



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ**

**EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION OF THE  
MECHANICAL BEHAVIOUR OF UNSATURATED SOILS**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ - DOCTORAL THESIS

**Μιχαήλ Εμμ. Μπαρδάνης**

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.,  
M.Sc. Imperial College of Science, Technology and Medicine

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:** Μ. ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Av. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ  
ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μιχαήλ Εμμ. Μπαρδάνη

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.,  
M.Sc. Imperial College of Science, Technology and Medicine

Η διατριβή υποβλήθηκε στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου  
Πολυτεχνείου προς εκπλήρωση των προϋποθέσεων του τίτλου του Διδάκτορος  
Μηχανικού

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Μ. ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
(Επιβλέπων)

2. Γ. ΓΚΑΖΕΤΑΣ Καθηγητής Ε.Μ.Π.

3. Γ. ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Μ. ΚΑΒΒΑΔΑΣ, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
(Επιβλέπων)

2. Γ. ΓΚΑΖΕΤΑΣ Καθηγητής Ε.Μ.Π.

3. Γ. ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

4. Γ. ΤΣΙΑΜΠΙΑΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

5. Β. Ν. ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, Αν. Καθηγήτρια  
Ε.Μ.Π.

6. Μ. ΠΑΝΤΑΖΙΔΟΥ, Αν. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

7. Δ. ΛΟΥΚΙΔΗΣ, Επικ. Καθηγητής  
Πανεπιστημίου Κύπρου

Αθήνα, Μάιος 2016



Copyright © Μιχαήλ Εμμ. Μπαρδάνης, 2016.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

*Απαγορεύεται η αντιγραφή, η αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, η διανομή, η αναπαραγωγή, η μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.*

*Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).*



## Ευχαριστίες

---

Ασχολούμαι με τα μη κορεσμένα εδάφη από το καλοκαίρι του 1998. Πολύς καιρός. Δύσκολο να θυμηθείς τα πάντα. Να τους ξεχωρίσεις όλους. Ξεχωρίζουν όμως κάποιοι με μεγάλη διαφορά. Ο επιβλέπων μου, ο Μιχάλης Καββαδάς. Στήριξε το αντικείμενο, και την επιλογή του να επιβλέπει τη διατριβή μου σε αυτό. Τα μέλη της επταμελούς επιτροπής μου για τον χρόνο τους και την ενασχόλησή τους. Ο ομότιμος καθηγητής Ανδρέας Αναγνωστόπουλος. Με στήριξε. Πάντα και για όλα. Και του είμαι ευγνώμων για αυτό. Ο φίλος μου ο Παναγιώτης Σιταρένιος. Με βοήθησε και τον βοήθησα. Με έσπρωξε και τον έσπρωξα. Προς τα εμπρός. Ο Σπύρος Καβουνίδης και ο Γιώργος Ντουνιάς στην Έδαφος. Ανέχτηκαν τις ερευνητικές μου ανησυχίες για τα μη κορεσμένα εδάφη και όχι μόνο. Και έκανα ότι μπορούσα για να τους το επιστρέψω πολλαπλάσιο. Ο Γιώργος Πυργιώτης στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής. Με έμαθε πολλά πράγματα μέσα στο εργαστήριο και τον ευχαριστώ γι' αυτό. Οι συνεργάτες μου στο εργαστήριο της Έδαφος, η Σοφία Γρίφιζα, ο Μάριος Τσουκαλαδάκης και ο Χάρης Βαγενάς. Είναι οι πολύτιμοι συνεργάτες μου μέχρι σήμερα. Η γυναίκα μου Σοφία για την αγάπη της και την υπομονή της. Και τα τρία μου παιδιά, ο ΜΑΝΟΣ, η ΜΑΡΙΑ και η ΜΕΛΙΝΑ. Αυτό εδώ το κείμενο είναι η επιστημονική μου παρακαταθήκη και στα τρία.







**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ**

*Διδακτορική Διατριβή*

**Εργαστηριακή και αναλυτική διερεύνηση**

**της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών**

*Μιχαήλ Εμμ. Μπαρδάνης*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζεται η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών, η εργαστηριακή διερεύνησή της που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής και η διατύπωση ενός νέου θεωρητικού πλαισίου για την περιγραφή της. Μη κορεσμένο ονομάζεται το εδαφικό εκείνο υλικό του οποίου ο βαθμός κορεσμού, δηλαδή ο λόγος του όγκου των κενών του εδαφικού υλικού που πληρούνται με νερό προς το συνολικό όγκο των κενών του, είναι μικρότερος της μονάδας και μεγαλύτερος του μηδενός. Η μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών αυτών υλικών έχει αποτελέσει αντικείμενο διερεύνησης μόνο σχετικά πρόσφατα. Η παρούσα διδακτορική διατριβή περιλαμβάνει τρία μέρη: το πρώτο μέρος που αποτελεί το κείμενο στο οποίο παρουσιάζεται η φύση και η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών, το δεύτερο μέρος στο οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργαστηριακής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής και το τρίτο μέρος στο οποίο διατυπώνεται το νέο θεωρητικό πλαίσιο για μη κορεσμένα εδάφη.

Στο πρώτο μέρος της διατριβής παρουσιάζονται οι λόγοι της εμφάνισης μη κορεσμένων εδαφών στη φύση και λόγω ανθρωπογενών διεργασιών ως εισαγωγή στην παρουσίαση και μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών. Επεξηγείται η αλληλεπίδραση της υγρής και της αέριας φάσης και πως αυτή εκδηλώνεται μακροσκοπικά με τη μορφή της μύζησης. Η μύζηση (suction) αποτελεί τη δεύτερη παράμετρο τάσης στα μη κορεσμένα εδάφη, μετά την ολική τάση ανηγμένη ως προς την πίεση της αέριας φάσης. Παρουσιάζονται εκτενώς οι μέθοδοι

μέτρησης αυτού του μεγέθους και βιβλιογραφικά και με βάση τη συσσωρευθείσα εμπειρία του γράφοντα από την εκπόνηση της διατριβής καταλήγοντας στη σύγκριση και αξιολόγησή τους. Παρουσιάζεται και επεξηγείται η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, η οποία αποτελεί την καμπύλη που περιγράφει τον τρόπο απώλειας ή προσρόφησης νερού από ένα εδαφικό υλικό συναρτήσει της μεταβολής της μύζησης. Αποτελεί την κεντρική έννοια για την κατανόηση αλλά και τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και η μορφή της καθορίζει την εξέλιξη των μεταβολών όγκου, της διατμητικής αντοχής και του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή και την αέρια φάση συναρτήσει της μύζησης. Οι μεταβολές όγκου των μη κορεσμένων εδαφών, η διατμητική τους αντοχή και η διαπερατότητά τους περιγράφονται αναλυτικά σε ξεχωριστά κεφάλαια του πρώτου μέρους της διατριβής με τα οποία ολοκληρώνεται η παρουσίαση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών.

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής παρουσιάζεται η εργαστηριακή διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Εκτελέστηκαν δοκιμές προσδιορισμού του κλάδου παρθένας ξήρανσης (virgin drying) της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε φυσικά εδαφικά υλικά, αναζυμωμένα εδαφικά υλικά σε μορφή πολτού και αναζυμωμένα εδαφικά υλικά μετά από συμπίεσή τους υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως μέχρι διάφορες τιμές της κατακόρυφης τάσης και αποφόρτισή τους. Παρουσιάζονται οι προσδιορισθέντες κλάδοι ξήρανσης, οι εργαστηριακές διατάξεις προσδιορισμού τους (θάλαμοι μύζησης, θάλαμοι διατήρησης υδατικών διαλυμάτων και υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου), οι συμπληρωματικές δοκιμές παρακολούθησης του ποσοστού υγρασίας κατά την ξήρανση στην ατμόσφαιρα ή τον εργαστηριακό φούρνο θερμοκρασίας 110 °C και τα συμπεράσματα από τις δοκιμές αυτές μαζί με τις εμπειρικές συσχετίσεις που διατυπώθηκαν επί τη βάση των προσδιορισθεισών τιμών παραμέτρων, ιδίως σε ό,τι αφορά την εξέλιξη του παραμένοντος λόγου κενών συναρτήσει της ιστορίας φόρτισης-αποφόρτισης των εδαφικών υλικών. Διατυπώθηκε μάλιστα μία οικογένεια εμπειρικών συσχετίσεων που επιτρέπουν την πρόβλεψη του παραμένοντος λόγου κενών των εδαφικών υλικών μετά από ξήρανση από την αρχική τους κατάσταση (όπως εκφράζεται από τον αρχικό λόγο κενών), τη φύση τους (όπως εκφράζεται από το όριο υδαρότητας ή το όριο πλαστικότητας και την ανηγμένη πυκνότητα στερεάς φάσης) και τη δομή τους. Η σημασία της εμπειρικής αυτής συσχέτισης έγκειται στο ότι ο παραμένων λόγος κενών αποτελεί παράμετρο μηχανικής συμπεριφοράς των μη

κορεσμένων εδαφών, άμεσα χρησιμοποιούμενη σε καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη, ειδικά δε στο νέο θεωρητικό πλαίσιο περιγραφής της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών που διατυπώθηκε. Η εργαστηριακή διερεύνηση συμπληρώθηκε από δοκιμές προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε συμπυκνωμένα εδάφη, δοκιμές προσδιορισμού διόγκωσης/κατάρρευσης σε συμπυκνωμένα εδάφη υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως, και δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα που πραγματοποιήθηκαν σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά που είχαν υποστεί ξήρανση. Ειδικά ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων αυτών των δύο ειδών δοκιμών επέτρεψε την εκτίμηση της φαινόμενης συνοχής που ανέπτυξαν τα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά κατά την ξήρασή τους. Η εξέλιξη της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση αποτελεί παράμετρο καταστατικής προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε στο νέο θεωρητικό πλαίσιο περιγραφής της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών που διατυπώθηκε.

Στο τρίτο μέρος της διδακτορικής διατριβής παρουσιάζεται το νέο θεωρητικό πλαίσιο της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών που αναπτύχθηκε. Αρχικά παρουσιάζονται τα διατυπωμένα καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά. Παρουσιάζεται αναλυτικά το πρώτο ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά, το καταστατικό προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990). Η αναλυτική παρουσίασή του θεωρήθηκε σκόπιμη, αφενός γιατί αποτελεί το πρώτο προσομοίωμα που περιέγραψε ένα ενοποιημένο θεωρητικό πλαίσιο της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και αφετέρου γιατί όλα τα καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη που διατυπώθηκαν μετά από αυτό, βασίζονται σε αυτό σε μικρό ή μεγαλύτερο βαθμό και είναι πολύ εύκολη η παρουσίασή τους αν έχει γίνει κατανοητό το προσομοίωμα αυτό. Από την παρουσίαση αυτή διαπιστώνεται ότι κανένα από τα υφιστάμενα καταστατικά προσομοιώματα δεν μπορεί να προβλέψει διάφορες μορφές της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών με την αύξηση της μύζησης (συνεχή αύξηση -μονοτονική ή μη-, αρχική αύξηση ακολουθούμενη από σταθεροποίηση ή τέλος, αρχική αύξηση και στη συνέχεια μείωση της διατμητικής αντοχής). Διαπιστώνεται επίσης ότι κανένα από τα υπάρχοντα καταστατικά προσομοιώματα δεν προβλέπει προοδευτική παύση της μείωσης του λόγου κενών με την αύξηση της μύζησης *με ταυτόχρονη «στόχευση»* προς συγκεκριμένη

τιμή του παραμένοντος λόγου κενών των εδαφικών υλικών. Αυτές ακριβώς τις δύο ελλείψεις καλύπτει το νέο θεωρητικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε:

α. Περιγράφει την εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση έτσι ώστε να είναι δυνατόν να προβλεφθεί οποιαδήποτε δυνατή εξέλιξη της διατμητικής αντοχής μετά την πίεση διείσδυσης αέρα (παραιτέρω αύξηση της αντοχής, σταθεροποίηση ή μείωση).

β. Προβλέπει παύση της παραιτέρω μείωσης του λόγου κενών των εδαφικών υλικών από την μύζηση που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών και μετά με *ταυτόχρονη* ικανότητα κατάληξης σε επιλεγμένη τιμή του παραμένοντος λόγου κενών (αυτή που έχει μετρηθεί εργαστηριακά ή προβλέπεται από τις εμπειρικές συσχετίσεις στις οποίες κατέληξε η πραγματοποιηθείσα εργαστηριακή διερεύνηση).

γ. Διά της μορφής που προβλέπει παύση της παραιτέρω μείωσης του λόγου κενών, το νέο θεωρητικό πλαίσιο μπορεί να προβλέψει την δυνατή περιοχή εμφάνισης πλαστικών ογκομετρικών μεταβολών λόγω μεταβολής της μύζησης. Αυτό το σημείο αποτελεί ίσως το πιο καινοτόμο σημείο του νέου θεωρητικού πλαισίου, καθώς εισάγει για πρώτη φορά την έννοια ότι υπάρχει μία περιοχή τιμών της μύζησης (από την τιμή της μύζησης επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών και μετά) στην οποία *πλαστικές ογκομετρικές παραμορφώσεις μπορούν να συμβούν μόνο λόγω αύξησης της ολικής τάσης και όχι λόγω αύξησης της μύζησης*.



**NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF GEOTECHNICAL ENGINEERING**

*Doctoral Thesis*

**Experimental and analytical investigation of the mechanical behaviour of  
unsaturated soils**

*Michael Emm. Bardanis*

**ABSTRACT**

This thesis presents the mechanical behaviour of unsaturated soils and the experimental and analytical investigation performed in the specific field as part of the thesis. Unsaturated is called the soil the degree of saturation of which, i.e. the ratio of the volume of its water-filled voids to the volume of all its voids, is smaller than unity and larger than zero. The mechanical behaviour of these soils has been the object of extensive research worldwide only relatively recently. The thesis is divided into three parts: the first one which presents the nature and mechanical behaviour of unsaturated soils, the second part which presents the experimental investigation performed, and the third part presenting the analytical investigation and the new theoretical framework developed for unsaturated soils.

In the first part of the thesis, the reasons why unsaturated soils appear in nature are presented as an introduction to the presentation of their mechanical behaviour. The interaction between the liquid and the air phase of the soil is explained and how it manifests itself macroscopically in the form of suction. Suction constitutes the second stress parameter in unsaturated soils; the first being total stress relative to the air pressure. Suction measurement methods are exhaustively presented on the basis of literature review and the experience of the author ending with their comparative evaluation. The soil-water characteristic curve is then presented and explained. This curve describes the way water is drained or absorbed by the soil due to changes in suction. It is the fundamental property for describing the nature and studying the mechanical behaviour of soil. Its shape dictates the evolution of volume changes, shear strength and permeability relative to the liquid- and the air-phase with suction.

Volume changes, shear strength and permeability of unsaturated soils are presented in separate chapters of the first part of the thesis.

The experimental investigation of the mechanical behaviour of unsaturated soils performed is presented in the second part of the thesis. The virgin drying branches of the soil-water characteristic curves on natural soils, reconstituted soils in the form of slurries, recomposed and compacted soils were measured. These branches are presented along with the arrays used to measure them (pressure extractors, salt solutions chambers and the chilled mirror hygrometer), additional tests monitoring moisture loss during drying in the 110 °C oven or the atmospheric conditions in the laboratory, along with the empirical relations derived from measured properties, especially regarding the evolution of residual void ratio after drying relative to the loading-unloading history of soils. Actually, a family of empirical relations was derived allowing prediction of the residual void ratio after drying from their initial state (as expressed by initial void ratio), their nature (as expressed by the liquid or plastic limit and specific gravity) and their structure. This family of empirical relations is important as residual void ratio after drying constitutes a parameter describing the mechanical behaviour of unsaturated soils, readily used in constitutive models for unsaturated soils, especially in the new theoretical framework developed and presented in the third part. The laboratory investigation also included swelling/collapse tests under one-dimensional loading conditions and unconfined compression and splitting tensile strength tests on samples of reconstituted soils subjected to drying. The combination of the results of the latter two types of tests allowed the estimation of the apparent cohesion developed by the tested reconstituted soils during drying. The evolution of apparent cohesion with suction is an input parameter for constitutive modeling of unsaturated soils used in the new theoretical framework developed.

The new theoretical framework for the description of the mechanical behaviour of unsaturated soils that was developed is presented in the third part of the thesis. The already published constitutive models for unsaturated soils are presented first. The first full constitutive model for unsaturated soils developed by Alonso, et al. (1990) is presented at the beginning. Its extensive presentation was deemed necessary as this model was the first to present the mechanical behaviour of unsaturated soils in a unified manner and because all subsequent models are in one or the other way based on this model. This literature review revealed that no existing constitutive model for

unsaturated soils predicts various forms of unsaturated soil shear strength evolution with suction (continuous increase, initial increase followed by stabilization or finally initial increase with subsequent decrease in strength). Except for that, no existing constitutive model predicts progressive stabilization of void ratio decrease due to drying, at the same time “aiming” at a specific value of the residual void ratio after drying. These two deficits are covered by the new theoretical framework developed:

- α. It describes the evolution of tensile strength with suction in order for any type of scenario to be predicted for suction increasing beyond air-entry pressure (further increase in strength, stabilization or decrease).
- β. It predicts progressive stabilization of void ratio decrease due to drying, at the same time “aiming” at a specific value of the residual void ratio after drying (the one measured in the laboratory or predicted by the empirical relations derived from the experimental investigation performed).
- γ. Prediction of stabilization of void ratio decrease due to drying introduces an area in the  $p$ - $s$ - $v$  space that no plastic volumetric strains are any longer possible due to suction increase but only due to total stress increase. This point is perhaps the most important theoretical contribution of the new framework.





## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΙΧΑΗΛ ΕΜΜ. ΜΠΑΡΔΑΝΗ

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ  
ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ  
ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΜΕΡΟΣ Ι

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1****ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.2	ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	6
1.3	ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΑΡΟΝΤΟΣ ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ	7
1.4	ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ	7

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2****Η ΦΥΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ. Η ΜΥΖΗΣΗ**

2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
2.2	ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	11
2.2.1	Βαθμός κορεσμού. Ορισμός και ονομασία εδαφών ως προς τις τιμές του	11
2.2.2	Εμφάνιση των μη κορεσμένων και των μερικώς κορεσμένων εδαφών	14
2.3	ΒΑΘΜΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ, ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΜΥΖΗΣΗ (SUCTION)	19
2.3.1	Γενικά	19
2.3.2	Η φύση της μύζησης. Μύζηση εδαφικού σκελετού και ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης	21
2.3.2.1	Επιρροή τριχοειδών φαινομένων	23
2.3.2.2	Επιρροή ηλεκτρικών δυνάμεων και δυνάμεων van der Waals	34
2.3.2.3	Επιρροή ωσμωτικών φαινομένων	37
2.3.2.4	Επιρροή περιβαλλοντικών παραγόντων-Η εξίσωση Kelvin	37
2.3.3	Εξέλιξη της συνύπαρξης υγρής και αέριας φάσης με την αύξηση της απόστασης από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα	39

2.3.4	Ο ορισμός της μύζησης	48
2.3.5	Αρνητική πίεση του νερού των πόρων. Η εφελκυστική αντοχή του νερού	56
2.3.6	Η μέτρηση της μύζησης	58
2.3.7	Το δυναμικό μύζησης $p_F$	59
2.4	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ	60
2.4.1	Γενικά	60
2.4.2	Η αρχή των ενεργών τάσεων για μη κορεσμένα εδάφη	60
2.4.3	Παράμετροι τάσης για μη κορεσμένα εδάφη	64
2.5	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	65
2.6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	66

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

#### Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ

3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	69
3.2	ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ	69
3.3	ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ - ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΑΞΟΝΑ (AXIS TRANSLATION TECHNIQUE)	72
3.3.1	Αρχή της μεθόδου	72
3.3.2	Εξέλιξη της μεθόδου	79
3.3.3	Σχολιασμός της μεθόδου	80
3.4	ΜΕΘΟΔΟΣ ΧΑΡΤΙΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ (FILTER PAPER METHOD)	85
3.4.1	Αρχή της μεθόδου	85
3.4.2	Εξέλιξη της μεθόδου	87
3.4.3	Σχολιασμός της μεθόδου	99
3.5	ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	103
3.5.1	Εισαγωγή	103
3.5.2	Μέθοδος τεμαχίων πορώδους υλικού (Porous blocks method) – Μέθοδος τεμαχίων γύψου (Gypsum blocks method)	105
3.5.3	Μέθοδος αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας (Thermal conductivity sensors)	138
3.5.4	Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος μέτρησης	146
3.6	ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	149
3.6.1	Εισαγωγή	149
3.6.2	Ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης (thermistor psychrometers)	150
3.6.3	Ψυχρόμετρα φαινομένου Peltier (thermocouple psychrometers)	155
3.6.4	Υγρόμετρα σημείου δρόσου (dew-point hygrometers)	161
3.6.5	Υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου (chilled-mirror hygrometers)	162
3.6.6	Αισθητήρες αντίστασης/χωρητικότητας πολυμερών (polymer resistance/ capacitance sensors)	166

3.6.7	Αισθητήρες οργανικών μέσων	167
3.6.8	Σχολιασμός της μεθόδου	168
3.7	TENSIOMETRA (TENSIO METERS)	170
3.7.1	Εισαγωγή	170
3.7.2	Τενσιόμετρα με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	171
3.7.3	Τενσιόμετρα με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	181
3.7.4	Ωσμωτικά τενσιόμετρα	191
3.7.5	Συνήθη πιεζόμετρα με ικανότητα μέτρησης αρνητικής πίεσης πόρων	192
3.8	ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΩΣΜΩΤΙΚΗΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ	193
3.9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	195

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Η ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ

4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	201
4.2	Η ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ	201
4.2.1	Ποιοτική απεικόνιση. Γενικά χαρακτηριστικά. Σημεία καμπής	201
4.2.2	Υστέρηση παραμέτρου συσχέτισης κατά την ύγρανση	205
4.2.3	Παραδείγματα χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού για διάφορα εδαφικά υλικά	212
4.2.4	Συσχέτιση με την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης και τα υπόλοιπα φυσικά χαρακτηριστικά	215
4.2.5	Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με περισσότερα των δύο σημεία καμπής	218
4.2.6	Επιρροή της δομής επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού	219
4.3	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ	236
4.3.1	Γενικά	236
4.3.2	Μέθοδος μετατόπισης άξονα	238
4.3.3	Μέθοδος ωσμωτικού ελέγχου μύζησης	253
4.3.4	Μέθοδος ελέγχου της μύζησης μέσω φυγοκέντρισης	261
4.3.5	Μέθοδος ταπεινώσεως της πίεσης του νερού των πόρων (hanging column method)	265
4.3.6	Μέθοδος μέτρησης της μύζησης επιτόπου και στο εργαστήριο	272
4.3.7	Συμπεράσματα	274
4.4	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ	278
4.4.1	Γενικά	278
4.4.2	Κατατάξεις μαθηματικών προσομοιωμάτων	279
4.4.3	Μαθηματικά προσομοιώματα	280
4.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	299

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΟΓΚΟΥ ΣΤΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ**

5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	303
5.2	ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΟΓΚΟΥ ΠΛΗΡΩΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	305
5.3	ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΟΓΚΟΥ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	320
5.4	ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΟΓΚΟΥ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΥΠΟ ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΟΛΙΚΗ ΤΑΣΗ	322
5.4.1	Εισαγωγή	322
5.4.2	Μεταβολές όγκου για μύζηση μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα	322
5.4.3	Μεταβολές όγκου για μύζηση μεγαλύτερη της πίεσης διείσδυσης αέρα και μικρότερη της μύζησης επίτευξης παραμένοντος ποσοστού υγρασίας	324
5.4.4	Μεταβολές όγκου για μύζηση μεγαλύτερη της μύζησης επίτευξης παραμένοντος ποσοστού υγρασίας	329
5.5	ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΟΓΚΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ	330
5.5.1	Εισαγωγή – Δυνατές καταστάσεις μεταβολών μύζησης και τάσης	330
5.5.2	Ο χώρος ολικής τάσης-μύζησης-λόγου κενών	333
5.5.3	Εργαστηριακές συσκευές προσδιορισμού της συμπιεστότητας των μη κορεσμένων εδαφών υπό ελεγχόμενη μύζηση και μη μηδενικές τιμές της ολικής τάσης	344
5.5.4	Χρονική εξέλιξη των μεταβολών όγκου στα μη κορεσμένα εδάφη	359
5.6	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ	360
5.6.1	Γενικά	360
5.6.2	Πειραματικά αποτελέσματα μονοδιάστατης στερεοποίησης	360
5.6.3	Συσχέτιση μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων	361
5.6.4	Συμπεράσματα από τη συσχέτιση δείκτη συμπίεσης με τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών του δείγματος	371
5.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	375

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ**

6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	377
6.2	ΤΟ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΟHR-COULOMB	377
6.3	ΣΥΣΤΟΛΙΚΟΤΗΤΑ-ΔΙΑΣΤΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	390
6.4	ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	394
6.5	Η ΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	402
6.6	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΥΖΗΣΗ	405
6.6.1	Εισαγωγή	405

6.6.2	Συσκευές τριαξονικής φόρτισης με έλεγχο της μύζησης	406
6.6.3	Συσκευές απευθείας διάτμησης με έλεγχο της μύζησης	408
6.6.4	Συσκευές ανεμπόδιστης θλίψης με έλεγχο της μύζησης	411
6.7	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΥΖΗΣΗ	413
6.8	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΕΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΜΥΖΗΣΗΣ	417
6.8.1	Εισαγωγή	417
6.8.2	Παραδείγματα από τη διεθνή βιβλιογραφία	417
6.8.3	Αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας σε κατολισθήσεις με τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα χαμηλά	431
6.8.4	Ένα εργαστηριακό παράδειγμα μέτρησης της διατμητικής αντοχής παρουσία μύζησης	439
6.9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	443

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΡΟΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

7.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	447
7.2	ΡΟΗ ΤΗΣ ΥΓΡΗΣ ΦΑΣΗΣ ΔΙΑ ΜΕΣΩ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΥΖΗΣΗ	449
7.2.1	Εισαγωγή	449
7.2.2	Υδραυλική διαφορά δυναμικού και υδραυλική κλίση	450
7.2.3	Ο νόμος του Darcy για μή κορεσμένα εδάφη	457
7.2.4	Συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση και η συσχέτισή του με τον βαθμό κορεσμού	462
7.2.5	Υστέρηση του συντελεστή διαπερατότητας κατά μήκος κλάδων ξήρανσης και ύγρανσης	467
7.3	ΡΟΗ ΤΗΣ ΑΕΡΙΑΣ ΦΑΣΗΣ ΔΙΑ ΜΕΣΩ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΥΖΗΣΗ	468
7.3.1	Εισαγωγή	468
7.3.2	Νόμος του Fick για τη ροή της αέριας φάσης	469
7.3.3	Συσχέτιση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση με τη μύζηση ή τον βαθμό κορεσμού	472
7.4	ΔΙΑΧΥΣΗ ΤΗΣ ΑΕΡΙΑΣ ΦΑΣΗΣ ΔΙΑ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΥΓΡΗΣ ΦΑΣΗΣ	474
7.5	ΣΥΝΟΨΙΣΗ ΝΟΜΩΝ ΡΟΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	478

7.6	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΥΓΡΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ	479
7.6.1	Εισαγωγή	479
7.6.2	Μέθοδοι μόνιμης ροής για τη μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση	479
7.6.2.1	Μέθοδος σταθερού φορτίου	479
7.6.2.2	Μέθοδος σταθερής παροχής	484
7.6.2.3	Μέθοδος φυγοκέντρισης	484
7.6.3	Μέθοδοι μη μόνιμης ροής για τη μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση	487
7.6.3.1	Εισαγωγή	487
7.6.3.2	Μέθοδος οριζόντιας διείσδυσης ύδατος	488
7.6.3.3	Μέθοδοι παρακολούθησης στραγγιζόμενου ύδατος	491
7.6.3.4	Μέθοδοι χρονικά σημειακής κατανομής	494
7.6.4	Μέθοδοι μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση	498
7.6.5	Μέθοδοι μέτρησης του συντελεστή διάχυσης	502
7.6.6	Συνόψιση	502
7.7	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΔΙΑ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	503
7.7.1	Εισαγωγή	503
7.7.2	Επίλυση με κατάστρωση φύλλου υπολογισμών	504
7.7.3	Επέκταση των συμπερασμάτων από το παράδειγμα	507
7.8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	508

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

### ΣΥΝΟΨΙΣΗ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

8.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	511
8.2	ΣΥΝΟΨΙΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ	511
8.2.1	Η φύση των μη κορεσμένων εδαφών	511
8.2.2	Οι μέθοδοι μέτρησης της μύζησης	514
8.2.3	Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού	518
8.2.4	Η συμπιεστότητα των μη κορεσμένων εδαφών	521
8.2.5	Η διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών	522
8.2.6	Η διαπερατότητα των μη κορεσμένων εδαφών ως προς την υγρή και την αέρια φάση των πόρων	525
8.3	Η ΑΞΙΑ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	527

## ΜΕΡΟΣ II

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

#### ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΜΕΡΟΥΣ II

9.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	531
9.2	ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΕΙΣΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ	531
9.3	ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΜΕΡΟΥΣ	532
9.4	ΚΑΤΑΛΗΞΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ	535

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

#### ΤΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΩΝ ΕΓΓΕΝΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

10.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	537
10.2	ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΕΣ ΑΡΓΙΛΟΙ	538
10.3	ΤΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΩΝ ΕΓΓΕΝΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ. Η ΓΡΑΜΜΗ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ Η ΓΡΑΜΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗ	539
10.4	ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΩΝ ΕΓΓΕΝΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	544
10.4.1	Η Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης	544
10.4.2	Η Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης	551
10.4.3	Σχόλια επί των παραμέτρων κανονικοποίησης	567
10.5	ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΩΝ ΕΓΓΕΝΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ	570
10.5.1	Αστράγγιστη διατμητική αντοχή	570
10.5.2	Διαπερατότητα	570
10.5.3	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	576
10.6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	577

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

#### ΤΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

11.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	579
11.2	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΤΟΥΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ	582
11.3	ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΙΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	593
11.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	617
11.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	629

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12**

### **ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ**

12.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	631
12.2	ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ	632
12.2.1	Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε πλήρως κορεσμένα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά.	632
12.2.2	Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αρχικά μη κορεσμένα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά.	633
12.2.3	Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε φυσικά εδαφικά υλικά.	633
12.2.4	Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης για την προπαρασκευή δοκιμών.	634
12.2.5	Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά.	634
12.2.6	Συνόψιση δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης ανά υλικό.	635
12.3	ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ	636
12.4	ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΥΔΑΤΟΣ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ Ή ΤΟΝ ΦΟΥΡΝΟ ΤΩΝ 110 °C	637
12.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	641

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13**

### **ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ**

13.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	643
13.2	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ	644
13.3	ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	647
	Παρασκευή των πολτών	649
	Μόρφωση δοκιμών & υπολογισμός αρχικού ύψους	651
	Φόρτιση δοκιμών	652
	Εξαγωγή δοκιμών από τις κυψέλες & επεξεργασία αποτελεσμάτων	653
13.4	ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	698
13.5	ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ	716
13.6	ΤΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΘΕΙΣΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ ΚΑΙ ΜΕ ΤΙΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.	745
13.7	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΗ ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΓΙΑ ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΑ ΥΛΙΚΑ	757
13.8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	763



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14****ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ**

14.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	765
14.2	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	768
14.2.1	Εισαγωγή	768
14.2.2	Μέθοδος μετατόπισης άξονα – Θάλαμοι μύζησης	768
14.2.3	Μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης με κορεσμένα υδατικά διαλύματα αλάτων – Υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου	777
14.3	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ	782
14.3.1	Εισαγωγή	782
14.3.2	Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων	783
14.3.3	Άργιλος Χανίων	787
14.3.4	Άργιλος Λιβαδερού Δράμας	789
14.3.5	Άργιλος και Μάργα Κηφισιάς	792
14.3.6	Άργιλος Μελίτης Φλώρινας	794
14.3.7	Άργιλος Αμαρουσίου	796
14.3.8	Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου	801
14.3.9	Άργιλος Αμφιλοχίας	808
14.3.10	Μάργα Κορίνθου	820
14.3.11	Μάργα Χαλκουτσίου	827
14.3.12	Αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας	838
14.3.13	Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου	843
14.3.14	Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού από μοναδικό δοκίμιο	846
14.3.15	Μαθηματική προσομοίωση των προσδιορισθεισών χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού	850
14.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ	864
14.5	ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ Ή ΣΤΟΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΦΟΥΡΝΟ	876
14.5.1	Εισαγωγή	876
14.5.2	Καμπύλες ξήρανσης στον φούρνο θερμοκρασίας 110 °C	876
14.5.3	Καμπύλες ξήρανσης στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου	882
14.6	ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΚΕΝΩΝ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΧΙΚΟ ΛΟΓΟ ΚΕΝΩΝ	886
14.6.1	Εισαγωγή	886
14.6.2	Αρχικά πειραματικά δεδομένα	888
14.6.3	Επεξεργασία των αποτελεσμάτων	890
14.6.4	Επεξεργασία με το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων	901
14.6.5	Συμπεράσματα	909
14.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	910

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 15

### ΕΙΔΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

15.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	915
15.2	ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΕΙΣΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΣΕ Ο,ΤΙ ΑΦΟΡΑ ΤΙΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΟΓΚΟΥ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ	918
15.2.1	Μεταβολές όγκου λόγω διαβροχής και εξέλιξή τους με την τάση	918
15.2.2	Σχολιασμός του συνήθους τρόπου μέτρησης της πίεσης διόγκωσης	918
15.3	Ο ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΕΝΟΣ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΗΣ ΣΚΥΡΟΥ	927
15.3.1	Τοποθεσία προέλευσης του υλικού – Στοιχεία για τη γεωλογική του προέλευση	927
15.3.2	Δειγματοληψία	927
15.3.3	Φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού	932
15.3.4	Χαρακτηριστικά συμπύκνωσης του υλικού	933
15.4	ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΒΡΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΑΣΕΙΣ	935
15.4.1	Γενικά	935
15.4.2	Πειραματική διαδικασία	935
15.4.3	Μετρήσεις αρχικής μύζησης αμέσως μετά τη συμπύκνωση	942
15.4.4	Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης	946
15.4.5	Μεταβολές όγκου κατά την ύγρανση υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης	948
15.5	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ	952
15.5.1	Αποσαθρωμένος σερπεντινίτης	952
15.5.2	Άργιλος Αμαρουσίου	958
15.6	ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΕ Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ	968
15.7	ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΤΑ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΥΠΟΒΕΒΛΗΜΕΝΩΝ ΣΕ ΞΗΡΑΝΣΗ	970
15.7.1	Εισαγωγή – Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν – Το σκεπτικό των εκτελεσθεισών δοκιμών	970
15.7.2	Διατμητική αντοχή αναζυμωμένων εδαφικών υλικών	974
15.7.3	Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης	977
15.7.4	Δοκιμές θλίψης κατά γενέτειρα	993
15.7.5	Συνδυασμός αποτελεσμάτων	994
15.7.6	Συμπεράσματα	1000
15.8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	1002

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 16****ΣΥΝΟΨΙΣΗ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΜΕΡΟΥΣ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ**

16.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1005
16.2	ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΝΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	1005
16.3	ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΑ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	1006
16.4	ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ	1008
16.5	ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ/ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ	1013
16.6	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	1014

**ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ****ΚΕΦΑΛΑΙΟ 17****ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΜΕΡΟΥΣ ΙΙΙ**

17.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1019
17.2	ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΑΡΟΝΤΟΣ ΤΡΙΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ	1019
17.3	ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΤΡΙΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ	1020
17.4	ΚΑΤΑΛΗΞΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	1021

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 18****ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ**

18.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1025
18.2	ΤΟ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΩΝ ALONSO, ET AL. (1990)	1027
18.2.1	Εισαγωγή	1027
18.2.2	Παράμετροι τάσης διατύπωσης του προσομοιώματος	1027
18.2.3	Επιφάνειες διαρροής	1027
18.2.4	Μεταβολή του ειδικού όγκου συναρτήσει μεταβολών της μύζησης και της τάσης	1035
18.2.5	Νόμοι ροής	1036
18.2.6	Νόμοι κράτυνσης	1037
18.2.7	Ελαστικές παραμορφώσεις	1037
18.2.8	Συνέπειες των διατυπώσεων του προσομοιώματος	1038
18.3	ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ	1061

18.3.1	Εισαγωγή	1061
18.3.2	Toll (1990) - Wheeler (1991)	1061
18.3.3	Gens & Alonso (1992) – Alonso, et al. (1994) – Alonso, et al. (1999)	1064
18.3.4	Kohgo, et al. (1993a & 1993b)	1071
18.3.5	Wheeler & Sivakumar (1995) - Wheeler (1996) - Wheeler & Sivakumar (2000) - Sivakumar & Doran (2000)	1074
18.3.6	Maâtouk, et al. (1995)	1079
18.3.7	Cui & Delage (1996)	1080
18.3.8	Bolzon, et al. (1996)	1083
18.3.9	Rampino, et al. (2000)	1083
18.3.10	Karube & Kawai (2001)	1084
18.3.11	Loret & Khalili (2002)	1085
18.3.12	Tang & Graham (2002)	1085
18.3.13	Georgiadis, et al. (2003)	1090
18.3.14	Wheeler, et al. (2003)	1091
18.3.15	Gallipoli, et al. (2003a & 2003b)	1096
18.3.16	Chiu & Ng (2003)	1097
18.3.17	Sheng, et al. (2004)	1100
18.3.18	Tamagnini (2004)	1100
18.3.19	Tarantino & Tombolato (2005)	1101
18.3.20	Li (2007a & 2007b)	1101
18.3.21	Thu, et al. (2007)	1101
18.3.22	Sheng, et al. (2008)	1103
18.3.23	Zhang & Lytton (2009a & 2009b)	1109
18.3.24	Tarantino (2009)	1110
18.3.25	Συνόψιση	1110
18.4	Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ	1110
18.5	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ Η ΣΥΖΕΥΞΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ (FULL THERMO-HYDRO-MECHANICAL MODELING)	1115
18.6	ΣΥΝΟΨΙΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	1117

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 19

### ΤΟ ΝΕΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

19.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1119
19.2	ΤΟ ΝΕΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ (MBBM)	1121
19.2.1	Εισαγωγή	1121
19.2.2	Παράμετροι τάσης – Εντατικές καταστάσεις	1122
19.2.3	Εδαφικά υλικά και εύρος εντατικών μεγεθών για τα οποία ισχύει το προσομοίωμα	1122
19.2.4	Μαθηματική διατύπωση του προτεινόμενου θεωρητικού πλαισίου	1124

19.2.5	Αξιοποίηση των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα για διάφορες τιμές της μύζησης	1164
19.3	ΣΥΝΟΨΙΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	1172

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 20**

### **ΣΥΝΟΨΙΣΗ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΡΙΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ**

20.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1175
20.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ	1175
20.3	ΤΟ ΝΕΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	1177
20.4	ΚΑΤΑΛΗΞΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	1178
20.5	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	1180

	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	1181
--	---------------------	------

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**

### **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**

#### **ΠΡΟΤΑΘΕΙΣΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ**

A.1	ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ	1207
A.2	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ ΚΕΝΩΝ	1209
A.3	ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΚΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ	1210
A.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	1213

### **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**

#### **ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΑΓΝΩΣΤΟΥΣ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ ΚΑΙ $\delta$ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ**

1215

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ**

### **ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ**

Γ.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1219
Γ.2	Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ FREDLUND, ET AL. (2000)	1220
Γ.3	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ	1226
Γ.4	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	1243

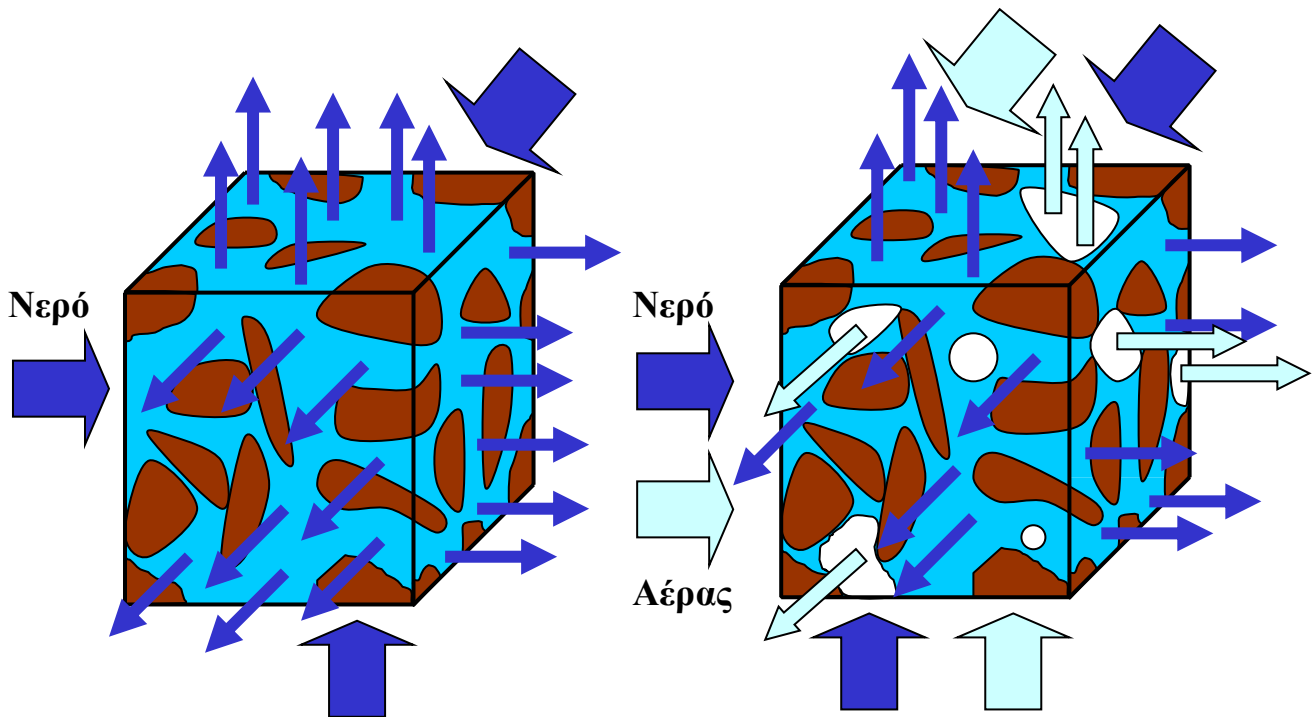
## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ**

### **ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΤΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ**

1253

Δ1	Άργιλος Χανίων	1254
Δ1	Άργιλος Χανίων	1255
Δ2	Άργιλος Κορίνθου	1257
Δ3	Άργιλος Αγίων Αναργύρων	1259
Δ4	Άργιλος Αμαρουσίου	1261
Δ6	Μάργα Κορίνθου	1263
Δ7	Μάργα Αγίων Αναργύρων	1265
Δ8	Μάργα Πατρών	1267
Δ9	Ίλύς λίμνης Ιωαννίνων	1269

# ΜΕΡΟΣ Ι



**ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ  
ΓΝΩΣΗΣ ΣΕ Ο,ΤΙ ΑΦΟΡΑ ΤΗ ΦΥΣΗ ΚΑΙ ΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΛΑΦΩΝ**

**STATE OF THE ART REVIEW ON THE NATURE AND  
MECHANICAL BEHAVIOUR OF UNSATURATED SOILS**





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μή κορεσμένο ονομάζεται το εδαφικό εκείνο υλικό του οποίου ο βαθμός κορεσμού, δηλαδή ο λόγος του όγκου των κενών του εδαφικού υλικού που πληρούνται με νερό προς το συνολικό όγκο των κενών του, είναι μικρότερος της μονάδας και μεγαλύτερος του μηδενός. Εδαφικά υλικά με βαθμό κορεσμού ίσο με τη μονάδα ονομάζονται πλήρως κορεσμένα και εδαφικά υλικά με μηδενικό βαθμό κορεσμού απολύτως ξηρά. Η εμφάνιση των μή κορεσμένων εδαφών στον ελλαδικό χώρο είναι ιδιαίτερα συχνή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους στις θερμότερες και ξηρότερες περιοχές, και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, ακόμα και στις λιγότερο θερμές ή ξηρές περιοχές της χώρας. Γι' αυτό το λόγο έχει ιδιαίτερη σημασία η μελέτη της φύσης και της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών σε μια χώρα όπως η Ελλάδα. Τα περισσότερα εγχειρίδια εδαφομηχανικής και προπτυχιακές ή ακόμα και μεταπτυχιακές σειρές μαθημάτων εδαφομηχανικής όμως βασίζονται στην υπόθεση ότι όλα τα εδαφικά υλικά είναι πλήρως κορεσμένα με νερό. Οι λόγοι για αυτό είναι τρεις:

1. Η εδαφομηχανική αναπτύχθηκε στη Βόρεια Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική όπου το κλίμα είναι τόσο ψυχρό και υγρό, ώστε η ανώτερη, μή κορεσμένη, ζώνη του εδάφους είναι συνήθως σχετικά ρηχή ή και ανύπαρκτη σε φυσικά εδάφη με αποτέλεσμα τα περισσότερα γεωτεχνικά έργα να κατασκευάζονται μέσα σε πλήρως κορεσμένο έδαφος (θεμελιώσεις, συστήματα αντιστήριξης, σήραγγες και άλλες υπόγειες κατασκευές κλπ) και επομένως η παραδοχή ότι το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο είναι συνήθως ορθή.
2. Η φύση και η μηχανική συμπεριφορά των μή κορεσμένων εδαφών αποδείχθηκε πολύ πιο δύσκολη στην κατανόησή της σε σχέση με αυτή των πλήρως κορεσμένων εδαφών δικαιολογώ-

ντας τη χρονική υστέρηση στην κατανόηση και αξιοποίησή της σε σχέση με την αντίστοιχη των πλήρως κορεσμένων εδαφών. Ο εργαστηριακός προσδιορισμός παραμέτρων για μη κορεσμένα εδάφη παραμένει έως και σήμερα ιδιαίτερα ακριβός, δύσκολος και χρονοβόρος. Αντίστοιχου κόστους, δυσκολίας και διάρκειας είναι και οι δοκιμές πεδίου στις οποίες μετρούνται παράμετροι που σχετίζονται με τα μη κορεσμένα εδάφη.

3. Η βασική παραδοχή επίσης πίσω από τη μελέτη των εδαφικών υλικών όταν οι πόροι τους είναι πλήρως γεμάτοι με νερό είναι ότι η κατάσταση αυτή βρίσκεται προς την πλευρά της ασφάλειας. Για παράδειγμα σε ό,τι αφορά τη διατμητική αντοχή, αυτή είναι μεγαλύτερη για ένα μη κορεσμένο έδαφος σε σχέση με το ίδιο έδαφος όταν είναι πλήρως κορεσμένο.

Δεδομένου όμως ότι μη κορεσμένα μπορεί να είναι φυσικά εδάφη σε περιοχές του κόσμου που οι κλιματολογικές συνθήκες το επιτρέπουν (όπως η Ελλάδα) αλλά και όλες οι συμπυκνωμένες επιχώσεις (αρχικά και ανεξαρτήτως κλιματολογικών συνθηκών), η παραδοχή πλήρους κορεσμού δεν επιτρέπει την ορθή μελέτη της φύσης και της μηχανικής συμπεριφοράς φυσικών εδαφών χωρών με θερμό και ξηρό κλίμα αλλά και των επιχώσεων. Η οικονομική ανάπτυξη χωρών με θερμότερο και ξηρότερο κλίμα ωστόσο, με τη συνεπαγόμενη αύξηση των αναγκών των χωρών αυτών σε έργα υποδομής, οδήγησε στην ενασχόληση με τα μη κορεσμένα εδάφη, αφού γεωτεχνικά έργα στις χώρες αυτές κατασκευάζονται μέσα σε μη κορεσμένα εδάφη ή επί αυτών. Επίσης η ανάγκη για δημιουργία υπόγειων χώρων ταφής πυρηνικών αποβλήτων στις πιο προηγμένες βιομηχανικά χώρες έχει ως προαπαιτούμενο τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και της επιρροής της θερμοκρασίας στη μηχανική συμπεριφορά των εδαφών γενικώς, αφού η θερμότητα που εκπέμπουν τα πυρηνικά απόβλητα μειώνει το βαθμό κορεσμού των συμπυκνωμένων υλικών που τα περιβάλλουν στους υπόγειους χώρους ταφής τους<sup>1</sup> διατηρώντας τα μη κορεσμένα. Η συντηρητικότητα της θεώρησης των εδαφικών υλικών ως πλήρως κορεσμένων ακόμα και όταν δεν είναι, βρίσκεται σε ευθεία αντίθεση με την επιθυμία επίτευξης οικονομίας που πάντοτε ενδιαφέρει στα τεχνικά έργα. Συχνά άλλωστε οι λόγοι για τους οποίους η παραδοχή πλήρους κορεσμού θεωρείται ότι βρίσκεται στην πλευρά της ασφάλειας οδηγεί στο αντίθετο αποτέλεσμα όταν εξετάζονται αντίστροφα προβλήματα (π.χ. αντίστροφες αναλύσεις κατολισθήσεων).

---

<sup>1</sup> Τα πυρηνικά απόβλητα που οδηγούνται σε υπόγειους χώρους ταφής, βρίσκονται μέσα σε μεταλλικά κάιιστρα τα οποία τοποθετούνται μέσα σε οπές που διανοίγονται σε βράχο και περιβάλλονται από συμπυκνωμένα υλικά χαμηλής διαπερατότητας (μίγματα μπετονίτη-άμμου). Λόγω των μικρών υπερκειμένων τα περιβάλλοντα τα κάιιστρα συμπυκνωμένα υλικά εκτός του ότι είναι εξαρχής μη κορεσμένα –όπως όλες οι επιχώσεις– παραμένουν και στη συνέχεια και μάλιστα με μειούμενο βαθμό κορεσμού λόγω της εξάτμισης του νερού που περιέχεται σε αυτά, εξαιτίας της θερμότητας που εκπέμπουν τα ραδιενεργά απόβλητα μέσα από τα κάιιστρα.

Βασική ιδιομορφία των μή κορεσμένων εδαφών εκτός από την πολυπλοκότητα της φύσης τους, η κατανόηση της οποίας αποτελεί προϋπόθεση για την κατανόηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς, είναι ότι η μηχανική τους συμπεριφορά οδηγεί ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και την εντατική κατάσταση σε εντελώς διαφορετική εκδήλωση της ίδιας μεταβολής του βαθμού κορεσμού. Για παράδειγμα, σε ό,τι αφορά τις μεταβολές όγκου, η μετάπτωση από τον μερικό κορεσμό στον πλήρη κορεσμό μπορεί να οδηγήσει σε διόγκωση ή συρρίκνωση του ίδιου εδαφικού υλικού ανάλογα με την τάση υπό την οποία θα γίνει. Σε ό,τι αφορά τη διατμητική αντοχή, η μείωση του βαθμού κορεσμού οδηγεί σε αρχική αύξηση της διατμητικής αντοχής των εδαφικών υλικών η οποία όμως μπορεί στη συνέχεια να μετατραπεί σε μείωση ή περαιτέρω αύξησή της ανάλογα με τη φύση του υλικού. Σε ό,τι αφορά τη διαπερατότητα τέλος, η μείωση του βαθμού κορεσμού οδηγεί σε μείωση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό κατά αρκετές τάξεις μεγέθους σε ό,τι αφορά τη μικροδιαπερατότητα του εδάφους, αλλά στη συνέχεια εάν το εδαφικό υλικό συρρικνώνεται τόσο, ώστε να ρηγματώνεται λόγω της συρρίκνωσής του, οδηγεί σε ραγδαία αύξηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό κατά αρκετές τάξεις μεγέθους. Η ιδιόμορφη αυτή συμπεριφορά αποτελεί πρόκληση για τη σύγχρονη εδαφομηχανική και η κατανόησή της υπηρετεί τις ιδιαίτερες ανάγκες χωρών με αυξημένη συχνότητα εμφάνισης μή κορεσμένων εδαφών όπως είναι και η Ελλάδα.

Στα πλαίσια αυτά σε πάρα πολλές χώρες του κόσμου η επιστημονική έρευνα στην εδαφομηχανική έχει στραφεί στη μελέτη των μή κορεσμένων εδαφών. Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί μέρος αυτής της προσπάθειας και αποσκοπεί στη διατύπωση ενός θεωρητικού πλαισίου για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών. Ο αντικειμενικός στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής ορίστηκε να είναι η διατύπωση ενός θεωρητικού πλαισίου για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών προκειμένου η εκπόνηση της σχετικής έρευνας να μην περιοριστεί στην απλή αναπαραγωγή της περιγραφής της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών από τη διεθνή βιβλιογραφία ή την απλή εργαστηριακή διερεύνησή της, αλλά να καταλήξει στη διατύπωση ενός «εργαλείου». Το «εργαλείο» αυτό, αφενός θα περιγράψει τη μηχανική συμπεριφορά θεωρητικά, εξυπηρετώντας την επεξήγηση και διδασκαλία αυτής, και αφετέρου θα προσφέρεται για εξέλιξη σε ένα πλήρες καταστατικό προσομοίωμα, ολοκλήρωση στις διατυπώσεις καταστατικών προσομοιωμάτων για πλήρως κορεσμένα εδάφη (επιτρέποντας την επέκταση των προβλέψεών τους και για συνθήκες μερικού κορεσμού) και τελικά ενσωμάτωση σε κώδικες πεπερασμένων στοιχείων.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από τρία μέρη: το παρόν πρώτο μέρος που αποτελεί το κείμενο στο οποίο παρουσιάζεται η φύση και η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών, το δεύτερο μέρος στο οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργαστηριακής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής και το τρίτο μέρος στο οποίο διατυπώνεται το νέο θεωρητικό πλαίσιο για μη κορεσμένα εδάφη. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η σκοπιμότητα συγγραφής του παρόντος πρώτου μέρους της διδακτορικής διατριβής, η διάρθρωση της διατριβής και το περίγραμμα των περιεχομένων του πρώτου μέρους.

## **1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

Το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η διατύπωση ενός θεωρητικού πλαισίου για τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών. Αναπτύχθηκε ένα θεωρητικό πλαίσιο για μη κορεσμένα εδάφη με βάση τη θεωρία της κρίσιμης κατάστασης. Προκειμένου να διατυπωθεί το θεωρητικό πλαίσιο απαιτήθηκε η κατανόηση της φύσης των μη κορεσμένων εδαφών και της μηχανικής τους συμπεριφοράς όπως αυτή είναι αποτυπωμένη στη διεθνή βιβλιογραφία. Στη συνέχεια για να διερευνηθούν ερωτηματικά ως προς τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών και να προσδιοριστούν τιμές των ιδιαίτερων παραμέτρων που την περιγράφουν για εδάφη από τον ελλαδικό χώρο, υλοποιήθηκε εκτεταμένο πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών στα πλαίσια του οποίου αγοράστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν εντατικά νέες εργαστηριακές συσκευές από τον Τομέα Γεωτεχνικής, ενώ χρησιμοποιήθηκαν εξίσου εντατικά και αντίστοιχες συσκευές του Εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. Επίσης υλοποιήθηκε από το γράφοντα για πρώτη φορά στην Ελλάδα η μέθοδος ελέγχου της μύζησης με υδατικά διαλύματα. Η σχετική πειραματική διάταξη υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αυτών δοκιμών και τα συμπεράσματα της εργαστηριακής διερεύνησης παρουσιάζονται στο δεύτερο μέρος της διδακτορικής διατριβής. Τέλος στο τρίτο μέρος παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα ήδη διατυπωμένα καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη και διατυπώνεται το νέο θεωρητικό πλαίσιο.

### 1.3 ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΑΡΟΝΤΟΣ ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

Στο παρόν πρώτο μέρος της διδακτορικής διατριβής παρουσιάζεται η φύση και η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών. Αποτελεί το πρώτο τέτοιο κείμενο στην ελληνική γλώσσα και προϋποθέτει γνώση της εδαφομηχανικής όπως αυτή περιστρέφεται γύρω από την αρχή των ενεργών τάσεων για πλήρως κορεσμένα εδάφη. Παρατίθεται προκειμένου να διευκολύνει την παρουσίαση του νέου θεωρητικού πλαισίου για μη κορεσμένα εδάφη που γίνεται στο τρίτο μέρος της διδακτορικής διατριβής και την κατανόηση της εργαστηριακής διερεύνησης που παρουσιάζεται στο δεύτερο μέρος.

Όπως προαναφέρθηκε, η ίδια μεταβολή του βαθμού κορεσμού εκδηλώνεται συχνά με εντελώς διαφορετικό τρόπο. Έτσι στο παρόν πρώτο μέρος εξετάζεται και παρουσιάζεται η φύση των μη κορεσμένων εδαφών, δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο αλληλεπιδρά η αέρια φάση με την υγρή και αυτές με τη σειρά τους επί της στερεάς φάσης του εδάφους, προσδίδοντας τα μακροσκοπικά παρατηρούμενα χαρακτηριστικά των μη κορεσμένων εδαφών. Ορίζονται, παρουσιάζονται και επεξηγούνται οι παράμετροι τάσης για τα μη κορεσμένα εδάφη και η κεντρική έννοια για τη μελέτη της μηχανικής τους συμπεριφοράς που είναι η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ιδιαιτερότητες της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών ως προς τις μεταβολές όγκου, τη διατμητική αντοχή και τη διαπερατότητα. Τέλος συνοψίζονται οι απαιτήσεις προσομοίωσης από ένα καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδάφη.

Με τη συγκέντρωση των παραπάνω στοιχείων στο πρώτο μέρος είναι δυνατή η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εργαστηριακής διερεύνησης που γίνεται στο δεύτερο μέρος και του νέου θεωρητικού πλαισίου που γίνεται στο τρίτο μέρος.

### 1.4 ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

Το πρώτο μέρος της διδακτορικής διατριβής αποτελείται από οκτώ κεφάλαια (συμπεριλαμβανομένης και της παρούσας εισαγωγής). Τα κεφάλαια που ακολουθούν είναι:

- Κεφάλαιο 2. Η φύση των μη κορεσμένων εδαφών.
- Κεφάλαιο 3. Η μέτρηση της μύζησης.

- Κεφάλαιο 4. Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού.
- Κεφάλαιο 5. Συμπιεστότητα των μη κορεσμένων εδαφών.
- Κεφάλαιο 6. Διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών.
- Κεφάλαιο 7. Διαπερατότητα των μη κορεσμένων εδαφών.
- Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται και επεξηγείται η φύση των μη κορεσμένων εδαφών. Η παράθεσή του εδώ κρίθηκε σκόπιμη προκειμένου να παρουσιαστούν οι λόγοι της εμφάνισης μη κορεσμένων εδαφών στη φύση και λόγω ανθρωπογενών διεργασιών ως εισαγωγή στην παρουσίαση και μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών. Παρουσιάζεται και επεξηγείται η αλληλεπίδραση της υγρής και της αέριας φάσης και πως αυτή εκδηλώνεται μακροσκοπικά με τη μορφή της μύζησης. Η μύζηση (suction) αποτελεί τη δεύτερη παράμετρο τάσης στα μη κορεσμένα εδάφη, μετά την ολική τάση ανηγμένη ως προς την πίεση της αέριας φάσης. Παρουσιάζονται και συζητούνται οι μέχρι σήμερα προταθείσες διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων για μη κορεσμένα εδάφη και επεξηγούνται οι αδυναμίες τους καταλήγοντας στη χρήση των δύο προαναφερθεισών παραμέτρων τάσης.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται εκτενής αναφορά στις υπάρχουσες μεθόδους μέτρησης της μύζησης. Αποτελεί το κείμενο που περιέχει την «υπάρχουσα κατάσταση της γνώσης» (state of the art) στη μέτρηση της μύζησης συγκεντρώνοντας και παρουσιάζοντας τις υπάρχουσες μεθόδους μέτρησης του μεγέθους αυτού. Το κεφάλαιο αυτό καταλήγει επιχειρώντας τη σύγκριση των μεθόδων και τη συνοπτική παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της κάθε μίας. Η σκοπιμότητα παράθεσης του κεφαλαίου αυτού έγκειται στο ότι, με βάση την εμπειρία του γράφοντος, η ενασχόληση με τις μεθόδους και τις συσκευές μέτρησης της μύζησης επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση του εντατικού αυτού μεγέθους. Όπως άλλωστε επιδεικνύεται στο δεύτερο μέρος της διατριβής, η καλή γνώση των αισθητήρων μέτρησης και της συμπεριφοράς τους επιτρέπει πιο εξεζητημένες μεθόδους εργαστηριακών μετρήσεων και δοκιμών που με τη σειρά τους εξασφαλίζουν καλύτερες δυνατότητες διερεύνησης της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται και επεξηγείται η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού αποτελεί την καμπύλη που περιγράφει τον τρόπο απώλειας ή προσρόφησης νερού από ένα εδαφικό υλικό συναρτήσει της μεταβολής της μύζησης. Α-

ποτελεί την κεντρική έννοια για την κατανόηση αλλά και τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών και η μορφή της καθορίζει την εξέλιξη των μεταβολών όγκου, της διατμητικής αντοχής και του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή και την αέρια φάση συναρτήσει της μύζησης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αξιολογούνται επίσης και τα διατυπωμένα μαθηματικά προσομοιώματα για την περιγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Περιγράφονται τέλος οι εργαστηριακές συσκευές και οι μέθοδοι προσδιορισμού της.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι μεταβολές όγκου των μή κορεσμένων εδαφών. Χρησιμοποιείται η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού για να επεξηγηθεί η συμπεριφορά που πρέπει να αναμένεται ανάλογα με τη θέση που βρισκόμαστε επί αυτής. Ορίζεται σε όρους λόγου κενών-μύζησης και συσχετίζεται με την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης προκειμένου να εξηγηθεί η διαφορετική εκδήλωση (διόγκωση ή συρρίκνωση) της ίδιας μεταβολής του βαθμού κορεσμού ως συνάρτηση της ιστορίας φόρτισης-αποφόρτισης και της ιστορίας ξήρανσης-ύγρανσης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση μιας εφαρμογής που στην προκειμένη περίπτωση είναι η ερμηνεία αποτελεσμάτων μονοδιάστατης συμπίεσης αρχικά πλήρως ή μή κορεσμένων εδαφών. Στα πλαίσια αυτά ορίζεται ο «Φαινόμενος» Δείκτης Συμπίεσης και η Τάση «Φαινόμενης» Προφόρτισης λόγω μερικού κορεσμού. Ο πρώτος αποτελεί την κλίση της προβολής της καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης στο χώρο κατακόρυφης ολικής τάσης – μύζησης – λόγου κενών στο επίπεδο κατακόρυφης ολικής τάσης – λόγου κενών. Η Τάση «Φαινόμενης» Προφόρτισης λόγω μερικού κορεσμού αποτελεί την τάση διαρροής που παρατηρείται στην ίδια προβολή για αρχικά μή κορεσμένα αναζυμωμένα εδάφη (οπότε δεν θα έπρεπε να υπάρχει) ή φυσικά εδάφη (οπότε είναι μεγαλύτερη από εκείνη που αντιστοιχεί στη δομή των εδαφικών υλικών λόγω υπερστερεοποίησης, σιμέντωσης, θιξοτροπίας, ερπυσμού ή του συνδυασμού τους). Τα δύο μεγέθη χρησιμοποιούνται για την επεξήγηση των παρατηρούμενων φαινομένων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της εκπόνησης της παρούσας διδακτορικής διατριβής για τη μελέτη τους. Επεξηγείται τέλος η διαφορετική συμπεριφορά που παρατηρείται για αργιλικά εδάφη χαμηλής και υψηλής πλαστικότητας.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η διατμητική αντοχή των μή κορεσμένων εδαφών. Χρησιμοποιείται και πάλι η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού για να επεξηγηθεί η συμπεριφορά που πρέπει να αναμένεται ανάλογα με τη θέση που βρισκόμαστε επί αυτής. Παρουσιάζεται και επεξηγείται το γενικευμένο κριτήριο Mohr-Coulomb για μή κορεσμένα εδάφη (γραμμικό και μή γραμμικό). Επεξηγείται η μή γραμμικότητα του κριτηρίου και ο τρόπος της μεταβολής της διατ-

μητικής αντοχής με τη μύζηση υπό σταθερή ολική τάση με βάση τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Παρουσιάζονται συνοπτικά οι εργαστηριακές μέθοδοι προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής μη κορεσμένων εδαφών και το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση προβλημάτων ευστάθειας πρανών κατά τα οποία η αναγνώριση της επιρροής του βαθμού κορεσμού είναι κρίσιμης σημασίας για την κατανόηση του κατολισθητικού φαινομένου και του ορθού υπολογισμού παραμέτρων παραμένουσας διατμητικής αντοχής από αντίστροφες αναλύσεις αστοχησάντων πρανών. Στα πλαίσια αυτά διατυπώνεται η μεθοδολογία υπολογισμού της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής από αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας αστοχησάντων πρανών, όπου ο υπόγειος ορίζοντας βρίσκεται χαμηλά, μαζί με συστάσεις για ορθή εκτέλεση των αντιστρόφων αναλύσεων. Τέλος παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μέτρησης της επιρροής της μύζησης στη διατμητική αντοχή ενός χονδρόκοκκου εδαφικού υλικού.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται οι νόμοι ροής που διέπουν την κίνηση της υγρής και της αέριας φάσης ως προς το στερεό σκελετό στα μη κορεσμένα εδάφη. Παρουσιάζεται και επεξηγείται η διατύπωση του νόμου του Darcy (κίνηση της υγρής φάσης ως προς το στερεό σκελετό) και του νόμου του Fick (κίνηση της αέριας φάσης) για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά καθώς και οι νόμοι μεταβολής του συντελεστή διαπερατότητας της υγρής φάσης ως προς το στερεό σκελετό και του συντελεστή διαπερατότητας της αέριας φάσης ως προς το στερεό σκελετό συναρτήσει της μύζησης. Όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια, το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με την παρουσίαση μιας εφαρμογής που επιδεικνύει την επιρροή του βαθμού κορεσμού σε προβλήματα υπόγειας ροής. Συγκεκριμένα γίνεται εκτίμηση του χρόνου αποκατάστασης της υδροστατικής κατανομής της πίεσης του νερού των πόρων σε αρχικά μη κορεσμένο εδαφικό σχηματισμό υποκείμενο σε πλημμύρα στην επιφάνεια του εδάφους, εάν αγνοηθεί και εάν ληφθεί υπόψη η επιρροή του βαθμού κορεσμού στο συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση.

Το πρώτο μέρος ολοκληρώνεται με το Κεφάλαιο 8, στο οποίο συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα και τη βιβλιογραφία που παρατίθενται στο τέλος της διατριβής.

Εκτός από την παρουσίαση και την επεξήγηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών, η σημασία του παρόντος πρώτου μέρους έγκειται και στην εκτεταμένη βιβλιογραφία του η οποία καλύπτει πλήρως όλα τα επιμέρους αντικείμενα που εξετάζονται σε αυτό (σχεδόν το 90% της βιβλιογραφίας που παρατίθεται στο τέλος της διατριβής αφορά στο πρώτο μέρος).



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Η ΦΥΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ. Η ΜΥΖΗΣΗ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η φύση των μη κορεσμένων εδαφών πριν από την περιγραφή της μηχανικής τους συμπεριφοράς στα επόμενα κεφάλαια του πρώτου μέρους. Αρχικά ορίζεται ο βαθμός κορεσμού και στη συνέχεια γίνεται διάκριση μεταξύ μη κορεσμένων και μερικώς κορεσμένων εδαφών. Ακολουθεί αναφορά στη συχνότητα και τους λόγους της εμφάνισης των μη κορεσμένων και των μερικώς κορεσμένων εδαφών. Ορίζεται και επεξηγείται η επίδραση της πίεσης της υγρής και της αέριας φάσης των πόρων του εδαφικού υλικού και η μύζηση (suction). Παρουσιάζεται η μορφή του μη κορεσμένου εδάφους για τις διάφορες ενδιάμεσες καταστάσεις μεταξύ πλήρους κορεσμού και απόλυτης ξηρότητας και γίνεται εισαγωγή στην έννοια της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Τέλος γίνεται αναφορά στις παραμέτρους τάσης που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών και στη διατύπωση της αρχής των ενεργών τάσεων για μη κορεσμένα εδάφη.

### 2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

#### 2.2.1 Βαθμός κορεσμού. Ορισμός και ονομασία εδαφών ως προς τις τιμές του

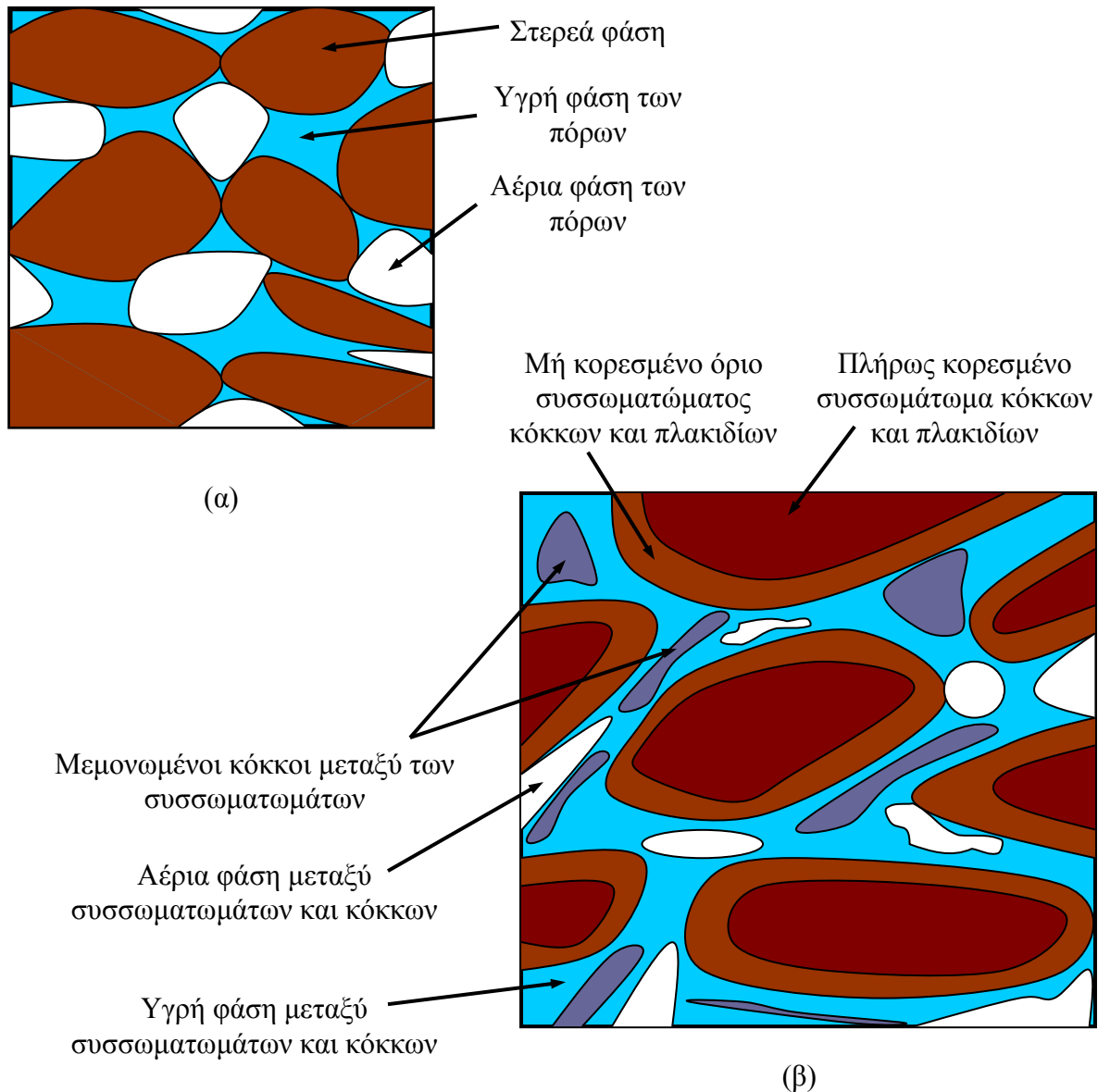
Ο *βαθμός κορεσμού*  $S_r$  (degree of saturation) ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών ενός εδαφικού υλικού που είναι γεμάτα με νερό,  $V_w$ , προς το συνολικό όγκο των κενών του εδαφικού υλικού  $V_k$  (Εξ. 2.1). Συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό και λαμβάνει εξ ορισμού τιμές από 0 έως 100%.

$$S_r = V_w / V_k \quad (2.1)$$

Βαθμός κορεσμού ίσος με 100% σημαίνει ότι τα κενά του εδαφικού υλικού είναι πλήρως γεμάτα με νερό (οπότε το εδαφικό υλικό είναι *πλήρως κορεσμένο*) και βαθμός κορεσμού ίσος με 0 σημαίνει ότι τα κενά του εδαφικού υλικού δεν περιέχουν καθόλου νερό (οπότε το εδαφικό υλικό είναι *απολύτως ξηρό*). Όταν ο βαθμός κορεσμού έχει οποιαδήποτε άλλη τιμή μεταξύ 0 και 100%, το εδαφικό υλικό ονομάζεται *μή κορεσμένο* ή *ακόρεστο* (unsaturated). Για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα στη διεθνή βιβλιογραφία απαντάτο εξίσου συχνά ο όρος *μερικώς κορεσμένο* (partly ή partially saturated) δηλώνοντας την ίδια έννοια με τον όρο *μή κορεσμένο* ή *ακόρεστο*. Στο 1<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Συνέδριο Μή Κορεσμένων Εδαφών το 1995 στο Παρίσι, οι Delage & Graham (1995) συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα των συζητήσεων που είχαν διεξαχθεί και μετά από ανασκόπηση των άρθρων που παρουσιάστηκαν στο συνέδριο εισηγήθηκαν τον ακόλουθο διαχωρισμό μεταξύ μή κορεσμένων (ή ακόρεστων) και μερικώς κορεσμένων εδαφών:

- *Μή κορεσμένο* ή *ακόρεστο* είναι το έδαφος εκείνο το οποίο έχει βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100% και μεγαλύτερο του 0 και είναι ομοιογενές ως προς τον βαθμό κορεσμού. Ακόμη και στο μικρότερο επίπεδο δηλαδή, στο εδαφικό αυτό υλικό υπάρχει και αέρας και νερό μεταξύ των κόκκων και των πλακιδίων που το αποτελούν (Σχ. 2.1α) και μάλιστα κατά τρόπο που το εδαφικό υλικό να είναι ομοιογενές ως προς τον βαθμό κορεσμού.
- *Μερικώς κορεσμένο* είναι το έδαφος το οποίο έχει βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100% και μεγαλύτερο του 0 αλλά είναι ανομοιογενές ως προς τον βαθμό κορεσμού του, δηλαδή μπορεί κατά τόπους να είναι πλήρως κορεσμένο, μή κορεσμένο ή ακόμη και απολύτως ξηρό (Σχ. 2.1β).

Μή κορεσμένα είναι συνήθως εδαφικά υλικά με πρακτικά ομοιογενές μέγεθος πόρων. Αντίθετα, μερικώς κορεσμένα εδάφη είναι εκείνα με έντονα ανομοιογενές μέγεθος πόρων, οπότε για δεδομένη τιμή του βαθμού κορεσμού, στους μεγαλύτερου μεγέθους πόρους συγκεντρώνεται ο αέρας και στους μικρότερου μεγέθους πόρους συγκεντρώνεται το νερό. Αν και η εμφάνιση εδαφών με φυσική κοκκομετρική διαβάθμιση που να οδηγεί σε τέτοια ανομοιογένεια του μεγέθους των πόρων δεν μπορεί να αποκλειστεί, συνήθως τέτοιου είδους εδάφη είναι εδάφη τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης και συμπυκνωμένα εδάφη. Το ζήτημα της ομοιογένειας του μεγέθους των πόρων συζητείται αναλυτικά στην § 2.3.



**Σχήμα 2.1.** Ιδεατή απεικόνιση α) μή κορεσμένου και β) μερικώς κορεσμένου εδάφους.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή υιοθετείται ο παραπάνω διαχωρισμός και σε όλο το κείμενο επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο όρος «μή κορεσμένο» (αντί του όρου «ακόρεστο») αποδίδοντας τον αγγλικό όρο «unsaturated» με την έννοια που περιγράφηκε παραπάνω και ο όρος «μερικώς κορεσμένο» αποδίδοντας τον αγγλικό όρο «partly saturated» ή «partially saturated». Η μηχανική συμπεριφορά που περιγράφεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή είναι εκείνη των μή κορεσμένων εδαφών εκτός και εάν επισημαίνεται ότι κάποια αναφορά ισχύει και για μερικώς κορεσμένα εδάφη.

## 2.2.2 Εμφάνιση των μή κορεσμένων και των μερικώς κορεσμένων εδαφών

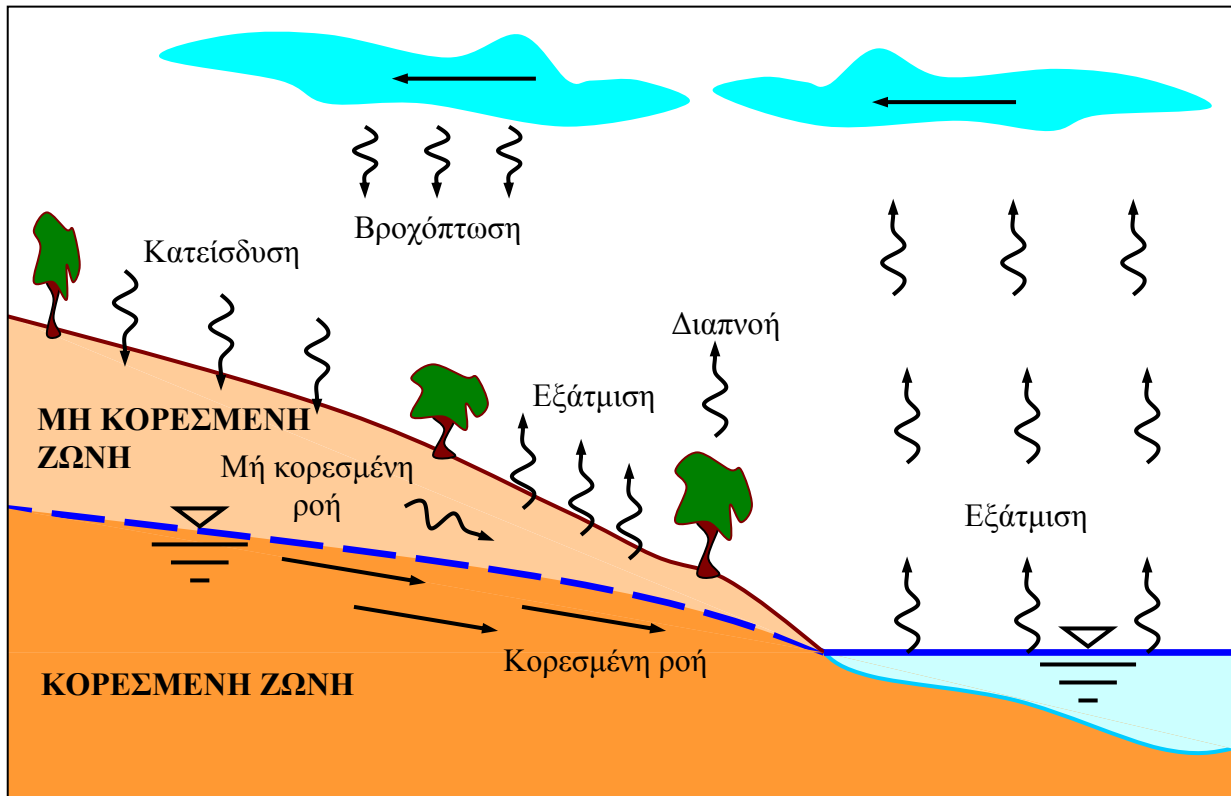
Εδαφικά υλικά με βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100% εμφανίζονται σε διάφορες μορφές στη φύση ή λόγω ανθρωπογενών διεργασιών. Οπουδήποτε η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα εμφανίζεται σε βάθος από την επιφάνεια του εδάφους επαρκές για τη φύση του συγκεκριμένου εδαφικού υλικού, το έδαφος επαρκώς ψηλότερα από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα αποκτά βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100%. Αντίστοιχα, όπου έχουμε την κατασκευή συμπτυκνωμένων επιχώσεων, το έδαφος αμέσως μετά την συμπίκνωσή του θα έχει βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100% και μάλιστα μπορεί να είναι μή κορεσμένο ή μερικώς κορεσμένο, ανάλογα με την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού.

Σε ό,τι αφορά φυσικά εδάφη, όπως είναι γνωστό από τον υδρολογικό κύκλο (Σχ. 2.2), στην επιφάνεια του εδάφους υπάρχει απορροή, κατείδυση, εξάτμιση και διαπνοή. Οπουδήποτε η εξάτμιση και η διαπνοή αθροιστικά υπερτερούν της κατείδυσης των επιφανειακών υδάτων στο υπέδαφος, η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα βρίσκεται χαμηλότερα από την επιφάνεια του εδάφους και στο τμήμα του υπεδάφους ανάμεσα στη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και στην επιφάνεια του εδάφους δημιουργείται η *μή κορεσμένη ζώνη* (unsaturated ή vadose zone). Όπως προαναφέρθηκε και θα εξεταστεί λεπτομερώς και στη συνέχεια του κεφαλαίου, τα εδαφικά υλικά αρχίζουν να έχουν βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100% στο ύψος εκείνο πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα, το οποίο καθορίζεται από τη φύση του κάθε εδαφικού υλικού.

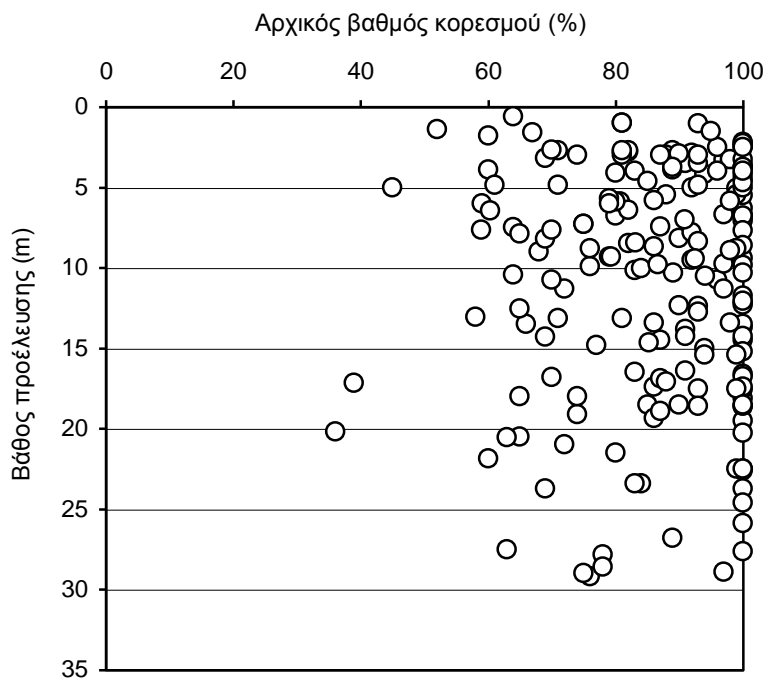
Στο Σχ. 2.3 παρουσιάζονται οι τιμές του βαθμού κορεσμού που μετρήθηκαν σε δείγματα αργιλικών εδαφών από τον ελλαδικό χώρο στα οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης με το βάθος προέλευσης των δειγμάτων (Μπαρδάνης & Καβουνίδης, 2001β<sup>1</sup>). Όπως φαίνεται, υπάρχουν καταγεγραμμένες πολύ χαμηλές τιμές του βαθμού κορεσμού, ακόμα και σε σημαντικά βάθη. Οι τιμές αυτές αποτελούν τις τιμές του βαθμού κορεσμού κατά την έναρξη των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης και δεν ταυτίζονται κατ' ανάγκη με τις πραγματικές τιμές του βαθμού κορεσμού επιτόπου. Στο διάγραμμα του Σχ. 2.3 καταγράφεται λοιπόν, εκτός από την τιμή του βαθμού κορεσμού των εδαφών επιτόπου, και η επιρροή της δειγματοληψίας, της παραμονής των δειγμάτων στις ατμοσφαιρικές συνθήκες μέχρι την περιτύλιξή τους με ελαστική μεμβράνη, της μεταφοράς τους στο εργαστήριο κλπ., με βάση την *γεωερευνητική πρακτική στον ελλαδικό χώρο*. Ακόμα λοιπόν και αν το Σχ. 2.3 δεν είναι

---

<sup>1</sup> Περισσότερα για τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης που χρησιμοποιήθηκαν από τους Μπαρδάνη & Καβουνίδη, 2001β, στο Κεφάλαιο 5 του πρώτου μέρους.



Σχήμα 2.2. Υδρολογικός κύκλος και μη κορεσμένη ζώνη του εδάφους.



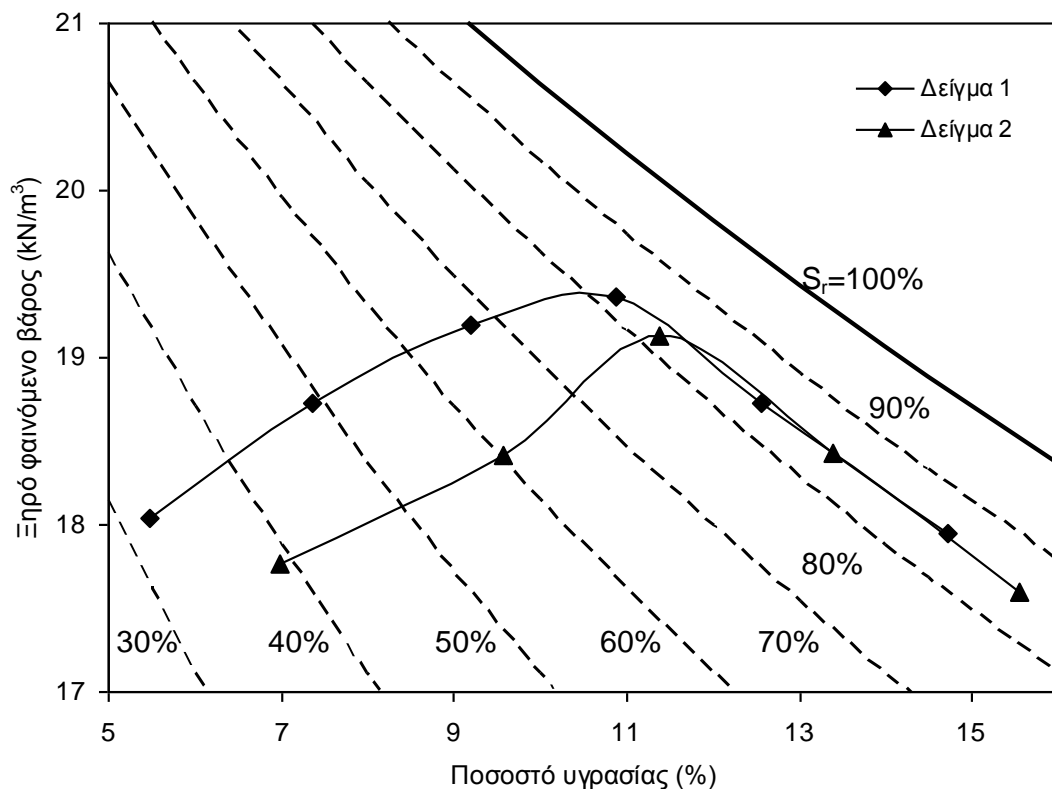
Σχήμα 2.3. Βαθμός κορεσμού σε δείγματα αργλικών εδαφών από τον ελλαδικό χώρο που πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης με το βάθος προέλευσης των δειγμάτων (Μπαρδάνης & Καβουνίδης, 2001β).

ενδεικτικό της συχνότητας και του βάθους εμφάνισης μη κορεσμένων εδαφών στον ελλαδικό χώρο, τεκμηριώνει την αναγκαιότητα κατανόησης της επιρροής του βαθμού κορεσμού σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών. Η αναγκαιότητα αυτή συνιστά έναν ακόμα λόγο για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών, αφού τα δείγματα των γεωτρήσεων χάνουν μέρος της υγρασίας τους από τη δειγματοληψία μέχρι την εκτέλεση των δοκιμών και ο βαθμός κορεσμού τους μειώνεται. Υπάρχουν βέβαια εργαστηριακές δοκιμές στις οποίες ο βαθμός κορεσμού των δοκιμίων μπορεί να επανέλθει στην τιμή 100% πριν την έναρξη της δοκιμής, αλλά αυτό δεν μπορεί να γίνει σε όλα τα είδη δοκιμών, και εκτός αυτού η επαναφορά του βαθμού κορεσμού στην τιμή 100% μετά από προηγούμενη μείωση δημιουργεί υστερητικά φαινόμενα τα οποία περιγράφονται στα Κεφάλαια 4 και 5 του πρώτου μέρους.

Μή κορεσμένα εδάφη στη φύση είναι κοκκώδη υλικά όπως χάλικες και άμμοι και λεπτόκοκκα υλικά όπως ιλείς και αμιγείς (ή πρακτικά αμιγείς) άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας και υπό προϋποθέσεις υψηλής πλαστικότητας (Delage & Graham, 1995). Γενικότερα, μή κορεσμένα είναι εδάφη με πρακτικά ομοιογενές μέγεθος πόρων. Για αυτόν το λόγο και εδαφικά υλικά που αποτελούν μείγματα κόκκων διαφόρων μεγεθών μπορούν να απαντηθούν μή κορεσμένα, υπό την προϋπόθεση ότι η διάταξη των κόκκων και των πλακιδίων τους είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζει πρακτικά ομοιογενές μέγεθος πόρων. Αντίθετα, στις περιπτώσεις εκείνες που απαντώνται στη φύση εδάφη με ανομοιογενές μέγεθος πόρων, τότε στους μεγαλύτερου μεγέθους πόρους συγκεντρώνεται ο αέρας και στους μικρότερου μεγέθους πόρους συγκεντρώνεται το νερό, αυτά είναι μερικώς κορεσμένα. Αν και η εμφάνιση εδαφικών υλικών με φυσική κοκκομετρική διαβάθμιση που να οδηγεί σε τέτοια ανομοιογένεια του μεγέθους των πόρων δεν μπορεί να αποκλειστεί, συνήθως τέτοιου είδους εδάφη είναι υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης και συμπυκνωμένα. Περίπτωση φυσικών τέτοιων υλικών αποτελούν –υπό προϋποθέσεις- οι άργιλοι υψηλής πλαστικότητας.

Ο βαθμός κορεσμού των συμπυκνωμένων υλικών αμέσως μετά τη συμπύκνωσή τους προκύπτει μικρότερος του 100% ως απαίτηση επίτευξης της μέγιστης πυκνότητάς τους. Πράγματι, για όλα τα εδαφικά υλικά η επίτευξη της μέγιστης πυκνότητάς τους κατά τη συμπύκνωση επιτυγχάνεται για ποσοστά υγρασίας και ενέργεια συμπύκνωσης, τέτοια που το υλικό έχει βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100%. Ενδεικτικά παρατίθεται το Σχ. 2.4, όπου φαίνονται οι καμπύλες ξηρού φαινομένου βάρους-υγρασίας που προέκυψαν από τη δοκιμή Proctor με την πρότυπη ενέργεια συμπύκνωσης σε 2 δείγματα πλήρως αποσαθρωμένου Σερπεντινίτη Σκύρου. Στο Δείγμα 1 του Σχ. 2.4 ο βαθμός κορεσμού στο μέγιστο ξηρό φαινόμενο βάρος ήταν 82.5% και στο Δείγμα 2

82.3%,. Αν μάλιστα –ως συνήθως<sup>2</sup>– η απαίτηση είναι για μικρότερο ξηρό φαινόμενο βάρος από το μέγιστο (95% ή 98%), τότε για προδιαγραφή συμπίκνωσης «ξηρά» από την βέλτιστη υγρασία (dry of optimum), ή στην φυσική υγρασία με μικρότερη ενέργεια συμπίκνωσης, προκύπτουν τιμές του βαθμού κορεσμού σημαντικά μικρότερες και από τις προαναφερθείσες, ενώ ακόμα και για προδιαγραφή συμπίκνωσης «υγρά» από την βέλτιστη υγρασία (wet of optimum) οι αρχικές τιμές του βαθμού κορεσμού παραμένουν μικρότερες του 100%. Περισσότερα για τις ιδιότητες του πλήρως αποσαθρωμένου Σερπεντινίτη Σκύρου μπορούν να βρεθούν στα Κεφ. 11 και 15 του δεύτερου μέρους της διατριβής.



**Σχήμα 2.4.** Καμπύλες ξηρού φαινομένου βάρους-υγρασίας από την πρότυπη δοκιμή Proctor σε δύο δείγματα πλήρως αποσαθρωμένου Σερπεντινίτη Σκύρου. Στα Κεφάλαια 11 και 15 παρουσιάζονται οι ιδιότητες του συγκεκριμένου δείγματος του υλικού που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

<sup>2</sup> Αύξηση της ενέργειας συμπίκνωσης οδηγεί την καμπύλη ξηρού φαινομένου βάρους-υγρασίας προς μικρότερες τιμές του ποσοστού υγρασίας και μεγαλύτερες τιμές του ξηρού φαινομένου βάρους (π.χ. το μέγιστο ξηρό φαινόμενο βάρος από τη δοκιμή Proctor με την τροποποιημένη ενέργεια συμπίκνωσης προκύπτει πάντοτε μεγαλύτερο από εκείνο από τη δοκιμή με την πρότυπη ενέργεια συμπίκνωσης *αλλά και σε μικρότερη τιμή του ποσοστού υγρασίας*). Έτσι αποτελεί κοινή πρακτική σε πραγματικά έργα να επιδιώκεται η συμπίκνωση για τιμές της υγρασίας στη βέλτιστη ή και μικρότερη αυτής (όπως προκύπτει από την εργαστηριακή δοκιμή), αφού η μεγαλύτερη ενέργεια συμπίκνωσης των σύγχρονων χωματοουργικών μηχανημάτων στην πραγματικότητα θα οδηγήσει σε συμπίκνωση «υγρά» από τη βέλτιστη υγρασία της καμπύλης ξηρού φαινομένου βάρους-υγρασίας η οποία αντιστοιχεί στην επιτόπου ενέργεια συμπίκνωσης για αυτό το ποσοστό υγρασίας.

Άρα, πρόσφατα συμπακνωμένα εδάφη χωρίς σημαντικά υπερκείμενα έχουν βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100%<sup>3</sup>. Μπορεί δε να είναι είτε μη κορεσμένα, είτε μερικώς κορεσμένα. Προκειμένου για κοκκώδη υλικά όπως χάλικες, άμμους και μείγματα αυτών είναι λογικό να υποθεθεί ότι ακόμα και στο επίπεδο του στοιχειώδους αντιπροσωπευτικού όγκου (ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση φτάνει στο επίπεδο των μεμονωμένων κόκκων) στα υλικά αυτά συνυπάρχει η υγρή και η αέρια φάση μεταξύ του σκελετού των στερεών κόκκων. Αντίθετα στην περίπτωση αργιλικών εδαφών τα οποία αποσπώνται από δανειοθαλάμους όπου μπορεί να ήταν πλήρως κορεσμένα, η μηχανική διάσπαση που προηγείται της διάστρωσης και συμπύκνωσης αφήνει για συμπύκνωση πλήρως κορεσμένα συσσωματώματα πλακιδίων και κόκκων<sup>4</sup>, ανάμεσα στα οποία υπάρχει και νερό και αέρας και ενδεχομένως άλλοι μεμονωμένοι κόκκοι (ιδίως στην περίπτωση ανάμειξης τους με πιο κοκκώδη υλικά προ της συμπύκνωσης για επίτευξη της επιθυμητής κοκκομετρικής διαβάθμισης). Η κατάσταση αυτή παρουσιάζεται στο Σχ. 2.1β.

Με εξαίρεση ωστόσο την περίπτωση των συμπακνωμένων εδαφών, οι υπόλοιπες περιπτώσεις εμφάνισης μή ή μερικώς κορεσμένων εδαφών στη φύση καθορίζονται από τη θέση της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα από την επιφάνεια του εδάφους, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια του εδάφους, αυτόν καθεαυτό τον τύπο του εδαφικού υλικού (κοκκομετρική διαβάθμιση και ορυκτολογία) και την περιεκτικότητα του νερού των πόρων σε ξένες ουσίες ή γενικότερα το είδος του υγρού των πόρων. Το αποτέλεσμα αυτών των παραγόντων είναι η μεταβολή της εντατικής κατάστασης στην υγρή φάση των πόρων του μη κορεσμένου εδαφικού υλικού. Στις παραγράφους που ακολουθούν εξετάζεται η επιρροή αυτή.

---

<sup>3</sup> Συμπακνωμένα κοκκώδη εδαφικά υλικά αναμένεται να παραμένουν μη κορεσμένα ακόμα και μετά την απόθεση σημαντικών υπερκειμένων (εφόσον δεν υπάρχει διήθηση νερού προς το εσωτερικό τους), αφού το μέγεθος των παραμορφώσεων λόγω των υπερκειμένων δεν επαρκεί για να προκαλέσει τον κορεσμό τους (ιδέ Κεφάλαιο 5).

<sup>4</sup> Με τις παρυφές των συσσωματωμάτων ενδεχομένως μη κορεσμένες από την έκθεση του προς συμπύκνωση υλικού στις ατμοσφαιρικές συνθήκες κατά τη μεταφορά του ή την πρόκληση απώλειας υγρασίας ώστε να αποκτήσει την προδιαγεγραμμένη υγρασία συμπύκνωσης (αργιλικά εδάφη, ιδίως κατά τους χειμερινούς μήνες, ενδέχεται να έχουν ποσοστό υγρασίας μεγαλύτερο από εκείνο που έχει προδιαγραφεί για επίτευξη της επιθυμητής πυκνότητας).



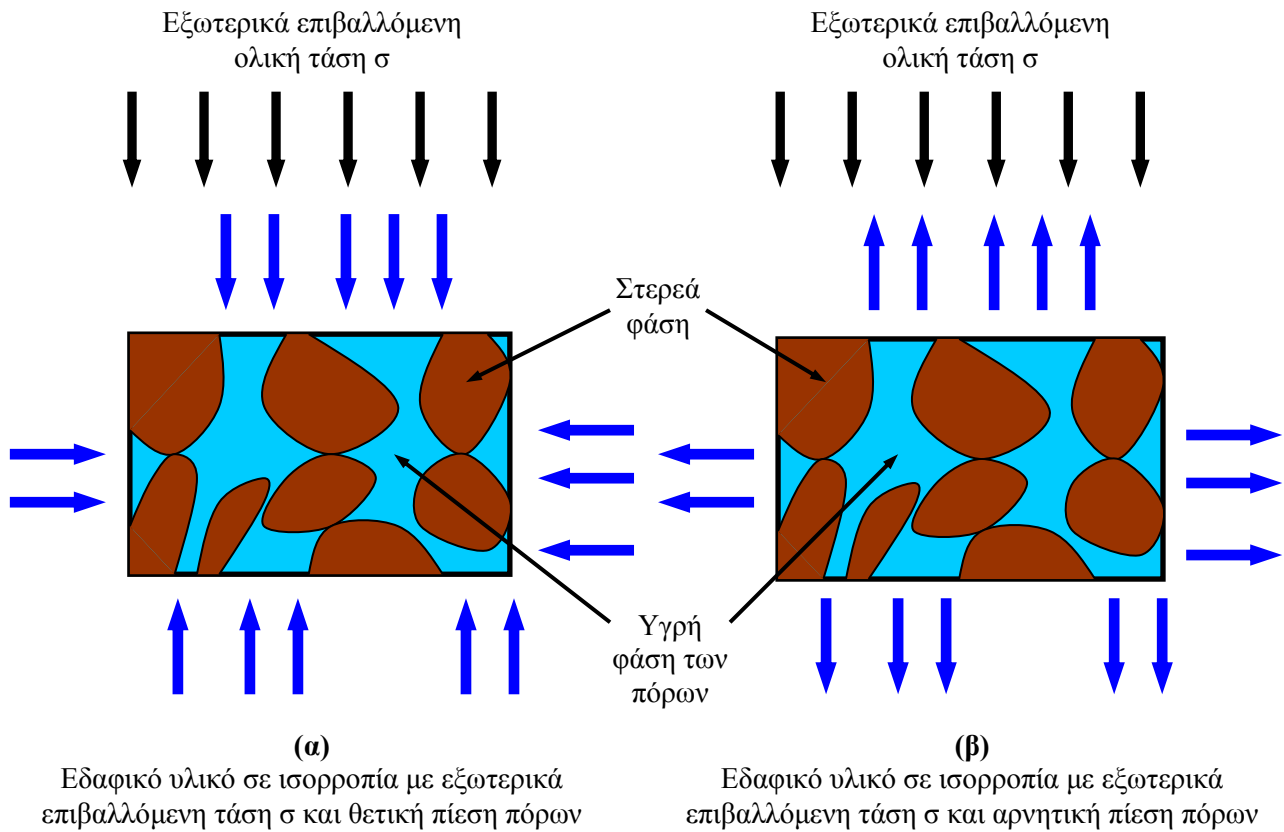
## 2.3 ΒΑΘΜΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ, ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΜΥΖΗΣΗ (SUCTION)

### 2.3.1 Γενικά

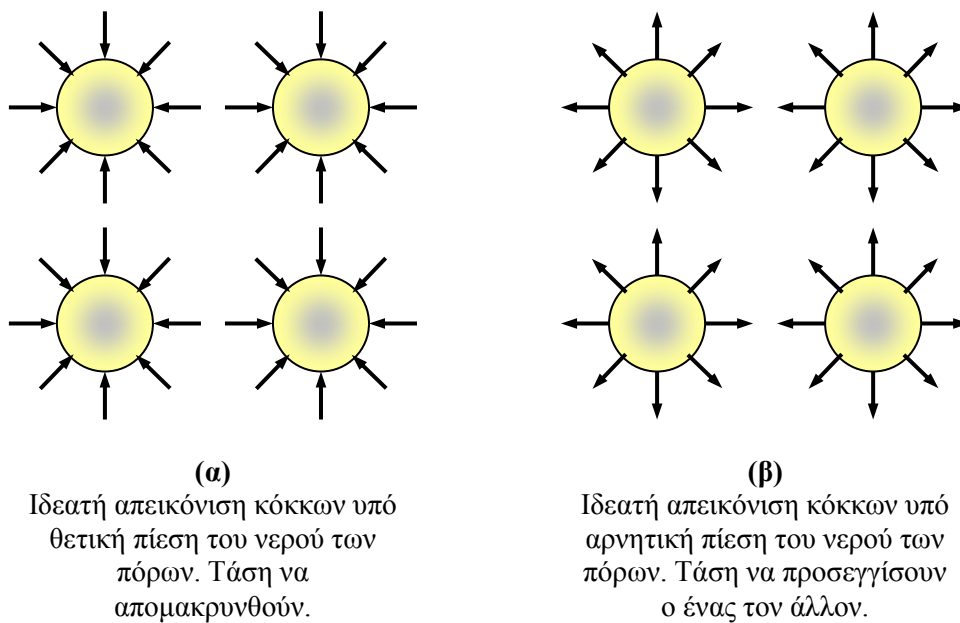
Το βασικό διαφορετικό χαρακτηριστικό των μή κορεσμένων εδαφών, που προκύπτει ως αποτέλεσμα του μερικού κορεσμού τους, είναι η εντατική κατάσταση στην υγρή φάση των πόρων. Στα πλήρως κορεσμένα εδάφη ή, ακριβέστερα, στα εδαφικά υλικά που βρίσκονται κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα, η μόνη ρευστή φάση είναι η υγρή φάση και η πίεση σε αυτήν είναι θετική (θλιπτική, κατά τον ορισμό των προσήμων στην εδαφομηχανική). Στα εδάφη που βρίσκονται πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα μπορεί να υπάρχει μόνο η υγρή φάση στους πόρους τους ή και η υγρή και η αέρια φάση ταυτόχρονα. Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο η υγρή φάση στους πόρους των εδαφών, η πίεση της υγρής φάσης των πόρων είναι αρνητική.

Το φυσικό νόημα της παρουσίας θετικής πίεσης είναι ότι το νερό των πόρων έχει την τάση να διαφύγει από το εδαφικό υλικό παρουσία της πίεσης αυτής (Σχ. 2.5α). Η πίεση αυτή αφαιρείται από την ολική τάση κατά τις προβλέψεις της αρχής των ενεργών τάσεων για πλήρως κορεσμένα εδάφη. Αντίστοιχα, παρουσία αρνητικής πίεσης το νερό έχει την τάση όχι να διαφύγει από το εδαφικό υλικό αλλά να προσροφήσει κι άλλο, εάν παρέχεται (Σχ. 2.5β). Εάν η μόνη παρούσα φάση στους πόρους ενός εδαφικού υλικού είναι η υγρή, τότε η αρνητική της πίεση προστίθεται στην ολική τάση, κατά τις προβλέψεις της αρχής των ενεργών τάσεων, και ισοδυναμεί με την παρουσία αυξημένης ενεργού τάσης. Η θετική πίεση πόρων δηλαδή έχει την τάση να απωθεί τους κόκκους τον έναν από τον άλλον, ενώ η αρνητική να τους ελκύει (Σχ. 2.6).

Ανάλογα με τη φύση του εδάφους, το πάχος της μή κορεσμένης ζώνης και τις συνθήκες που επιδρούν στην επιφάνεια του εδάφους, σε ορισμένο ύψος πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα αρχίζει να συνυπάρχει η υγρή με την αέρια φάση των πόρων και τότε η εντατική κατάσταση της υγρής φάσης περιγράφεται από το μέγεθος που ονομάζεται *μύζηση* (suction) και θα εξετάσουμε αναλυτικά στην υπόλοιπη §2.3.



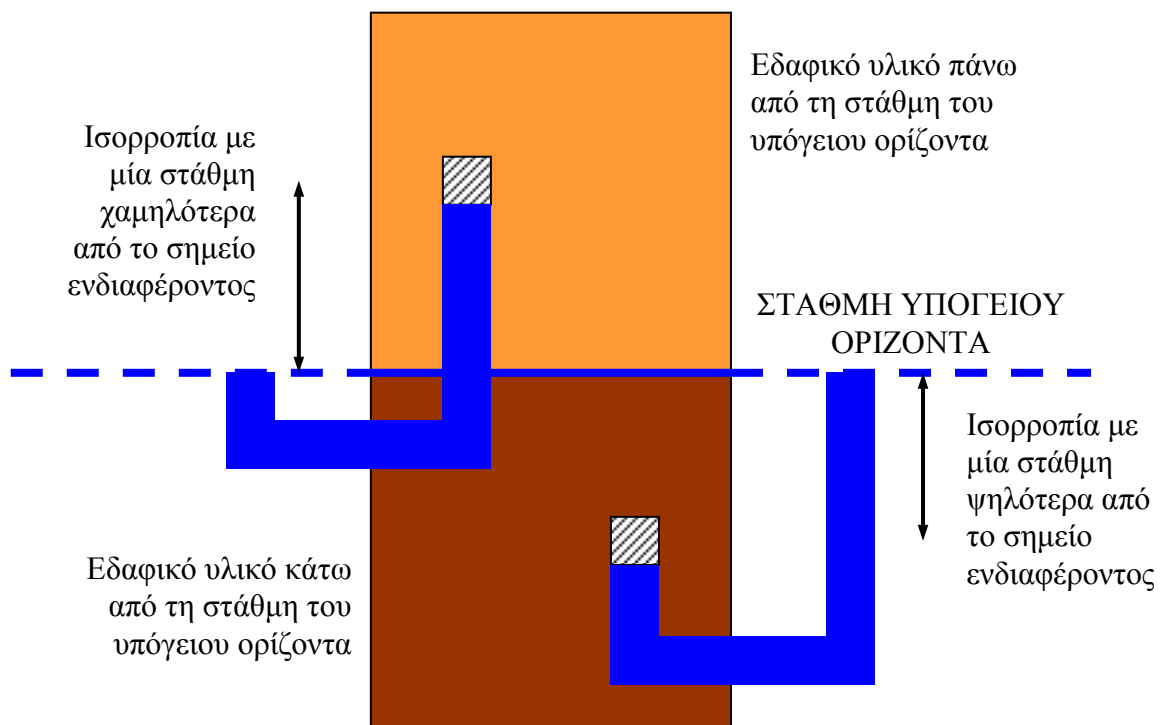
**Σχήμα 2.5.** Εδαφικό υλικό σε ισορροπία με εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση  $\sigma$  και α) θετική πίεση πόρων ή β) αρνητική πίεση πόρων.



**Σχήμα 2.6.** Ιδεατή απεικόνιση εδαφικών κόκκων α) υπό θετική πίεση του νερού των πόρων και β) υπό αρνητική πίεση του νερού των πόρων.

### 2.3.2 Η φύση της μύζησης. Μύζηση εδαφικού σκελετού και ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης

Θερμοδυναμικά η πίεση στην υγρή φάση εκφράζει την ενέργεια της υγρής φάσης ως προς μία ενέργεια αναφοράς του λεγόμενου *ελεύθερου νερού* (free water) (Lu & Likos, 2004). Ελεύθερο νερό υπ' αυτή την έννοια θεωρείται νερό στο οποίο δεν υπάρχουν διαλυμένες ουσίες, δεν αλληλεπιδρά με άλλες φάσεις που μπορούν να προκαλέσουν καμπύλωση της διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης και δεν ασκούνται σε αυτό άλλες εξωτερικές δυνάμεις εκτός από τις βαρυτικές. Στη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα η πίεση της υγρής φάσης είναι μηδενική, δηλαδή το νερό που βρίσκεται σε αυτήν, θεωρούμενο ως ελεύθερο νερό δεν έχει αυξημένο ή μειωμένο δυναμικό ως προς τη χαρακτηριστική αυτή θέση. Κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα το δυναμικό αυτό αυξάνει και πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα μειώνεται, δηλαδή νερό ευρισκόμενο στη θέση αυτή βρίσκεται πάντα σε ισορροπία με τη στάθμη αναφοράς που αποτελεί η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Απλοϊκά λοιπόν, ένα όργανο μέτρησης της πίεσης του νερού τοποθετημένο στις στάθμες αυτές θα έδειχνε στάθμη στη θέση του υπόγειου ορίζοντα κατά τον τρόπο που φαίνεται στο Σχ. 2.7.



**Σχήμα 2.7.** Πίεση στην υγρή φάση εδαφικών υλικών πάνω και κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα.

Εάν αγνοήσουμε τη θερμοκρασία, τη βαρύτητα και τα αδρανειακά φαινόμενα, οι βασικοί μηχανισμοί που προκαλούν τη μείωση του δυναμικού του νερού είναι τα τριχοειδή φαινόμενα, τα φαινόμενα προσρόφησης (δυνάμεις μεταξύ σωματιδίων και υγρής φάσης) και τα ωσμωτικά φαινόμενα. Τα δύο τελευταία επιδρούν και σε πλήρως και σε μή κορεσμένα εδάφη, αλλά τα πρώτα εμφανίζονται μόνο σε μή κορεσμένα εδαφικά υλικά.

Τα τριχοειδή φαινόμενα, περιλαμβάνουν καμπύλωση της διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης παρουσία της αρνητικής πίεσης στην υγρή φάση των πόρων και αποτελούν φαινόμενο που εμφανίζεται μόνο στα μή κορεσμένα εδαφικά υλικά και οφείλεται στη συνύπαρξη της υγρής και της αέριας φάσης στους πόρους των εδαφών.

Τα φαινόμενα προσρόφησης οφείλονται κυρίως στα πεδία δυνάμεων που αναπτύσσονται λόγω ηλεκτρικών φορτίων και δυνάμεων van der Waals σε πολύ μικρή απόσταση από τη διεπιφάνεια στερεάς και υγρής φάσης και έχουν μεγαλύτερη σημασία για λεπτόκοκκα εδάφη. Οι ηλεκτρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται οφείλονται στα ηλεκτρικά πεδία που προκαλούνται από την αρνητική φόρτιση στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων. Οι δυνάμεις van der Waals οφείλονται στην αλληλεπίδραση δυνάμεων που αναπτύσσονται σε ατομική κλίμακα μεταξύ των μορίων που απαρτίζουν την επιφάνεια της στερεάς φάσης και των μορίων που απαρτίζουν την υγρή φάση και εμφανίζονται σε όλα τα είδη εδαφικών υλικών. Η επιρροή και των δύο αυτών ειδών δυνάμεων είναι εμφανέστερη στην υγρή φάση που έχει προσροφηθεί στην επιφάνεια αργιλικών πλακιδίων, τα οποία έχουν και σημαντικά ηλεκτρικά φορτία και μεγάλη επίπεδη επιφάνεια σε σχέση με το μέγεθός τους. Η επιρροή και των ηλεκτρικών δυνάμεων και των δυνάμεων van der Waals μειώνεται ραγδαία με την αύξηση της απόστασης από την επιφάνεια των στερεών σωματιδίων (κόκκοι και πλακίδια). Γι' αυτόν το λόγο, όπως εξετάζεται αναλυτικά στην Παράγραφο 2.3.2.2 και στο Κεφάλαιο 4, τα φαινόμενα προσρόφησης έχουν μεγαλύτερη σημασία εκεί που το ποσοστό υγρασίας και ο βαθμός κορεσμού έχουν μικρές τιμές, οπότε η υγρή φάση των πόρων περιορίζεται σε λεπτές στρώσεις που περιβάλλουν τη στερεά φάση.

Τα ωσμωτικά φαινόμενα οφείλονται στην παρουσία διαλυμένων ουσιών στην υγρή φάση των πόρων των εδαφικών υλικών. Οι διαλυμένες ουσίες μπορούν να προκύψουν με δύο τρόπους: ως εξωτερικά παρεχόμενες διαλυμένες ουσίες που διεισδύουν στο νερό των πόρων με φυσικές διαδικασίες όπως η διάθηση και ως εσωτερικά παρεχόμενες διαλυμένες ουσίες που εμφανίζονται στο νερό των πόρων από διαδικασίες ανταλλαγής ιόντων από την κρυσταλλική δομή των αργίλων με μόρια του νερού των πόρων. Η παρουσία τέτοιων διαλυμένων ουσιών μέσα στην

υγρή φάση των πόρων μπορεί να μειώσει περαιτέρω το δυναμικό της ως προς το δυναμικό του ελεύθερου νερού κατά μία συνιστώσα γνωστή ως χημική.

Η αρνητική πίεση πόρων και η μύζηση που αναπτύσσεται μέσα σε ένα εδαφικό υλικό λόγω τριχοειδών φαινομένων και φαινομένων προσρόφησης είναι γνωστή ως *μύζηση εδαφικού σκελετού* (matric suction). Η αρνητική πίεση πόρων και η μύζηση που αναπτύσσεται μέσα σε ένα εδαφικό υλικό λόγω ωσμωτικών φαινομένων είναι γνωστή ως *ωσμωτική μύζηση* ή *ωσμωτικό δυναμικό* (osmotic suction ή osmotic potential). Για λόγους που εξετάζονται αναλυτικά στις §2.3.2.3 και 2.3.4, στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται η χρήση του όρου *ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης* και προτιμάται έναντι των προηγούμενων όρων (με προτεινόμενο αγγλικό όρο: *osmotic component of suction*). Η αρνητική πίεση πόρων και η μύζηση που αναπτύσσεται ως αποτέλεσμα όλων των προαναφερθέντων φαινομένων ονομάζεται *ολική μύζηση* (total suction). Επισημαίνεται ότι στην ελληνική γλώσσα απαντώνται και οι όροι *αναρρόφηση* και *απομύζηση* για την απόδοση του αγγλικού όρου suction. Ο όρος αναρρόφηση μάλιστα χρησιμοποιείται και στο Λεξικό Τεχνικών Όρων Εδαφομηχανικής-Θεμελιώσεων της Ελληνικής Επιστημονικής Εταιρείας Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων (1977). Ο όρος μύζηση ωστόσο είναι απλούστερος, έχει επικρατήσει από δεκαετίες στο χώρο της γεωπονικής επιστήμης, όπου υπάρχει πολύ μεγαλύτερη εμπειρία και στο συγκεκριμένο φυσικό μέγεθος και στη μέτρησή του με διάφορα όργανα, και επίσης δεν συνοδεύεται από την αρνητική έννοια με την οποία χρησιμοποιείται μεταφορικά το ουσιαστικό «απομύζηση» και το ρήμα «απομυζώ». Προκειμένου λοιπόν να διατηρηθεί η μεγαλύτερη δυνατή συμφωνία στη διεπιστημονική χρήση της ορολογίας και επειδή ο όρος μύζηση παρουσιάζεται γλωσσολογικά πιο σωστός σε σχέση με τον όρο απομύζηση, στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται και προτείνεται γενικά για χρήση ο όρος μύζηση για την απόδοση του αγγλικού όρου suction.

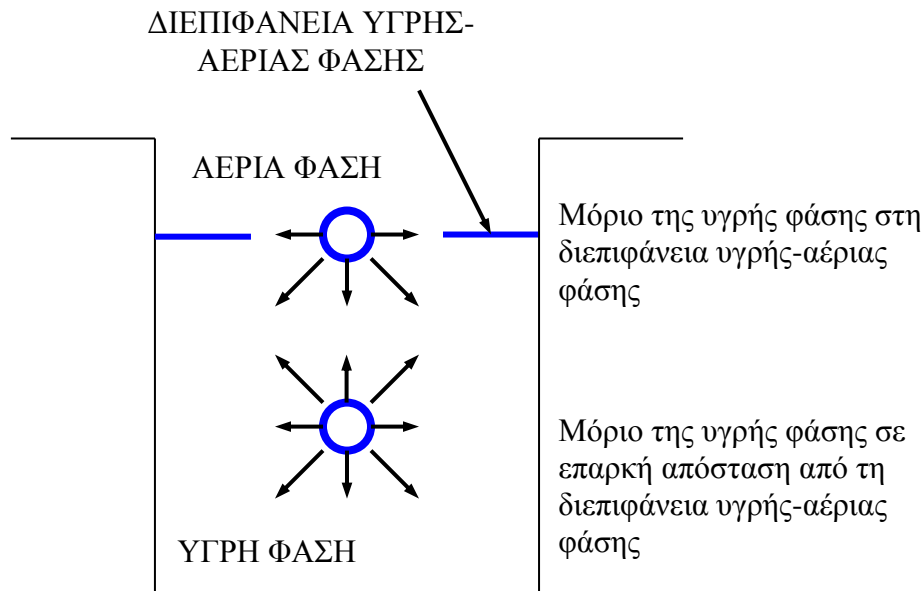
Στις υποπαραγράφους που ακολουθούν αναπτύσσεται περαιτέρω η επιρροή καθενός από τους παράγοντες που οδηγούν στην ανάπτυξη αρνητικής πίεσης πόρων ή μύζησης που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

#### 2.3.2.1 Επιρροή τριχοειδών φαινομένων

Στα μή κορεσμένα εδαφικά υλικά συνυπάρχει και η υγρή και η αέρια φάση των πόρων με αποτέλεσμα να δημιουργείται στην περιοχή της επαφής τους μία διεπιφάνεια υγρής-αέριας

φάσης. Βασικό χαρακτηριστικό της διεπιφάνειας αυτής είναι η ισορροπία δυνάμεων κατά μήκος της. Αυτή οφείλεται στις μοριακές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα μόρια της υγρής φάσης που βρίσκονται πολύ κοντά στη διεπιφάνεια αυτή και είναι διαφορετικές από τις δυνάμεις που ασκούνται στα μόρια της υγρής φάσης βαθύτερα μέσα σε αυτήν.

Σε ένα μόριο επαρκώς βαθύτερα από τη διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης ασκούνται δυνάμεις ευρισκόμενες σε ισορροπία μεταξύ τους σε όλες τις διευθύνσεις. Σε ένα μόριο της υγρής φάσης ευρισκόμενο στη διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης ωστόσο υπάρχουν δυνάμεις στην κατακόρυφη διεύθυνση που δεν βρίσκονται σε ισορροπία (Σχ. 2.8).



**Σχήμα 2.8.** Δυνάμεις που ασκούνται σε μόρια της υγρής φάσης ευρισκόμενα στη διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης και σε επαρκή απόσταση από αυτήν.

Για να μπορούν να βρίσκονται σε ισορροπία τα μόρια της υγρής φάσης στη διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης υπεισέρχεται η *επιφανειακή τάση* (surface tension),  $T_s$ , της υγρής φάσης (αφού της αέριας φάσης είναι πρακτικά αμελητέα) και η διεπιφάνεια καμπυλώνεται προς την πλευρά της φάσης που η πίεση είναι μικρότερη. Η επιφανειακή τάση έχει μονάδες δύναμης ανά μήκος και ουσιαστικά εκφράζει την αντίσταση σε διάρρηξη της διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης (όπως π.χ. σε μία ελαστική μεμβράνη). Όπως προκύπτει από τη γεωμετρία του Σχ. 2.9α η ισορροπία δυνάμεων εκφράζεται από την Εξ. 2.2:

$$2 T_s \sin \beta = \Delta u (2 R_s \sin \beta) \quad \text{ή} \quad 2 T_s \cos \alpha = \Delta u (2 R_s \cos \alpha) \quad (2.2)$$

όπου  $\alpha$  η γωνία καμπύλωσης της διεπιφάνειας (και  $\beta$  η συμπληρωματική της),  $R_s$  η ακτίνα καμπυλότητας του θεωρούμενου τμήματος σε ισορροπία, και  $2 R_s \cos \alpha$  (ή  $2 R_s \sin \beta$ ) το μήκος του καμπύλου τμήματος (με την καμπύλωση να υφίσταται σε επίπεδο μόνο και όχι στο χώρο). Αναδιατάσσοντας τους όρους της Εξ. 2.2 και με απαλοιφή των κοινών όρων στα δύο μέρη προκύπτει η Εξ. 2.3, η οποία εκφράζει τη διαφορά πίεσης στις δύο ρευστές φάσεις ως συνάρτηση της επιφανειακής τάσης και της ακτίνας καμπυλότητας της διεπιφάνειάς τους (για καμπύλωση σε δύο διαστάσεις).

$$\Delta u = \frac{T_s}{R_s} \quad (2.3)$$

Για καμπύλωση της διεπιφάνειας σε τρεις διαστάσεις (Σχ. 2.9β) τότε η διαφορά πίεσης ανάμεσα στις δύο ρευστές φάσεις εκφράζεται από την Εξ. 2.4 (Fredlund & Rahardjo, 1993, Lu & Likos, 2004), η οποία είναι γνωστή ως εξίσωση Young-Laplace (Young, 1805, Laplace, 1806):

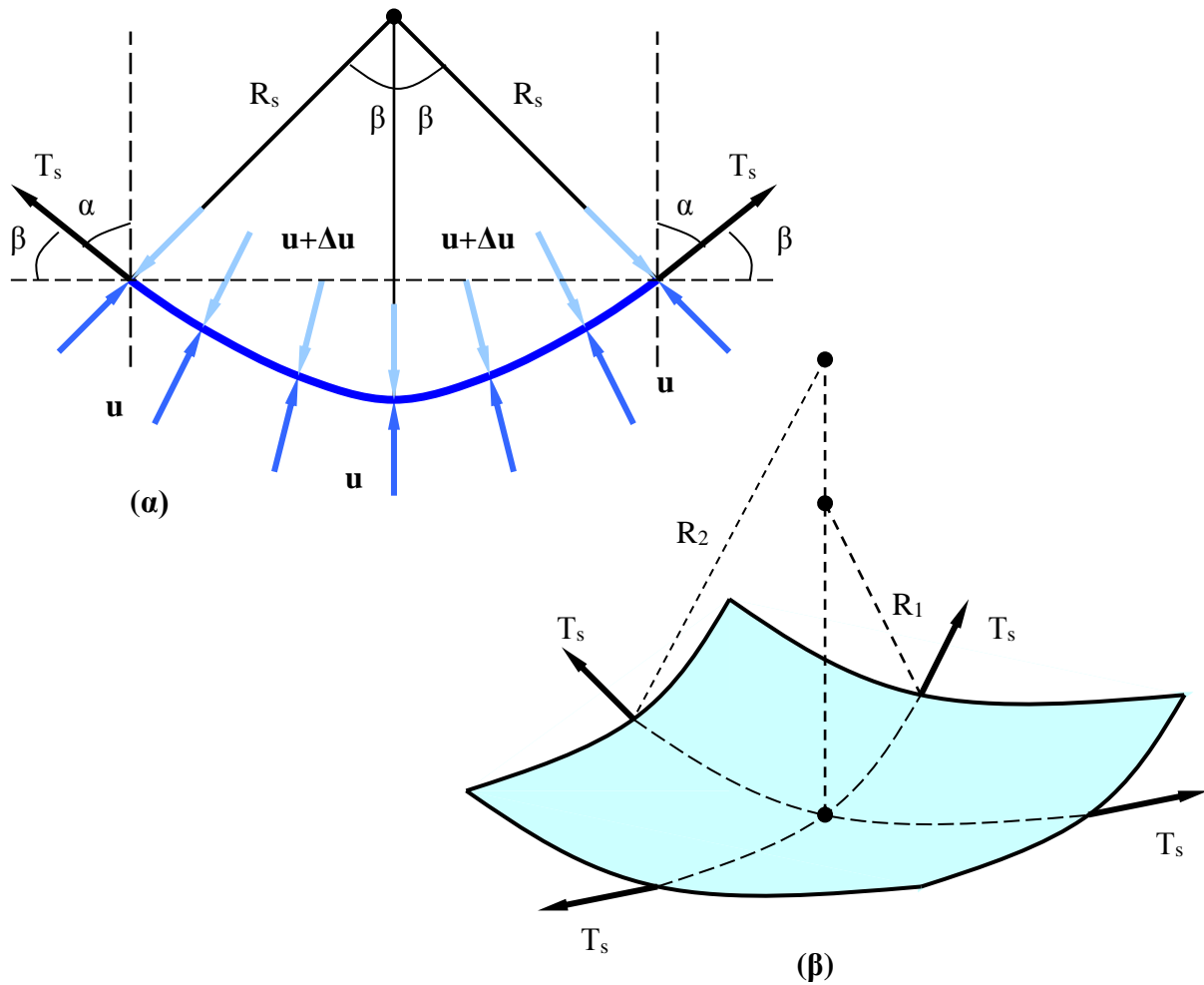
$$\Delta u = T_s \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.4)$$

όπου  $R_1$  και  $R_2$  είναι οι ακτίνες καμπυλότητας στις δύο διευθύνσεις. Στην περίπτωση που οι δύο ακτίνες καμπυλότητας είναι οι ίδιες τότε η Εξ. 2.4 εκφυλίζεται στην Εξ. 2.5:

$$\Delta u = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.5)$$

Σε ένα ιδεατό μη κορεσμένο έδαφος, χωρίς επιρροή δυνάμεων προσρόφησης μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης, όπου η πίεση της αέριας φάσης είναι  $u_a$ , μεγαλύτερη από την πίεση της υγρής φάσης  $u_w$ , και οι ακτίνες καμπυλότητας στα δύο επίπεδα είναι οι ίδιες, τότε η μύζηση εδαφικού σκελετού εκφράζεται από την Εξ. 2.6:

$$u_a - u_w = \frac{2T_s}{R_s} \quad (2.6)$$



**Σχήμα 2.9.** Διάγραμμα ελευθέρου σώματος καμπυλωμένης διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης α) σε δύο διαστάσεις, και β) σε τρεις διαστάσεις με διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας σε δύο επίπεδα.

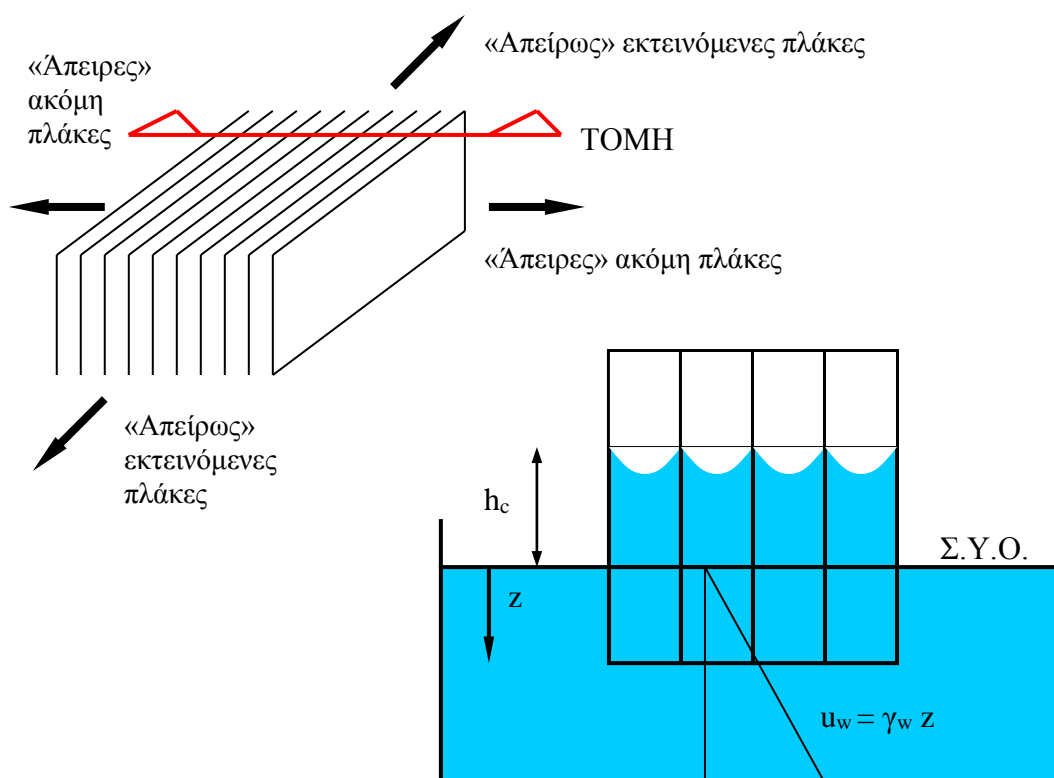
Η Εξ. 2.6 για ιδεατό μή κορεσμένο έδαφος εκφράζει τη μύζηση εδαφικού σκελετού ως συνάρτηση της φύσης της υγρής και της αέριας φάσης μέσω της επιφανειακής τάσης της διεπιφάνειάς τους και του μεγέθους των πόρων τους μέσω της ακτίνας καμπυλότητας της καμπυλωμένης διεπιφάνειας όπως καθορίζεται από το μέγεθος των πόρων.

Για να γίνουν τα προαναφερθέντα καλύτερα κατανοητά θα εξεταστεί ένα θεωρητικό προσομοίωμα των εδαφικών υλικών. Έστω ότι τα εδαφικά υλικά αποτελούνταν από παράλληλα διατεταγμένες συμπαγείς πλάκες, απείρως εκτεινόμενες, σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους, κατά τον τρόπο που φαίνεται στο Σχ. 2.10. Αν η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα βρισκόταν αρχικά στο ύψος  $h_c$  πάνω από τη στάθμη που φαίνεται στο Σχ. 2.10 και προοδευτικά άρχισε να χαμηλώνει, τότε η πίεση στην υγρή φάση θα γινόταν μικρότερη από την πίεση στην αέρια (έστω



η ατμοσφαιρική) και η ισορροπία μεταξύ δύο πλακών θα είχε όπως προκύπτει στην Εξ. 2.2, ενώ η διαφορά πίεσης μεταξύ υγρής και αέριας φάσης θα εκφραζόταν από την Εξ. 2.3. Στην τελική κατάσταση λοιπόν, μετά την ταπείνωση στάθμης του υπόγειου ορίζοντα στην τελική θέση και για ισορροπία δυνάμεων στο νερό που έχει απομείνει μεταξύ πλακών πάνω από τη νέα στάθμη του υπόγειου ορίζοντα θα πρέπει να ισχύει η Εξ. 2.7:

$$\Delta u = \gamma_w h_c \quad (2.7)$$



**Σχήμα 2.10.** Στάθμη υπόγειου ορίζοντα και ύψος τριχοειδούς ανύψωσης σε ιδεατό προσομοίωμα των πόρων του εδάφους από πλάκες.

η οποία εκφραζόμενη ως προς  $h_c$  και με αντικατάσταση του  $\Delta u$  από την Εξ. 2.3 οδηγεί στην Εξ. 2.8:

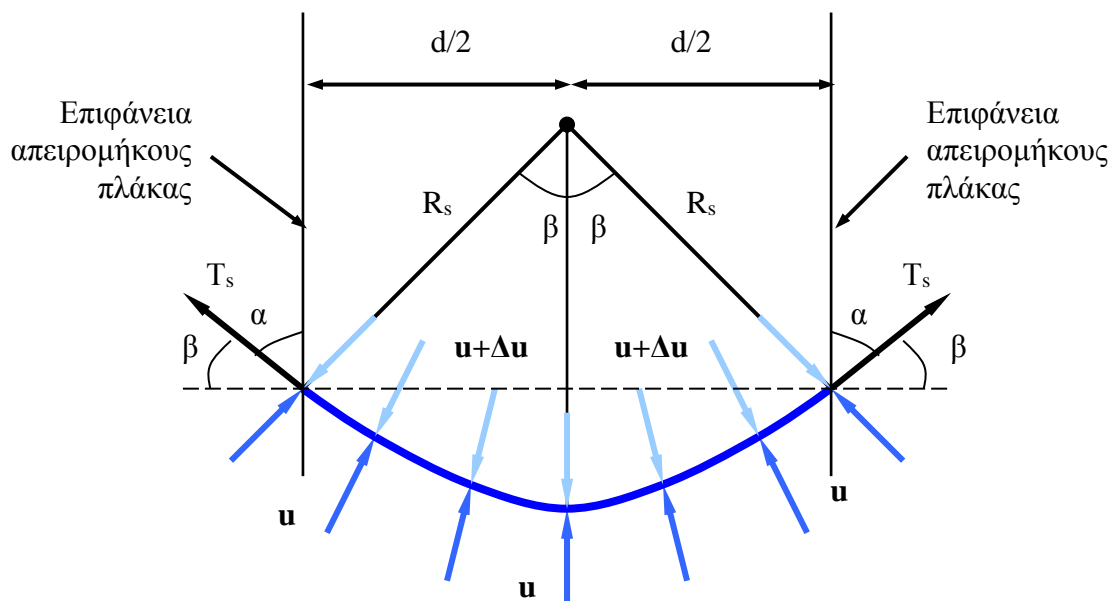
$$h_c = \frac{T_s}{\gamma_w R_s} \quad (2.8)$$

όπου  $R_s$  η ακτίνα καμπυλότητας της διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης. Αν είναι  $d$  η σταθερή απόσταση μεταξύ των πλακών, τότε, όπως προκύπτει από το Σχ. 2.11, η ακτίνα καμπυλότητας  $R_s$  μπορεί να εκφραστεί εύκολα ως συνάρτηση της απόστασης των πλακών και της γωνίας καμπύλωσης της διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης  $\alpha$  (Εξ. 2.9).

$$R_s = (d/2) / \cos \alpha \quad (2.9)$$

Αντικαθιστώντας την ακτίνα καμπυλότητας  $R_s$  από την Εξ. 2.9 στην Εξ. 2.8 προκύπτει η Εξ. 2.10.

$$h_c = \frac{2T_s \cos \alpha}{\gamma_w d} \quad (2.10)$$

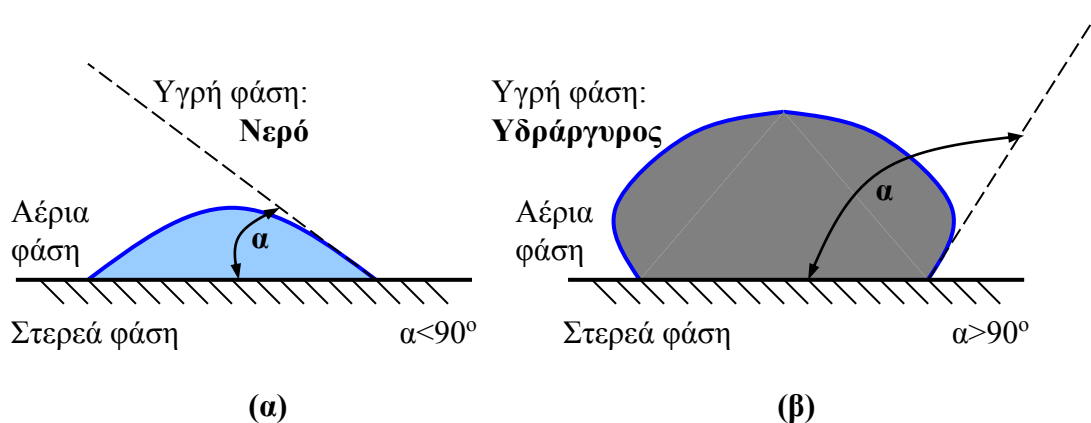


**Σχήμα 2.11.** Διάγραμμα ελευθέρου σώματος καμπυλωμένης διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης μεταξύ δύο διαδοχικών απειρομήκων πλακών.

Η Εξ. 2.10 εκφράζει για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών το ύψος μέχρι το οποίο οι «πόροι» του «εδάφους» παραμένουν εντελώς γεμάτοι με νερό ως αποτέλεσμα της διαφοράς πίεσης στην υγρή και την αέρια φάση, με την πίεση στην υγρή φάση να είναι μικρότερη από την πίεση στην αέρια. Δηλώνει επίσης ότι το ύψος αυτό πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα

είναι συνάρτηση της φύσης της υγρής φάσης, όπως εκφράζεται από το ειδικό βάρος του υγρού  $\gamma_w$  και την επιφανειακή του τάση  $T_s$ , της απόστασης των πλακών  $d$  και της αλληλεπίδρασης της στερεάς φάσης με την υγρή, όπως εκφράζεται από τη γωνία  $\alpha$ .

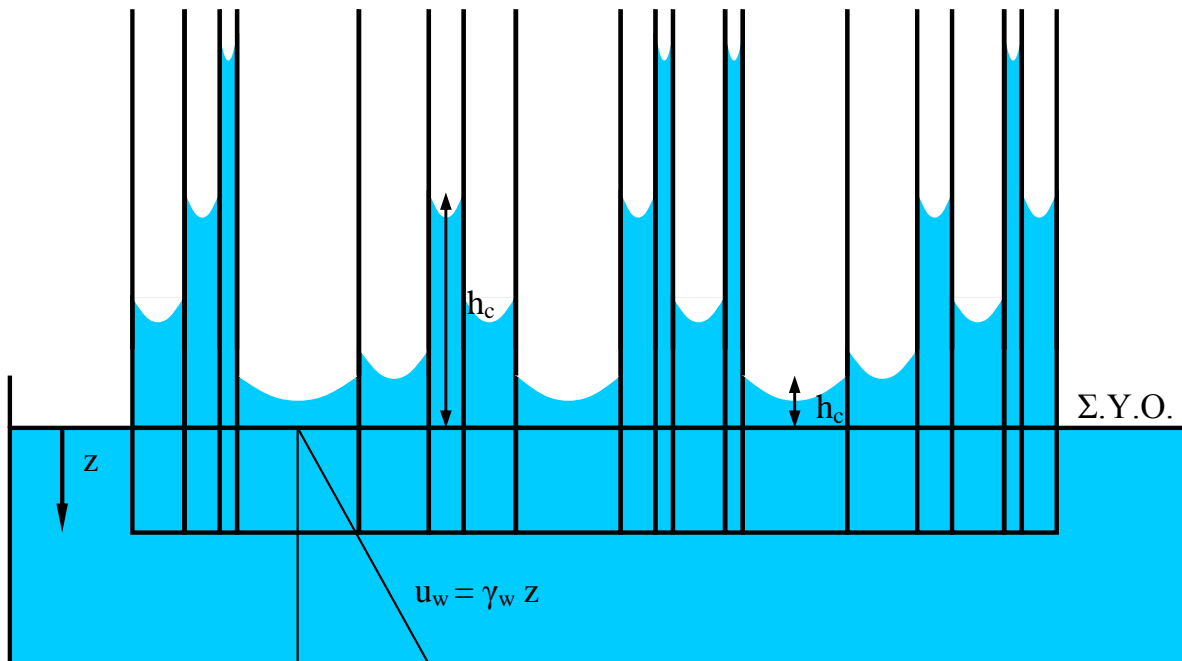
Η γωνία επαφής  $\alpha$  συνιστά εγγενή ιδιότητα ενός συστήματος αποτελούμενου από στερεά, υγρή και αέρια φάση (Lu & Likos, 2004). Προκειμένου για ένα μη κορεσμένο εδαφικό υλικό η γωνία  $\alpha$  ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της εφαπτομένης στη διεπιφάνεια αέριας-υγρής φάσης και της διεπιφάνειας υγρής-στερεάς φάσης, στο σημείο επαφής των δύο διεπιφανειών. Η επιφάνεια της στερεάς φάσης για τα περισσότερα υλικά που αποτελούν τη στερεά φάση στα εδάφη, είτε διαβρέχεται από την υγρή φάση (Σχ. 2.12α), όταν η υγρή φάση αποτελείται από νερό, είτε δεν διαβρέχεται από την υγρή φάση (Σχ. 2.12β), όταν η υγρή φάση αποτελείται από υδράργυρο (μέτρηση μεγέθους πόρων των εδαφών με διεϊσδυση υδραργύρου –mercury intrusion porosimetry). Στην πρώτη περίπτωση η γωνία επαφής  $\alpha$  είναι οξεία και στη δεύτερη αμβλεία, με την περίπτωση που η γωνία  $\alpha$  γίνεται ορθή να αφορά σε ουδέτερη αλληλεπίδραση υγρής-στερεάς φάσης ως προς τη διαβροχή. Οξεία γωνία επαφής αντιστοιχεί σε μικρότερη πίεση στην αέρια φάση από την υγρή (τριχοειδής ανύψωση –capillary rise) και αμβλεία στο αντίθετο (τριχοειδής ταπείνωση –capillary depression). Αναλυτικότερη ενασχόληση με τη γωνία επαφής  $\alpha$  μπορεί να βρεθεί στους Lu & Likos (2004), Letey et al. (1962), Kumar & Malik (1990) και De Bano (2000).



**Σχήμα 2.12.** Αλληλεπίδραση στερεάς-υγρής-αέριας φάσης σε μη κορεσμένο εδαφικό υλικό: α) με την υγρή φάση να αποτελείται από νερό (διαβρέχει την στερεά φάση), και β) την υγρή φάση να αποτελείται από υδράργυρο (δεν διαβρέχει την στερεά φάση).

Το σημαντικό σημείο που προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση όπως κατέληξε στην Εξ. 2.10 είναι ότι για το προσομοίωμα του εδάφους με απειρομήκειες πλάκες από το ίδιο υλικό σε σταθερή μεταξύ τους απόσταση είναι ότι το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης εξαρτάται μόνο από την απόσταση των πλακών και άρα θα είναι σταθερό, οπουδήποτε μέσα στο ιδεατό αυτό έδαφος αφού είναι σταθερή η απόσταση των πλακών (για δεδομένο υγρό των πόρων, υλικό κατασκευής των πλακών και συνθήκες πίεσης, υγρασίας και θερμοκρασίας στην περιβάλλουσα ατμόσφαιρα). Στην ιδεατή αυτή περίπτωση λοιπόν θα είχαμε τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα σε μία θέση, νερό έως το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης και από εκεί και πάνω μόνο αέρα (Σχ. 2.10).

Αντίθετα, αν στο προσομοίωμα της προηγούμενης περίπτωσης οι πλάκες δεν απείχαν σταθερή απόσταση μεταξύ τους αλλά μεταβλητή, κυμαινόμενη από πολύ μικρή έως πολύ μεγάλη, τότε εξαιτίας της ύπαρξης διαφορετικών αποστάσεων μεταξύ των πλακών, θα ήταν διαφορετικό και το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης από διάκενο σε διάκενο μεταξύ πλακών, ποικίλλοντας από πολύ μικρό, ίσως και μηδενικό εκεί που η απόσταση των πλακών θα ήταν πολύ μεγάλη (μεγάλοι πόροι του εδάφους), έως πολύ μεγάλο εκεί που η απόσταση των πλακών θα ήταν πολύ μικρή (μικροί πόροι του εδάφους) όπως φαίνεται στο Σχ. 2.13.



**Σχήμα 2.13.** Προσομοίωση της διαφορετικής ικανότητας συγκράτησης νερού των πόρων των εδαφικών υλικών μέσω του διαφορετικού ύψους τριχοειδούς ανύψωσης σε ιδεατό προσομοίωμα από πλάκες σε διαφορετική απόσταση μεταξύ τους.

Το παράδειγμα αυτό επιτρέπει να φανταστούμε τι συμβαίνει στο εσωτερικό της ιδιαίτερα πιο πολύπλοκης διάταξης των σωματιδίων των πραγματικών εδαφών (κόκκων και πλακιδίων), καταρχάς σε ό,τι αφορά την ποικιλία ως προς το μέγεθος των πόρων που δημιουργούνται. Αν η κοκκομετρική διαβάθμιση του εδαφικού υλικού είναι τέτοια που να εξασφαλίζει πρακτικά ομοιογενές μέγεθος πόρων, τότε πράγματι καθώς απομακρυνόμαστε προς τα πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα, μέχρι ένα ύψος το εδαφικό υλικό θα είναι πλήρως κορεσμένο (το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης για το κυρίαρχο μέγεθος πόρων) και από αυτό το ύψος και πάνω προοδευτικά θα αρχίσει να εξέρχεται το νερό των πόρων αρκετά ραγδαία (θεωρητικά αμέσως) λόγω της έλλειψης ποικιλίας μεγεθών πόρων.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση εδαφικών υλικών με κοκκομετρική διαβάθμιση τέτοια που να οδηγεί σε πόρους διαφορετικού μεγέθους εντός του εδαφικού υλικού, αρχικά το εδαφικό υλικό παραμένει πλήρως κορεσμένο μέχρι το ύψος από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο μέγεθος πόρων. Στη συνέχεια, όσο το ύψος από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα μεγαλώνει, στραγγίζουν προοδευτικά και οι μικρότεροι πόροι και οι εσοχές των μεγαλύτερων πόρων, οδηγώντας σε αργή και όχι ραγδαία απώλεια ύδατος από τους πόρους με την περαιτέρω αύξηση του ύψους από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Και αυτή η περίπτωση προσομοιώνεται από το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους.

Οι περιορισμοί των θεωρητικών αυτών προσομοιωμάτων της επίδρασης των τριχοειδών φαινομένων αφορούν στη γεωμετρική προσομοίωση του σχήματος των πόρων του εδαφικού υλικού, αφού το νερό μπορεί να εξέλθει από τους πόρους αλλά όχι από τις παρυφές τους, όπου οι αποστάσεις μεταξύ των κόκκων και των πλακιδίων είναι μικρότερες και ως εκ τούτου σε εκείνα τα σημεία των πόρων είναι διαφορετικές οι αποστάσεις που υπεισέρχονται. Θα πρέπει να απομακρυνθούμε δυσανάλογα πολύ σε σχέση με πριν από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα για να εξέλθει το νερό και από εκεί.

Επεκτείνοντας το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών στη συσχέτιση παρουσίας νερού και πίεσης προκύπτει το Σχ. 2.14. Στο Σχ. 2.14α παρουσιάζεται η κατανομή της πίεσης στο νερό μεταξύ των πλακών στο προσομοίωμα με τις πλάκες σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και κάτω η πίεση του νερού είναι θετική και από εκεί και πάνω η πίεση είναι αρνητική μέχρι την τιμή που αντιστοιχεί στο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης  $h_c$ . Συσχετίζοντας την ποσότητα νερού που περιέχεται μεταξύ των πλακών πάνω από τη στάθμη του

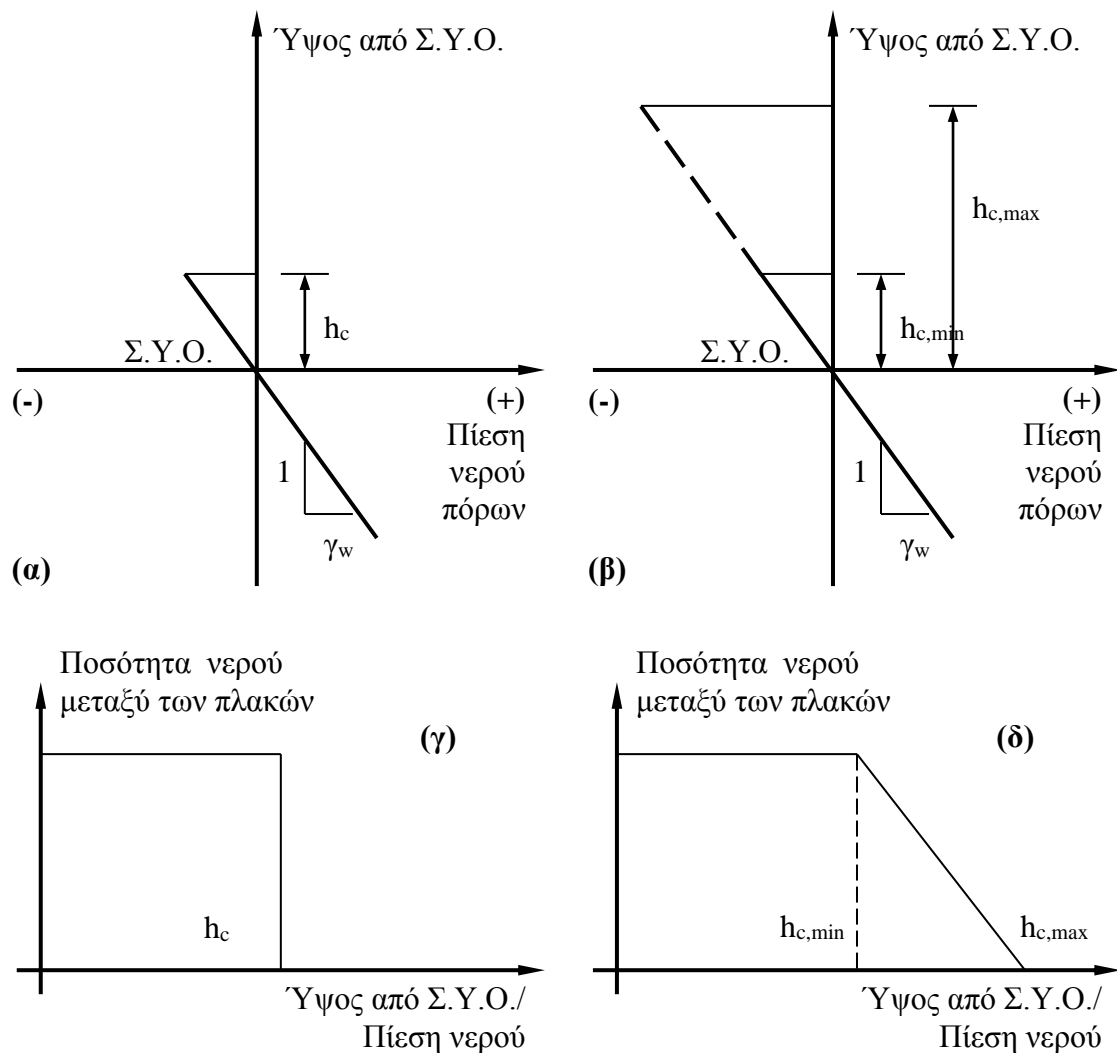
υπόγειου ορίζοντα με το ύψος από τη στάθμη αυτή (ή αντίστοιχα την πίεση στην οποία αντιστοιχεί αυτό το ύψος) προκύπτει το Σχ. 2.14γ για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Αντίστοιχα για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους, στο Σχ. 2.14β παρουσιάζεται η κατανομή της πίεσης στο νερό μεταξύ των πλακών. Η διαφορά με την προηγούμενη περίπτωση είναι ότι από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και πάνω η πίεση είναι αρνητική με νερό να υπάρχει σε όλα τα κενά μέχρι την τιμή που αντιστοιχεί στο ελάχιστο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης  $h_{c,min}$  και στα κενά μικρότερης απόστασης πλακών μέχρι το μέγιστο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης  $h_{c,max}$  που αντιστοιχεί στην ελάχιστη απόσταση μεταξύ των πλακών. Κατά συνέπεια από το ύψος  $h_{c,min}$  (ή την πίεση που αντιστοιχεί σε αυτό) και πάνω, η μέση ποσότητα νερού που περιέχεται μεταξύ των πλακών δεν μηδενίζεται όπως στο Σχ. 2.14γ αλλά μειώνεται προοδευτικά μέχρι το ύψος  $h_{c,max}$  όπως φαίνεται στο Σχ. 2.14δ (η μείωση αυτή απεικονίζεται ενδεικτικά γραμμική – προφανώς θα είναι μη γραμμική με τα κοίλα στραμμένα προς τα πάνω ή προς τα κάτω αν κυριαρχούν οι μικρότερες αποστάσεις πλακών ή οι μεγαλύτερες αποστάσεις αντίστοιχα).

Η γραφική απεικόνιση της μέσης ποσότητας του νερού με το ύψος από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα/πίεση του νερού αποτελεί την εισαγωγή στη *χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού* που αποτελεί τη βασική έννοια για την περιγραφή της φύσης και της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών (ιδέ §2.4).

Μία βασική παραδοχή που έγινε επίσης για τη χάραξη των διαγραμμάτων στο Σχ. 2.14, είναι ότι κατά την απώλεια ύδατος δεν συμβαίνει οποιαδήποτε μείωση του συνολικού όγκου (συρρίκνωση -shrinkage). Μια τέτοια μεταβολή θα επέβαλε επιπλέον μείωση της ποσότητας νερού που δείχνεται στα Σχ. 2.14γ και 2.14δ, ακόμα και κατά το στάδιο πριν το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης.

Παρόμοια θεωρητικά προσομοιώματα της απώλειας ύδατος με την απομάκρυνση από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα με το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε σταθερή ή διαφορετική απόσταση μεταξύ τους έχουν διατυπωθεί και με τριχοειδείς σωλήνες της ίδιας ή διαφορετικής διαμέτρου αλλά και με σφαίρες σταθερής ή διαφορετικής διαμέτρου σε διατάξεις μέγιστης και ελάχιστης πυκνότητας (ενδεικτικά: Fredlund & Rahardjo, 1993, Lu & Likos, 2004). Για τα προσομοιώματα αυτά έχουν προσδιοριστεί θεωρητικές συσχετίσεις της διαφοράς της πίεσης στην αέρια και την υγρή φάση και το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης, παρόμοιες με την Εξ. 2.10. Συγκρινόμενα με το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών αποδίδουν πιστότερα τον τρόπο

απώλειας ύδατος σε κοκκώδη εδάφη με στρογγυλεμένους κόκκους ενώ αντίθετα το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών αποδίδει πιστότερα, σε ό,τι αφορά τη γεωμετρία, τον τρόπο απώλειας ύδατος σε συσσωματώματα αργιλικών πλακιδίων περίπου παράλληλα διατεταγμένα μεταξύ τους. Η σύγκριση μεταξύ των σχέσεων και η αξιολόγηση των προσομοιωμάτων αυτών θεωρείται ότι σε αυτό το σημείο δεν έχει νόημα, αφού βασικός σκοπός της ανάπτυξης του προσομοιώματος των απειρομήκων πλακών είναι η επίδειξη του τρόπου απώλειας ύδατος στην μή κορεσμένη ζώνη του εδάφους και η εισαγωγή στη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού παρά η ανάπτυξη μίας θεωρητικής συσχέτισης για το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης.



**Σχήμα 2.14.** Κατανομές πίεσης του νερού με την απόσταση από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα και του περιεχόμενου νερού με το ύψος από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε σταθερή απόσταση (α, γ) και σε διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους (β, δ).

### 2.3.2.2 Επιρροή ηλεκτρικών δυνάμεων και δυνάμεων van der Waals

Στα πλαίσια του προσομοιώματος των απειρομήκων πλακών δεν έχουν υπεισεέλθει καθόλου μέχρι αυτό το σημείο οι ιδιαιτερότητες των ορυκτών που αποτελούν τους κόκκους και τα πλακίδια των εδαφικών υλικών. Οι απειρομήκεις πλάκες δηλαδή θεωρήθηκε ότι αποτελούνται από υλικό τέτοιο που δεν υπάρχει κάποια ιδιαιτερότητα κατά την επαφή των μορίων της επιφάνειάς τους με τα μόρια του νερού πλην της διαβροχής ή μή της στερεάς φάσης από την υγρή. Αυτό είναι επαρκές για να προσομοιώσει τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν οι κόκκοι των χονδρόκοκκων εδαφικών υλικών με το νερό των πόρων τους και είναι γνωστό ως *τριχοειδές προσομοίωμα* (capillary model).

Όπως προαναφέρθηκε όμως, στα εδαφικά υλικά αναπτύσσονται ηλεκτρικές δυνάμεις και δυνάμεις van der Waals. Τα πεδία των δυνάμεων αυτών είναι ισχυρά σε πολύ μικρή απόσταση από τη διεπιφάνεια στερεάς και υγρής φάσης και έχουν μεγαλύτερη σημασία για λεπτόκοκκα εδάφη, όπου η αναλογία των διαστάσεων των πλακιδίων πλέον –και όχι κόκκων- ευνοεί την ανάπτυξη εντονότερων τέτοιων δυνάμεων.

Οι ηλεκτρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται οφείλονται στα ηλεκτρικά πεδία που προκαλούνται από την αρνητική φόρτιση στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων. Η επιφάνεια των αργιλικών ορυκτών που αποτελούν τα πλακίδια των αργιλικών εδαφών είναι ηλεκτρικά φορτισμένη με θετικά φορτία να αναπτύσσονται κατά μήκος της περιμέτρου των πλακιδίων και αρνητικά φορτία να αναπτύσσονται επί της επιφάνειάς τους. Το αποτέλεσμα είναι τα ηλεκτρικά φορτισμένα δίπολα των μορίων του νερού να έλκονται από την αρνητικά φορτισμένη επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων και να προσκολλώνται σε αυτήν σχηματίζοντας τη διπλή στρώση του *προσροφημένου νερού* (adsorbed water) εκατέρωθεν των αργιλικών πλακιδίων (Terzaghi, 1928, Grim, 1968), η οποία με τη σειρά της περιβάλλεται από το *απορροφημένο νερό* (absorbed water) που συνδέεται με το νερό στην προσροφημένη στρώση (επίσης συγκρατούμενο με ηλεκτροστατικής φύσης δυνάμεις στο προσροφημένο νερό και όχι τα αργιλικά πλακίδια). Γύρω από αυτό υπάρχει το *ελεύθερο νερό* (free water) –βλ. εισαγωγή §2.3.2. Ο Bolt (1956) χρησιμοποίησε τη θεωρία αυτή για να εξηγήσει τους λόγους της παρουσίας νερού πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα σε αργιλικά εδάφη καθώς και της συρρίκνωσης των αργίλων κατά την ξήρανση. Το νερό που μπορεί να απομακρυνθεί από τα αργιλικά εδάφη κατά τον Bolt (1956) είναι το ελεύθερο νερό.



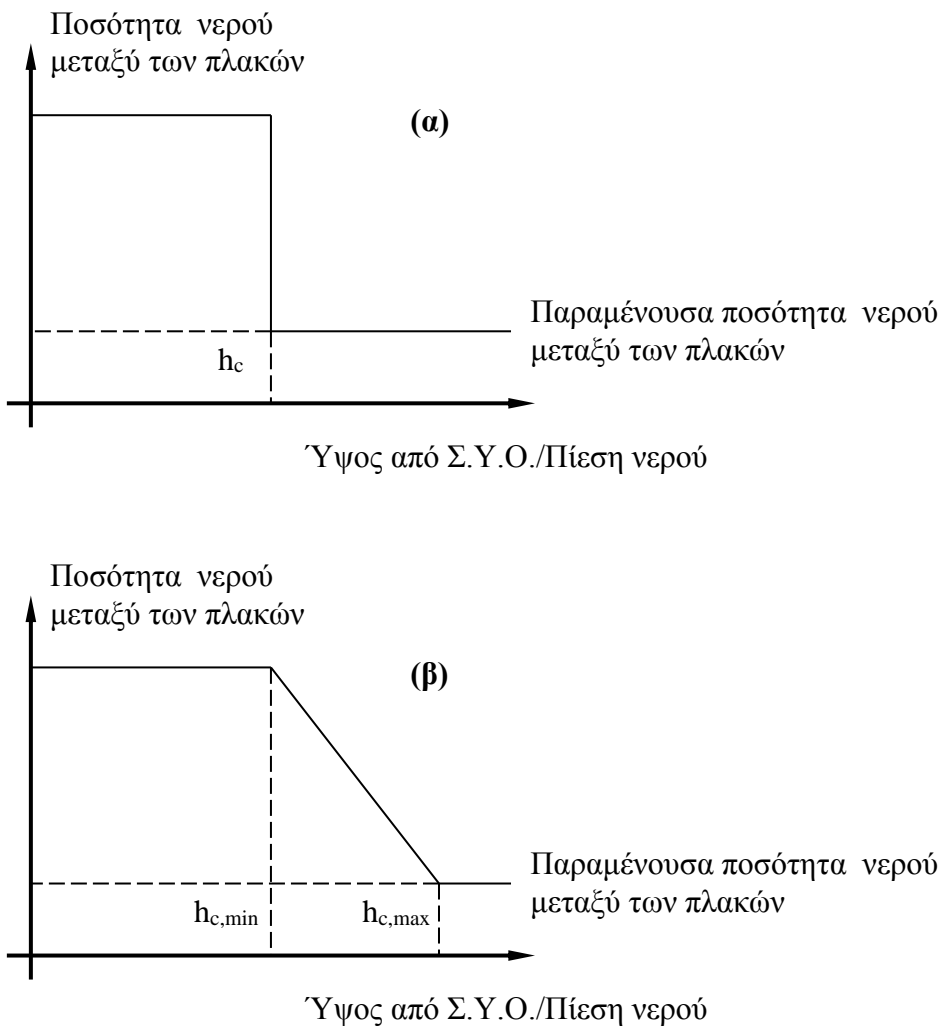
Οι δυνάμεις van der Waals οφείλονται στην αλληλεπίδραση δυνάμεων που αναπτύσσονται σε ατομική κλίμακα μεταξύ των μορίων που απαρτίζουν την επιφάνεια της στερεάς φάσης και των μορίων που απαρτίζουν την υγρή φάση και εμφανίζονται σε όλα τα είδη των εδαφικών υλικών.

Η επιρροή και των δύο αυτών ειδών δυνάμεων είναι εμφανέστερη στην υγρή φάση που έχει προσροφηθεί στην επιφάνεια αργιλικών πλακιδίων, τα οποία έχουν και σημαντικά ηλεκτρικά φορτία και μεγάλη επίπεδη επιφάνεια σε σχέση με το μέγεθός τους. Η επιρροή και των ηλεκτρικών δυνάμεων και των δυνάμεων van der Waals μειώνεται ραγδαία με την αύξηση της απόστασης από την επιφάνεια των στερεών σωματιδίων (κόκκοι και πλακίδια).

Αν αναλογιστούμε λοιπόν την επιρροή των δυνάμεων αυτών στα εδαφικά υλικά, είναι λογικό να είναι εντονότερη η επίδρασή τους εκεί που οι πόροι των εδαφικών υλικών είναι μικρότεροι, αφού αυτοί εμφανίζονται εκεί που είναι πιο λεπτόκοκκα τα εδάφη, ή στις παρυφές και εσοχές πόρων, όπου αναμένεται πάλι να είναι μεγαλύτερη η επίδραση αυτών των δυνάμεων. Γι' αυτό λοιπόν το λόγο, τα φαινόμενα προσρόφησης έχουν μεγαλύτερη σημασία εκεί που το ποσοστό υγρασίας και ο βαθμός κορεσμού έχουν μικρές τιμές, οπότε η υγρή φάση των πόρων περιορίζεται σε λεπτές στρώσεις που περιβάλλουν τη στερεά φάση. Οι λεπτές αυτές στρώσεις είτε δεν μπορούν να απομακρυνθούν από την επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων, είτε για να απομακρυνθούν, η μύζηση πρέπει να γίνει δυσανάλογα μεγάλη για την απομάκρυνση της ίδιας ποσότητας νερού σε σχέση με εκείνη που απαιτείται για την απομάκρυνση της ίδιας ποσότητας νερού εκεί που κυριαρχούν τα τριχοειδή φαινόμενα (μεγαλύτεροι πόροι).

Εισάγοντας τη λεπτή αυτή στρώση στο προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών (είτε σε σταθερή, είτε σε διαφορετική απόσταση), πάνω από το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης υπάρχει μία μικρή ποσότητα νερού που αντιστοιχεί σε μία λεπτή στρώση νερού κατά μήκος των πλακών, η παρουσία της οποίας δεν καθορίζεται από τα τριχοειδή φαινόμενα, αλλά από την ύπαρξη των ηλεκτρικών δυνάμεων και των δυνάμεων van der Waals κατά μήκος των πλακών. Τότε, τα Σχ. 2.14γ και 2.14δ τροποποιούνται όπως φαίνεται στα Σχ. 2.15α και 2.15β αντίστοιχα. Ακόμα δηλαδή και αν η απώλεια ύδατος είναι ραγδαία (θεωρητικά άμεση) μετά το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης  $h_c$ , όπως στο προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους, ή βαθμιαία όπως στο προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών σε διαφορετική απόσταση, η ποσότητα του νερού στους πόρους του ιδεατού εδάφους δεν μηδενίζεται αλλά σταθεροποιείται σε μία πολύ μικρή τιμή που αντιστοιχεί στις λεπτές προσροφημένες στρώσεις της υγρής φάσης κατά μήκος των πλακών ανεξαρτήτως ύψους από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Υπάρχει λοιπόν

μία ποσότητα νερού, η οποία όσο κι αν απομακρυνθούμε από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα ή όσο κι αν αφήσουμε το εδαφικό υλικό να ξεραθεί υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες δεν θα απομακρυνθεί. Το ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί σε αυτήν την ποσότητα νερού ονομάζεται *παραμένον ποσοστό υγρασίας* (residual water content), με τα φυσικά μεγέθη που αντιστοιχούν στην κατάσταση αυτή να φέρουν την αντίστοιχη ονομασία (*παραμένον βαθμός κορεσμού, παραμένον λόγος κενών κλπ*).



**Σχήμα 2.15.** Κατανομές του περιεχόμενου νερού με το ύψος από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα ή την αντίστοιχη πίεση νερού όταν υπάρχει λεπτή στρώση λόγω ηλεκτρικών δυνάμεων και δυνάμεων van der Waals για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών (α) σε σταθερή απόσταση και (β) σε διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ τους.

### 2.3.2.3 Επιρροή ωσμωτικών φαινομένων

Στην Παρ. 2.3.2.2 έγινε αναφορά στις στρώσεις του προσροφημένου και του απορροφημένου νερού και την παρουσία του ελεύθερου νερού πέραν αυτών. Κατά τον Bolt (1956), το ελεύθερο νερό είναι το μόνο το οποίο μπορεί να διαφύγει από ένα εδαφικό υλικό. Αν τώρα σε ένα πραγματικό εδαφικό υλικό, πέρα από τη στρώση του απορροφημένου νερού υπάρχει νερό με άλατα σε διάλυση υπό δεδομένη κάθε φορά συγκέντρωση, το νερό αυτό θα βρίσκεται σε χημική ισορροπία με το απορροφημένο νερό για τη συγκεκριμένη συγκέντρωση αλάτων. Αν η ποσότητα του νερού αλλάξει (εξάτμιση ή απώλειά του κατά την ξήρανση υπό την επιρροή τριχοειδών φαινομένων) τότε διαταράσσεται η χημική αυτή ισορροπία μεταξύ ελεύθερου νερού και απορροφημένου νερού (αφού άλλαξε η συγκέντρωση του ελεύθερου νερού) και για να αποκατασταθεί, μόρια νερού πρέπει να περάσουν από τη στρώση του απορροφημένου νερού στο ελεύθερο νερό πέραν αυτής. Η κίνηση αυτή μορίων νερού οδηγεί αφενός στη μείωση του πάχους της στρώσης του απορροφημένου νερού και αφετέρου στην αύξηση των ελκτικών δυνάμεων που ασκεί η στρώση του προσροφημένου νερού. Αποτέλεσμα και των δύο αυτών φαινομένων είναι η μείωση της απόστασης των αργιλικών πλακιδίων που διαπιστώνεται μακροσκοπικά ως μείωση του ολικού όγκου των αργίλων κατά την ξήρανση, γνωστή και ως συρρίκνωση. Η θεωρία αυτή εξηγεί την παρουσία μίας επιπλέον συνιστώσας των δυνάμεων που δρουν στο νερό που περιέχεται στους πόρους αργιλικών εδαφών και το εμποδίζουν να διαφύγει από αυτούς υπό οποιαδήποτε αιτία προκαλεί ξήρανση. Εξηγεί επίσης και τους λόγους της συρρίκνωσης των αργίλων κατά την ξήρανση, αφού η προκαλούμενη μείωση του πάχους της στρώσης του απορροφημένου νερού είναι αυτή που φέρνει πιο κοντά τα αργιλικά πλακίδια προκαλώντας τη μείωση του ολικού όγκου. Περισσότερα για το προσομοίωμα αυτό, που είναι γνωστό ως *ωσμωτικό* (osmotic model), και συνολικά τη θεωρία του προσροφημένου και απορροφημένου νερού μπορούν να βρεθούν στους Grim (1968), Ridley (1993) και Marshall et al. (1996), ενώ η επιρροή των ωσμωτικών φαινομένων αναπτύσσεται περισσότερο στην §2.3.4.

### 2.3.2.4 Επιρροή περιβαλλοντικών παραγόντων-Η εξίσωση Kelvin

Μέχρι αυτό το σημείο χρησιμοποιήθηκαν δύο διαδεδομένα φυσικά προσομοιώματα (τριχοειδές –με ή χωρίς την επιρροή των ηλεκτρικών δυνάμεων και των δυνάμεων van der Waals- και ωσμωτικό) για να περιγράψουν τον τρόπο με τον οποίο είναι δυνατόν να βρεθεί νερό και πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Κατά την περιγραφή και των δύο προσομοιωμάτων η

στάθμη του υπόγειου ορίζοντα θεωρήθηκε σταθερή και περιγράφηκαν οι συνθήκες υπό τις οποίες αυτή βρίσκεται σε ισορροπία με το καθεστώς της πίεσης του νερού των πόρων που αναπτύσσεται πάνω από αυτήν, κατά την επέκταση της υδροστατικής κατανομής της πίεσης πόρων που υπάρχει κάτω από αυτήν (στην περίπτωση που δεν υπάρχει –τουλάχιστον σημαντική– ροή του νερού των πόρων).

Κάθε παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει την ισορροπία αυτή αποτελεί και παράγοντα που επηρεάζει την παρουσία του νερού στην ζώνη του εδάφους πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Έτσι εκτός από την προφανή επιρροή της ταπείνωσης ή ανύψωσης του υπόγειου ορίζοντα λόγω απώλειας ή παροχής ύδατος σε αυτόν μέσω υπόγειας κίνησης του νερού, η μεταβολή της θερμοκρασίας ή της πίεσης ή της σχετικής υγρασίας στον ατμοσφαιρικό αέρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους είναι επίσης λόγος που μπορεί να προκαλέσει μεταβολή της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα και άρα της παρουσίας του νερού στους πόρους του εδάφους πάνω από αυτήν (και της εντατικής κατάστασης στο νερό των πόρων).

Ο Kelvin (1871)<sup>5</sup> διατύπωσε την ομώνυμη εξίσωση, η οποία συσχετίζει τη μεταβολή της πίεσης κάθετα σε μία καμπυλωμένη διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης με την πίεση των ατμών στην αέρια φάση. Προκειμένου για έναν τριχοειδή σωλήνα, την υγρή φάση να αποτελείται από νερό και την αέρια από τον ατμοσφαιρικό αέρα, η εξίσωση του Kelvin διατυπώνεται ως εξής (Εξ 2.11):

$$\mu_1 - \mu_0 = -R T \ln \frac{u_{u1}}{u_{u0}} = \frac{2T_s v_w \cos \alpha}{r} \quad (2.11)$$

όπου  $\mu_1 - \mu_0$  είναι η μεταβολή στο χημικό δυναμικό των υδρατμών στον τριχοειδή σωλήνα λόγω της καμπύλωσης της διεπιφάνειας νερού-αέρα ( $\mu_0$  είναι το χημικό δυναμικό του ελεύθερου νερού ως σημείο αναφοράς και  $\mu_1$  είναι το χημικό δυναμικό στην επικρατούσα κατάσταση),  $R$  είναι η παγκόσμια σταθερά των ιδανικών αερίων,  $T$  η θερμοκρασία εκφρασμένη σε βαθμούς Kelvin,  $u_{u0}$  είναι η κορεσμένη πίεση υδρατμών σε ισορροπία με το ελεύθερο νερό σε θερμοκρασία  $T$ ,  $u_{u1}$  είναι η επικρατούσα πίεση υδρατμών στον τριχοειδή σωλήνα,  $T_s$  είναι η επιφανειακή τάση του νερού, και  $v_w$  ο μερικός μοριακός όγκος των υδρατμών. Όταν η αέρια

<sup>5</sup> Πρόκειται για τον Λόρδο Kelvin, το πραγματικό όνομα του οποίου ήταν William Thomson. Στη βιβλιογραφία εμφανίζεται με το πραγματικό του όνομα.

φάση είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας και υγρή φάση το νερό όπως εδώ, ο λόγος  $\frac{u_{u1}}{u_{u0}}$  είναι η σχετική υγρασία RH. Σε αντιστοιχία με την Εξ. 2.6, η διαφορά πίεσης της αέρας και της υγρής φάσης σε τριχοειδείς σωλήνες ακτίνας  $r$  εκφράζεται από την Εξ. 2.12:

$$u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad (2.12)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. 2.11 και 2.12 προκύπτει η Εξ. 2.13 η οποία εκφράζει τη διαφορά της πίεσης στον αέρα και στο νερό μέσα σε ένα τριχοειδή σωλήνα (και άρα κατ' επέκταση το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης εντός αυτού) ως συνάρτηση των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στον αέρα (της μεν θερμοκρασίας άμεσα και έμμεσα μέσω της επιρροής της στα άλλα μεγέθη, της δε πίεσης έμμεσα μόνο μέσω της επιρροής της στη σχετική υγρασία και στο μερικό μοριακό όγκο των ατμών της υγρής φάσης).

$$u_a - u_w = - \frac{RT}{v_w} \ln \frac{u_{u1}}{u_{u0}} = - \frac{RT}{v_w} \ln (RH) = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad (2.13)$$

Η Εξίσωση του Kelvin έχει πολύ μεγάλη θεωρητική και πρακτική σημασία. Παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο για την εξήγηση της συσχέτισης ανάμεσα στα φαινόμενα που επικρατούν στην ατμόσφαιρα και το νερό των πόρων στα μή κορεσμένα εδάφη. Επιτρέπει δε πρακτικές εφαρμογές όπως τη μέτρηση της μύζησης μέσω της μέτρησης της σχετικής υγρασίας, ή τον έλεγχο της μέσω του ελέγχου της σχετικής υγρασίας (ιδέ αναλυτικότερη εξήγηση των εφαρμογών αυτών στα Κεφ. 3 και 4).

### 2.3.3 Εξέλιξη της συνύπαρξης υγρής και αέρας φάσης με την αύξηση της απόστασης από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα

Μετά από την αναφορά στα διάφορα προσομοιώματα που περιγράφουν τους λόγους εμφάνισης ύδατος πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα εξετάζεται μία πραγματική στήλη εδαφικού υλικού όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχ. 2.16β. Στη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα το εδαφικό υλικό είναι πλήρως κορεσμένο με τη διάταξη των κόκκων και πλακιδίων που απεικονίζεται στη θέση αυτή της στήλης του εδαφικού υλικού, η οποία στη συνέχεια θα

υποθεθεί σταθερή κατά μήκος της στήλης. Η πίεση του νερού των πόρων στη θέση αυτή είναι 0 όπως φαίνεται στο Σχ. 2.16α που απεικονίζει την εξέλιξη της πίεσης των πόρων με την απόσταση από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Αντιστοίχως ο βαθμός κορεσμού είναι 100% και το ποσοστό υγρασίας έχει μία αρχική τιμή που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο εδαφικό υλικό όπως φαίνεται στο Σχ. 2.16β που απεικονίζει την εξέλιξη των μεγεθών αυτών με την απόσταση από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα.

Τα εδαφικά υλικά έχουν μέσα στη μάζα τους κόκκους και πλακίδια ποικιλίας μεγεθών που σχηματίζουν «απειρία» διαφορετικών μεγεθών των κενών μεταξύ τους (μέσα σε κάποιο εύρος τιμών για το κάθε εδαφικό υλικό) και άρα, με βάση όσα προαναφέρθηκαν για το προσομοίωμα των απειρομήκων πλακών, «απειρία» τιμών ύψους τριχοειδούς ανύψωσης. Η απειρία αυτών των μεγεθών των κενών τους ωστόσο, θα έχει μία μέγιστη τιμή στην οποία θα αντιστοιχεί μία ελάχιστη τιμή του ύψους τριχοειδούς ανύψωσης. Η τιμή αυτή του ύψους τριχοειδούς ανύψωσης θα είναι εκείνη που αντιστοιχεί στον εδαφικό σχηματισμό στο σύνολό του. Μέχρι αυτήν την τιμή του ύψους τριχοειδούς ανύψωσης, το εδαφικό υλικό θα είναι πλήρως κορεσμένο, αφού όλα του τα κενά θα είναι γεμάτα με νερό, με το νερό των πόρων του να βρίσκεται υπό αρνητική πίεση και αυτή να ακολουθεί την υδροστατική κατανομή, εφόσον δεν έχουμε σημαντική συνιστώσα της πίεσης λόγω ροής. Από το ύψος αυτό πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και πάνω, το εδαφικό υλικό αρχίζει προοδευτικά να στραγγίζει με τους μεγαλύτερους πόρους του να στραγγίζουν πρώτοι και τους επόμενους μετά. Ένα εδαφικό υλικό λοιπόν θα διατηρεί νερό μέσα στη μάζα του μέχρι και το ύψος εκείνο πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα που αντιστοιχεί στο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης των πόρων με το ελάχιστο μέγεθος μέσα στο εδαφικό υλικό. Σε συμφωνία άλλωστε με τα προαναφερθέντα, ακόμα και αν ένα μέγεθος πόρων έχει στραγγίσει, νερό παραμένει στις παρυφές του πόρου όπου οι αποστάσεις μεταξύ των πλακιδίων και των κόκκων είναι μικρότερες και είναι σαν να έχουμε τους πόρους μικρότερου μεγέθους. Όπως όμως προαναφέρθηκε οι πόροι ενός εδαφικού υλικού μπορούν να στραγγίσουν μόνο μέχρι ένα ορισμένο μέγεθος πόρων όπως εξηγείται από τις προβλέψεις του ωσμωτικού προσομοιώματος.

Όπως προαναφέρθηκε, το ποσοστό υγρασίας ενός δοκιμίου εδαφικού υλικού από το ύψος εκείνο πάνω από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα που αντιστοιχεί στο ύψος πάνω από το οποίο δεν μπορεί να στραγγίσει το νερό τριχοειδώς από τους πόρους ελάχιστου μεγέθους ονομάζεται *παραμένον ποσοστό υγρασίας* (residual water content). *Η τιμή αυτή του ποσοστού υγρασίας αντιστοιχεί στην ελάχιστη εκείνη ποσότητα νερού που θα παραμείνει σε ένα εδαφικό υλικό εάν το αφήσουμε να*

στραγγίσει σε –συνήθεις- ατμοσφαιρικές συνθήκες και η οποία για να εξαχθεί θα πρέπει το δοκίμιο, είτε να θερμανθεί, είτε γενικά να εξασκηθεί πολύ μεγάλη δύναμη στα μόρια του νερού των πόρων του για να το βγάλουμε από αυτούς.

Εάν προσπαθήσουμε να αποτυπώσουμε όλα τα παραπάνω σε ένα σχήμα, τότε προκύπτει το Σχ. 2.16γ. Σε αυτό παρουσιάζεται η εξέλιξη του ποσοστού υγρασίας και του βαθμού κορεσμού με το ύψος πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και βρίσκεται σε ακριβή αντιστοιχία με το Σχ. 2.15β. Αν στο Σχ. 2.16γ μετατρέψουμε το ύψος από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα και το βάθος από αυτήν σε αρνητική και θετική πίεση στήλης νερού αντίστοιχα, τότε προκύπτει το Σχ. 2.17, στο οποίο συσχετίζεται το ύψος αυτό της στήλης νερού με το ποσοστό φυσικής υγρασίας ή τον βαθμό κορεσμού ή το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας. Το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας  $\theta_w$  ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του νερού των πόρων  $V_w$  προς τον συνολικό όγκο του εδάφους  $V_{ολ}$  (Εξ. 2.14):

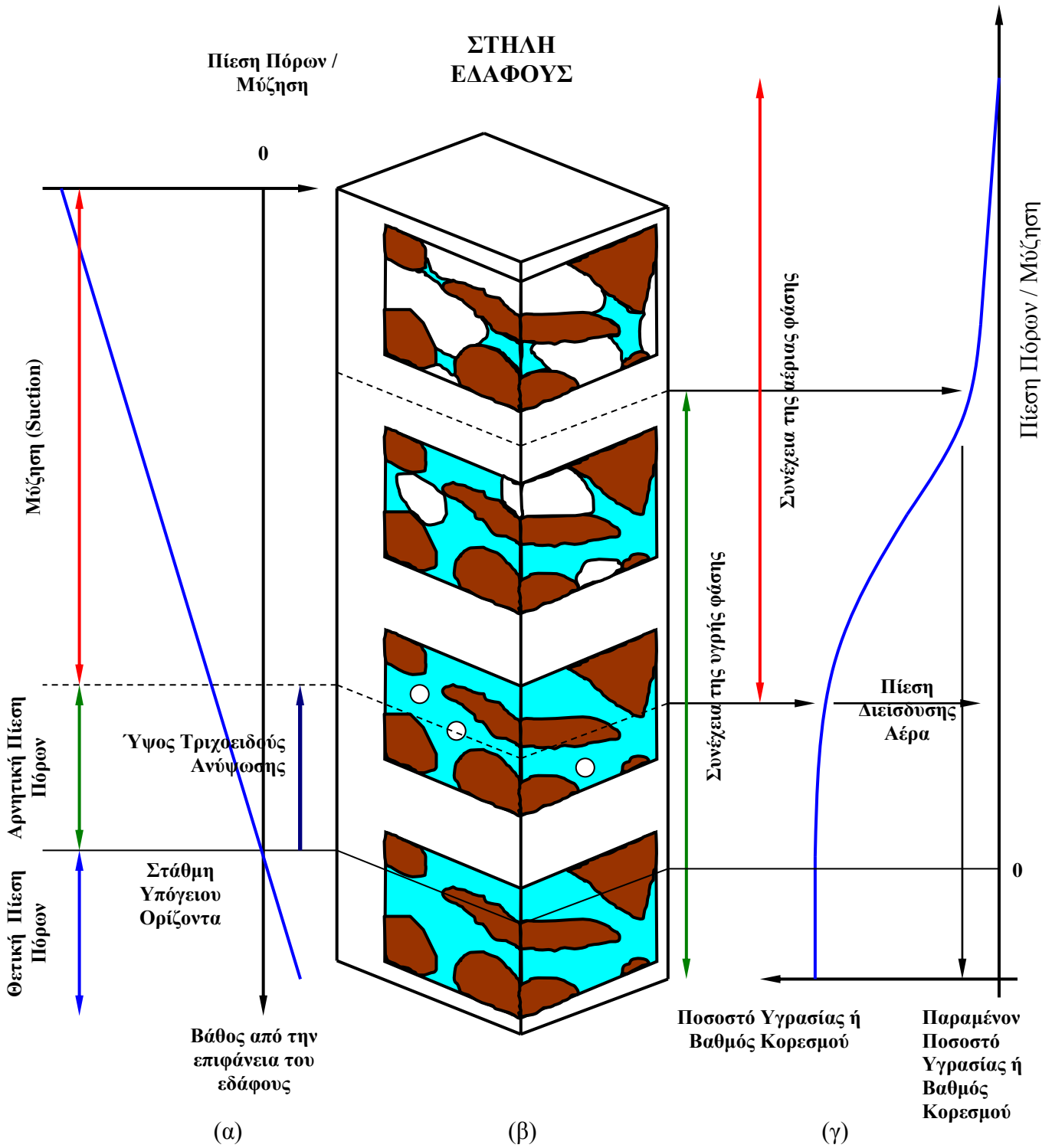
$$\theta_w = V_w / V_{ολ} \quad (2.14)$$

Στο τμήμα της καμπύλης που η πίεση είναι θετική (στήλη νερού που αντιστοιχεί σε βάθος από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και κάτω) δεν υπάρχει μεταβολή του ποσοστού υγρασίας  $w$  ή του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας  $\theta_w$  και προφανώς του βαθμού κορεσμού  $S_r$ , ο οποίος είναι σταθερός 100% κάτω από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα<sup>6</sup>. Στο τμήμα της που η πίεση είναι αρνητική (στήλη νερού που αντιστοιχεί σε ύψος πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και συνηθίζεται να απεικονίζεται δεξιά του άξονα των  $w$ ,  $\theta_w$  ή  $S_r$ ) απεικονίζονται τα δύο χαρακτηριστικά σημεία καμπής που περιγράφηκαν προηγουμένως και οριοθετούν στην περιοχή των εδαφικών υλικών πάνω από τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα τρεις περιοχές:

α) Το πρώτο χαρακτηριστικό σημείο της καμπύλης αυτής είναι το πρώτο σημείο καμπής που αντιστοιχεί στο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης του εδαφικού σχηματισμού. Πριν από αυτό το σημείο καμπής εκτείνεται η Περιοχή I.

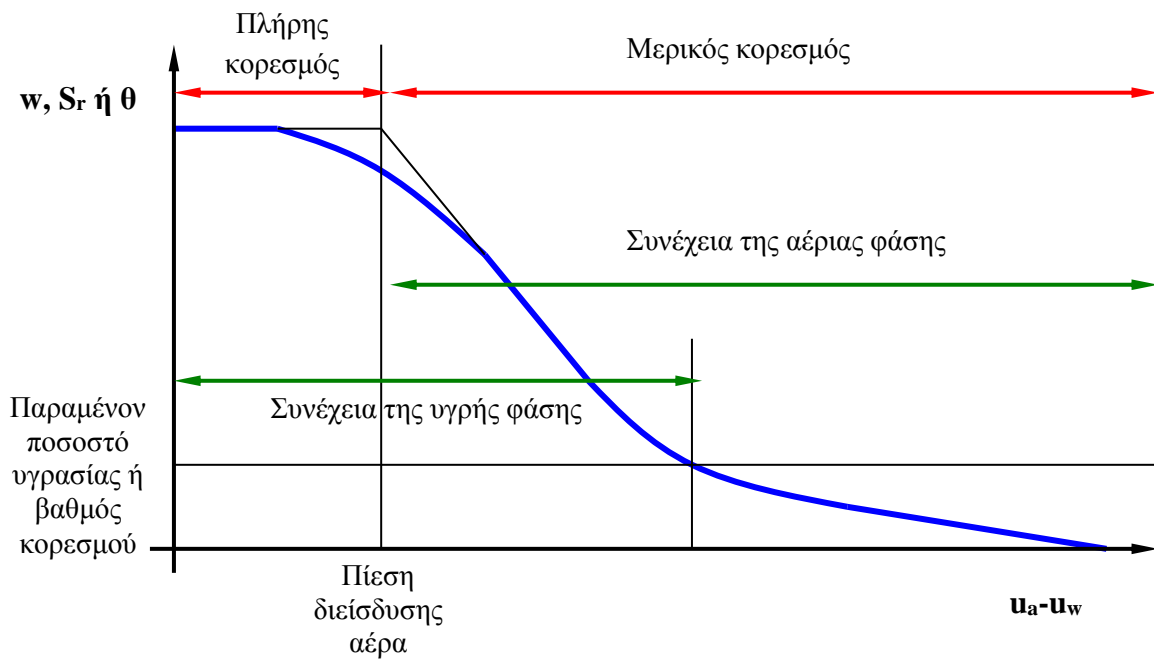
β) Το δεύτερο χαρακτηριστικό σημείο της καμπύλης αυτής είναι το δεύτερο σημείο καμπής που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας. Μεταξύ του πρώτου σημείου καμπής και του

<sup>6</sup> Ο υπόγειος ορίζοντας εδώ θεωρείται γενικός και ενιαίος (ambient) και όχι επικρεμάμενος (perched), οπότε όντως ο βαθμός κορεσμού σε οποιοδήποτε βάθος κάτω από αυτόν είναι σταθερός, ίσος με 100%.



**Σχήμα 2.16.** Στήλη εδάφους με την εξέλιξη της συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης (β), την κατανομή της πίεσης πόρων (α) και την εξέλιξη του ποσοστού υγρασίας ή του βαθμού κορεσμού (γ) με την απόσταση από τη στάθμη του υπόγειου οριζοντα.





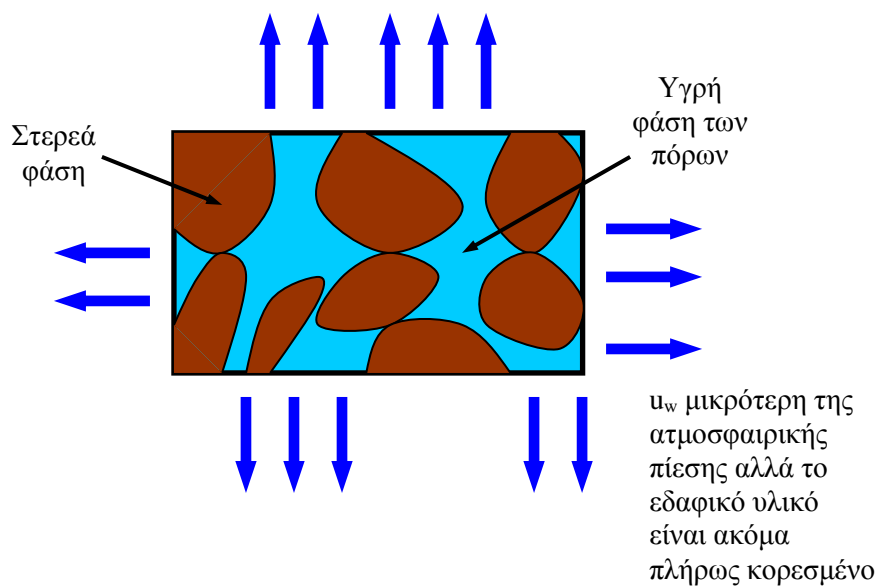
**Σχήμα 2.17.** Ποιοτική απεικόνιση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.

δεύτερου σημείου καμπής εκτείνεται η Περιοχή II και από το δεύτερο σημείο καμπής και μετά εκτείνεται η Περιοχή III.

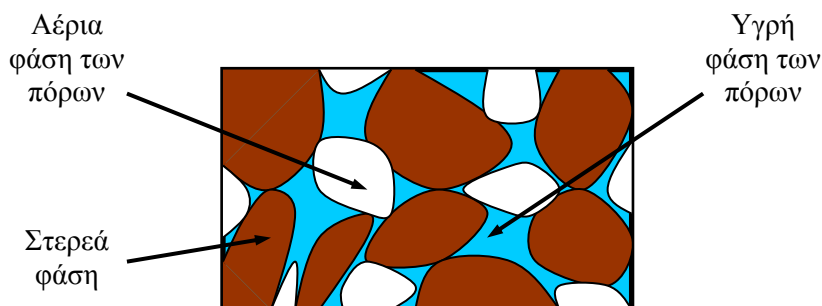
Σε όρους πίεσης, το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης αντιστοιχεί στην *πίεση διείσδυσης αέρα* (air-entry pressure) την αρνητική εκείνη πίεση δηλαδή μέχρι την οποία εντός του εδαφικού υλικού δεν υπάρχει αέρας αλλά μόνο νερό.

Στην Περιοχή I μεταξύ μηδενικής πίεσης και ύψους τριχοειδούς ανύψωσης (δηλ. πίεσης διείσδυσης αέρα) το εδαφικό υλικό είναι πλήρως κορεσμένο, αλλά η πίεση των πόρων είναι αρνητική. Η αρχή των ενεργών τάσεων ισχύει με την πίεση των πόρων να έχει αρνητικές τιμές (τιμές δηλαδή μικρότερες της ατμοσφαιρικής πίεσης). Η ενεργός τάση λοιπόν είναι μεγαλύτερη της ολικής κατά το μέγεθος της αρνητικής πίεσης πόρων. Αυτό σημαίνει ότι μείωση της πίεσης των πόρων υπό σταθερή ολική τάση οδηγεί σε αύξηση της διατμητικής αντοχής και σε ογκομετρικές παραμορφώσεις όμοιες με εκείνες που θα προκαλούντο από την αντίστοιχη αύξηση της ενεργού τάσης αν το εδαφικό υλικό ήταν πλήρως κορεσμένο. Στην Περιοχή I η υγρή φάση είναι συνεχής και είναι η *μοναδική παρούσα ρευστή φάση* (Σχ. 2.18). Προφανώς η κίνηση του νερού των πόρων γίνεται με αυτό να βρίσκεται σε υγρή φάση.

Στην Περιοχή II μεταξύ της πίεσης διείσδυσης αέρα και της πίεσης που αντιστοιχεί στο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης των πόρων ελαχίστου μεγέθους, το εδαφικό υλικό έχει στο εσωτερικό του και αέρα και νερό και μάλιστα και η υγρή και η αέρια φάση των εδαφών είναι συνεχής (Σχ. 2.19). Στην περιοχή αυτή όπως εξηγείται και στην Παρ. 2.4.2 δεν ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων. Η κίνηση του νερού των πόρων γίνεται και σε αυτήν την περιοχή με αυτό να βρίσκεται σε υγρή φάση, αλλά μόνο μέσα από τον χώρο που καταλαμβάνει η υγρή φάση. Η παρατήρηση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για τη διαπερατότητα των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών όπως εξηγείται στο Κεφάλαιο 7. Στην περιοχή αυτή κυριαρχούν τα τριχοειδή φαινόμενα στον καθορισμό της παρουσίας του νερού στους πόρους του εδάφους.



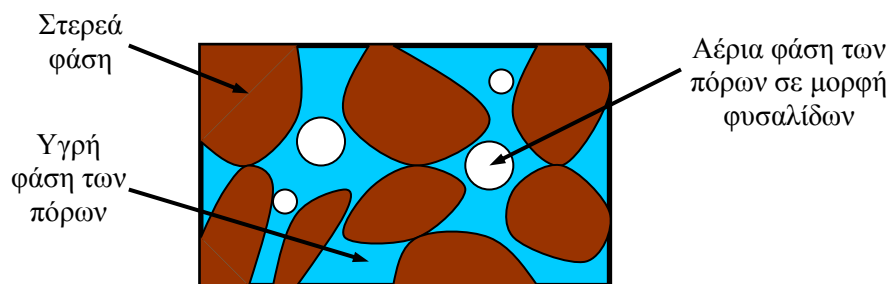
**Σχήμα 2.18.** Παντού στο εσωτερικό του εδαφικού υλικού υπάρχει νερό αλλά στα όριά του ασκείται μία δύναμη/τάση να φύγει το νερό από τους πόρους (Περιοχή I).



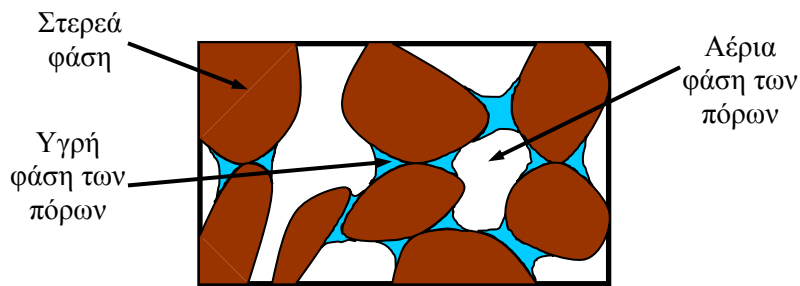
**Σχήμα 2.19.** Συνύπαρξη της συνέχειας της υγρής και της αέριας φάσης των εδαφικών υλικών (Περιοχή II).

Στο όριο μεταξύ Περιοχής I και Περιοχής II υπάρχει μία ιδιαίτερη υποπεριοχή στην οποία το εδαφικό υλικό είναι μη κορεσμένο αλλά με την αέρια φάση να είναι μη συνεχής, ευρισκόμενη σε μορφή διακριτών μεταξύ τους φυσαλίδων (Σχ. 2.20). Ο περιεχόμενος αέρας σε αυτήν την περίπτωση ονομάζεται στην αγγλική βιβλιογραφία *occluded air*. Προφανώς στην ιδιαίτερη αυτή μεταβατική περιοχή η κίνηση του νερού των πόρων γίνεται με αυτό να βρίσκεται σε υγρή φάση, χωρίς να έχουμε κίνηση του αέρα των πόρων –ως συνεχούς μέσου.

Στην Περιοχή III, δηλαδή μεταξύ της πίεσης που αντιστοιχεί στο ύψος τριχοειδούς ανύψωσης των πόρων ελαχίστου μεγέθους (παραμένον ποσοστό υγρασίας) και το θεωρητικό σημείο μηδενισμού του ποσοστού υγρασίας, το εδαφικό υλικό έχει στο εσωτερικό του και αέρα και νερό, αλλά μόνο η αέρια φάση του εδαφικού υλικού είναι συνεχής, ενώ η υγρή φάση είναι μη συνεχής, αφού το νερό των πόρων περιορίζεται πια σε απομονωμένους θύλακες στους μικρότερους πόρους ή στις μικρότερου μεγέθους κοιλότητες στα άκρα μεγαλύτερων πόρων (Σχ. 2.21). Ούτε στην περιοχή αυτή ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων. Στην περιοχή αυτή πια η μετακίνηση του νερού των πόρων δεν γίνεται με το νερό σε υγρή φάση (αφού η υγρή φάση δεν είναι πλέον συνεχής) αλλά με το νερό σε μορφή υδρατμών. Αποτέλεσμα αυτού είναι η διαπερατότητα του εδάφους ως προς την υγρή φάση στην κατάσταση αυτή να περιορίζεται πάρα πολύ (ιδέ Κεφάλαιο 7). Αντίστροφα η διαπερατότητα του εδάφους ως προς την αέρια φάση είναι μέγιστη.



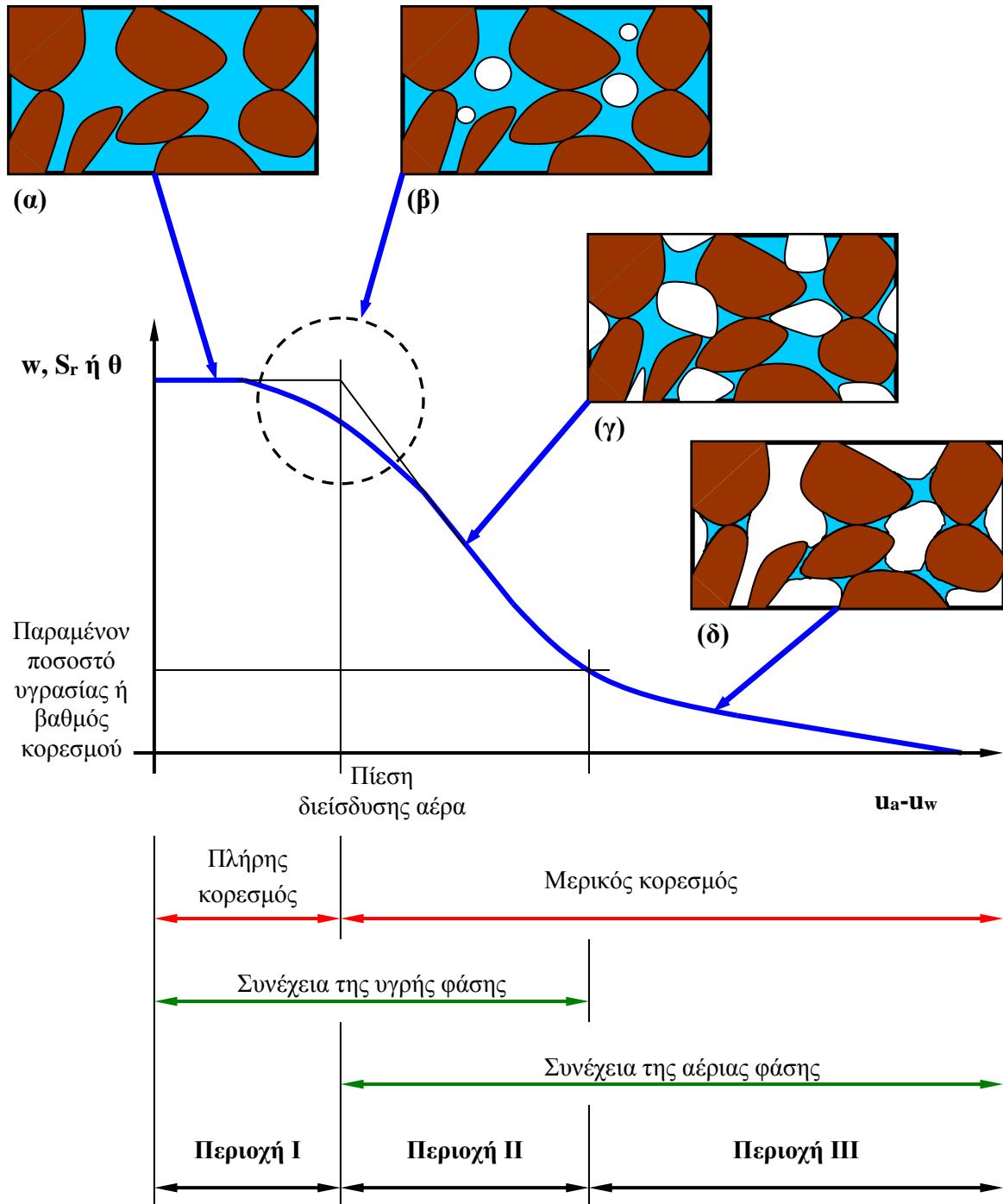
**Σχήμα 2.20.** Αέρια φάση σε μορφή διακριτών φυσαλίδων (μη συνεχής) εντός συνεχούς υγρής φάσης (οριακή περιοχή μεταξύ Περιοχής I και II).



**Σχήμα 2.21.** Η αέρια φάση είναι συνεχής, αλλά η υγρή φάση είναι μη συνεχής έχοντας πλέον περιοριστεί σε απομονωμένους θύλακες στους πόρους μικρότερου μεγέθους ή στις παρυφές των πόρων μεγαλύτερου μεγέθους (Περιοχή ΙΙΙ).

Η καμπύλη του βαθμού κορεσμού με την αρνητική πίεση πόρων ονομάζεται *χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού* και εξετάζεται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 4. Στο Σχ. 2.22 συνοψίζονται οι ποιοτικές απεικονίσεις της κατάστασης μεταξύ στερεάς, υγρής και αέριας φάσης ενός εδαφικού υλικού και παρουσιάζεται ταυτόχρονα η περιοχή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στην οποία αντιστοιχούν. Η σημασία της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού έγκειται στο ότι επιτρέπει οι διάφορες τιμές του βαθμού κορεσμού από το 0 έως το 100% να συσχετιστούν με συγκεκριμένες φυσικές καταστάσεις συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης εντός των εδαφικών υλικών, οπότε να αναζητηθεί η αντίστοιχη μηχανική συμπεριφορά για την περιγραφή των μη κορεσμένων εδαφών όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια του πρώτου μέρους.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, η *χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού αποτελεί τη βασική έννοια για την ποιοτική περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών και της κατάταξής τους ως προς τον βαθμό κορεσμού*. Απαντά δηλαδή στο ερώτημα που συχνά διατυπώνεται «πώς κατατάσσεται ένα έδαφος ως προς ένα μέγεθος (μή κορεσμένο), όταν το μέγεθος που χρησιμοποιείται για την κατάταξη καταλαμβάνει τόσο εκτεταμένο εύρος τιμών;». Μη κορεσμένο δηλαδή είναι και το έδαφος εκείνο με βαθμό κορεσμού 99.99% και εκείνο με βαθμό κορεσμού 50% και εκείνο με βαθμό κορεσμού 0.001%. Μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού λοιπόν γίνεται αντιληπτή η κατάσταση συνύπαρξης της στερεάς, της υγρής και της αέριας φάσης στην οποία αντιστοιχεί κάθε μία από αυτές τις τιμές, και άρα η αντίστοιχη μηχανική συμπεριφορά όπως εξηγείται στα Κεφ. 5, 6 και 7, με διαφορετικό τρόπο



**Σχήμα 2.22.** Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού με τα ονομαστικά όρια πλήρους και μερικού κορεσμού, τα όρια της συνέχειας της κάθε ρευστής φάσης και την ποιοτική απεικόνιση της συνύπαρξης στερεάς, υγρής και αέριας φάσης: (α) πλήρης κορεσμός (Περιοχή I), (β) μερικός κορεσμός με την αέρια φάση σε μορφή φυσαλίδων (οριακή περιοχή μεταξύ Περιοχής I και II), (γ) μερικός κορεσμός με την υγρή και την αέρια φάση να είναι ταυτόχρονα συνεχείς (Περιοχή II) και (δ) μερικός κορεσμός με την υγρή φάση να μην είναι πια συνεχής (Περιοχή III).

μάλιστα για κάθε εδαφικό υλικό ανάλογα με τη δική του χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, η οποία συνιστά χαρακτηριστική ιδιότητα του κάθε εδαφικού υλικού και καθορίζεται από τις φυσικές του ιδιότητες και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται.

Για παράδειγμα σε ένα εδαφικό υλικό ο παραμένον βαθμός κορεσμού μπορεί να είναι 30%, άρα όταν έχει βαθμό κορεσμού 50% βρίσκεται στην Περιοχή II της -δικής του- χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Αντίθετα σε ένα άλλο εδαφικό υλικό ο παραμένον βαθμός κορεσμού μπορεί να είναι 60%, άρα όταν έχει βαθμό κορεσμού 50% βρίσκεται στην Περιοχή III της -δικής του- χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Ακόμα περισσότερο, αν ένα εδαφικό υλικό έχει π.χ. παραμένοντα βαθμό κορεσμού 30% χωρίς προηγούμενη ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης, ο παραμένον βαθμός κορεσμού του μπορεί να μεταβληθεί εάν προηγηθεί κάποια ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης. Η ίδια τιμή του βαθμού κορεσμού λοιπόν μπορεί να αντιστοιχεί όχι απλώς σε διαφορετικό σημείο επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, στην ίδια περιοχή, αλλά ακόμα και σε διαφορετική περιοχή επί αυτής, άρα και σε εντελώς διαφορετικό καθεστώς μηχανικής συμπεριφοράς, και μάλιστα με την κατάσταση αυτή να μεταβάλλεται ανάλογα με την ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης του εδαφικού υλικού. Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφ. 4, ενώ στα Κεφ. 4 και 5 επεξηγείται και η συσχέτισή της με την ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης των εδαφικών υλικών.

#### **2.3.4 Ο ορισμός της μύζησης**

Στην §2.3.3 επεξηγήθηκε η θετική και η αρνητική πίεση του νερού των πόρων και εισήχθη ως έννοια η μύζηση. Προκειμένου για γενικό και ενιαίο υπόγειο ορίζοντα χωρίς σημαντική υπόγεια ροή, κάτω από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα η πίεση του νερού είναι θετική, δηλ. το νερό έχει την τάση να διαφύγει από το εδαφικό υλικό παρουσία της πίεσης αυτής. Το αντίθετο εκφράζει η αρνητική πίεση του νερού των πόρων πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και μέχρι το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης που υπάρχει μόνο μία ρευστή φάση, η υγρή. Το νερό δηλαδή έχει την τάση όχι να διαφύγει από τους πόρους αλλά να προσελκύσει κι άλλο (δηλ. το έδαφος να προσροφήσει κι άλλο νερό). Πάνω από το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης όπου αρχίζει η συνύπαρξη υγρής και αέριας φάσης, η διαφορά της πίεσης στο νερό των πόρων από την πίεση στον αέρα των πόρων ονομάζεται μύζηση (suction) και συμβολίζεται διεθνώς  $u_a - u_w$  ή  $\psi$  ή  $s$ . Δεδομένου ότι η πίεση του νερού των πόρων  $u_w$  πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα είναι μικρότερη του 0 (δηλ. μικρότερη της ατμοσφαιρικής πίεσης) η μύζηση είναι θετική αφού στην πλειοψηφία

των περιπτώσεων η πίεση του αέρα των πόρων  $u_a$  είναι 0 (ατμοσφαιρική). Η παρουσία μύζησης επίσης δε σημαίνει κατ' ανάγκην ότι η πίεση της υγρής φάσης των πόρων είναι πραγματικά αρνητική, δηλαδή μικρότερη του πραγματικού 0 και όχι απλώς μικρότερη της ατμοσφαιρικής πίεσης. Προκειμένου η πίεση της υγρής φάσης να είναι πραγματικά αρνητική, η τιμή της μύζησης πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 100 kPa<sup>7</sup> και η τιμή της πίεσης της αέριας φάσης να είναι ίση με την ατμοσφαιρική (και τα δύο αυτά ισχύουν για την αέρια φάση να αποτελείται από τον ατμοσφαιρικό αέρα). Σε αυτόν ακριβώς το λόγο οφείλεται και η διαδεδομένη άποψη ότι το νερό δεν μπορεί να βρεθεί υπό αρνητική πίεση μεγαλύτερη από 100 kPa, κατ' απόλυτο τιμή, ακριβώς γιατί δεν μπορεί να παραλάβει πραγματικά αρνητική (εφελκυστική) πίεση. Η δυνατότητα ύπαρξης τιμών της μύζησης μεγαλύτερων των 100 kPa επεξηγείται στην §2.3.5.

Στην περίπτωση που οι κόκκοι ή τα πλακίδια των εδαφικών υλικών περιβάλλονται εξ ολοκλήρου από νερό οπότε η πίεση του νερού των πόρων ασκείται ολόπλευρα σε αυτούς έχει ήδη εξηγηθεί η επιρροή της πίεσης αυτής, θετικής ή αρνητικής. Στην περίπτωση λοιπόν αυτή (Περιοχή I επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού) η μύζηση ταυτίζεται με την αρνητική πίεση πόρων και γι' αυτό ισχύει και η αρχή των ενεργών τάσεων. Εάν ωστόσο θεωρήσουμε καταστάσεις συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης των πόρων όπως αυτές που αντιστοιχούν στις Περιοχές II και III επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, τότε η πίεση της υγρής φάσης δεν ασκείται ολόπλευρα επί των κόκκων και των πλακιδίων των εδαφικών υλικών.

Στο Σχ. 2.23 παρουσιάζεται ιδεατή απεικόνιση κόκκων εδαφικού υλικού της ίδιας ακτίνας σε επαφή μεταξύ τους, στην εγγύτερη περιοχή των οποίων υπάρχει νερό που σχηματίζει τον *μηνίσκο* (meniscus)<sup>8</sup> του νερού που απεικονίζεται. Η δύναμη έλξης μεταξύ των εφαιπτόμενων κόκκων που προκαλεί η παρουσία του μηνίσκου είναι (Haines, 1927):

$$F = \frac{2\pi R T_s}{1 - \tan \frac{\theta}{2}} \quad (2.15)$$

<sup>7</sup> 101.3 kPa για την ακρίβεια (1 Atm), όπως προκύπτει από τα ποσοστά των αερίων που απαρτίζουν τον ατμοσφαιρικό αέρα, το μοριακό τους βάρος και την υπόθεση ότι συμπεριφέρονται ως ιδανικά αέρια.

<sup>8</sup> Ο όρος μηνίσκος περιγράφει το μη κοινό τμήμα κύκλου που αποκόπτεται από άλλον κύκλο μικρότερης ή μεγαλύτερης διαμέτρου και δεν ταυτίζεται με το σχήμα που απεικονίζεται στο Σχ. 2.23. Έχει επικρατήσει ως όρος ωστόσο στην αγγλική βιβλιογραφία (έναντι του παλαιότερου και οξύμωρου “water islands”), δεδομένου ότι, παρόλο που αναζητήθηκε, δεν βρέθηκε δόκιμος γεωμετρικός όρος που να περιγράφει το σχήμα αυτό.

όπου  $F$ , η δύναμη που ασκείται σε κάθε κόκκο,  $T_s$  η επιφανειακή τάση του νερού,  $R$  η ακτίνα των κόκκων και  $\theta$  η γωνία που σχηματίζει η ευθεία που ενώνει τα κέντρα των δύο κόκκων με την ακτίνα κάθε κόκκου όταν αγγίζει την περιφέρεια του μηνίσκου. Η δύναμη αυτή τείνει να φέρει τους δύο κόκκους πιο κοντά και άρα η επίδρασή της θα είναι να «σταθεροποιεί» τους κόκκους αυτούς στη θέση τους, να έχει δηλαδή την τάση να κάνει πιο «ανθεκτική» μια ομάδα κόκκων που συνδέονται κατ' αυτόν τον τρόπο σε κάθε αίτιο που θα τείνει να τους διαχωρίσει.

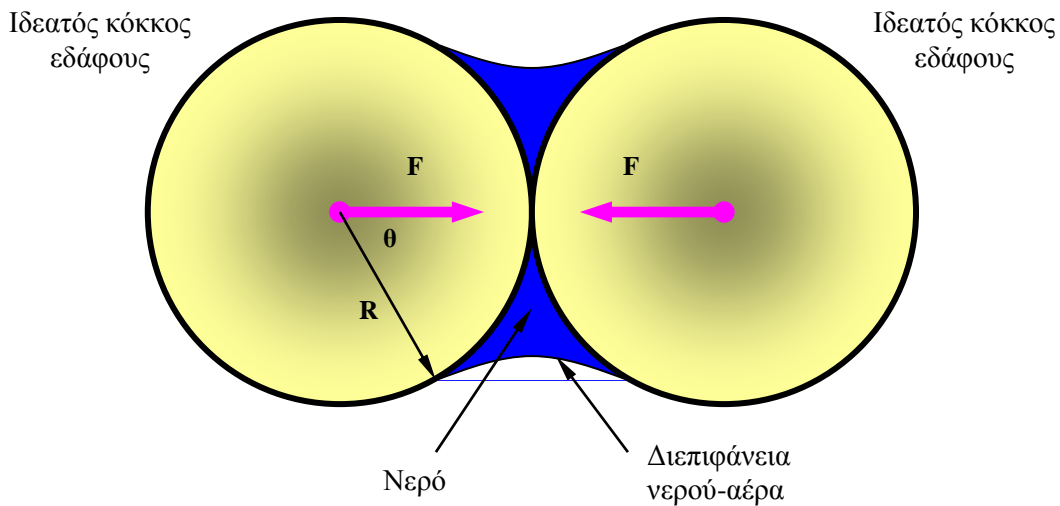
Θεωρώντας ότι αντίστοιχες δυνάμεις με αυτές που δημιουργούν οι μηνίσκοι του νερού μεταξύ των ιδεατών σφαιρικών κόκκων ασκούνται και μεταξύ των κόκκων των πραγματικών εδαφών κατά την κατάσταση συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης όπως στις Περιοχές II και III επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, τότε γίνεται προφανές ότι οι δυνάμεις αυτές τείνουν να σταθεροποιήσουν τους κόκκους αυτούς. Το ίδιο σύνολο κόκκων λοιπόν θα παρουσιάζεται με μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με την περίπτωση που οι μηνίσκοι δεν υπήρχαν, όπως αν ήταν πλήρως κορεσμένο (Περιοχή I). Η διαπίστωση αυτή επιτρέπει τη διατύπωση ενός θεωρητικού ορισμού της μύζησης. Όπως η τάση σε ένα εδαφικό υλικό είναι το όριο των δυνάμεων που ασκούνται στις επαφές μεταξύ των κόκκων σε δεδομένη επιφάνεια προς την επιφάνεια αυτή τείνουσα στο 0 (Σχ. 2.24α), έτσι και η μύζηση είναι το όριο των δυνάμεων που δημιουργούν οι μηνίσκοι του νερού εκεί που η αέρια φάση έχει αποκτήσει τη συνέχειά της (Περιοχές II και III) και ασκούνται σε δεδομένη επιφάνεια προς την επιφάνεια αυτή τείνουσα στο 0 (Σχ. 2.24β). Δεδομένου μάλιστα ότι η συνύπαρξη της υγρής με την αέρια φάση είναι συνάρτηση μόνο της απόστασης από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τότε και η τιμή της μύζησης εξαρτάται μόνο από αυτούς τους παράγοντες και είναι ανεξάρτητη της διεύθυνσης της θεωρούμενης επιφάνειας (σε αντίθεση με την τάση), και άρα είναι μέγεθος ιστροπικό, όπως και η πίεση του νερού των πόρων στα πλήρως κορεσμένα εδάφη.

Τα προαναφερθέντα ισχύουν χωρίς περιορισμούς για την Περιοχή II επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Στην Περιοχή III ισχύουν επί της αρχής αλλά με τις ιδιαιτερότητες που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 6 για τα κοκκώδη και τα αργιλικά εδαφικά υλικά ξεχωριστά.

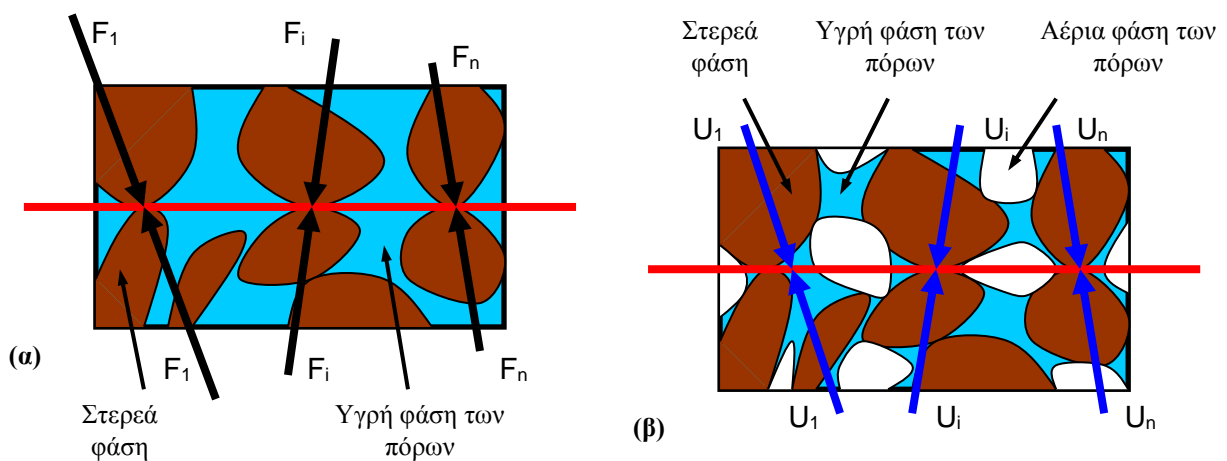
Ο ορισμός που διατυπώθηκε είναι ένας θεωρητικός ορισμός της μύζησης, κατ' επέκταση του ορισμού της τάσης σε εδαφικά υλικά και σε συνέπεια της φυσικής προέλευσης της μύζησης στις Περιοχές II και III επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Ο ορισμός αυτός είναι ιδιαίτερα ελκυστικός για την επεξήγηση της παρουσίας της μύζησης ως παραμέτρου τάσης (ιδέ



§2.4.3) και απόλυτα ικανοποιητικός σε όρους μηχανικής με την παραδοχή ότι το νερό στους πόρους είναι απεσταγμένο. Αν δεν είναι, όπως συνήθως συμβαίνει, τότε πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλοι λόγοι για τη δημιουργία της μύζησης και γι' αυτό θα παρουσιαστούν στη συνέχεια ήδη υπάρχοντες ορισμοί της μύζησης επί τη βάση των λόγων προέλευσής της και των συνιστωσών της στις οποίες οδηγούν αυτοί.



**Σχήμα 2.23.** Ιδεατή απεικόνιση εδαφικών κόκκων μεταξύ των οποίων υπάρχει «μηνίσκος» νερού και της δύναμης έλξης που ασκεί ο «μηνίσκος» σε αυτούς.



**Σχήμα 2.24.** Δυνάμεις α) στις επαφές των στερεών κόκκων  $F_i$  σε πλήρως κορεσμένο έδαφος και β) στους στερεούς κόκκους  $U_i$  λόγω μερικού κορεσμού.

Μετά από αρκετή σύγχυση, ο ορισμός που συμφωνήθηκε για τη μύζηση κατά το 1<sup>ο</sup> Συνέδριο Διογκώσιμων Εδαφών το 1965 (Ridley, 1993) ήταν:

- *Ολική μύζηση* είναι η αρνητική πίεση ως προς την πίεση της ατμόσφαιρας που καταγράφεται στο νερό των πόρων των εδαφικών υλικών, και η οποία πρέπει να ασκηθεί σε περίσσεια νερού ευρισκόμενη σε επαφή μέσω ημιδιαπερατής μεμβράνης με το νερό των πόρων, ώστε αυτή να βρίσκεται σε ισορροπία με αυτό.
- *Μύζηση εδαφικού σκελετού* είναι η αρνητική πίεση που καταγράφεται στο νερό των πόρων των εδαφικών υλικών, και η οποία πρέπει να ασκηθεί σε υδατικό διάλυμα της ίδιας ακριβώς σύνθεσης με το νερό των πόρων ευρισκόμενο σε επαφή μέσω ημιδιαπερατής μεμβράνης με το νερό των πόρων, ώστε το υδατικό διάλυμα να βρίσκεται σε ισορροπία με το νερό των πόρων.
- *Ωσμωτική μύζηση* είναι η αρνητική πίεση η οποία πρέπει να ασκηθεί σε περίσσεια καθαρού νερού ώστε αυτό να βρίσκεται σε ισορροπία με υδατικό διάλυμα της ίδιας σύνθεσης με το νερό των πόρων του εδαφικού υλικού με το οποίο βρίσκεται σε επαφή μέσω ημιδιαπερατής μεμβράνης.

Με βάση τους ορισμούς αυτούς, το άθροισμα της μύζησης εδαφικού σκελετού και της ωσμωτικής μύζησης ισούται με την ολική μύζηση.

Ο Ridley (1993) αναμόρφωσε τους ορισμούς αυτούς ως εξής:

- *Ολική μύζηση* είναι η τάση που απαιτείται ώστε να εξαχθεί ένα μόριο νερού από την υγρή φάση των πόρων και να βρεθεί στην αέρια φάση (δηλ. η ικανότητα του εδάφους να αντιστέκεται στην απώλεια νερού από τη μετάπτωση του τελευταίου από την υγρή στην αέρια φάση).
- *Μύζηση εδαφικού σκελετού* είναι η τάση που υπάρχει σε ένα μόριο νερού στην υγρή φάση (δηλ. η ικανότητα του εδάφους να αντιστέκεται στην απώλεια νερού χωρίς αυτό να αλλάζει φάση).
- *Διαφορική μύζηση* είναι η διαφορά της ολικής μύζησης από τη μύζηση εδαφικού σκελετού (όπως αυτές ορίστηκαν πριν).

Οι ορισμοί αυτοί επιτυγχάνουν κυρίως την επισήμανση των λόγων για τους οποίους αναπτύσσεται η μύζηση, δηλαδή την επιρροή των τριχοειδών φαινομένων και της ηλεκτρικής φόρτισης των αργιλικών πλακιδίων (τριχοειδές και ωσμωτικό προσομοίωμα) που οδηγούν στην ανάπτυξη της μύζησης εδαφικού σκελετού και την επιρροή της παρουσίας διαλυμένων ουσιών στο νερό των πόρων που οδηγεί στην ανάπτυξη της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης.

Η ασάφεια γύρω από την ωσμωτική μύζηση και το κατά πόσο αυτή ταυτίζεται με τη διαφορά ολικής μύζησης και μύζησης εδαφικού σκελετού θα μπορούσε να οδηγήσει σε αντίστοιχη ασάφεια για τη σημασία αυτής στην επίλυση πραγματικών προβλημάτων. Πράγματι για να έχει αυτή τέτοια σημασία που να πρέπει να ληφθεί υπόψη σε ένα πραγματικό πρόβλημα, θα πρέπει το εδαφικό υλικό να περιέχει νερό με μεγάλη περιεκτικότητα σε διαλυμένες ουσίες, και ταυτόχρονα η περιεκτικότητά του νερού με το οποίο θα έρθει σε επαφή το εδαφικό αυτό υλικό να έχει *σημαντική διαφορά* στην περιεκτικότητά του σε διαλυμένες ουσίες. Έτσι προφανώς δεν έχει νόημα η θεώρηση της παρουσίας της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης στην περίπτωση που έχουμε ένα κοκκώδες<sup>9</sup> εδαφικό υλικό κοντά σε ένα ποτάμι ή μία λίμνη και οι μεταβολές στη μύζηση μπορούν να προκύψουν από βροχοπτώσεις ή εξατμισοδιαπνοή δηλαδή προσρόφηση ή απώλεια νερού με την ίδια –ή πρακτικά την ίδια- περιεκτικότητα σε διαλυμένες ουσίες με το νερό των πόρων του εδαφικού υλικού. Αν αντίθετα το εδαφικό υλικό περιέχει στους πόρους του νερό υψηλής περιεκτικότητας σε διαλυμένες ουσίες και οι μεταβολές στη μύζηση μπορεί να προέλθουν από διείσδυση νερού εντελώς διαφορετικής περιεκτικότητας σε διαλυμένες ουσίες, τότε πράγματι η ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης ενδιαφέρει.

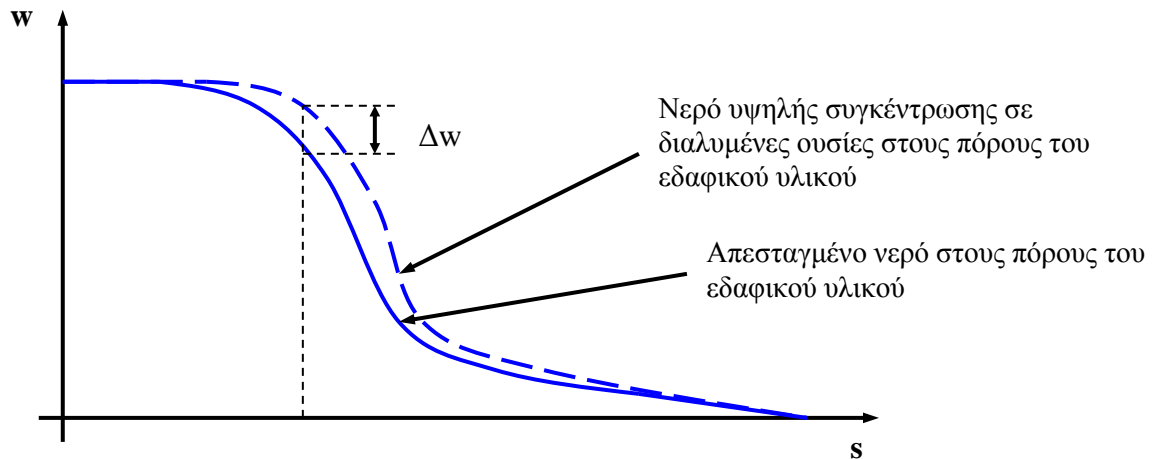
Προκειμένου να αποσαφηνιστεί αυτό καλύτερα παρατίθεται το εξής παράδειγμα. Έστω ότι έχουμε δύο όμοια δοκίμια του ίδιου μή κορεσμένου εδάφους και η μόνη τους διαφορά είναι ότι το ένα περιέχει απεσταγμένο νερό και το άλλο θαλασσινό νερό. Αν προστεθεί ελάχιστη ποσότητα απεσταγμένου νερού στο ένα και στο άλλο δοκίμιο, η μάζα του απεσταγμένου νερού που θα έχει προστεθεί στο εδαφικό υλικό με το θαλασσινό νερό θα δεχθεί μεγαλύτερη συνισταμένη δύναμη, αφού θα δράσει στα μόριά της, όχι μόνο η μηχανική συνιστώσα της μύζησης (μύζηση εδαφικού σκελετού), αλλά και η ωσμωτική (ωσμωτική μύζηση), η οποία όμως δεν υπάρχει στο δοκίμιο με το απεσταγμένο νερό. Αντίστροφα τώρα, προκειμένου να εξαχθεί η ίδια ποσότητα νερού από τα δύο αυτά δοκίμια, θα πρέπει να υπερνικηθεί στο δοκίμιο με το θαλασσινό νερό και η μηχανική συνιστώσα της μύζησης και η ωσμωτική, η οποία δεν υπάρχει

<sup>9</sup> Θεωρείται κοκκώδες για να αγνοηθεί η ανταλλαγή ιόντων με μόρια νερού που συμβαίνει σε αργιλικά εδαφικά υλικά.

στο δοκίμιο με το απεσταγμένο νερό. Εάν απεικονιζόταν σε ένα διάγραμμα η συνολική μύζηση με το ποσοστό υγρασίας, τότε για την ίδια τιμή της συνολικής μύζησης, θα πρέπει να αναμένουμε το ίδιο υλικό με θαλασσινό νερό (ή γενικά με νερό με μεγάλη συγκέντρωση αλάτων) να μπορεί να συγκρατήσει περισσότερο νερό στους πόρους του από το ίδιο εδαφικό υλικό με απεσταγμένο νερό στους πόρους του και άρα στην ίδια τιμή της συνολικής μύζησης θα πρέπει να αντιστοιχεί μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας (Σχ. 2.25). Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση που προστίθεται ελάχιστη ποσότητα θαλασσινού νερού στα δύο δοκίμια. Στο δοκίμιο με το θαλασσινό νερό στους πόρους του, η ποσότητα αυτή θα δεχόταν μόνο την επίδραση της μύζησης εδαφικού σκελετού (αφού δεν υπάρχει διαφορά συγκέντρωσης σε διαλυμένες ουσίες ανάμεσα στο προστιθέμενο και το υπάρχον νερό). Στο δοκίμιο με το απεσταγμένο νερό η προστιθέμενη ποσότητα θαλασσινού νερού θα δεχόταν την επίδραση της μύζησης εδαφικού σκελετού, μειωμένη κατά την επίδραση της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης, αφού ενώ υπάρχει η τάση για προσρόφιση ύδατος λόγω του μερικού κορεσμού, θα υπάρχει ταυτόχρονα και η τάση απώλειας ύδατος προς το προστιθέμενο νερό για την αποκατάσταση της συγκέντρωσης μεταξύ των δύο διαλυμάτων. Η ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης λοιπόν είναι πρώτα και κύρια συνάρτηση των διαφορών ή των ομοιοτήτων στη συγκέντρωση υπάρχοντος στους πόρους και προστιθέμενου ή αφαιρούμενου ύδατος από αυτούς και αυτή η διαφορά ή ομοιότητα είναι που θα καθορίσει όχι απλώς το μέγεθός της αλλά και την ίδια της την επιρροή στο παρατηρούμενο φαινόμενο. Ενώ βέβαια αυτό ισχύει χωρίς περιορισμούς στις περιπτώσεις που αναμένεται προσρόφιση ύδατος, στην περίπτωση της απώλειας ύδατος από τους πόρους ενός εδαφικού υλικού λόγω εξάτμισης είναι βέβαιο ότι υπάρχει –θεωρητικά τουλάχιστον– διαφορά στη συγκέντρωση σε διαλυμένες ουσίες του νερού που διαφεύγει και του νερού που μένει, αφού χάνεται μόνο διαλύτης ενώ οι διαλυμένες ουσίες παραμένουν στο νερό των πόρων αυξάνοντας την συγκέντρωσή τους. Υπό την προϋπόθεση όμως ότι η συγκέντρωση δεν είναι μεγάλη, η ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης δεν μπορεί να λάβει πάρα πολύ υψηλές τιμές.

Το τελευταίο ερώτημα που ανακύπτει είναι κατά πόσο η μύζηση εδαφικού σκελετού σε ένα υλικό με απεσταγμένο νερό στους πόρους του παραμένει η ίδια με εκείνη στο ίδιο υλικό, αλλά με θαλασσινό νερό στους πόρους του. Κατά πόσο δηλαδή οι ηλεκτρικές δυνάμεις και οι δυνάμεις van der Waals είναι οι ίδιες ανάμεσα στους κόκκους ή τα πλακίδια των εδαφικών υλικών (ιδίως τα πλακίδια στα πλαίσια του ωσμωτικού προσομοιώματος) και το νερό με άλατα και ανάμεσα στους κόκκους ή τα πλακίδια και το απεσταγμένο νερό. Κατά το ωσμωτικό προσομοίωμα δεν μπορεί να είναι αφού η απώλεια ύδατος σε αργιλικά υλικά προκαλεί συρρίκνωση άμεσα εξαρτώμενη από την παρουσία ηλεκτρικών φορτίων στο απορροφημένο

νερό των αργιλικών πλακιδίων, τα οποία καθορίζονται από το είδος και την ποσότητα των ιόντων που βρίσκονται στο νερό των πόρων, αφού αύξηση της συγκέντρωσης σε διαλυμένες ουσίες πρέπει να αναμένεται ότι θα φέρει πιο κοντά τα πλακίδια και άρα να αυξήσει τη μύζηση εδαφικού σκελετού.



**Σχήμα 2.25.** Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού για το ίδιο εδαφικό υλικό με απεσταγμένο νερό στους πόρους του και με νερό με υψηλή συγκέντρωση σε διαλυμένες ουσίες στους πόρους του.

Καταλήγοντας λοιπόν, το φυσικό μέγεθος που αναπτύσσεται στα μή κορεσμένα εδάφη είναι η ολική μύζηση. Αυτή έχει μία συνιστώσα, τη μύζηση εδαφικού σκελετού, η οποία οφείλεται στην κοκκομετρική διαβάθμιση των εδαφικών υλικών και στη διάταξη των κόκκων και των πλακιδίων που τα αποτελούν –η οποία αντίστοιχα μπορεί να αποκαλείται μηχανική συνιστώσα– και μία συνιστώσα που οφείλεται στην περιεκτικότητα της υγρής φάσης σε διαλυμένες ουσίες και καθορίζεται από το φαινόμενο της ώσμωσης. Η παρουσία ή όχι της συνιστώσας λόγω ώσμωσης δεν είναι συνάρτηση μόνο του ίδιου του εδαφικού υλικού, όπως συμβαίνει με τη μηχανική συνιστώσα, αλλά και του υγρού με το οποίο αυτό έρχεται σε επαφή. Αν η περιεκτικότητα σε διαλυμένες ουσίες της υγρής φάσης των πόρων είναι η ίδια με το υγρό με το οποίο έρχεται σε επαφή το εδαφικό υλικό, τότε δεν έχει φυσικό νόημα η ανάπτυξη αυτής της συνιστώσας της μύζησης. Έχει φυσικό νόημα η ανάπτυξή της μόνο κατά την ξήρανση, οπότε το υγρό που χάνεται είναι μόνο διαλύτης, αλλά για να έχει πρακτική σημασία πρέπει η περιεκτικότητα σε διαλυμένες ουσίες να είναι επαρκώς υψηλή. Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους, προτείνεται η ωσμωτική μύζηση να αναφέρεται ως *ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης*.

### 2.3.5 Αρνητική πίεση του νερού των πόρων. Η εφελκυστική αντοχή του νερού

Στις προηγούμενες παραγράφους αναφέρθηκε ότι η πίεση της υγρής φάσης μπορεί να γίνει αρνητική και μάλιστα μικρότερη του απόλυτου 0 και όχι απλώς της ατμοσφαιρικής πίεσης. Αυτό μοιάζει αντιφατικό με την κοινή εμπειρία της εμφάνισης φυσαλίδων στο νερό όταν η πίεση του γίνεται μικρότερη της ατμοσφαιρικής και προσεγγίζει το  $-100$  kPa, οπότε πιστεύεται ότι γίνεται σπηλαιώση στο νερό. Μία πιο προσεκτική εξέταση του ορισμού της σπηλαιώσης αλλά και της φύσης του ίδιου του νερού στις συνήθεις καταστάσεις στις οποίες απαντάται διαφοροποιεί αυτή την εικόνα.

Καταρχάς, *σπηλαιώση* (cavitation) είναι το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο μόρια ενός υγρού μεταπίπτουν από την υγρή φάση στην αέρια λόγω πτώσης της πίεσης του υγρού υπό σταθερή θερμοκρασία, όπως ακριβώς θα συνέβαινε αν αυξανόταν η θερμοκρασία του υγρού και έφτανε στο σημείο ζέσεώς του υπό σταθερή πίεση. Για αυτό το λόγο το φαινόμενο αυτό λέγεται και «βρασμός εν ψυχρώ».

Τα περισσότερα υγρά ωστόσο περιέχουν αέρια σε διάλυση. Καθώς μειώνεται η πίεση στο υγρό των πόρων τα αέρια αυτά περνούν σε αέρια φάση μέσα στο υγρό των πόρων σχηματίζοντας διακριτές μεταξύ τους φυσαλίδες όπως ακριβώς θα συνέβαινε αν πράγματι επιτυγχανόταν πραγματική σπηλαιώση του εν λόγω υγρού. Η πρόταση αυτή έγινε από τους Harvey et al (1944) και γνώρισε σημαντική αποδοχή έκτοτε. Ο Tabor (1979) επέδειξε ότι η εφελκυστική αντοχή του νερού (η μέγιστη δηλαδή κατ' απόλυτο τιμή αρνητική πίεση που μπορούσε να του επιβάλλει πριν συμβεί βρασμός εν ψυχρώ) είναι περίπου 500 kPa, ενώ οι Temperley & Chambers (1946) αναφέρουν ότι προσεκτικά απαερωμένα υγρά εντός δοχείων με λεία τοιχώματα έχουν σημαντικά υψηλότερη εφελκυστική αντοχή από εκείνη που έχουν στην περίπτωση που δεν πληρούνται αυτές οι συνθήκες. Η σημασία των παρατηρήσεων των Temperley & Chambers (1946) έγκειται στην επιβεβαίωση της υπόθεσης των Harvey et al (1944) για τη σημασία της διαφοράς της ύπαρξης φυσαλίδων εντός του νερού και στις παρυφές αυτού με το στερεό με το οποίο βρίσκεται σε επαφή. Μία ελεύθερη φυσαλίδα εντός ενός υγρού είναι ασταθής και συνήθως τα αέρια που τη σχηματίζουν περνούν σε διάλυση εντός του υγρού. Αντίθετα μία φυσαλίδα σε μία κοιλότητα του δοχείου εντός του οποίου βρίσκεται το υγρό που την περιβάλλει μπορεί να παραμείνει αδιάλυτη ακόμα και μετά την επιβολή πολύ υψηλών τιμών της πίεσης στο νερό. Όταν η πίεση λαμβάνει αρνητικές τιμές, οι φυσαλίδες αυτές μεγαλώνουν σε μέγεθος και τελικά προκαλούν το φαινόμενο που εκδηλώνεται ως *σπηλαιώση*. Η διαδικασία αυτή ελέγχεται από τη

διήθηση των αερίων (gas diffusion) διά μέσω της διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης και την μετακίνηση του ορίου αέριας-υγρής-στερεάς φάσης συναρτήσει του καθεστώτος των τάσεων σε κάθε φάση.

Η εφελκυστική αντοχή του νερού μετρείται με σωλήνες Berthelot. Οι σωλήνες αυτοί (κλειστοί στα δύο άκρα τους) είναι αρχικά σχεδόν γεμάτοι με νερό ενώ το κενό εντός αυτών καταλαμβάνεται από αέρα και υδρατμούς. Ο σωλήνας τότε θερμαίνεται ώστε το υγρό που περιέχει να διογκωθεί και να προκαλέσει τη διάλυση όλων των αερίων σε αυτό. Κατά την πτώση της θερμοκρασίας που ακολουθεί, το υγρό παραμένει προσκολλημένο στα τοιχώματα του σωλήνα υποβαλλόμενο προοδευτικά σε ολοένα και μεγαλύτερο εφελκυσμό (αρνητική πίεση) έως ότου καταρρέει με την εμφάνιση της αέριας φάσης εντός του σωλήνα. Μερικοί κύκλοι θέρμανσης-ψύξης αρκούν για την ανάπτυξη εφελκυστικής αντοχής (Charman et al., 1975), ενώ αυτή αυξάνει με την αύξηση των κύκλων θέρμανσης-ψύξης (Jones et al, 1981) και την επιβολή προηγούμενης υψηλής θετικής πίεσης στο υγρό (Tarantino & Mongiovi, 2001).

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, αλλά και τις εργασίες ανάπτυξης συσκευών απευθείας μέτρησης της μύζησης μέχρι πολύ υψηλές τιμές αυτής (ιδέ Κεφάλαιο 3), ο μηχανισμός υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής του νερού έχει ως εξής:

- Η εμφάνιση φυσαλίδων σε υγρό χωρίς προηγούμενη επεξεργασία κατά τη μείωση της πίεσης σε αυτό δεν συνιστά σπηλαιώση με βάση τον ορισμό του φαινομένου, δηλ. τη μετάπτωση μορίων του υγρού από την υγρή στην αέρια φάση λόγω μείωσης της πίεσης στο υγρό.
- Το φαινόμενο αυτό οφείλεται σε μικροφυσαλίδες αερίων που παραμένουν εγκλωβισμένες μέσα στα υγρά ή στις μικροκοιλότητες κατά μήκος της επαφής του υγρού με το στερεό εντός του οποίου βρίσκεται χωρίς να διαλυθούν, ακόμα και μετά την επιβολή πολύ υψηλών πιέσεων στο νερό, και την παρουσία αερίων διαλυμένων εντός του υγρού τα οποία περνούν εύκολα από τη διάλυση εντός του υγρού στην αέρια φάση προκαλώντας την αύξηση του μεγέθους των παριστάμενων φυσαλίδων μέχρι την τελική ραγδαία ένωσή τους προς αποκατάσταση της συνέχειας της αέριας φάσης.
- Υγρό καθαρό, χωρίς προσμείξεις ή διαλυμένες ουσίες εντός αυτού, απαερωμένο, που έχει υποβληθεί σε προηγούμενη πολύ υψηλή πίεση ώστε οι μικροφυσαλίδες να συντριβούν και τα αέρια που τις σχηματίζουν να περάσουν σε διάλυση εντός του υγρού και το οποίο βρίσκεται σε δοχείο μικρού όγκου (για περιορισμό της ποσότητας του υγρού) με πολύ λεία τοιχώματα ώστε να μην μπορούν να παραμείνουν φυσαλίδες αερίων κατά μήκος της διεπιφάνειας υγρής-

στερεάς φάσης επιδεικνύει πολύ υψηλή εφελκυστική αντοχή, η οποία αντιστοιχεί σε πίεση πολύ χαμηλότερη των  $-100$  kPa.

Εν όψει των παραπάνω, το φαινόμενο κατά το οποίο το νερό (ή οποιοδήποτε υγρό γενικά) χάνει την εφελκυστική του αντοχή ευρισκόμενο υπό συνήθεις συνθήκες για τιμές της πίεσης πολύ μικρότερες εκείνης που αντιστοιχεί στην πραγματική σπηλαίωση, υπό την παρουσία μηχανισμών όπως αυτός που περιγράφηκε, θα ονομάζεται εφεξής στην παρούσα διδακτορική διατριβή *φαινόμενη σπηλαίωση* αποδίδοντας τον αγγλικό όρο *nucleisatation* που χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει το φαινόμενο αυτό από τους Ridley (1993) και Tarantino & Mongioni (2001).

### 2.3.6 Η μέτρηση της μύζησης

Δεδομένης της σημασίας της μύζησης για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφικών υλικών είναι κεφαλαιώδους σημασίας η ικανότητα μέτρησής της. Η γνώση της μύζησης ενός μή κορεσμένου εδαφικού υλικού σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του επιτρέπει τη γνώση της *κατάστασης* στην οποία βρίσκεται και πως αυτή έχει επηρεαστεί ή θα επηρεαστεί από την εξέλιξη του βαθμού κορεσμού. Η γνώση των τιμών της μύζησης και του βαθμού κορεσμού ενός εδαφικού υλικού είναι αντίστοιχης σημασίας με τη γνώση των τιμών των τάσεων και του λόγου κενών σε ένα πλήρως κορεσμένο εδαφικό υλικό.

Ακριβώς λόγω της ιδιαίτερης σημασίας της μύζησης για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφικών υλικών και ως εκ τούτου της σημασίας της δυνατότητας μέτρησής της γίνεται εκτενής αναφορά στις υπάρχουσες μεθόδους μέτρησης της μύζησης στο Κεφάλαιο 3 (παρουσιάζεται η υπάρχουσα κατάσταση της γνώσης σε ό,τι αφορά τη μέτρηση της μύζησης –state of the art in suction measurement). Η παράθεση αυτού του κεφαλαίου στο σημείο αυτό εξυπηρετεί εκτός από την παρουσίαση των διαφόρων μεθόδων μέτρησης της μύζησης, την καλύτερη κατανόησή της ως έννοια αλλά και την απαραίτητη εισαγωγή στη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (Κεφάλαιο 4), τους φυσικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη μύζηση και τις μεθόδους ελέγχου της.



### 2.3.7 Το δυναμικό μύζησης pF

Για λόγους πληρότητας είναι σκόπιμο να γίνει αναφορά και στο δυναμικό μύζησης, pF (Schofield, 1935).

Η μύζηση εκφράζει την ενέργεια της υγρής φάσης των πόρων και μπορεί να εκφραστεί σε όρους ενέργειας ανά μονάδα μάζας ή χημικού δυναμικού  $\mu$  (chemical potential), με μονάδες J/mol, σε όρους ενέργειας ανά μονάδα όγκου που εκφράζει ένα δυναμικό πίεσης  $\psi$  (pressure potential), με μονάδες  $\text{J/m}^3 = \text{N}\cdot\text{m/m}^3 = \text{N/m}^2 = \text{Pa}$ , ή ως ενέργεια ανά μονάδα βάρους που εκφράζει ένα δυναμικό ύψους  $h$  (head potential), με μονάδες  $\text{J/N} = \text{N}\cdot\text{m/N} = \text{m}$ . Η μετατροπή ανάμεσα σε μονάδες των μεγεθών αυτών μπορεί να γίνει με χρήση της Εξ. 2.16:

$$\mu = \psi \cdot v_w = h \cdot g \cdot \omega_w \quad (2.16)$$

όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $\text{m/s}^2$ ),  $\omega_w$  είναι η μοριακή μάζα της υγρής φάσης ( $\text{kg/mol}$ ),  $v_w$  είναι ο μερικός μοριακός όγκος της υγρής φάσης ( $\text{m}^3/\text{mol}$ ) και το χημικό δυναμικό εκφράζεται σε μονάδες J/mol.

Το συνηθέστερο μέγεθος για χρήση στη γεωτεχνική μηχανική είναι το δυναμικό πίεσης ή μύζηση με μονάδες πίεσης. Εναλλακτικές μονάδες που χρησιμοποιούνταν στην πρώιμη βιβλιογραφία ήταν το pF (Schofield, 1935), το οποίο εκφράζει τον δεκαδικό λογάριθμο του ύψους νερού σε cm (Εξ. 2.17):

$$pF = \log (cm_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (2.17)$$

το οποίο κατά προσέγγιση συσχετίζεται με τη μύζηση σε kPa κατά την Εξ. 2.18:

$$10^{(pF-1)} \cong \text{kPa} \quad (2.18)$$

Η χρήση του σήμερα έχει περιοριστεί σημαντικά και απαντάται σε ελάχιστες βιβλιογραφικές αναφορές.

## 2.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

### 2.4.1 Γενικά

Στα μη κορεσμένα εδάφη συνυπάρχουν τρεις φάσεις, η στερεά, η υγρή και η αέρια. Κατά συνέπεια σε κάθε μία από αυτές υπάρχει μία τάση/πίεση που επιδρά και όλες μαζί βρίσκονται σε ισορροπία με την εξωτερικά εφαρμοζόμενη ολική τάση  $\sigma$ . Καθώς η αέρια και υγρή φάση δεν μπορούν να παραλάβουν διατμητική τάση, το μέρος της τάσης που τους αναλογεί εκφυλίζεται σε πίεση, οπότε έχουμε την εξωτερική ολική τάση  $\sigma$ , την τάση της στερεάς φάσης  $\sigma_s$ , την πίεση της υγρής φάσης  $u_w$  και την πίεση της αέριας φάσης  $u_a$ . Σε αναλογία προς τα πλήρως κορεσμένα εδάφη που η τάση που αναλαμβάνει η στερεά φάση των κόκκων είναι η διαφορά της ολικής, εξωτερικά εφαρμοζόμενης τάσης από την πίεση που αναπτύσσεται στο νερό των πόρων, έχει επιχειρηθεί και στα μη κορεσμένα εδάφη ο συνδυασμός των τάσεων και πιέσεων των τριών φάσεων προς διατύπωση μίας και μοναδικής παραμέτρου, οι μεταβολές της οποίας θα αποτελούν την αναγκαία και ικανή συνθήκη για την επεξήγηση όλων των παρατηρούμενων μεταβολών στη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών.

### 2.4.2 Η αρχή των ενεργών τάσεων για μη κορεσμένα εδάφη

Μέχρι σήμερα έχουν γίνει αρκετές απόπειρες για την διατύπωση της αρχής των ενεργών τάσεων για μη κορεσμένα εδάφη. Πριν από την παρουσίαση και τον σχολιασμό των διατυπώσεων αυτών, πρέπει, αφενός να γίνει υπενθύμιση της αρχής των ενεργών τάσεων όπως διατυπώθηκε από τον Terzaghi (1936), και αφετέρου να τονιστεί η προϋπόθεση για να αποτελεί ένα μέγεθος ενεργό τάση: *Αναγκαία και ικανή συνθήκη για να αποτελεί ένα μέγεθος ενεργό τάση είναι οι μεταβολές του να προκαλούν κάθε παρατηρούμενη μεταβολή στη μηχανική συμπεριφορά του εδαφικού υλικού και κάθε μεταβολή στη μηχανική συμπεριφορά του υλικού να αντιστοιχεί σε μία μεταβολή της τιμής του μεγέθους αυτού (λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή του χρόνου), ανεξάρτητα από τις επιμέρους μεταβολές στα εντατικά μεγέθη που δρουν στις φάσεις του υλικού και προκαλούν την ίδια μεταβολή στο μέγεθος που συνιστά την ενεργό τάση. Δηλαδή, στα πλήρως κορεσμένα εδάφη για παράδειγμα, οι παρατηρούμενες μεταβολές οφείλονται αποκλειστικά στη μεταβολή της ενεργού τάσης, ανεξάρτητα από το εάν αυτή οφείλεται σε μεταβολή της ολικής τάσης υπό σταθερή πίεση πόρων ή σε μεταβολή της πίεσης πόρων υπό σταθερή ολική τάση. Έχοντας*

επιβεβαιώσει πειραματικά αυτήν ακριβώς την αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία, ο Terzaghi (1936) κατέληξε:

«Οι τάσεις σε οποιοδήποτε σημείο σε μία διατομή ενός εδαφικού υλικού μπορούν να υπολογιστούν από τις ολικές κύριες τάσεις  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  που δρουν σε αυτό το σημείο. Αν τα κενά του εδαφικού υλικού είναι γεμάτα με νερό ευρισκόμενο υπό πίεση  $u$ , οι ολικές κύριες τάσεις διακρίνονται σε δύο μέρη. Το ένα μέρος  $u$  δρα επί του νερού και του εδάφους με την ίδια ένταση και ονομάζεται ουδέτερη τάση ή πίεση του νερού των πόρων. Η διαφορά

$$\sigma_1' = \sigma_1 - u, \sigma_2' = \sigma_2 - u, \sigma_3' = \sigma_3 - u \quad (2.19)$$

αποτελεί μία περίσσεια επί της πίεσης του νερού των πόρων  $u$  και δρα αποκλειστικά επί της στερεάς φάσης του εδαφικού υλικού. Το τμήμα αυτό της ολικής κύριας τάσης ονομάζεται ενεργός κύρια τάση».

Είναι προφανής ο περιορισμός της ισχύος της αρχής των ενεργών τάσεων για πλήρως κορεσμένα εδαφικά υλικά και η συνέπεια της πρότασης αυτής:

«Όλα τα παρατηρούμενα φαινόμενα που προκαλεί η μεταβολή της τάσης (π.χ. παραμόρφωση ή μεταβολή της διατμητικής αντοχής) οφείλονται αποκλειστικά σε μεταβολές στην μέση ενεργό τάση (λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή του χρόνου)».

Οι σπουδαιότερες διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων για μή κορεσμένα εδάφη με την πηγή από την οποία προέρχονται παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Σε όλες τις διατυπώσεις χρησιμοποιείται η ολική τάση  $\sigma$  και η πίεση στην υγρή φάση  $u_w$  ή κάποιο μέγεθος που σχετίζεται με αυτήν. Σε μερικές από τις διατυπώσεις χρησιμοποιείται και η πίεση στην αέρια φάση  $u_a$ . Πέραν αυτών, στις περισσότερες διατυπώσεις υπάρχει τουλάχιστον μία παράμετρος η οποία συνδέει τα εντατικά μεγέθη που δρουν στις επιμέρους φάσεις.

Στα πλήρως κορεσμένα εδάφη, αφενός δεν υπάρχει όρος που να συνδέει την ολική τάση και την πίεση στην υγρή φάση και αφετέρου, κάθε παρατηρούμενη μεταβολή στα εδαφικά υλικά οφείλεται στη μεταβολή του μεγέθους αυτού και αντίστροφα (λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή του χρόνου) ανεξαρτήτως των μεταβολών στα επιμέρους μεγέθη από τα οποία προκύπτει η ενεργός τάση. Το δεύτερο από αυτά τα χαρακτηριστικά συνιστά προϋπόθεση για να θεωρηθεί

κάποιο από τα προταθέντα μεγέθη ενεργός τάση. Το ενδεχόμενο ύπαρξης όρου που να συνδέει την ολική τάση και την πίεση στην υγρή φάση δεν προβληματίζει, υπό την προϋπόθεση όμως ότι αυτός ο όρος είναι ανεξάρτητος της κατάστασης (state) στην οποία βρίσκεται το εδαφικό υλικό.

**Πίνακας 2.1.** Διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά.

Πηγή	Εξίσωση για την Αρχή των Ενεργών Τάσεων	Περιγραφή μεταβλητών
Hilf, 1956	$u = u_a + u_c, \quad (2.20)$ όπου $u_c = (-) T \{1/r_1 + 1/r_2\}$	T: επιφανειακή τάση του νερού $r_1, r_2$ : εσωτερική και εξωτερική ακτίνα μηνίσκων υγρής φάσης
Croney, Coleman & Black, 1958	$\sigma' = \sigma - \beta' u_w \quad (2.21)$	$\beta'$ : Παράμετρος «συγκόλλησης» που αποτελεί το μέτρο του αριθμού των δεσμών υπό εφελκυσμό που συνεισφέρουν στην διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού
Bishop, 1959	$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w) \quad (2.22)$	$\chi$ : Παράμετρος που συσχετίζεται με τον βαθμό κορεσμού
Lambe, 1960	$\sigma = \sigma \alpha_m + u_a \alpha_a + u_w \alpha_w + R - A \quad (2.23)$	$\alpha_a$ : Ποσοστό συνολικής επιφάνειας που καταλαμβάνεται από αέρα $\alpha_w$ : Ποσοστό συνολικής επιφάνειας που καταλαμβάνεται από νερό $\alpha_m$ : Ποσοστό συνολικής επιφάνειας που καταλαμβάνεται από τη στερεά φάση
Aitchison, 1961	$\sigma' = \sigma + \psi p'' \quad (2.24)$	$\psi$ : Παράμετρος με τιμές από 0 έως 1 $p''$ : υπόλειμμα πίεσης του νερού των πόρων
Jennings, 1961	$\sigma' = \sigma + \beta p'' \quad (2.25)$	$\beta$ : Στατιστικός συντελεστής ίδιου τύπου με την επιφάνεια επαφής. Πρέπει να μετρείται πειραματικά σε κάθε ξεχωριστή περίπτωση
Richards, 1966	$\sigma' = \sigma - u_a + \chi_m (h_m + u_a) + \chi_s (h_s + u_a) \quad (2.26)$	$\chi_m$ : Παράμετρος ενεργού τάσης για την μύζηση εδαφικού σκελετού $h_m$ : Μύζηση εδαφικού σκελετού $\chi_s$ : Παράμετρος ενεργού τάσης για την ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης $h_s$ : Ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης

Όπως έχει αποδειχτεί πλέον σήμερα, οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι στις διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων για μη κορεσμένα εδάφη δεν πληρούν αυτήν την απαίτηση αλλά εξαρτώνται από την κατάσταση του υλικού με αποτέλεσμα οι διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων να καθίστανται μάλλον καταστατικές εξισώσεις παρά διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων.

Πρώτοι οι Jennings & Burland (1962) αμφισβήτησαν την ισχύ της πρότασης του Bishop (1959) για την ενεργό τάση –και τις παρόμοιες διατυπώσεις- επιδεικνύοντας ότι η τιμή της παραμέτρου  $\chi$  προέκυπτε διαφορετική όταν προέκυπτε από τη διατμητική αντοχή και όταν προέκυπτε από τις μεταβολές στο λόγο κενών αποτελώντας συνάρτηση της τασικής διαδρομής, αλλά και των επιμέρους μεταβολών στα εντατικά μεγέθη της κάθε ρευστής φάσης, που προκαλούσαν την ίδια μεταβολή της «ενεργού τάσης». Παρατήρησαν μάλιστα ότι οι αποκλίσεις αυτές γίνονται μέγιστες από μία κρίσιμη τιμή του βαθμού κορεσμού και κάτω, την οποία προσδιόρισαν περί το 20% για τις ιλιές και τις άμμους και μεταξύ 85 και 90% για τις αργίλους. Οι παρατηρήσεις αυτές για τον βαθμό κορεσμού επιδεικνύουν την επιρροή και της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του εδαφικού υλικού στην παράμετρο  $\chi$ .

Οι Bishop & Blight (1963) περιόρισαν την ισχύ της πρότασης του Bishop (1959) στη συσχέτιση μεταξύ διατμητικής αντοχής και ενεργού τάσης παρατηρώντας και εκείνοι ότι δεν επαρκεί για την πρόβλεψη των ογκομετρικών παραμορφώσεων, αφού η ίδια μεταβολή της ενεργού τάσης προερχόμενη από μεταβολή του όρου  $\sigma-u_a$  και από μεταβολή του όρου  $u_a-u_w$  οδηγούσε σε διαφορετική ογκομετρική παραμόρφωση. Προχωρώντας μάλιστα ένα βήμα πιο πέρα πρότειναν την διαχείριση προβλημάτων ογκομετρικών παραμορφώσεων μέσω διαφορετικών παραμέτρων τάσης, και όχι μίας μοναδικής παραμέτρου τάσης. Η πρόταση αυτή τονίστηκε ακόμα περισσότερο από τον Burland (1964, 1965), τους Matyas & Radhakrishna (1968) και τους Barden et al. (1969) μέχρι την πρόταση συγκεκριμένων παραμέτρων τάσης για μη κορεσμένα εδάφη από τους Fredlund & Morgenstern (1977). Περαιτέρω πειραματικά αποτελέσματα που απέδειξαν ότι τα μη κορεσμένα εδάφη δεν υπακούουν στην αρχή των ενεργών τάσεων παρουσιάστηκαν από τους Wheeler & Sivakumar (1995).

Συνοψίζοντας τα πειραματικά αποτελέσματα που προαναφέρθηκαν, είναι μάλλον αδύνατο να αποδοθεί μία μοναδική τιμή της «ενεργού τάσης» σε ένα μη κορεσμένο εδαφικό υλικό και αυτή να επαρκεί για την περιγραφή όλων των μεταβολών που παρατηρούνται σε αυτό. Διατυπώσεις όπως αυτή του Bishop (1959) περιγράφουν ίσως επαρκώς τις μεταβολές της διατμητικής

αντοχής αλλά όχι και των ογκομετρικών μεταβολών. Η επάρκεια στην πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής δικαιολογεί τη διάδοσή τους, ιδίως για διατύπωση καταστατικών προσομοιωμάτων και ενσωμάτωση σε κώδικες πεπερασμένων στοιχείων, οι δημιουργοί των οποίων ισχυρίζονται κατ' αυτόν τον τρόπο ότι καλύπτουν και τη μηχανική συμπεριφορά των μή κορεσμένων εδαφών. Και πάλι ωστόσο η περιοχή της ισχύος τους περιορίζεται από τη φύση των υλικών και το εύρος του βαθμού κορεσμού. Ακόμα σημαντικότερα, όπως παρατηρεί ο Wheeler (2006), για την πρόβλεψη των ογκομετρικών μεταβολών πρέπει πρακτικά σε όλες τις διατυπώσεις να εισαχθεί μία καταστατική παράμετρος που να συνδέει τα επιμέρους εντατικά μεγέθη στην κάθε φάση και η οποία να διορθώνει την αδυναμία πρόβλεψης των παρατηρούμενων μεταβολών ανεξάρτητα από τις επιμέρους μεταβολές στα εντατικά αυτά μεγέθη. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, οι διατυπώσεις αυτές καθίστανται καταστατικές εξισώσεις που συνδέουν τις ανεξάρτητες παραμέτρους τάσης με τις παρατηρούμενες μεταβολές, παρά διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων. Οι τάσεις αυτές δε, καλό είναι να αναφέρονται – όπως έχει επικρατήσει πια πρακτικά- ως τάσεις Bishop και όχι ενεργές τάσεις.

### 2.4.3 Παράμετροι τάσης για μή κορεσμένα εδάφη

Οι Fredlund & Morgenstern (1977) κατέληξαν στην εγγενή αδυναμία διατύπωσης της αρχής των ενεργών τάσεων για μή κορεσμένα εδαφικά υλικά και προχώρησαν στον ορισμό δύο παραμέτρων τάσης για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφικών υλικών. Οι δύο παράμετροι τάσης λοιπόν τις οποίες πρότειναν είναι οι συνδυασμοί των  $\sigma$ ,  $u_w$  και  $u_a$ ,  $\sigma - u_a$  και  $u_a - u_w$ . Κάθε άλλος συνδυασμός των  $\sigma$ ,  $u_w$  και  $u_a$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών αλλά οι παραπάνω συγγραφείς πρότειναν τις δύο αυτές παραμέτρους τάσης *ως εκείνες με το σαφέστερο φυσικό νόημα και την ικανότητα απευθείας μέτρησης ή υπολογισμού*. Η παράμετρος  $\sigma - u_a$  λοιπόν εκφράζει την περίσσεια της τάσης επί της πίεσης της αέριας φάσης, η οποία εφόσον είναι συνεχής βρίσκεται υπό την ατμοσφαιρική πίεση. Η παράμετρος  $u_a - u_w$  εκφράζει τη διαφορά της πίεσης της υγρής φάσης ως προς την πίεση της αέριας φάσης, η οποία εφόσον είναι συνεχής βρίσκεται υπό την ατμοσφαιρική πίεση και άρα την «τάση» της υγρής φάσης να προσροφήσει νερό εφόσον αυτό παρασχεθεί σε περίσσεια. Η παράμετρος αυτή λοιπόν είναι η μύζηση και αντιδιαστέλλεται ως προς την αρνητική πίεση πόρων (ιδέ Παρ. 2.3) όπως καταχρηστικά θεωρείται κάθε πίεση μικρότερη του μηδενός. Η πίεση της υγρής φάσης γίνεται πραγματικά αρνητική (εφελκυστική) όταν η μύζηση ξεπεράσει την τιμή των 100 kPa.

## 2.5 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΝΤΑΙ ΑΠΟ ΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε και επεξηγήθηκε η φύση των μη κορεσμένων εδαφών. Η γενική αυτή παρουσίαση συμπληρώνεται από τα Κεφάλαια 3 και 4, όπου παρουσιάζονται οι μέθοδοι μέτρησης της μύζησης και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού αντίστοιχα. Ακολουθούν τα Κεφάλαια 5 έως 7, στα οποία παρουσιάζονται η παραμορφωσιμότητα, η διατμητική αντοχή και η διαπερατότητα των μη κορεσμένων εδαφών, ως ιδιαίτερα επιμέρους χαρακτηριστικά της μηχανικής τους συμπεριφοράς. Η σημασία της παρουσίασης της φύσης και της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών δεν θα είχε νόημα αν αυτή δεν ήταν απαραίτητη στην επίλυση αντίστοιχων προβλημάτων μηχανικού:

<u>Προβλήματα που σχετίζονται με παραμορφώσεις:</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Παραμορφώσεις διογκώσιμων/καταρρεύσιμων εδαφικών υλικών</li> <li>• Ρωγμές συρρίκνωσης αργιλικών εδαφών</li> <li>• Στερεοποίηση και καθιζήσεις σε μη κορεσμένα εδάφη</li> <li>• Συμπύκνωση εδαφών</li> </ul>
<u>Προβλήματα που σχετίζονται με τη διατμητική αντοχή:</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ευστάθεια πρανών και κατολισθήσεις λόγω μεταβολών του βαθμού κορεσμού</li> <li>• Οριζόντιες ωθήσεις γαιών σε μη κορεσμένα εδάφη</li> <li>• Μεταβολή της φέρουσας ικανότητας επιφανειακών θεμελιώσεων λόγω μεταβολών του βαθμού κορεσμού</li> </ul>
<u>Προβλήματα υπόγειας ροής:</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ισορροπία μάζας νερού στη διεπιφάνεια εδάφους-ατμόσφαιρας</li> <li>• Τροφοδοσία της πλήρως κορεσμένης ζώνης του εδάφους</li> <li>• Μελέτη στρώσεων κάλυψης χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων και κιβωτίων υπόγειας απόθεσης πυρηνικών αποβλήτων</li> <li>• Μεταφορά ρυπαντικών ουσιών στην μη κορεσμένη ζώνη του εδάφους και αποκατάσταση μολυσμένων περιοχών</li> <li>• Μόνιμη και μη μόνιμη ροή σε μη κορεσμένα συμπυκνωμένα στρώματα χωμάτινων φραγμάτων</li> </ul>

Όπου κατέστη δυνατόν παρατίθενται παραδείγματα βασικών τέτοιων προβλημάτων στα αντίστοιχα κεφάλαια.

## 2.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα του παρόντος κεφαλαίου σχετικά με τη φύση των μή κορεσμένων εδαφικών υλικών προκύπτουν τα εξής:

### 1. Επιρροή αλληλεπίδρασης υγρής και αέριας φάσης μή κορεσμένων εδαφικών υλικών.

Στα μή κορεσμένα εδαφικά υλικά συνυπάρχει η υγρή και η αέρια φάση ακόμα και στο επίπεδο του στοιχειώδους αντιπροσωπευτικού όγκου. Η πίεση σε κάθε μία από αυτές τις φάσεις και η ολική τάση καθορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά του μή κορεσμένου εδαφικού υλικού. Η πίεση του νερού μπορεί να γίνει πραγματικά αρνητική (μικρότερη όχι απλώς της ατμοσφαιρικής αλλά του 0) δηλαδή εφελκυστική και μάλιστα να φτάσει μέχρι πολύ χαμηλές τιμές μέχρι να συμβεί πραγματική σπηλαιώση, δηλαδή μόρια νερού να περάσουν από την υγρή φάση στην αέρια λόγω μείωσης της πίεσης υπό σταθερή θερμοκρασία. Τα παρατηρούμενα φαινόμενα κατά τα οποία «σπηλαιώση» συμβαίνει σε πολύ υψηλότερες τιμές της πίεσης (χωρίς μάλιστα να γίνει πραγματικά αρνητική η πίεση) σχετίζονται με την παρουσία αερίων σε διάλυση μέσα στο νερό και την παρουσία μικροφουσαλίδων αερίων μέσα στο νερό αλλά και τον χώρο που αυτό βρίσκεται. Απαερωμένο, απιονισμένο, απεσταγμένο νερό σε μικρό όγκο εντός δοχείου πολύ υψηλής αντοχής, εξαιρετικά λείας και προσεκτικά κατασκευασμένης εσωτερικής επιφάνειας, με προηγούμενη φόρτιση σε υψηλές τιμές της πίεσης (3-4 MPa), μετά από αρκετούς κύκλους τέτοιων φορτίσεων, μπορεί να παραλάβει πολύ μικρές τιμές της αρνητικής πίεσης (υψηλές τιμές εφελκυστικής πίεσης) που αγγίζουν και κάποιες φορές ξεπερνούν τα 2 MPa. Αυτές είναι οι τιμές της πίεσης που συμβαίνει πραγματική σπηλαιώση. Αντίθετα το φαινόμενο κατά το οποίο φουσαλίδες αερίων εμφανίζονται μέσα σε νερό που δεν πληρεί τις παραπάνω προϋποθέσεις πρέπει να αναφέρεται ως φαινόμενη σπηλαιώση (αποδίδοντας τον αγγλικό όρο nucleisation). Η κατανόηση αυτών των φαινομένων εξηγεί την εξέλιξη της συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης ενός μή κορεσμένου εδαφικού υλικού με τη μείωση του βαθμού κορεσμού, την κατανόηση της πίεσης διείδυσης αέρα (και του ύψους τριχοειδούς ανυψώσεως), όπως και τη διαφορά αρνητικής πίεσης πόρων και μύζησης, της εμφάνισης της κάθε μιας καθώς και την εισαγωγή στη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Η αρνητική πίεση της υγρής φάσης των πόρων προϋποθέτει παρουσία μέσα στο εδαφικό υλικό μόνο της μίας ρευστής φάσης των πόρων, της υγρής, η οποία τυγχάνει να βρίσκεται υπό πίεση μικρότερη της ατμοσφαιρικής ή και πραγματικό εφελκυστικό καθεστώς. Τέτοια κατάσταση μπορεί να απαντηθεί σε πλήρως κορεσμένα εδάφη πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και κάτω από το ύψος



τριχοειδούς ανύψωσης, αλλά και σε πλήρως κορεσμένα εδάφη κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα ευρισκόμενα υπό καθεστώς διαστολικότητας. Η μύζηση αντίθετα προϋποθέτει την παρουσία και των δύο ρευστών φάσεων, υγρής και αέριας, και εκφράζει τον συνδυασμό της εντατικής κατάστασης στις δυο τους, απλά διατυπούμενη ως η διαφορά της πίεσης στην υγρή και την αέρια φάση. Δεν προϋποθέτει μάλιστα καν ότι η πίεση στην υγρή φάση είναι αρνητική, όπως άλλωστε συμβαίνει στη μέθοδο ελέγχου της μύζησης με μετατόπιση άξονα (ιδέ Κεφ. 3 και 4).

**2. Αρχή των ενεργών τάσεων στα μη κορεσμένα εδάφη.** Αυτή ισχύει όσο τα εδαφικά υλικά διατηρούνται πλήρως κορεσμένα ακόμα και αν βρίσκονται υπό αρνητική πίεση πόρων. Ισχύει επίσης υπό περιορισμούς όταν έχει εμφανιστεί αέρας σε μορφή φυσαλίδων με τη θεώρηση της υγρής φάσης ως συμπιεστής. Στην περίπτωση που η αέρια φάση έχει πλέον αποκτήσει τη συνέχεια της και συνυπάρχει με τη συνεχή υγρή φάση (πολλώ δε μάλλον όταν η υγρή φάση έχει χάσει τη δική της συνέχεια) οι υπάρχουσες διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων για τις καταστάσεις αυτές φαίνεται να εξαρτώνται από την τασική διαδρομή χωρίς να έχει αποδειχτεί η καθολική ισχύς κάποιας από αυτές ανεξαρτήτως τασικής διαδρομής και μεταβολών των επιμέρους εντατικών μεγεθών στην κάθε ρευστή φάση. Ταυτόχρονα η παρουσία σε όλες τις σχετικές διατυπώσεις τουλάχιστον ενός όρου ο οποίος κατ' ουσίαν εκφράζει την κατάσταση στην οποία βρίσκονται σχετικά μεταξύ τους η υγρή και η αέρια φάση καθιστά τις σχέσεις αυτές καταστατικούς νόμους περισσότερο, παρά διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων.

**3. Παράμετροι τάσης για μη κορεσμένα εδάφη.** Καλύπτοντας το κενό που αφήνει η έλλειψη μίας σαφούς και καθολικά αποδεκτής διατύπωσης της αρχής των ενεργών τάσεων για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά, ιδίως στην κρίσιμη εκείνη περιοχή που συνυπάρχει η συνέχεια της υγρής και της αέριας φάσης των εδαφικών υλικών, χρησιμοποιούνται δύο παράμετροι τάσης προκειμένου να περιγραφεί η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Οι παράμετροι αυτές μπορεί να είναι δύο οποιοιδήποτε συνδυασμοί των τριών τάσεων/πίεσεων<sup>10</sup> των αντίστοιχων φάσεων δηλαδή της τάσης  $\sigma$  της στερεάς φάσης, της πίεσης στην υγρή φάση  $u_w$  και της πίεσης στην αέρια φάση  $u_a$ . Οι συνδυασμοί που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι η ολική τάση ανηγμένη ως προς την πίεση της αέριας φάσης

<sup>10</sup> Δεδομένου ότι μόνο η στερεά φάση μπορεί να παραλάβει διατμητικές τάσεις, το εντατικό μέγεθος που αφορά σε αυτήν είναι τάση. Αντίθετα ούτε η υγρή ούτε η αέρια φάση μπορεί να παραλάβει διατμητικές τάσεις οπότε το εντατικό μέγεθος που αφορά σε αυτές είναι πίεση.

των πόρων,  $\sigma - u_a$  και η μύζηση  $u_a - u_w$ . Προκειμένου για συνεχή αέρια φάση, η τιμή της  $u_a$  είναι αυτή της πίεσης της ατμόσφαιρας. Ο προσδιορισμός της ολικής τάσης αποτελεί μάλλον εύκολη διαδικασία αλλά η μέτρηση και ο έλεγχος της μύζησης παραμένουν αρκετά επίπονες, λεπτεπίλεπτες και χρονοβόρες, απαιτώντας ειδικό και ακριβό εξοπλισμό.

4. **Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού.** Αποτελεί την κεντρική έννοια για την κατανόηση και τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Είναι η καμπύλη μεταβολής του ποσοστού υγρασίας ή του βαθμού κορεσμού με τη μύζηση, δείχνοντας τον τρόπο με τον οποίο ένα εδαφικό υλικό χάνει νερό όσο η μύζηση αυξάνεται (όσο δηλαδή γίνεται πιο ξηρό) και τον τρόπο με τον οποίο προσροφά νερό όσο η μύζηση μειώνεται (όσο δηλαδή το υλικό επανυγραίνεται). Ο προσδιορισμός της είναι μία επίπονη διαδικασία και χρονοβόρα διαδικασία, που συνήθως μάλιστα απαιτεί εξοπλισμό υψηλού κόστους. Η γνώση της για κάθε συγκεκριμένο υλικό επιτρέπει την πρόβλεψη της εξέλιξης της συμπιεστότητάς του, της διατμητικής του αντοχής και της διαπερατότητάς του ως προς την υγρή και την αέρια φάση συναρτήσει του βαθμού κορεσμού του.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκε η φύση των μή κορεσμένων εδαφών και ορίστηκε και επεξηγήθηκε η μύζηση. Τονίστηκε δε η σημασία της παραμέτρου αυτής στη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι μέτρησης της μύζησης. Για όλες τις μεθόδους που περιγράφονται, οι παρατιθέμενες περιγραφές, πληροφορίες και αξιολογήσεις προέρχονται από τις βιβλιογραφικές αναφορές για την κάθε μέθοδο. Ειδικά σε ό,τι αφορά τη μέθοδο μετατόπισης άξονα, τη μέθοδο τενσιομέτρου, τη μέθοδο μέτρησης με χαρτιά φίλτρου, τη χρήση υγρομέτρου ψυχρού κατόπτρου και τεμαχίων γύψου και πορωδών υλικών παρατίθεται και η εμπειρία από την εφαρμογή τους από τον γράφοντα. Η παράθεση ενός κεφαλαίου για τη μέτρηση της μύζησης σε αυτό το σημείο της διδακτορικής διατριβής κρίνεται σκόπιμη, αφενός γιατί συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της ίδιας της μύζησης ως φυσικού μεγέθους, και αφετέρου γιατί η επεξήγηση πολλών από τις έμμεσες μεθόδους μέτρησης της μύζησης συνιστούν άριστη εισαγωγή για την καλύτερη κατανόηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.

### 3.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ

Μέχρι σήμερα έχουν εφευρεθεί διάφορες μέθοδοι και όργανα μέτρησης της μύζησης. Οι μέθοδοι αυτές διακρίνονται στις μεθόδους άμεσης και στις μεθόδους έμμεσης μέτρησης της μύζησης. Μέθοδοι άμεσης μέτρησης της μύζησης είναι εκείνες κατά τις οποίες η μύζηση μετρείται απευθείας, κατά τρόπο αντίστοιχο με την άμεση μέτρηση της θετικής πίεσης του νερού των πόρων ενός εδαφικού υλικού. Αντίθετα στις μεθόδους έμμεσης μέτρησης μετρείται ένα άλλο

φυσικό μέγεθος το οποίο συσχετίζεται με τη μύζηση και από αυτό υπολογίζεται η τιμή της μύζησης του εδαφικού υλικού. Για τους λόγους που εξηγούνται στην §3.3 οι μέθοδοι έμμεσης μέτρησης διακρίνονται στις μεθόδους έμμεσης μέτρησης και στις μεθόδους έμμεσου προσδιορισμού.

Οι υπάρχουσες μέθοδοι μέτρησης της μύζησης συνοψίζονται στον Πίνακα 3.1. Οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στις παραγράφους που ακολουθούν. Στην αγγλική βιβλιογραφία οι μέθοδοι των Ομάδων Α και Β απαντώνται με τον όρο indirect methods (μέθοδοι έμμεσης μέτρησης) και οι μέθοδοι της Ομάδας Γ με τον όρο direct methods (μέθοδοι άμεσης μέτρησης). Η σκοπιμότητα της διάκρισης της μεθόδου μετατόπισης άξονα από τις υπόλοιπες βασίζεται στη διαφωνία που υπάρχει διεθνώς σχετικά με το πώς ακριβώς κατατάσσεται η μέθοδος αυτή και επεξηγείται περαιτέρω στην §3.3.

**Πίνακας 3.1.** Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης και οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται.

Κατηγορία μεθόδων μέτρησης της μύζησης	Μέθοδος μέτρησης της μύζησης	
	Ελληνικός όρος	Αγγλικός όρος
<b>A. Μέθοδοι έμμεσης μέτρησης της μύζησης.</b>	Μέθοδος μετατόπισης άξονα με χρήση θαλάμου μύζησης με μεμβράνη ή πορόλιθο	Axis translation technique by use of pressure membrane or pressure plate extractor
<b>B. Μέθοδοι έμμεσου προσδιορισμού της μύζησης.</b>	Μέθοδος χαρτιού φίλτρου	Filter paper method
	Μέθοδοι τεμαχίων πορώδους υλικού	Porous blocks methods
	Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης μέσω μέτρησης της σχετικής υγρασίας	Humidity measurement methods
<b>Γ. Μέθοδοι άμεσης μέτρησης της μύζησης.</b>	Μέθοδος тенσιομέτρου με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	Tensiometer
	Μέθοδος тенσιομέτρου με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	High air entry pressure tensiometer
	Μέθοδος ωσμωτικού тенσιομέτρου	Osmotic tensiometer

Παρά την αναγνώριση από πολύ νωρίς της σημασίας της μύζησης και της μέτρησής της στη γεωπονική επιστήμη, την εδαφολογία και την εδαφομηχανική, η έλλειψη μεθόδων και συσκευών για την μέτρησή της (πολλώ δε μάλλον τον έλεγχο της) αποτελούσε τροχοπέδη στην ανάπτυξή

των συγκεκριμένων κλάδων. Ο Gardner (1937) επεσήμανε την έλλειψη μίας μεθόδου ή ενός οργάνου ικανού να μετρά τη μύζηση και τα προβλήματα που η έλλειψη αυτή δημιουργούσε στην εξέλιξη της εδαφολογίας. Οι Bocking & Fredlund (1980a) επεσήμαναν τη σημασία της έλλειψης αυτής στην πρόοδο της μελέτης της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών. Οι Fredlund & Rahardjo (1988) αναγνώρισαν ότι παρά την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών που είχε επιτευχθεί, αυτή δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθεί στην πράξη χωρίς αξιόπιστες μεθόδους μέτρησης της μύζησης.

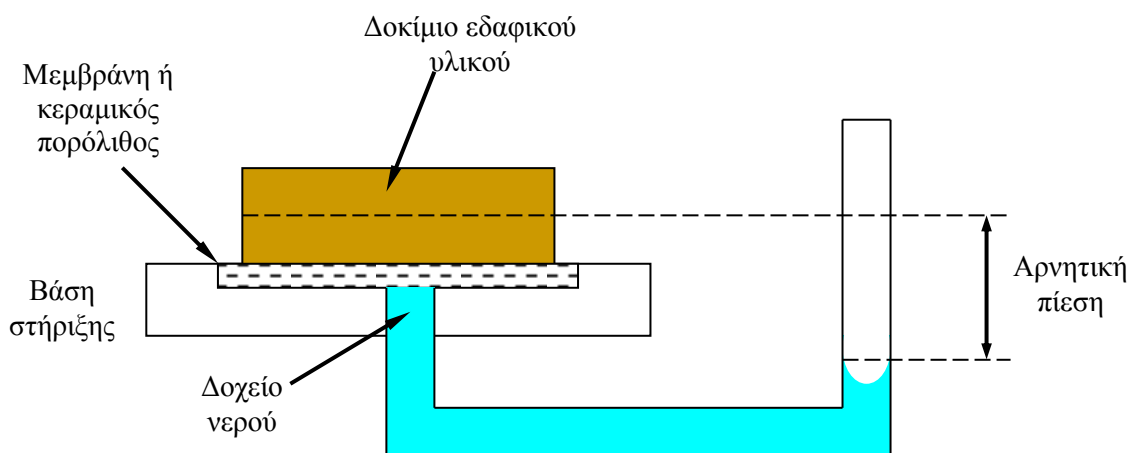
Μέσα στο χρονικό διάστημα που καλύπτουν οι αναφορές αυτές και ξεπερνάει τα 50 χρόνια αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι και όργανα μέτρησης της μύζησης με διάφορους βαθμούς ακρίβειας μέτρησης σε διάφορα εύρη τιμών της μύζησης. Από τις πιο αξιοσημείωτες ήταν η μέθοδος μετατόπισης άξονα (Richards, 1941), τα τεμάχια γύψου (Bouyoucos & Mick, 1940, Aitchison & Richards, 1965), τα ψυχρόμετρα (Richards, 1965, 1969), η μέθοδος του βαθμονομημένου χαρτιού φίλτρου (Chandler et al., 1992) και το τενσιόμετρο πορολίθου υψηλής πίεσης διεϊσδυσης αέρα (Ridley, 1993). Οι προαναφερθείσες βιβλιογραφικές αναφορές δεν αποτελούν κατ' ανάγκην τις πρώτες στις οποίες παρουσιάστηκε η αντίστοιχη μέθοδος αλλά πολύ καλής ποιότητας, περιγραφικές αναφορές με βάση τις οποίες ο ενδιαφερόμενος μπορεί να καταλάβει πλήρως και να εφαρμόσει την αντίστοιχη μέθοδο. Επίσης πρόσφατες γενικές αναφορές στις μεθόδους μέτρησης της μύζησης μπορούν να βρεθούν στους Fredlund & Rahardjo (1993), Ridley & Wray (1995), Delage (2004), Lu & Likos (2004) και Rahardjo & Leong (2006).

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται εκτενής αναφορά στις μεθόδους και τα όργανα μέτρησης της μύζησης που υπάρχουν σήμερα διαθέσιμα καταλήγοντας στη συγκριτική αξιολόγησή τους με παράθεση των μειονεκτημάτων και πλεονεκτημάτων τους. Συνοψίζονται δε και κρίσιμα χαρακτηριστικά τους όπως η ικανότητα μέτρησης της μύζησης στο εργαστήριο ή και επίπου, το εύρος τιμών της μύζησης στο οποίο μπορούν να μετρήσουν και ο απαιτούμενος χρόνος για την επίτευξη της μέτρησης. Πρέπει να γίνει κατανοητό εξαρχής ότι η πλειοψηφία των μεθόδων μέτρησης της μύζησης –όπως άλλωστε και η πλειοψηφία των μεθόδων ελέγχου της μύζησης– είναι λεπτεπίλεπτες, χρονοβόρες και απαιτούν ακριβό εξοπλισμό και επίπονη προσπάθεια για την επίτευξη αξιόπιστων μετρήσεων ακριβείας. Συνήθως, η επίλυση κάποιου από αυτά τα προβλήματα σε κάποια μέθοδο έχει ως τίμημα τη μείωση της ακρίβειας ή της αξιοπιστίας ή την αύξηση του χρόνου που απαιτείται για τη μέτρηση, ή στη χειρότερη των περιπτώσεων όλα αυτά μαζί.

### 3.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ - ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΑΞΟΝΑ (AXIS TRANSLATION TECHNIQUE)

#### 3.3.1 Αρχή της μεθόδου

Η μέθοδος μετατόπισης άξονα βασίζεται στην προγενέστερη μέθοδο μεμβράνης ή πορολίθου και αποτελεί την πρώτη μέθοδο μέτρησης της μύζησης που αναπτύχθηκε. Στην απλή μορφή της μεθόδου μεμβράνης ή πορολίθου, η διάταξη μέτρησης της μύζησης αποτελείται από ένα πορώδες άκρο (μεμβράνη ή κεραμικός πορόλιθος) ένα δοχείο κάποιου υγρού (συνήθως νερού) κάτω από το πορώδες άκρο και ένα όργανο μέτρησης της πίεσης στο υγρό του δοχείου (Σχ. 3.1). Το όργανο μέτρησης της πίεσης μπορεί να είναι ένα μανόμετρο υδραργύρου (mercury manometer), ένας μετρητής υποπίεσης (vacuum gauge), ένας μορφοτροπέας (electronic pressure transducer) ή προκειμένου για μικρές τιμές τη μύζησης ακόμα και μία βαθμονομημένη μπιρέτα, στην οποία καταγράφεται η διαφορά της στάθμης του νερού εντός αυτής με τη στάθμη του δοκιμίου επί του πορώδους άκρου (Σχ. 3.1). Το πορώδες άκρο συνήθως είναι επίπεδο επιτρέποντας την τοποθέτηση ενός εδαφικού δείγματος επί αυτού και το υλικό κατασκευής του (είτε μεμβράνη είτε πορόλιθος) έχει συνήθως πίεση διεύθυνσης αέρα 100 kPa. Το δοχείο του υγρού κάτω από το πορώδες άκρο δημιουργείται συνήθως με την τοποθέτηση μίας πλαστικής μεμβράνης υψηλής αντοχής γύρω από τον πορόλιθο και τη σταθεροποίησή της στην περιμέτρο του πορολίθου με κάποιου είδους σφικτήρα. Εναλλακτικά μπορεί να δημιουργείται με την σταθερή και στεγανή τοποθέτηση του πορολίθου πάνω από κοιλότητα εντός μεταλλικής βάσης.



**Σχήμα 3.1.** Αρχή της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με μεμβράνη ή κεραμικό πορόλιθο.

Η πίεση διείσδυσης αέρα της μεμβράνης ή του πορολίθου περιορίζεται συνήθως στα 100 kPa, αφού μεγαλύτερη τιμή της δεν θα είχε χρησιμότητα δεδομένου ότι ο όγκος του νερού στο δοχείο νερού κάτω από τη μεμβράνη ή τον πορόλιθο είναι τόσο μεγάλος που ένα δοκίμιο εδαφικού υλικού με μύζηση μεγαλύτερη από 100 kPa θα προκαλούσε φαινόμενη σπηλαιώση<sup>1</sup>. Κατά συνέπεια η μέθοδος αυτή περιορίζεται στη μέτρηση τιμών της μύζησης θεωρητικά μέχρι τα 100 kPa (πρακτικά μέχρι τα 85-90 kPa).

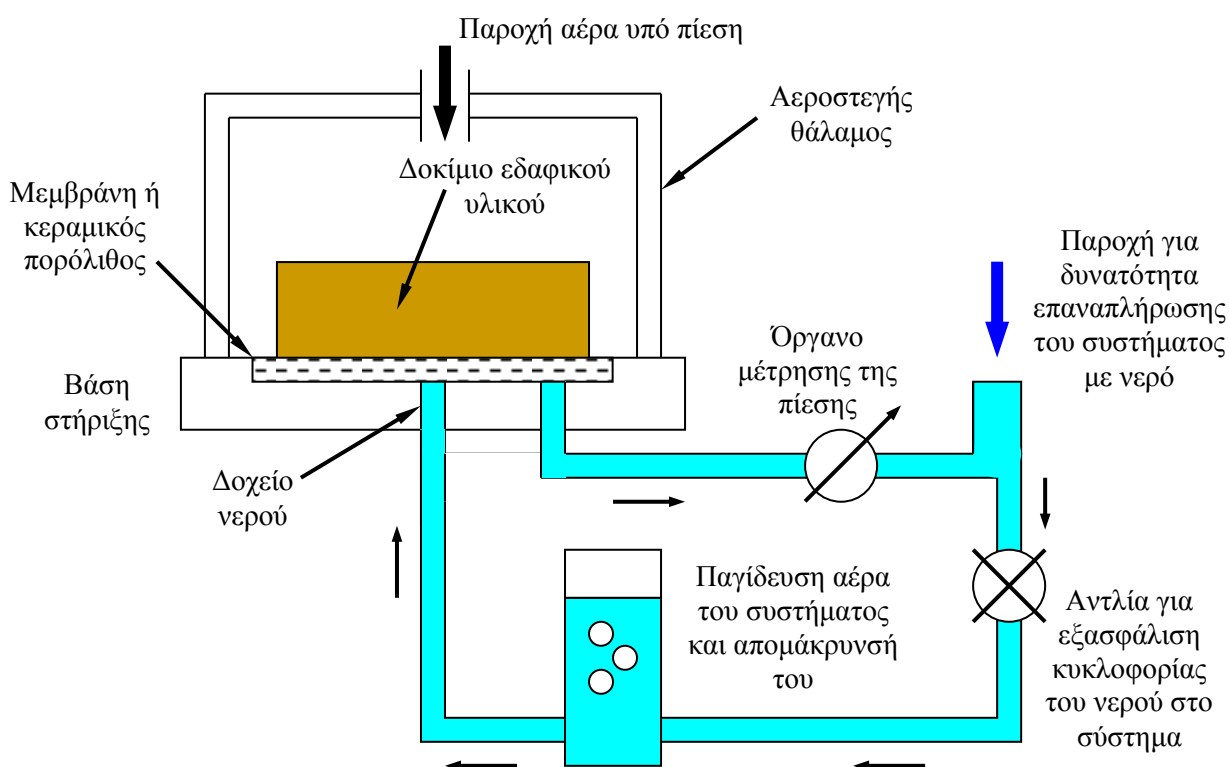
Η μέθοδος μετατόπισης άξονα βασίζεται στην προηγούμενη μέθοδο με τη διαφορά ότι το δοκίμιο του εδαφικού υλικού μαζί με τη μεμβράνη ή τον πορόλιθο τοποθετείται εντός αεροστεγώς κλεισμένου θαλάμου στον οποίο υπάρχει παροχή αέρα υπό πίεση και επικοινωνία του δοχείου του νερού με το εξωτερικό του θαλάμου όπου προσαρμόζεται κάποιο όργανο μέτρησης της πίεσης (Σχήμα 3.2). Όταν ο θάλαμος αυτός έχει κλείσει αεροστεγώς με τη μεμβράνη ή τον πορόλιθο να έχουν κορεστεί πλήρως και το δοχείο του νερού να είναι πλήρες απαερωμένου, απεσταγμένου νερού, αρχίζει η εισαγωγή αέρα υπό πίεση. Η πίεση αυτή του αέρα ασκείται εξίσου στην υγρή και στην αέρια φάση των πόρων του εδαφικού υλικού, αλλά και στο υγρό του δοχείου. Το αποτέλεσμα είναι η πίεση του αέρα των πόρων να αυξάνεται στην τιμή της πίεσης που εφαρμόζεται στο εσωτερικό του θαλάμου (γνωστή αφού είναι το μέγεθος που ελέγχεται) από την αρχική μηδενική τιμή της, και η πίεση του νερού των πόρων να αυξάνεται από την αρχική (και άγνωστη) αρνητική τιμή της, κατά μέγεθος ίσο με την ασκούμενη πίεση αέρα μέσα στο θάλαμο. Εάν η ασκούμενη πίεση αέρα μέσα στο θάλαμο είναι τόση που η αρχική αρνητική τιμή της πίεσης της υγρής φάσης των πόρων γίνει μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός (της ατμοσφαιρικής πίεσης δηλαδή) και υποθεθεί ίση με την πίεση στο υγρό του δοχείου όπου μετρείται η πίεση, τότε αυτή μπορεί να μετρηθεί με συμβατικά μέσα (ένα μανόμετρο ή έναν μορφοτροπέα μέτρησης θετικής πίεσης) και η μύζηση του εδαφικού υλικού προκύπτει ως η διαφορά της πίεσης του αέρα εντός του θαλάμου και της μετρηθείσας πίεσης στο υγρό του δοχείου μετά την εφαρμογή της πίεσης του αέρα στο θάλαμο.

Οι θάλαμοι αυτοί ονομάζονται στην αγγλική γλώσσα pressure extractors (για την ακρίβεια pressure membrane ή pressure plate extractors, ανάλογα αν χρησιμοποιείται μεμβράνη ή κεραμικός πορόλιθος) και ο όρος που έχει επικρατήσει στα ελληνικά είναι *θάλαμος μύζησης*<sup>2</sup>. Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται είναι ημιδιαπερατές, κατασκευασμένες από σελουλόζη

<sup>1</sup> Για αυτόν το λόγο εναλλακτικά των πορολίθων ή των μεμβρανών πίεσης διείσδυσης αέρα 100 kPa έχει χρησιμοποιηθεί και στρώση άμμου (sand-box method) περιορίζοντας το εύρος μέτρησης και ελέγχου της μύζησης ακόμα και κάτω από τα 50 kPa.

<sup>2</sup> Έχει ήδη καθιερωθεί στο χώρο της γεωπονικής επιστήμης, όπως άλλωστε και ο όρος μύζηση για τον όρο suction.

(cellulose) και οι κεραμικοί πορόλιθοι από αργιλικά υλικά της κατάλληλης ορυκτολογίας και κοκκομετρικής διαβάθμισης και στη συνέχεια τοποθετημένοι σε κλίβανο πολύ υψηλής θερμοκρασίας για να αποκτήσουν τις επιθυμητές ιδιότητες. Αυτές είναι υψηλή πίεση διείσδυσης αέρα σε ό,τι αφορά το ζητούμενο αλλά και σκληρότητα, ανθεκτικότητα κλπ σε ό,τι αφορά την εύκολη κατεργασία και χρήση τους. Όταν η μέθοδος μετατόπισης άξονα χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μύζησης ζητούμενο είναι και η ελάχιστη συμπίεστικότητα (ιδέ Κεφ. 4).



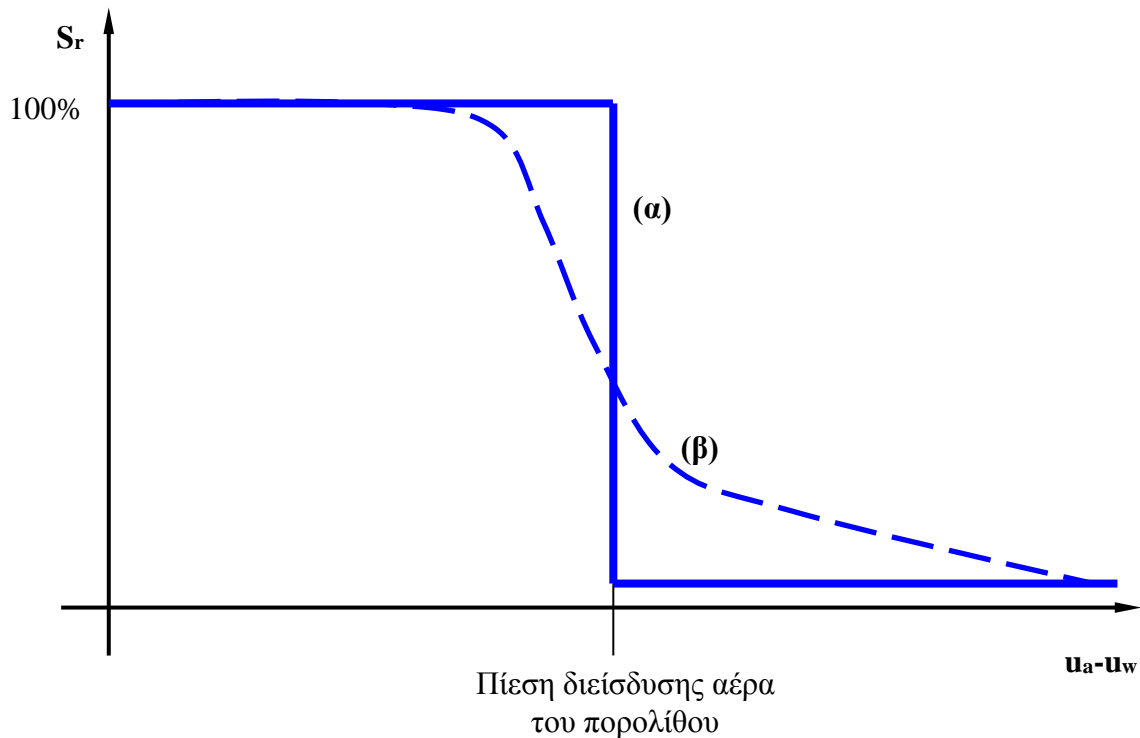
**Σχήμα 3.2.** Αρχή της μεθόδου μετατόπισης άξονα για τη μέτρηση της μύζησης.

Οι πορόλιθοι που χρησιμοποιούνται στους θαλάμους μύζησης πρέπει να έχουν κοκκομετρική διαβάθμιση τέτοια που να καταλήγει σε ομοιομορφία πόρων, η οποία οδηγεί σε σαφώς διακρινόμενη πίεση διείσδυσης αέρα του πορολίθου και απότομο *αποκορεσμό*<sup>3</sup> με την υπέρβασή της (Σχ. 3.3). Αν ο αποκορεσμός δεν ήταν απότομος, τότε αέρας θα μπορούσε να αρχίσει να περνάει από την αρχή της οριακής περιοχής μεταξύ Περιοχής I και II στην καμπύλη

<sup>3</sup> Ο όρος χρησιμοποιείται προς απόδοση του αγγλικού όρου desaturation και περιγράφει τη μετάπτωση από τιμές του βαθμού κορεσμού 100% σε τιμές μικρότερες αυτής.



συγκράτησης ύδατος του πορολίθου στο υγρό του δοχείου αλλοιώνοντας τις τιμές της πίεσης στο υγρό αυτό, οπότε δεν θα μετρείτο η σωστή τιμή της μύζησης. Ο όρος *καμπύλη συγκράτησης ύδατος* χρησιμοποιείται εναλλακτικά του όρου *χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού*. Στην προκειμένη περίπτωση αποδίδει πιο δόκιμα την καμπύλη ποσοστού υγρασίας ή βαθμού κορεσμού-μύζησης ενός υλικού όπως ένας πορόλιθος ή μια μεμβράνη, αφού δεν πρόκειται για εδαφικά υλικά.



**Σχήμα 3.3.** Καμπύλη συγκράτησης ύδατος πορολίθου σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης (α) με απότομο αποκορεσμό, και (β) με βαθμιαίο αποκορεσμό.

Στη μέθοδο μετατόπισης άξονα η μέγιστη πίεση αέρα που μπορεί να εφαρμοστεί είναι τόση, όση η πίεση διείσδυσης αέρα της μεμβράνης ή του κεραμικού πορολίθου. Αν εφαρμοστεί μεγαλύτερη πίεση αέρα τότε θα αρχίσει να διαφεύγει εκτός από νερό και αέρας δια μέσω της μεμβράνης ή του πορολίθου οπότε στο δοχείο του νερού θα έχουμε φαινόμενη σπηλαίωση και δεν θα μπορεί πια να μετρηθεί η πίεση της υγρής φάσης από το όργανο μέτρησης. Γι' αυτό η μέγιστη τιμή της μύζησης που μπορεί να μετρηθεί είναι όση και η πίεση διείσδυσης αέρα του πορολίθου ή της μεμβράνης, ώστε αν εφαρμόσουμε τόση πίεση αέρα, όση η πίεση διείσδυσης αέρα, η πίεση της υγρής φάσης θα γίνει 0 και θα έχουμε μετρήσει τη μύζηση. Κατά συνέπεια

έχει νόημα η χρησιμοποίηση πορολίθων ή μεμβρανών μεγαλύτερης πίεσης διείσδυσης αέρα από 100 kPa σε αντίθεση με την απλή μέθοδο μεμβράνης. Για αυτό το λόγο όταν στα πρώτα χρόνια χρησιμοποίησης της μεθόδου δεν είχαν αναπτυχθεί ακόμα κεραμικοί πορόλιθοι μεγαλύτερης πίεσης διείσδυσης αέρα<sup>4</sup>, χρησιμοποιήθηκαν οι μεμβράνες σελουλόζης που είχαν πίεση διείσδυσης αέρα 1500 kPa (15 Bar). Γενικά είναι δυσκολότερη η χρήση τους δεδομένου ότι σκίζονται εύκολα, είναι αναλώσιμες (κατά τον κατασκευαστή πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο μία ή δύο φορές, στην πράξη αυτό μπορεί να γίνει τρεις ή τέσσερις το πολύ) και κατά συνέπεια και ακριβές με αμφίβολη διάρκεια στο χρόνο (οπότε πρέπει να γίνεται τακτική προμήθειά τους αφού δεν προσφέρονται για μακροχρόνια αποθήκευση). Σήμερα πλέον υπάρχουν κεραμικοί πορόλιθοι με μεγαλύτερη πίεση διείσδυσης αέρα από 100 kPa, οι οποίοι φτάνουν ακόμα και σε πίεση διείσδυσης αέρα 1500 kPa. Τέτοιους πορολίθους διαθέτει ο θάλαμος μύζησης του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής (Φωτ. 3.1) και του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. (Φωτ. 3.2). Και οι δύο είναι κατασκευής Soil Moisture Inc. με δυνατότητα ταυτόχρονης υποδοχής ακόμα και τριών ή τεσσάρων πορολίθων πίεσης διείσδυσης αέρα 1500 kPa ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν πολλά δείγματα ταυτόχρονα στη συσκευή. Οι συνηθέστεροι πορόλιθοι έχουν τιμές πίεσης διείσδυσης αέρα 0.5, 1, 2, 3, 5 και 15 Bar. Σε ό,τι αφορά τις μεμβράνες σελουλόζης σήμερα έχουν αναπτυχθεί μεμβράνες με πίεση διείσδυσης αέρα που φτάνει τα 100 Bar, εκτός από τις μεμβράνες πίεσης διείσδυσης αέρα 15 Bar. Στον Πίν. 3.2 αναφέρονται βασικά χαρακτηριστικά των συνηθέστερων κεραμικών πορολίθων.

**Πίνακας 3.2.** Χαρακτηριστικά των συνηθέστερων κεραμικών πορολίθων.

Τύπος κεραμικού πορολίθου	Διάμετρος πόρων πορολίθου (κατά προσέγγιση) ( $10^{-3}$ mm)	Συντελεστής διαπερατότητας των πορολίθων (πλήρως κορεσμένοι) (m/s)	Πίεση διείσδυσης αέρα (kPa)
½ Bar υψηλής διαπερατότητας	6.00	$3.11 \times 10^{-7}$	48-62
1 Bar	1.70	$7.56 \times 10^{-9}$	138-207
1 Bar υψηλής διαπερατότητας	2.50	$8.60 \times 10^{-8}$	131-193
2 Bar	1.10	$6.30 \times 10^{-9}$	262-310
3 Bar	0.70	$2.50 \times 10^{-9}$	317-483
5 Bar	0.50	$1.21 \times 10^{-9}$	550
15 Bar	0.16	$2.59 \times 10^{-11}$	1520

Πηγή: Soilmoisture Equipment Corp. (2003)

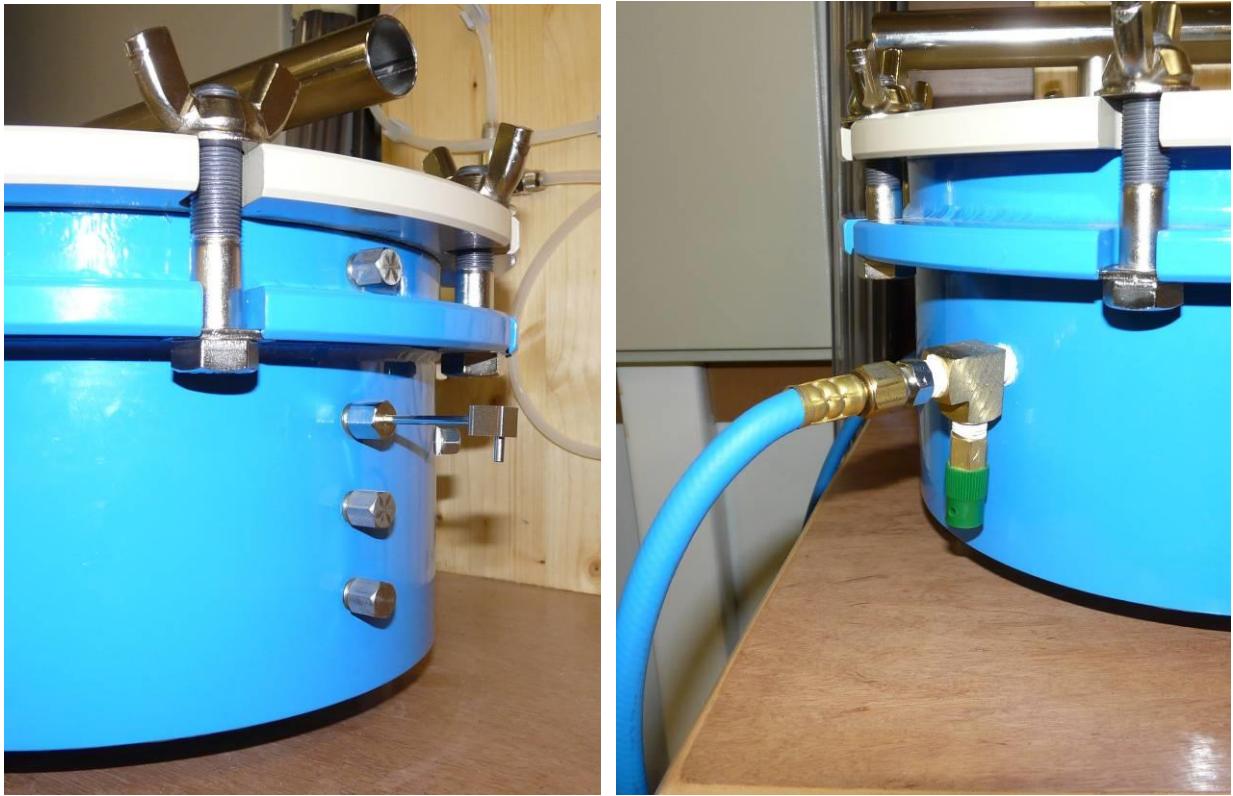
<sup>4</sup> Η ανάπτυξη των κεραμικών πορολίθων υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα υπήρξε ένα μάλλον δύσκολο επίτευγμα που απαιτήσε δεκαετίες και όταν επετεύχθη κατοχυρώθηκε εμπορικά (και παραμένει άλλωστε μέχρι σήμερα).



**Φωτογραφία 3.1.** Ο θάλαμος μύζησης του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής (Soil Moisture Inc.) με κεραμικό πορόλιθο πίεσης διείσδυσης αέρα 15 Bar. Αριστερά διακρίνεται ανοικτός με το σκέπασμα του δεξιά (α). Μεταξύ του λευκού πορολίθου και του περιβάλλοντος μαύρου ελαστικού βρίσκεται το δοχείο του νερού που επικοινωνεί με το εξωτερικό με τον λεπτό σωλήνα (A), ενώ διακρίνεται και ο χοντρότερος άσπρος σωλήνας (B) από τον οποίο εισέρχεται στον αεροστεγώς κλεισμένο θάλαμο (β) ο αέρας υπό πίεση.

Νεώτερες εκδόσεις της ίδιας συσκευής όπως ο θάλαμος μύζησης του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. έχει τέσσερις εξόδους νερού με αποτέλεσμα να μπορεί να δεχτεί τέσσερις κεραμικούς πορολίθους και άρα αντίστοιχα περισσότερα δοκίμια (Φωτ. 3.2α). Επίσης στην είσοδο του αέρα έχει προστεθεί βαλβίδα εκτόνωσης πίεσης για περισσότερη ασφάλεια κατά την χρήση της συσκευής (Φωτ. 3.2β).

Όπως προαναφέρθηκε, στη μέθοδο μετατόπισης άξονα η πίεση του νερού είναι θετική και δεν υπάρχει γενικά πρόβλημα φαινόμενης σπηλαιώσης λόγω της μύζησης που έχει το εδαφικό υλικό (όπως στην περίπτωση της απλής μεθόδου μέτρησης μεμβράνης ή πορολίθου) μέχρι πολύ μεγαλύτερες τιμές της μύζησης από 100 kPa. Ωστόσο η πίεση αέρα που ασκείται μέσα στον αεροστεγή θάλαμο είναι αρκετά μεγάλη, ώστε παρόλο που δεν έχει ξεπεραστεί η πίεση διείσδυσης αέρα του πορολίθου ή της μεμβράνης, όταν η πίεση αυτή διατηρείται για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα, είναι δυνατόν αέρας που βρίσκεται σε διάλυση μέσα στο νερό του εδαφικού υλικού το οποίο περνάει από το εδαφικό υλικό στο δοχείο νερού μέχρι να επιτευχθεί υδραυλική ισορροπία, να πάψει πια να είναι σε διάλυση και να εμφανιστεί με τη μορφή φυσαλί-



(α)

(β)

**Φωτογραφία 3.2.** Ο θάλαμος μύζησης του Εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. (Soil Moisture Inc.) με κεραμικό πορολίθο πίεσης διείσδυσης αέρα 15 Bar. Αριστερά διακρίνονται οι τέσσερις εξοδοι αέρα από τις οποίες κατά την λήψη της φωτογραφίας χρησιμοποιείτο η μία (α). Δεξιά διακρίνεται η είσοδος του αέρα υπό πίεση με την βαλβίδα εκτόνωσης της πίεσης για περισσότερη ασφάλεια.

δων στο δοχείο νερού. Γι' αυτόν το λόγο, δεν προσαρμόζεται απλώς ένα όργανο μέτρησης της πίεσης στο δοχείο νερού, αλλά ένα σύστημα κυκλοφορίας του νερού όπως αυτό που φαίνεται στο Σχ. 3.2. Έτσι το νερό κυκλοφορώντας χάρη στην παρουσία μιας αντλίας, επιτυγχάνει την παγίδευση στην κατάλληλη διάταξη τυχόν αέρα με μορφή φυσαλίδων μέσα σε αυτό και έτσι εξασφαλίζεται η ορθή μέτρηση της πίεσης του νερού. Εφόσον προβλεφθεί στη διάταξη αυτή η παρεμβολή της κατάλληλης παροχής, είναι δυνατή η επανατροφοδοσία του κυκλώματος με νερό σε περίπτωση μαζικής απώλειας καθώς και ο κορεσμός του κεραμικού πορολίθου αρχικά.

Ο πλήρης κορεσμός του πορολίθου (ή της μεμβράνης) είναι κρίσιμος για την ορθή λειτουργία της διάταξης και προκειμένου για πορολίθους πολύ υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα δεν μπορεί να επιτευχθεί σε εύλογα χρονικά διαστήματα απλώς με τη διαβροχή του πορολίθου ή την

παραμονή αυτού σε περίσσεια νερού, αλλά μόνο με την παραμονή αυτού σε περίσσεια νερού υπό αρκετά υψηλή πίεση. Στις διατάξεις αυτού του τύπου ο κορεσμός μπορεί να γίνει είτε αυξάνοντας την πίεση του νερού στο σύστημα κυκλοφορίας νερού μέχρι να αρχίσει να βγαίνει νερό από τον πορόλιθο, είτε κλείνοντας την έξοδο από το δοχείο νερού και αντί για παροχή πίεσης αέρα μέσα στο θάλαμο μύζησης, να γίνει παροχή νερού υπό την κατάλληλη πίεση για τον κορεσμό του πορολίθου.

Επίσης λόγω της φύσης των υλικών κατασκευής των πορολίθων αυτών είναι σκόπιμο κατά τον καθαρισμό τους να αποφεύγεται ο βρασμός και να προτιμάται η τοποθέτησή τους σε λουτρά υπερήχων του κατάλληλου μεγέθους συμπληρούμενη από επιφανειακό βούρτσισμα (με μαλακές βούρτσες και όχι συρματόβουρτσες). Ο βρασμός πρέπει να αποφεύγεται γενικά, ακόμα και σαν μέθοδος κορεσμού.

### 3.3.2 Εξέλιξη της μεθόδου

Η μέθοδος μεμβράνης ή πορολίθου στη μορφή των τενσιομέτρων αποτελεί την πρώτη μέθοδο μέτρησης της μύζησης που αναπτύχθηκε (Gardner et al, 1922, ιδέ αναλυτικότερα §3.8), εξέλιξη της οποίας αποτελεί η μέθοδος μετατόπισης άξονα, η οποία συνιστά την πρώτη μέθοδο μέτρησης υψηλών τιμών της μύζησης που αναπτύχθηκε (Richards, 1941).

Στη μέθοδο μεμβράνης ή πορολίθου, λόγω του σχετικά μεγάλου όγκου του νερού του σωλήνα που συνδέει το πορώδες άκρο με το όργανο μέτρησης της πίεσης η απόκριση μπορεί να είναι αργή. Επίσης, όπως προαναφέρθηκε, η χαμηλή πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού του πορώδους άκρου περιορίζει τη μέτρηση της μύζησης μέχρι τα 100 kPa. Ο Schofield (1935) αναγνώρισε αυτά τα μειονεκτήματα και πρότεινε πρώτος την επέκταση του εύρους μέτρησης της μύζησης μέσω κεραμικών πορολίθων ή πλακών πίεσης (pressure plates) με την εισαγωγή του εδαφικού δοκιμίου μαζί με τον πορόλιθο εντός ενός θαλάμου και την εφαρμογή πίεσης αέρα εντός του θαλάμου αυτού. Ο Richards (1941) ωστόσο ήταν ο πρώτος που υλοποίησε τη μέθοδο και επέδειξε πειραματικά τη χρησιμότητά της. Παρά την αντίληψη για ισόποση αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων κατά την εφαρμογή πίεσης αέρα στους θαλάμους μύζησης, ο Hilf (1956) ήταν αυτός που το επέδειξε πειραματικά. Εκτεταμένη παρουσίαση της μεθόδου και των περιορισμών της παρατίθεται από τους Bocking & Fredlund (1980a).

### 3.3.3 Σχολιασμός της μεθόδου

Η χρήση αέρα υπό πίεση για την ανύψωση της αρνητικής πίεσης του νερού των πόρων σε τιμές μεγαλύτερες της ατμοσφαιρικής, οπότε και αυτή μπορεί πλέον να μετρηθεί με συμβατικούς τρόπους, είναι γνωστή ως *μέθοδος μετατόπισης άξονα* (axis translation technique). Παρά τη μεγάλη διάδοσή της, η επιρροή της επί των εδαφικών υλικών μέχρι σήμερα δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς. Υπάρχει το ενδεχόμενο να αποτρέπει τη δημιουργία αέρα στους πόρους των εδαφικών υλικών επειδή η πίεση του νερού διατηρείται θετική. Αντίστροφα η υψηλή πίεση του περιβάλλοντος το εδαφικό δείγμα αέρα μπορεί να καθιστά ευκολότερη την είσοδο αέρα στο έδαφος από την περίπτωση που η πίεση του αέρα είναι ατμοσφαιρική. Όταν η μέθοδος χρησιμοποιείται για μέτρηση της μύζησης, οι παράγοντες αυτοί δεν επηρεάζουν σημαντικά. Όταν όμως χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μύζησης (ιδέ Κεφ. 4), όπου αποτελεί ζητούμενο ο προσδιορισμός της πίεσης διεύθυνσης αέρα και της περιοχής κατά μήκος της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που εμφανίζεται φαινόμενη σπηλαιώση, πιθανότατα παίζουν σημαντικό ρόλο.

Υπάρχει επίσης διαφωνία σχετικά με το πώς η μέθοδος αυτή κατατάσσεται, αν συνιστά δηλαδή μέθοδο άμεσης ή έμμεσης μέτρησης της μύζησης. Ο Tarantino (2003) εκφράζει ίσως τη βάση της διαφωνίας αυτών που τη θεωρούν μέθοδο έμμεσης μέτρησης λόγω των προαναφερθεισών αμφιβολιών σχετικά με την επίδραση της αυξημένης πίεσης του αέρα και της θετικής πίεσης του νερού καταλήγοντας ότι: «Θεωρώντας τη μύζηση απλώς ως τη διαφορά της πίεσης του αέρα των πόρων και της πίεσης του νερού των πόρων, τότε πράγματι η μέθοδος μετατόπισης άξονα είναι μέθοδος άμεσης μέτρησης. Λαμβάνοντας όμως υπόψη ότι πρέπει να μετρείται και υπό τις ίδιες απόλυτες τιμές της πίεσης του αέρα και του νερού των πόρων, τότε είναι έμμεση». Η θέση αυτή είναι γενικά σωστή αλλά και πάλι η μέθοδος μετατόπισης άξονα δεν είναι έμμεση μέθοδος με την έννοια των υπολοίπων έμμεσων μεθόδων στις οποίες μετρείται ένα εντελώς διαφορετικό φυσικό μέγεθος και από τη –γνωστή– συσχέτιση αυτού με τη μύζηση εξάγεται η τιμή της μύζησης. Γι' αυτό και στην αρχική κατηγοριοποίηση των μεθόδων μέτρησης της μύζησης στην παρούσα διδακτορική διατριβή διακρίθηκαν τρεις κατηγορίες μεθόδων: οι μέθοδοι άμεσης μέτρησης, οι μέθοδοι έμμεσης μέτρησης και οι μέθοδοι έμμεσου προσδιορισμού, πιστεύοντας ότι οι δύο τελευταίοι όροι εκφράζουν επιτυχώς τη διαφορά μεταξύ της μεθόδου μετατόπισης άξονα και των λοιπών μεθόδων που βασίζονται στη μέτρηση ενός εντελώς διαφορετικού φυσικού μεγέθους. Οι αντίστοιχοι αγγλικοί όροι που προτείνονται είναι: direct measurement, indirect measurement και indirect determination of suction.

Η μέθοδος αυτή πάντως επιτρέπει τη μέτρηση τιμών της μύζησης μέχρι και 1500 kPa, δεν απαιτεί τόσο υψηλούς κόστους επενδύσεις σε εργαστηριακό εξοπλισμό και ο εξοπλισμός είναι αρκετά στιβαρός και η ίδια η διαδικασία εφαρμογής της εργαστηριακής μεθόδου δεν απαιτεί λεπτεπίλεπτους χειρισμούς, δηλαδή ιδιαίτερη επιδεξιότητα από το προσωπικό που την εφαρμόζει. Ο χρόνος επίτευξης μέτρησης επίσης, αν και αντικειμενικά μεγάλος, είναι αναλογικά μικρός και ανέρχεται κατά τάξη μεγέθους σε μερικές ώρες έως 24ώρα. Από την άλλη πλευρά έχει τα ενδεχόμενα προβλήματα που πηγάζουν από την ανύψωση της πίεσης του αέρα και της πίεσης του νερού (και δεν έχουν διερευνηθεί ακόμα πλήρως) και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιτόπου μέτρηση της μύζησης.

Η μέθοδος βέβαια έχει έναν εγγενή περιορισμό σε ό,τι αφορά την ακρίβειά της που σχετίζεται με την απόκριση της πίεσης στο δοχείο του νερού μετά την εφαρμογή της πίεσης του αέρα στο θάλαμο. Στο Σχ. 3.4 απεικονίζεται η εξέλιξη της πίεσης στον αέρα του θαλάμου, η οποία είναι η ίδια με την πίεση στην αέρια φάση του υλικού του δοκιμίου, καθώς και η εξέλιξη της πίεσης στο δοχείο του νερού και στο νερό των πόρων του υλικού του δοκιμίου. Αμέσως μετά την αύξηση της πίεσης στο θάλαμο υπάρχουν δύο ενδεχόμενα: η πίεση στο νερό του δοχείου να αφεθεί να ισορροπήσει από τη στιγμιαία υψηλότερη τιμή της (Σχ. 3.4α) ή να εκτονωθεί ακαριαία και να αφεθεί να ισορροπήσει από τη στιγμιαία χαμηλότερη τιμή της (Σχ. 3.4β).

Στο Σχ. 3.4α αρχικά η πίεση της αέριας φάσης είναι μηδενική (ατμοσφαιρική) στο σημείο Α και η πίεση της υγρής φάσης αρνητική στο σημείο Β. Εφαρμόζοντας την πίεση στον αέρα του θαλάμου αυξάνεται ακαριαία, αν και στιγμιαία, και η πίεση του νερού του δοχείου στην ίδια τιμή με την πίεση του αέρα του θαλάμου στο σημείο Δ (αφού και το νερό στο δοχείο βρίσκεται αρχικά υπό ατμοσφαιρική πίεση και επικοινωνεί με τον αέρα του θαλάμου), ενώ η πίεση στην υγρή φάση του υλικού του δοκιμίου αυξάνεται κατά το ίδιο ποσό και γίνεται θετική στο σημείο Γ. Για να γίνει μέτρηση της –θετικής πλέον– πίεσης της υγρής φάσης, πρέπει να εκτονωθεί η μετρούμενη στο δοχείο του νερού θετική πίεση. Για να γίνει η εκτόνωση αυτή πρέπει να υπάρξει κάποια κίνηση νερού από το δοχείο του νερού προς το υλικό του δοκιμίου μέχρι να επιτευχθεί υδραυλική ισορροπία και η πίεση του νερού θα σταθεροποιηθεί σε μία μεγαλύτερη τιμή από εκείνη που θα απέδιδε τη σωστή τιμή της διαφοράς της αρχικής αρνητικής πίεσης της υγρής φάσης του δοκιμίου από την ατμοσφαιρική πίεση στο σημείο Ζ (ενώ η πίεση του αέρα του θαλάμου παραμένει στο Ε). Σε αυτή την περίπτωση η μύζηση που θα υπολογιστεί θα είναι μικρότερη από την αρχική πραγματική μύζηση του δοκιμίου ( $EZ < AB$ ).

Αντίθετα, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.4β, αν αμέσως μετά την ακαριαία αύξηση της πίεσης του νερού στο δοχείο μετά την αύξηση του αέρα στο θάλαμο (πίεση αέρα του θαλάμου και του νερού στο δοχείο στο  $\Delta'$ ), η πίεση αυτή εκτονωθεί πρόσκαιρα προς την ατμόσφαιρα (ανοίγοντας απλά μία βαλβίδα στην έξοδο και ξανακλείνοντάς την), τότε η πίεση στο νερό του δοχείου θα μειωθεί ακαριαία στο σημείο  $\Delta''$  και θα αυξάνει πλέον προοδευτικά μέχρι την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας σε μία μικρότερη τιμή από εκείνη που θα απέδιδε τη σωστή τιμή της διαφοράς της αρχικής αρνητικής πίεσης της υγρής φάσης του δοκιμίου από την ατμοσφαιρική πίεση στο σημείο  $Z'$  (ενώ η πίεση του αέρα του θαλάμου παραμένει στο  $E'$ ). Σε αυτή την περίπτωση η μύζηση που θα υπολογιστεί θα είναι μεγαλύτερη από την αρχική πραγματική μύζηση του δοκιμίου ( $E'Z' > A'B'$ ).

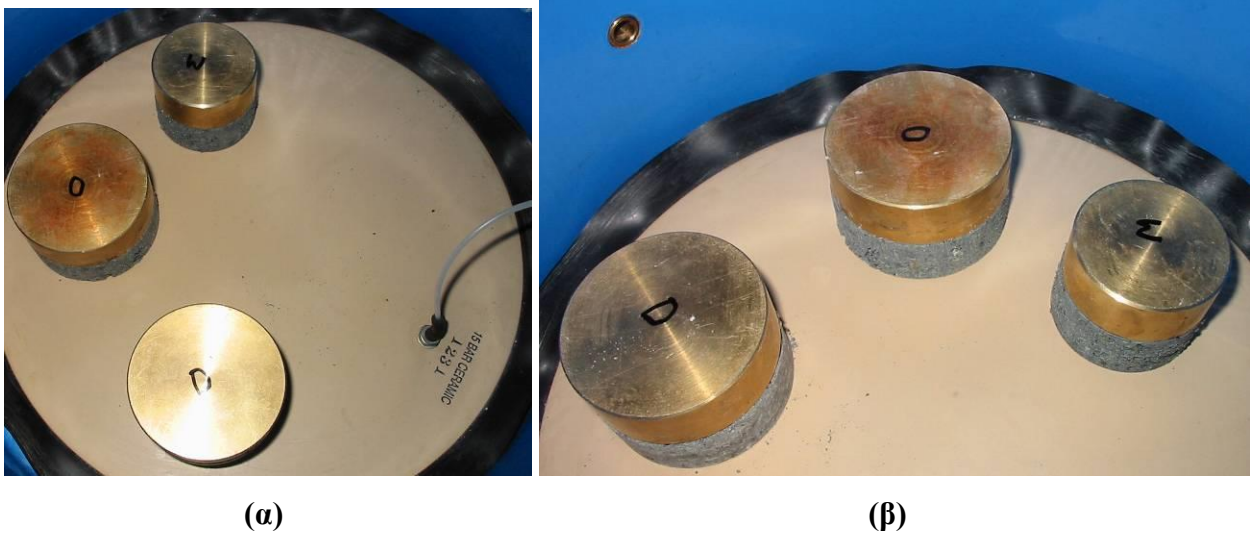
Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούνται αρκετά μεγάλου μεγέθους δοκίμια, ώστε η ποσότητα του νερού που πρέπει να κινηθεί από ή προς το δοκίμιο για να επιτευχθεί υδραυλική ισορροπία να είναι αναλογικά μικρή για να μπορεί να επηρεάσει την τιμή της μύζησης στο δοκίμιο. Επίσης σκόπιμη θα ήταν η μέτρηση και με τις δύο μεθόδους, ώστε η πραγματική τιμή της μύζησης να εγκλωβιστεί μεταξύ δύο ορίων.

Ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου που συχνά παραγνωρίζεται, είναι ότι προϋπόθεση για την εφαρμογή της είναι η παροχή αέρα υπό αρκετά υψηλή πίεση (π.χ. 15 Bar προκειμένου για τους θαλάμους μύζησης με τους αντίστοιχους πορολίθους, ή 100 Bar προκειμένου για τις μεμβράνες σελουλόζης με την αντίστοιχη πίεση διείσδυσης αέρα). Το γεγονός αυτό, είτε πολλαπλασιάζει το κόστος της απαιτούμενης επένδυσης σε σύστημα παροχής αέρα υπό την πίεση αυτή (κεντρικός αεροσυμπιεστής με δίκτυο παροχής ή μικρός αεροσυμπιεστής που συνδέεται απευθείας με τη συσκευή ή φιάλη αδρανούς αερίου υπό πίεση με τους κινδύνους που αυτή επιφυλάσσει και τις απαιτήσεις τακτικής αναγόμωσης), είτε περιορίζει την ικανότητα πλήρους εκμετάλλευσης της συσκευής.

Επίσης βασική προϋπόθεση για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου, είτε στην παραλλαγή της για τη μέτρηση της μύζησης, είτε στην παραλλαγή της για τον έλεγχο της μύζησης, είναι ότι πρέπει να εξασφαλίζεται η πολύ καλή επαφή των δοκιμίων του εδαφικού υλικού που τοποθετούνται εντός της συσκευής με τον πορόλιθο ή τη μεμβράνη. Για αυτόν το λόγο, συσκευές που ενσωματώνουν τις πιο ευαίσθητες μεμβράνες έχουν τόσο ύψος ώστε το σκέπασμά τους να πιέζει τα δοκίμια στη μεμβράνη. Αντίθετα σε συσκευές που έχουν τους πιο ανθεκτικούς κεραμικούς πορολίθους είναι σκόπιμο να τοποθετείται ένα μικρό βάρος πάνω στα δοκίμια



προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής το δοκίμιο θα διατηρεί πάντα καλή επαφή με τον κεραμικό πορόλιθο. Στην Φωτ. 3.3 παρουσιάζονται δοκίμια συμπυκνωμένου αποσαθρωμένου σερπεντινίτη εντός του θάλαμου μύζησης της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. με μικρά βάρη τοποθετημένα πάνω τους για την εξασφάλιση της συνεχούς επαφής με τον κεραμικό πορόλιθο. Είναι γεγονός ότι αυτό περιορίζει την εξωτερική επιφάνεια των δοκιμίων επί της οποίας ασκείται απευθείας η πίεση του αέρα αυξάνοντας έτσι πιθανόν τον απαιτούμενο χρόνο επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας. Η εμπειρία ωστόσο δείχνει ότι η έλλειψη καλής επαφής δοκιμίου-πορολίθου μπορεί από το να παρατείνει πολύ περισσότερο τον απαιτούμενο χρόνο επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας, έως και να αλλοιώσει πλήρως τα εργαστηριακά αποτελέσματα.

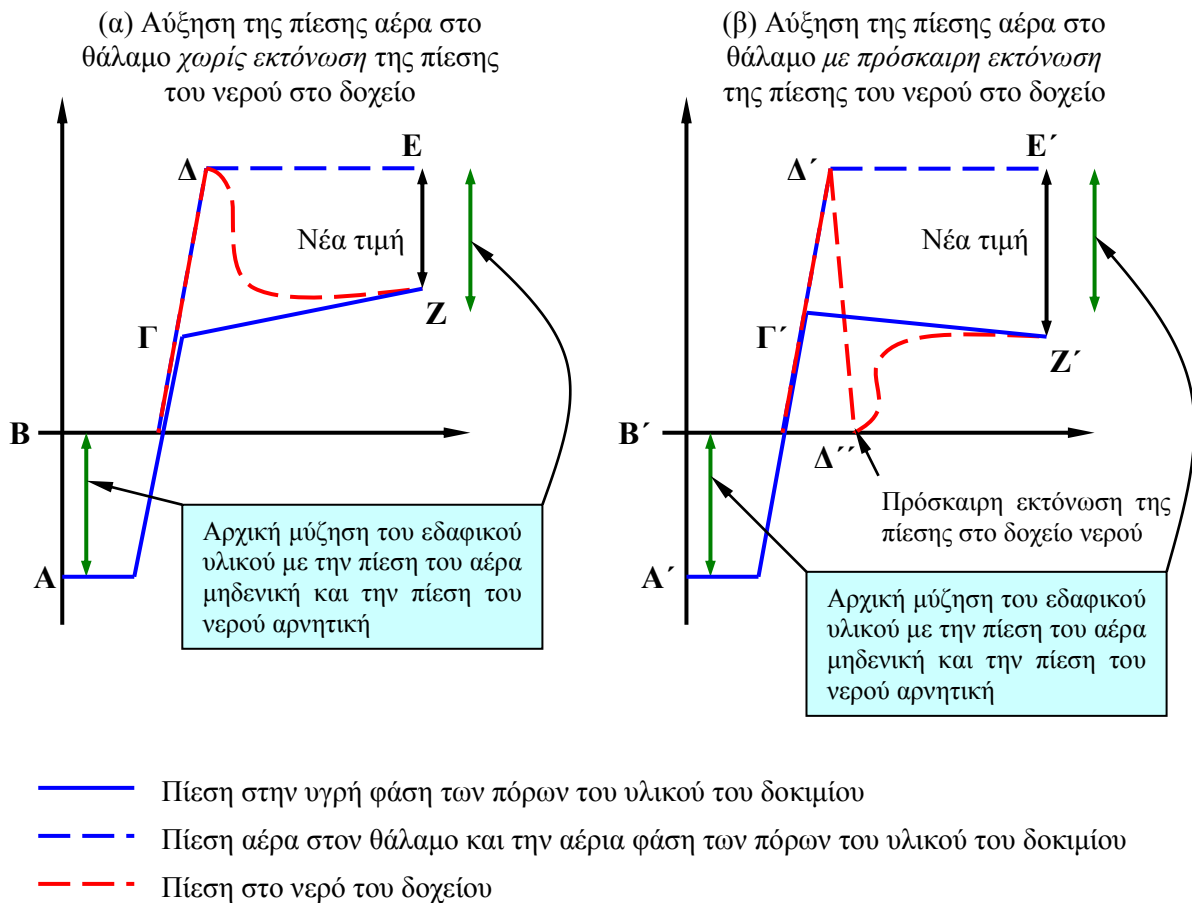


**Φωτογραφία 3.3.** Ο θάλαμος μύζησης του Εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. (Soil Moisture Inc.) με κεραμικό πορόλιθο πίεσης διείσδυσης αέρα 15 Bar και τρία δοκίμια συμπυκνωμένου αποσαθρωμένου σερπεντινίτη. Αριστερά (α) διακρίνονται τα τρία δοκίμια με τα βάρη από πάνω τους και ο σωλήνας επικοινωνίας του δοχείου νερού με την έξοδο. Δεξιά (β) διακρίνεται η είσοδος του αέρα υπό πίεση (πάνω αριστερά στην φωτογραφία) και ξανά τα τρία δοκίμια με τα βάρη από πάνω τους. Τα σύμβολα W, O και D αντιστοιχούν σε συνθήκες συμπίκνωσης «υγρά» από τη βέλτιστη υγρασία κατά τη δοκιμή Proctor, ακριβώς σε αυτήν, και «ξηρά» από αυτήν.

Επίσης, παρά το πολύ μικρό μέγεθος των πόρων των μεμβρανών ή των κεραμικών πορολίθων, αυτοί δεν μπορούν να αποτρέψουν τη διέλευση και των διαλυμένων ουσιών που υπάρχουν στην

υγρή φάση των πόρων του δοκιμίου. Κατά συνέπεια στη μέθοδο μεμβράνης και στη μέθοδο μετατόπισης άξονα μετρείται η μύζηση εδαφικού σκελετού.

Παρά τα μειονεκτήματα που προαναφέρθηκαν, η ανάπτυξη της μεθόδου μετατόπισης άξονα ήταν κρίσιμη για την πρόοδο της μελέτης της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών αφού, εκτός από μεθόδους μέτρησης της μύζησης, επί δεκαετίες υπήρξε η μόνη διαθέσιμη μέθοδος ελέγχου της μύζησης (ιδέ Κεφ. 4). Σήμερα μάλιστα η μέθοδος έχει ενσωματωθεί και στα πρότυπα της ASTM (American Society of Testing and Materials) στην παραλλαγή που αφορά τον έλεγχο της μύζησης (ιδέ Κεφ. 4). Στον Πίν. 3.3 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των μεθόδων μεμβράνης και μετατόπισης άξονα.



**Σχήμα 3.4.** Χαρακτηριστικά απόκρισης ενός θαλάμου μύζησης με αύξηση της πίεσης αέρα στο θάλαμο α) χωρίς και β) με εκτόνωση της πίεσης του νερού στο δοχείο (πρόσκαιρη).

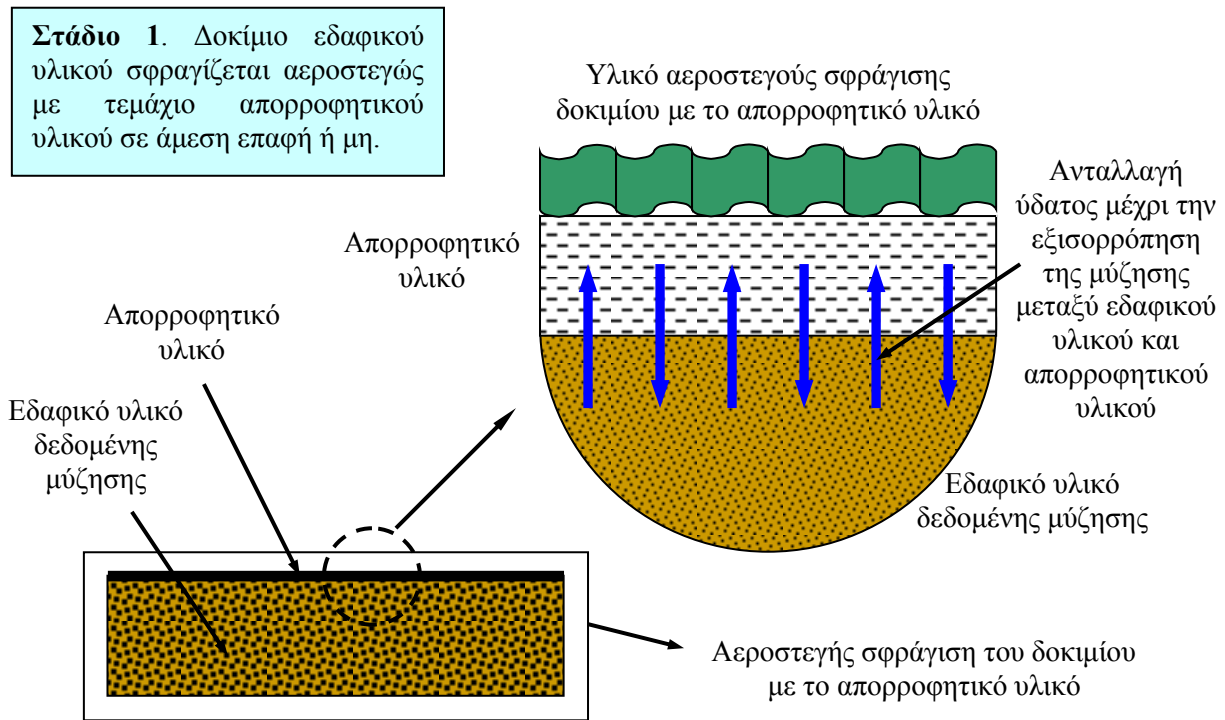
**Πίνακας 3.3.** Συνόπηση χαρακτηριστικών των μεθόδων μεμβράνης ή πορολίθου και μετατόπισης άξονα.

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Είδος μετρούμενης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Μεμβράνης ή πορολίθου	ΝΑΙ	ΟΧΙ	Έως 100 kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Ώρες
Μετατόπισης άξονα	ΝΑΙ	ΟΧΙ	Όση η πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού του πορολίθου. Συνήθως 1500 kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Ώρες έως 24ώρα

### 3.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΧΑΡΤΙΟΥ ΦΙΛΤΡΟΥ (FILTER PAPER METHOD)

#### 3.4.1 Αρχή της μεθόδου

Η μέθοδος χαρτιού φίλτρου βασίζεται στην αρχή ότι εάν ένα δείγμα υγρού εδαφικού υλικού βρεθεί σε επαφή με ένα τεμάχιο υλικού ικανού να απορροφά νερό (είτε το υλικό αυτό έχει κάποια υγρασία είτε είναι τελείως ξηρό), τότε θα έχουμε ροή ύδατος από το εδαφικό υλικό στο τεμάχιο αυτού του υλικού μέχρι να επέλθει υδραυλική ισορροπία μεταξύ τους (Σχ. 3.5). Αν το μέγεθος του δείγματος του εδαφικού υλικού είναι μεγάλο σε σχέση με το μέγεθος του τεμαχίου του απορροφητικού υλικού (ώστε αυτή καθεαυτή η διαδικασία της μέτρησης, δηλ. η ανταλλαγή νερού, να μη μεταβάλλει σημαντικά την τιμή του ποσοστού υγρασίας του εδαφικού δείγματος και άρα της μετρούμενης μύζησης), τότε το ποσοστό υγρασίας του απορροφητικού υλικού μπορεί να βαθμονομηθεί ώστε να δίνει τη μύζηση (να υπολογιστεί δηλαδή η τιμή της μύζησης που αντιστοιχεί σε κάθε τιμή του ποσοστού υγρασίας του απορροφητικού υλικού). Ένα άμεσα διαθέσιμο υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτό το σκοπό είναι το εργαστηριακό χαρτί φίλτρου. Οι δύο πιο διαδεδομένοι τύποι σήμερα για την εφαρμογή της μεθόδου είναι το Whatman No. 42 (Φωτ. 3.4) και το Schleicher & Schuell No. 589. Επί τη βάση της αρχής στην οποία βασίζεται η μέθοδος είναι προφανές ότι μπορεί θεωρητικά να χρησιμοποιηθεί και οποιοδήποτε άλλο χαρτί φίλτρου και γενικότερα οποιοδήποτε άλλο απορροφητικό υλικό για το οποίο θα έχει πραγματοποιηθεί η κατάλληλη βαθμονόμηση. Η αρχή αυτής της μεθόδου βρίσκεται ουσιαστικά εκτεταμένη εφαρμογή και σε όλες τις άλλες έμμεσες μεθόδους μέτρησης της μύζησης, σε ό,τι αφορά τη βαθμονόμησή τους ως προς γνωστές τιμές της μύζησης με χρήση κάποιας ή κάποιων από τις μεθόδους ελέγχου της μύζησης (Κεφ. 4).



**Στάδιο 2.** Το δοκίμιο του εδαφικού υλικού αφήνεται για το απαιτούμενο χρονικό διάστημα σφραγισμένο με το τεμάχιο απορροφητικού υλικού μέχρι την εξισορρόπηση της μύζησης μεταξύ των δύο υλικών.

**Στάδιο 3.** Το δοκίμιο με το τεμάχιο απορροφητικού υλικού αποσφραγίζονται και υπολογίζεται το ποσοστό υγρασίας του απορροφητικού υλικού. Από αυτό υπολογίζεται η μύζησή του απορροφητικού υλικού που λόγω επίτευξης ισορροπίας είναι η ίδια με εκείνη του δοκιμίου.

Σχήμα 3.5. Αρχή της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με χαρτί φίλτρου.



Φωτογραφία 3.4. Συσκευασία χαρτιών φίλτρου Ø55mm No 42 της εταιρείας Whatman.

### 3.4.2 Εξέλιξη της μεθόδου

Ο Gardner (1937) υπήρξε ο πρώτος που ανέφερε τη χρήση χαρτιού φίλτρου για τη μέτρηση της μύζησης των εδαφικών υλικών. Χρησιμοποίησε χαρτιά φίλτρου Schleicher & Schuell No. 589 διαμέτρου 9 cm τοποθετημένα αρχικά υγρά ή αρχικά ξηρά σε δοκίμια εδαφικού υλικού. Η υδραυλική ισορροπία επήλθε σε 5 έως 6 ημέρες σε θερμοκρασία περί τους 25 °C εντός αεροστεγώς σφραγισμένου δοχείου. Τα χαρτιά φίλτρου είχαν εμβαπτιστεί σε διάλυμα χλωριούχου υδραργύρου (HgCl<sub>2</sub>) συγκέντρωσης 0.2% πριν την τοποθέτησή τους, προκειμένου να αποφευχθεί η προσβολή τους από μικροοργανισμούς που μπορεί να βρίσκονταν στο εδαφικό υλικό (δεδομένης και της πολυήμερης παραμονής τους σε επαφή με το εδαφικό υλικό). Η βαθμονόμηση των χαρτιών φίλτρου έγινε με έλεγχο της μύζησης μέσω διαλύματος θειικού οξέος για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες των 1500 kPa και με έλεγχο της μύζησης με φυγοκεντρική για τιμές της μύζησης από 0 έως 1500 kPa (ιδέ Κεφ. 4 για τις μεθόδους ελέγχου της μύζησης).

Οι Fawcett & Collis-George (1967) αναφέρουν την πρώτη χρήση χαρτιού φίλτρου Whatman No. 42 για τη μέτρηση του «χαρακτηριστικού εδάφους-υγρασίας» (soil-moisture characteristic). Η βαθμονόμηση των χαρτιών φίλτρου έγινε με θάλαμο μύζησης και ξηραντήρα υποπίεσης (vacuum dessicator) στο εύρος τιμών μύζησης από 10 kPa έως 100 MPa σε χαρτιά φίλτρου που είχαν ξηρανθεί στον αέρα. Τα χρησιμοποιηθέντα χαρτιά φίλτρου είχαν εμβαπτιστεί σε διάλυμα χλωριούχου υδραργύρου συγκέντρωσης 0.005% και στη συνέχεια είχαν αποξηρανθεί σε φούρνο θερμοκρασίας 105 °C. Οι καμπύλες βαθμονόμησης των Fawcett & Collis-George (1967) περιγράφονται από τις Εξ. 3.1α και 3.1β (όπου  $s$  η μύζηση του δοκιμίου του εδαφικού υλικού και  $w_{fp}$  το ποσοστό υγρασίας του χαρτιού φίλτρου).

$$\log s = 4.777 - 0.06 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} < 43\% \quad (3.1\alpha)$$

$$\log s = 2.271 - 0.023 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} > 43\% \quad (3.1\beta)$$

Το εδαφικό δείγμα χωριζόταν στα δύο, στην άνω πλευρά του κάτω μισού δείγματος τοποθετούντο τρία χαρτιά φίλτρου, επί αυτών πιεζόταν ελαφρά το άλλο μισό του δείγματος και το σύνολο τοποθετείτο εντός στεγανού δοχείου που αφηνόταν σε θερμοκρασία 22 °C για 6 έως 7 ημέρες. Μόνο το κεντρικό από τα τρία χαρτιά φίλτρου χρησιμοποιείτο για τον προσδιορισμό της μύζησης προκειμένου έτσι να αποφευχθεί το πρόβλημα της επικόλλησης εδαφικού υλικού πάνω

σε χαρτιά φίλτρου ευρισκόμενα σε απευθείας επαφή με το εδαφικό υλικό (οπότε αλλοιώνεται το βάρος του χαρτιού φίλτρου).

Οι McQueen & Miller (1968) χρησιμοποίησαν χαρτιά φίλτρου Schleicher & Schuell No. 589 για να μετρήσουν την «τάση εδαφικής υγρασίας» (soil moisture stress) με παρόμοια διαδικασία με αυτή του Gardner (1937). Το διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για την αρχική επεξεργασία των φίλτρων ήταν διάλυμα πενταχλωροφαινόλης σε αιθανόλη συγκέντρωσης 3%. Το ξηραμένο στον αέρα χαρτί φίλτρου τοποθετείτο πάνω στο εδαφικό δείγμα και στη συνέχεια δείγμα και χαρτί φίλτρου σφραγίζονταν αεροστεγώς. Μετά την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας, το χαρτί φίλτρου αποσπάτο και υπολογιζόταν το ποσοστό υγρασίας του. Αναγνωρίστηκε η ιδιαίτερη σημασία της διαδικασίας αποκόλλησης του χαρτιού από το δείγμα, της μεταφοράς του στο ζυγό και η ίδια η ζύγιση αυτού στη συνέχεια. Η ταχύτητα εργασίας και η ελαχιστοποίηση της επαφής του χαρτιού φίλτρου με τα χέρια ή εργαλεία αποδείχτηκε κρίσιμη. Μετά από τουλάχιστον δύο ώρες στο φούρνο οι υποδοχείς ξήρανσης σκεπάζονταν εντός του φούρνου πριν εξαχθούν από αυτόν, εξάγονταν και αφήνονταν να κρυώσουν στη θερμοκρασία του χώρου για 30 δευτερόλεπτα πριν τη ζύγιση σε αναλυτικό ζυγό ακριβείας 0.0002 g. Η καταγραφή αυτή από τους McQueen & Miller (1968) είναι η πρώτη τόσο λεπτομερής καταγραφή της μέτρησης της μύζησης με τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου στη βιβλιογραφία.

Η βαθμονόμηση του χαρτιού φίλτρου έγινε σε τρία εύρη τιμών μύζησης. Για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες των 1500 kPa υγρά και ξηρά χαρτιά φίλτρου εκτέθηκαν σε κορεσμένα διαλύματα αλάτων σε κλειστά δοχεία. Τα φίλτρα ζυγίστηκαν σε χρόνους 7, 14, 28 και 76 ημερών προκειμένου να προσδιοριστεί ο απαιτούμενος χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας. Στα 33.5 MPa και στα 9.8 MPa η απορρόφηση νερού είχε πρακτικά ολοκληρωθεί μετά από 7 ημέρες, ενώ στα 2.7 MPa το βάρος και των υγρών και των ξηρών φίλτρων εξακολουθούσε να αλλάζει ακόμα και μετά από 76 ημέρες. Για τιμές της μύζησης από 10 έως 1500 kPa η βαθμονόμηση έγινε με την τοποθέτηση υγρών και ξηρών χαρτιών φίλτρου επί δοκιμίων εδαφικού υλικού που είχαν ήδη αποκτήσει την επιθυμητή τιμή μύζησης σε θαλάμους μύζησης και την τοποθέτηση δειγμάτων και χαρτιών σε αεροστεγώς κλεισμένα δοχεία. Για τιμές της μύζησης μικρότερες των 20 kPa η βαθμονόμηση έγινε με χρήση δοκιμίων εδαφικού υλικού από γνωστά ύψη πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και την μετατροπή τους σε μύζηση. Τα ποσοστά υγρασίας των χαρτιών φίλτρου που προσδιορίστηκαν σχεδιάστηκαν σε διάγραμμα με τις τιμές της μύζησης σε λογαριθμική κλίμακα. Οι καμπύλες βαθμονόμησης που προέκυψαν περιγράφονται από τις Εξ. 3.2α και 3.2β.

$$\log s = 5.246 - 0.0723 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} < 54\% \quad (3.2\alpha)$$

$$\log s = 1.895 - 0.0103 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} > 54\% \quad (3.2\beta)$$

Οι ίδιοι συγγραφείς υπήρξαν επίσης οι πρώτοι που αναγνώρισαν τη δυνατότητα χρήσης της μεθόδου χαρτιού φίλτρου όχι μόνο για τη μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού αλλά και τη μέτρηση της ολικής μύζησης. Αναγνώρισαν ότι σε ένα χαρτί φίλτρου *ευρισκόμενο σε άμεση επαφή* με το εδαφικό υλικό η απορρόφηση νερού γίνεται μέσω ροής (*κίνησης δηλαδή του νερού χωρίς να αλλάζει φάση*), ενώ αντίθετα σε ένα χαρτί φίλτρου το οποίο βρίσκεται στο ίδιο στεγανό δοχείο με το δείγμα του εδαφικού υλικού *αλλά όχι σε επαφή με το δείγμα* αυτή γίνεται με την *απορρόφηση υδρατμών από τον μεταξύ δείγματος και χαρτιού αέρα*. Επίσης αναγνώρισαν πρώτοι ότι για ιδιαίτερα ξηρά δείγματα εδαφικού υλικού, το νερό μεταξύ των κόκκων και των πλακιδίων έχει απομείνει πια μόνο στους μικρότερους από τους πόρους του εδαφικού υλικού και τις παρυφές των μεγαλύτερων πόρων και κατά συνέπεια άμεση επαφή μεταξύ του χαρτιού φίλτρου και του νερού των πόρων δεν είναι πλέον δυνατή. Κατά συνέπεια η απορρόφηση από το χαρτί φίλτρου γίνεται πλέον μόνο με απορρόφηση υδρατμών και ως εκ τούτου η προσδιοριζόμενη μύζηση σε τόσο ξηρά δείγματα είναι η ολική, ακόμα και αν τα χαρτιά φίλτρου βρίσκονται σε επαφή με τα εδαφικά δείγματα.

Οι Al-Khafaf & Hanks (1974) πραγματοποίησαν μια εργαστηριακή διερεύνηση της βαθμονόμησης των χαρτιών φίλτρου Schleicher & Schuell No. 589 για να διαπιστώσουν την επιρροή της μεταβολής της θερμοκρασίας και της ποιότητας της επαφής μεταξύ χαρτιού φίλτρου και εδαφικού υλικού επί της ακρίβειας της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με χαρτί φίλτρου. Οι δύο βασικές παρατηρήσεις τους είναι ότι η μέθοδος χαρτιού φίλτρου βασίζεται στην υπόθεση ότι η μύζηση του εδαφικού υλικού είναι ή ίδια με τη μύζηση του χαρτιού φίλτρου ευρισκόμενου σε επαφή με το εδαφικό υλικό μετά την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας και ότι το χαρτί φίλτρου πρέπει πάντα να τοποθετείται υγρό ώστε να αποφεύγεται η υστέρηση. Η προετοιμασία των χαρτιών φίλτρου έγινε όπως από τους McQueen & Miller (1968) αλλά εκτελέστηκαν δύο σειρές πειραμάτων. Στην πρώτη σειρά πειραμάτων, δύο χαρτιά φίλτρου τοποθετήθηκαν μαζί με τα δείγματα μέσα σε αεροστεγώς κλεισμένα δοχεία. Το ένα χαρτί φίλτρου βρισκόταν σε άμεση επαφή με το δείγμα στην πάνω πλευρά του και το άλλο χαρτί φίλτρου μεταξύ ενός κομματιού πολυαιθυλενίου και ενός κομματιού κοινού χαρτιού με το σύνολο τοποθετημένο σε επαφή με το εδαφικό δείγμα και κάτω από αυτό. Στην άλλη σειρά πειραμάτων ένα χαρτί φίλτρου βρισκόταν μέσα στο αεροστεγώς κλεισμένο δοχείο με το εδαφικό δείγμα, διαχωριζόμενο από αυτό με έναν

λαστιχένιο δακτύλιο. Οι δοκιμές αυτές αντιπροσώπευαν αντίστοιχα ασαφή επαφή, καλή επαφή και καθόλου επαφή του χαρτιού φίλτρου με το εδαφικό δείγμα. Κάθε δοκιμή πραγματοποιήθηκε μέσα σε αεροστεγώς κλεισμένο δοχείο ευρισκόμενο σε θάλαμο ελεγχόμενης θερμοκρασίας υπό θερμοκρασίες 15, 20, 24 και 32 °C καθώς και σε θάλαμο χωρίς έλεγχο της θερμοκρασίας.

Η βαθμονόμηση των χαρτιών φίλτρου έγινε με χρήση διαλυμάτων χλωριούχου καλίου και μετρήσεις της δημιουργούμενης μύζησης με ψυχρόμετρα για επιβεβαίωση για το εύρος τιμών της μύζησης από 100 έως 5000 kPa, με θάλαμο μύζησης για το εύρος τιμών της μύζησης από 10 έως 1500 kPa και με δείγματα από δεδομένα ύψη πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα για το εύρος τιμών της μύζησης από 0 έως 10 kPa. Οι καμπύλες βαθμονόμησης που προέκυψαν περιγράφονται από τις Εξ. 3.3α και 3.3β.

$$\log s = 5.117 - 0.0337 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} < 83\% \quad (3.3\alpha)$$

$$\log s = 1.983 - 0.0090 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} > 83\% \quad (3.3\beta)$$

Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι εκεί που η θερμοκρασία παρέμενε σταθερή, τα ποσοστά υγρασίας των χαρτιών φίλτρου ήταν τα ίδια για όλα τα μεγέθη δειγμάτων. Εκεί όμως που η θερμοκρασία μεταβαλλόταν, ήταν μεγάλη και η διασπορά στα ποσοστά υγρασίας των χαρτιών φίλτρου. Στις περιπτώσεις που υπήρχε έλεγχος της θερμοκρασίας, τα ποσοστά υγρασίας των χαρτιών φίλτρου τοποθετημένων σε ασαφή επαφή με τα εδαφικά δείγματα και των χαρτιών φίλτρου που δεν είχαν τοποθετηθεί σε επαφή με τα εδαφικά δείγματα είχαν διαφορές μικρότερες του 1% μεταξύ τους. Αντίθετα εκεί που δεν υπήρχε έλεγχος της θερμοκρασίας, η διαφορά σε αυτά τα ποσοστά υγρασίας ήταν από 4% έως 6%. Η απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας δεν είχε επιρροή. Οι δοκιμές με τα χαρτιά φίλτρου σε ασαφή επαφή συμφωνούσαν με τα αποτελέσματα των McQueen & Miller (1968) ενώ αντίθετα οι δοκιμές με τα χαρτιά φίλτρου σε καλή επαφή με το δείγμα έδειξαν υψηλότερο ποσοστό υγρασίας στην κατάσταση υδραυλικής ισορροπίας σε σύγκριση με τις αντίστοιχες ασαφούς επαφής (το οποίο αντιστοιχεί σε υψηλότερη τιμή της μύζησης).

Ο McKeen (1980) προσδιόρισε και εκείνος τις δικές του καμπύλες βαθμονόμησης για χαρτιά φίλτρου Schleicher & Schuell No. 589 με χρήση διαλυμάτων αλάτων και της μεθόδου μετατόπισης άξονα. Οι καμπύλες βαθμονόμησης που προσδιόρισε περιγράφονται από τις Εξ. 3.4α και 3.4β.



$$\log s = 4.900 - 0.0624 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} < 66\% \quad (3.4\alpha)$$

$$\log s = 1.250 - 0.0069 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} > 66\% \quad (3.4\beta)$$

Ο Hamblin (1981) επιδίωξε την διάδοση της μεθόδου η οποία μέχρι τότε είχε αγνοηθεί σημαντικά και προτίμησε τη χρήση χαρτιών φίλτρου Whatman No. 42. Οι χρόνοι επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας μειώθηκαν σε λιγότερο από δύο ημέρες με την τοποθέτηση ενός μόνο χαρτιού φίλτρου σε επαφή με το δοκίμιο του εδαφικού υλικού αντί για τη χρήση χαρτιού φίλτρου προστατευμένου μεταξύ δύο άλλων χαρτιών. Εδαφικό υλικό κολλημένο στο χαρτί φίλτρου είτε αφαιρείτο είτε ζυγίζοταν μαζί με το χαρτί φίλτρου. Αυτό θεωρείτο ότι επηρέαζε λιγότερο από την εξάτμιση που συνέβαινε όταν περνούσε πολύς χρόνος για τον καθαρισμό του φίλτρου. Η χρήση χλωριούχου υδραργύρου δεν θεωρήθηκε απαραίτητη<sup>5</sup> και μετρήσεις έγιναν:

- α) με τοποθέτηση του χαρτιού φίλτρου στην κάτω πλευρά ενός εδαφικού δείγματος εντός αεροστεγώς κλεισμένου μεταλλικού δοχείου,
- β) με τοποθέτηση του χαρτιού φίλτρου ανάμεσα στα τεμάχια ενός κομμένου πυρήνα γεωτρήσεως ο οποίος στη συνέχεια σφραγίζοταν αεροστεγώς, και
- γ) με τοποθέτηση χαρτιού φίλτρου σε προδιατηρημένες σχισμές στο έδαφος επιτόπου.

Ο τελευταίος τρόπος μέτρησης αποτελεί και την πρώτη καταγεγραμμένη απόπειρα επιτόπου μέτρησης της μύζησης με τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου. Ο Hamblin (1981) προσδιόρισε καμπύλη βαθμονόμησης περιγραφόμενη από μία εξίσωση μόνο (Εξ. 3.5).

$$\log s = 5.281 - 0.0822 w_{fp} \quad (3.5)$$

Οι Chandler & Gutierrez (1986) διερεύνησαν τη χρήση χαρτιών φίλτρου Whatman No. 42 για τη μέτρηση της επιτόπου ενεργού τάσης. Και αυτοί αναγνώρισαν την έλλειψη ανάγκης εμβάπτισης των χαρτιών φίλτρου σε διάλυμα χλωριούχου υδραργύρου. Η καμπύλη βαθμονόμησης των Fawcett & Collis-George (1967) επιβεβαιώθηκε στο εύρος τιμών 100 kPa έως 6000 kPa με

<sup>5</sup> Οι προηγούμενοι ερευνητές προέρχονταν συνήθως από το χώρο της γεωπονικής επιστήμης και το ενδιαφέρον τους εστιαζόταν σε εδαφικά υλικά κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (γεωργικό έδαφος –agricultural soil) όπου πράγματι υπάρχουν μικροοργανισμοί. Αντίθετα προκειμένου για εδαφικά υλικά σε μεγαλύτερα βάθη όπου επικεντρώνεται το ενδιαφέρον της εδαφομηχανικής η παρουσία μικροοργανισμών είναι λιγότερο πιθανή οπότε δεν υφίσταται λόγος εμπιστοσύμης των χαρτιών φίλτρου με κάποιο διάλυμα για την αντιμετώπιση των μικροοργανισμών.

χρήση δοκιμίων στερεοποιημένων σε συμπιεσόμετρο σε γνωστή τάση και αποφορτισμένων πλήρως υπό πρακτικά αστράγγιστες συνθήκες. Μετά την εξαγωγή του δείγματος από την κυψέλη του συμπιεσομέτρου τοποθετείτο ένα χαρτί φίλτρου στην πάνω και ένα στην κάτω του πλευρά με τους αντίστοιχους δίσκους από Perspex στην πάνω και κάτω πλευρά του δείγματος και το σύνολο τυλιγόταν σε μεμβράνη και σφραγιζόταν με παραφίνη στην οποία και παρέμενε για 5 ημέρες. Οι Chandler & Gutierrez (1986) πρότειναν την δική τους καμπύλη βαθμονόμησης χαρτιών φίλτρου Whatman No. 42, η οποία έχει βρει ιδιαίτερη αποδοχή στη γεωτεχνική κοινότητα. Η καμπύλη βαθμονόμησης που προέκυψε περιγράφεται από την Εξ. 3.6.

$$\log s = 4.850 - 0.0622 w_{fp} \quad (3.6)$$

Επίσης η ξήρανση και η ύγρανση των χαρτιών φίλτρου επιδείχθηκε ότι συμβαίνει πολύ γρήγορα υπό συνθήκες ατμοσφαιρικές συνθήκες σε ένα εργαστήριο και για αυτό προτάθηκε η ζύγιση των χαρτιών φίλτρου εντός 30 δευτερολέπτων από την αποσφράγιση της συσκευασίας τους με τα εδαφικά δείγματα και την απομάκρυνσή τους από αυτά.

Οι Greacen, et al. (1987) παρουσίασαν αποτελέσματα μετρήσεων της μύζησης με τη μέθοδο χαρτιών φίλτρου στο εύρος 10 kPa έως 50 kPa όπου κατ' αυτούς είναι μεγαλύτερη η διασπορά των μετρήσεων με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Έγινε βαθμονόμηση και των χαρτιών φίλτρου Whatman No. 42 και των Schleicher & Schuell No. 589 σε τρία επίπεδα τιμών μύζησης σε αυτό το εύρος ( 10 kPa, 20 kPa και 50 kPa) με χρήση θαλάμου μύζησης. Οι καμπύλες βαθμονόμησης που προσδιόρισαν περιγράφονται από τις Εξ. 3.7α και 3.7β για τα χαρτιά φίλτρου Schleicher & Schuell No. 589 και από τις Εξ. 3.8α και 3.8β για τα χαρτιά φίλτρου Whatman No. 42.

$$\log s = 5.058 - 0.0688 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} < 54\% \quad (3.7\alpha)$$

$$\log s = 1.882 - 0.0102 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} > 54\% \quad (3.7\beta)$$

$$\log s = 5.327 - 0.0780 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} < 45.3\% \quad (3.8\alpha)$$

$$\log s = 2.413 - 0.0135 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} > 45.3\% \quad (3.8\beta)$$

Πρότειναν επίσης ότι τα χαρτιά φίλτρου πρέπει να τοποθετούνται μέσα σε επίπεδα πλαστικά σακουλάκια κατά τη μεταφορά τους από το δείγμα μέχρι τον ζυγό. Επέδειξαν επίσης ότι σε

αυτές τις χαμηλές τιμές της μύζησης η ύγρανση των χαρτιών φίλτρου είχε ολοκληρωθεί σε ποσοστό 90% στα πρώτα μόλις λεπτά από την τοποθέτησή τους σε επαφή με το δοκίμιο του εδαφικού υλικού με το υπόλοιπο ποσοστό της ύγρανσης να γίνεται τις επόμενες ημέρες. Αποθαρρύνουν δε την χρήση ξένων υλικών για τον εγκλωβισμό μεταξύ τους των χαρτιών φίλτρου καθώς διαφορές στη θερμοκρασία μεταξύ των υλικών και του εδαφικού υλικού μπορεί να προκαλέσουν υγροποίηση υδρατμών επί του χαρτιού φίλτρου αυξάνοντας το ποσοστό υγρασίας του.

Οι ίδιοι παρουσιάζουν επίσης ένα ενδιαφέρον εργαλείο για τη μέτρηση της μύζησης επιτόπου με τη μέθοδο χαρτιών φίλτρου. Ένας σωλήνας πρόσβασης διαμέτρου 18 mm τοποθετείται στο έδαφος μέχρι το επιθυμητό βάθος και μία κωνική τρύπα διανοίγεται μέσα από αυτόν στον πυθμένα της οπής πρόσβασης. Εντός της κωνικής οπής και σε άμεση επαφή με το έδαφος τοποθετείται ένα χαρτί φίλτρου σταθεροποιημένο σε κώνο όμοιων διαστάσεων με την τρύπα. Όταν εξαχθεί το χαρτί από το έδαφος είτε τυλίγεται σε αλουμινόχαρτο και στη συνέχεια τοποθετείται σε θάλαμο υποπίεσης με υψηλή σχετική υγρασία, είτε τοποθετείται σε σφραγισμένο δοκιμαστικό σωλήνα για τη μεταφορά του στο εργαστήριο. Δεν αναφέρουν ωστόσο πληροφορίες για την επιτυχία ή μη εφαρμογή της μεθόδου.

Οι Richards & Peter (1987) αναγνώρισαν πρώτοι ότι η καμπύλη βαθμονόμησης εξαρτάται από τη συσκευασία των χαρτιών φίλτρου και κάθε συσκευασία θα πρέπει να βαθμονομείται ξεχωριστά πριν τη χρησιμοποίηση των χαρτιών φίλτρου. Στη συνέχεια παρουσίασαν τη βαθμονόμηση χαρτιών φίλτρου Whatman No. 42 η οποία όμως δεν διέφερε σημαντικά από αυτή που έχει προσδιοριστεί από άλλους ερευνητές.

Οι Fredlund & Rahardjo (1988) παρουσίασαν μετρήσεις της ολικής μύζησης με φίλτρα Schleicher & Schuell No. 589 και με ψυχρόμετρα οι οποίες βρίσκονται σε καλή συμφωνία μεταξύ τους στο εύρος τιμών μύζησης 300 kPa έως 2000 kPa.

Οι Sibley, et al. (1990) παρουσίασαν καμπύλες βαθμονόμησης και στατιστικές αναλύσεις των καμπυλών βαθμονόμησης χαρτιών φίλτρου από διαφορετικές συσκευασίες της ίδιας όμως εργοστασιακής παρτίδας. Ο σκοπός της εργασίας τους ήταν να επιδείξουν ότι εφόσον τα χαρτιά φίλτρου προέρχονταν από την ίδια εργοστασιακή παρτίδα, αρκούσε ο προσδιορισμός της καμπύλης βαθμονόμησης σε χαρτιά φίλτρου από μία συσκευασία μόνο. Αυτό αποδείχθηκε

πράγματι αλλά δεν προσδιορίστηκαν καμπύλες βαθμονόμησης και σε συσκευασίες χαρτιών φίλτρου από άλλες παρτίδες, οπότε η σχετική εργασία έμεινε ελλιπής.

Οι El-Ehwany & Houston (1990) αναγνώρισαν πρώτοι την σκοπιμότητα προσδιορισμού καμπυλών βαθμονόμησης για μετρήσεις της μύζησης με τα χαρτιά φίλτρου σε επαφή με το εδαφικό υλικό και για μετρήσεις με τα χαρτιά φίλτρου σε απόσταση από το εδαφικό υλικό. Προσδιόρισαν τη δική τους καμπύλη βαθμονόμησης για χαρτιά φίλτρου που δεν βρίσκονταν σε άμεση επαφή αλλά είχαν αφεθεί να έρθουν σε ισορροπία με τρία διαλύματα αλάτων και καθαρό νερό εντός αεροστεγώς κλεισμένων δοχείων και κατέληξαν σε μία γραμμική συσχέτιση μεταξύ της σχετικής υγρασίας και του λογαρίθμου του ποσοστού υγρασίας των χαρτιών φίλτρου. Υιοθετώντας στη συνέχεια τη σχέση του Kelvin (Εξ. 2.11) προσδιόρισαν μία συσχέτιση μεταξύ μύζησης και ποσοστού υγρασίας των χαρτιών φίλτρου. Η συσχέτιση αυτή διαφέρει σημαντικά από την καμπύλη βαθμονόμησης του McKeen (1980) η οποία προσδιορίστηκε με χρήση διαλυμάτων αλάτων αλλά και θαλάμου μύζησης για τέτοια χαρτιά φίλτρου αλλά αυτό δεν σχολιάστηκε από τους συγγραφείς. Περαιτέρω διερεύνηση της σκοπιμότητας διάκρισης των καμπυλών βαθμονόμησης για μετρήσεις της μύζησης με τα χαρτιά φίλτρου σε επαφή με το εδαφικό υλικό και για μετρήσεις με τα χαρτιά φίλτρου σε απόσταση από το εδαφικό υλικό μπορούν να βρεθούν και στους Houston et al. (1994).

Οι Sibley & Williams (1990) παρουσίασαν μία ενδιαφέρουσα σύγκριση της ευαισθησίας διαφορετικών υλικών χρησιμοποιούμενων ως απορροφητικά υλικά (διάφοροι τύποι μεμβράνης και χαρτιά φίλτρου Whatman No. 42) και κατέληξαν στον καθορισμό του εύρους της μύζησης που κάθε υλικό έχει αυξημένη ευαισθησία προσδιορισμού της μύζησης. Οι ίδιοι ωστόσο κατέληξαν ότι αν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί μόνο ένα υλικό σε όλο το εύρος τιμών μύζησης, το καταλληλότερο είναι τα χαρτιά φίλτρου Whatman No. 42.

Οι Crilly, et al. (1991) παρουσίασαν ένα όργανο μέτρησης της μύζησης επιτόπου με χρήση της μεθόδου χαρτιού φίλτρου. Το χαρτί φίλτρου εισάγεται στην ανοικτή οπή μιας γεώτρησης ή οπής με αντιστηριζόμενα τοιχώματα τυλιγμένο γύρω από μεταλλικό στέλεχος χωρίς να έρθει σε επαφή με το έδαφος. Γύρω από το σωλήνα περιτύλιξης του χαρτιού φίλτρου και πάνω από αυτόν υπάρχει γυάλινος δοκιμαστικός σωλήνας ο οποίος όταν περάσει επαρκής χρόνος ώστε να θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί ισορροπία κατεβαίνει σφραγίζοντας στη θέση του το χαρτί φίλτρου που κατ' αυτό τον τρόπο δεν χάνει υγρασία μέχρι την εξαγωγή του από την οπή και τη ζύγιση του. Ο σφραγισμένος σωλήνας εξάγεται από την οπή και ζυγίζεται στο εργαστήριο. Η καμπύλη

βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή των Chandler & Gutierrez (1986). Το χαρτί φίλτρου στη μέθοδο αυτή δεν βρίσκεται ποτέ σε επαφή με το εδαφικό υλικό και γι' αυτό μετρούνται μόνο τιμές της ολικής μύζησης. Ο χρόνος επίτευξης ισορροπίας του οργάνου διερευνήθηκε και προσδιορίστηκε στις δύο εβδομάδες.

Οι Chandler, et al. (1992) δημοσίευσαν μία προέκταση της καμπύλης βαθμονόμησης για χαρτιά φίλτρου Whatman No. 42 ευρισκόμενα σε επαφή με το εδαφικό υλικό για το εύρος τιμών μύζησης από 0 έως 120 kPa. Οι καμπύλες βαθμονόμησης που προσδιόρισαν περιγράφονται από τις Εξ. 3.9α και 3.9β.

$$\log s = 4.842 - 0.0622 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} < 47\% \quad (3.9\alpha)$$

$$\log s = 6.050 - 2.48 \log w_{fp}, \text{ για } w_{fp} > 47\% \quad (3.9\beta)$$

Οι Lee & Wray (1992) χρησιμοποίησαν χαρτιά φίλτρου Schleicher & Schuell No. 589 σε επαφή και χωρίς επαφή με το εδαφικό υλικό για τη μέτρηση της μύζησης. Δεν προσδιόρισαν καμπύλη βαθμονόμησης αλλά χρησιμοποίησαν την καμπύλη άλλων ερευνητών και μάλιστα θεώρησαν ότι ισχύει η ίδια και για τις δύο περιπτώσεις (χαρτιά φίλτρου σε επαφή ή χωρίς επαφή με το εδαφικό υλικό). Οι τιμές της μύζησης που προσδιορίστηκαν με τα χαρτιά φίλτρου σε επαφή με τα εδαφικά δείγματα συγκρίνονταν πολύ καλά με τις αντίστοιχες μετρήσεις σε θάλαμο μύζησης. Αντίθετα, οι μετρηθείσες τιμές της μύζησης με τα χαρτιά φίλτρου να μην βρίσκονται σε επαφή με το εδαφικό υλικό στο εύρος 100 έως 400 kPa έδωσαν υψηλότερες τιμές της μύζησης που μετρήθηκε με ψυχρόμετρο. Οι ίδιοι αναφέρουν ότι επειδή το χαρτί φίλτρου στην χρησιμοποιηθείσα καμπύλη βαθμονόμησης είχε βαθμονομηθεί με χρήση θαλάμου μύζησης στο εύρος 100 έως 1500 kPa είναι δυνατόν αυτός ο κλάδος της καμπύλης βαθμονόμησης να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μέτρηση της ολικής μύζησης με το χαρτί φίλτρου να μην βρίσκεται σε επαφή με το εδαφικό υλικό. Δεν προτείνουν ωστόσο καμιά εναλλακτική καμπύλη βαθμονόμησης για τα χαρτιά φίλτρου στο εύρος χαμηλών τιμών της μύζησης.

Οι Miller & Nelson (1992) εισήγαγαν ένα νέο χαρτί φίλτρου με την ονομασία Thomas Scientific No. 4705-F10 και παρουσίασαν μία καμπύλη βαθμονόμησης για το εύρος τιμών μύζησης 200 kPa έως 4000 kPa, την οποία προσδιόρισαν με χρήση διαλυμάτων χλωριούχου καλίου. Αντίστοιχη καμπύλη βαθμονόμησης για τη μύζηση εδαφικού σκελετού δεν παρουσιάστηκε. Η καμπύλη βαθμονόμησης που προσδιόρισαν περιγράφεται από την Εξ. 3.10.

$$\log s = 4.883 - 0.0599 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} < 43\% \quad (3.10)$$

Πιο πρόσφατα παρουσιάστηκε ένα ακόμη είδος χαρτιού φίλτρου κινεζικής προέλευσης με τις αντίστοιχες καμπύλες βαθμονόμησης στο εύρος 10 έως 1500 kPa, το ShuangQuan No. 202 (Jiang, et al., 2000). Πραγματοποιήθηκαν μάλιστα βαθμονομήσεις επί κύκλων ξήρανσης-ύγρυνσης χωρίς να παρατηρηθεί υστέρηση για το συγκεκριμένο χαρτί φίλτρου. Η καμπύλη βαθμονόμησης που πρότειναν οι Jiang, et al. (2000) για μονοτονική ξήρανση περιγράφεται από την Εξ. 3.11 για το εύρος τιμών μύζησης μεταξύ 10 και 1000 kPa.

$$\log s = 3.663 - 0.0147 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} > 30\% \quad (3.11)$$

Οι Bulut, et al. (2000α) επίσης πρότειναν τη δική τους καμπύλη βαθμονόμησης για χαρτιά φίλτρου Schleicher & Schuell No. 589, η οποία περιγράφεται από εκθετική συσχέτιση μεταξύ του λογαρίθμου της μύζησης και του ποσοστού υγρασίας των χαρτιών φίλτρου (Εξ. 3.12). Οι Bulut, et al. (2000β) συνέκριναν μετρήσεις της μύζησης με τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου και χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης των Bulut, et al. (2000α) και με τη μέθοδο του ψυχομέτρου και βρήκαν ότι με τη συγκεκριμένη καμπύλη βαθμονόμησης μετρούνται χαμηλότερες τιμές της μύζησης.

$$\log s = 1.1247 w_{fp}^{-0.8473}, \text{ για } w_{fp} > 25\% \quad (3.12)$$

Οι Likos & Lu (2002) πραγματοποίησαν μία ανάλυση ευαισθησίας της μέτρησης της μύζησης με τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου με το ποσοστό υγρασίας των χαρτιών φίλτρου. Χρησιμοποίησαν υδατικά διαλύματα αλάτων για τον έλεγχο της μύζησης των χαρτιών φίλτρου και πραγματοποίησαν 5 μετρήσεις της μύζησης ανά υδατικό διάλυμα. Όπως προέκυψε, η τυπική απόκλιση των μετρήσεων τους αυξανόταν με την αύξηση του ποσοστού υγρασίας των φίλτρων, υποδεικνύοντας μεγαλύτερη διασπορά σε αυτό το εύρος ποσοστού υγρασίας των χαρτιών φίλτρου που αντιστοιχεί σε χαμηλές τιμές μύζησης. Επί τη βάση αυτών των αποτελεσμάτων, οι Lu & Likos (2004) πρότειναν τη χρήση της μεθόδου μέτρησης της ολικής μύζησης με χαρτιά φίλτρου σε απόσταση από το εδαφικό δείγμα για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες των 1000 kPa, παρόλο που αναγνωρίζουν ότι η συγκεκριμένη μέθοδος θα μπορούσε θεωρητικά να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της μύζησης σε ολόκληρο το εύρος τιμών της. Η αδυναμία έγκειται περισσότερο στη μείωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της μεθόδου, παρά σε αυτή καθαυτή τη θεωρητική αδυναμία εφαρμογής. Το αντίστοιχο με τις χαμηλές τιμές της

μύζησης προτείνουν οι Likos & Lu (2002) και για τις πολύ υψηλές, συστήνοντας τον περιορισμό της μεθόδου για τιμές της μύζησης μικρότερες των 500000 kPa.

Οι Leong, et al. (2002) προσδιόρισαν επίσης τις δικές τους καμπύλες βαθμονόμησης για χαρτιά φίλτρου Whatman No. 42, ξεχωριστά μάλιστα για μετρήσεις της μύζησης εδαφικού σκελετού και της ολικής μύζησης. Οι καμπύλες βαθμονόμησης στις οποίες κατέληξαν περιγράφονται από τις Εξ. 3.13α και 3.13β για τη μύζηση εδαφικού σκελετού και τις Εξ. 3.14α και 3.14β για την ολική μύζηση.

$$\log s = 4.945 - 0.0673 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} < 47\% \quad (3.13\alpha)$$

$$\log s = 2.909 - 0.0229 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} > 47\% \quad (3.13\beta)$$

$$\log s = 5.310 - 0.3010 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} < 26\% \quad (3.14\alpha)$$

$$\log s = 8.778 - 0.2220 w_{fp}, \text{ για } w_{fp} > 26\% \quad (3.14\beta)$$

Πιο πρόσφατα, οι Marinho & Oliveira (2006) επιχειρηματολόγησαν υπέρ της ύπαρξης μίας και μοναδικής καμπύλης βαθμονόμησης των χαρτιών φίλτρου Whatman No. 42 (αυτής των Chandler, et al., 1992) αποδίδοντας τις αποκλίσεις των υπολοίπων καμπυλών βαθμονόμησης στην αδυναμία προσδιορισμού ανά περίπτωση της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης κατά τον προσδιορισμό της καμπύλης βαθμονόμησης των χαρτιών φίλτρου. Πρότειναν επίσης τη χρήση μεγάλων χρονικών διαστημάτων για επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας κατά τη μέτρηση της ολικής μύζησης (αποδίδοντας τις παρατηρηθείσες αποκλίσεις των καμπυλών βαθμονόμησης και στη μή τήρηση των χρόνων αυτών) και συγκεκριμένα:

α) για τιμές της ολικής μύζησης μεταξύ 0 και 100 kPa: χρόνος αρκετά μεγαλύτερος από 30 ημέρες (η πρόταση αυτή βρίσκεται σε συμφωνία με τα ευρήματα των McQueen & Miller, 1968, για τις μικρότερες τιμές της μύζησης που διερεύνησαν εκείνοι),

β) για τιμές μεταξύ 100 και 250 kPa: 30 ημέρες,

γ) για τιμές μεταξύ 250 και 1000 kPa: 15 ημέρες, και

δ) για τιμές μεταξύ 1000 και 30000 kPa: 7 ημέρες

Πραγματοποίησαν επίσης μικροφωτογράφιση χαρτιών φίλτρου από διαφορετικές παρτίδες στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο καταλήγοντας ότι δεν μπορούν να τεκμηριωθούν αλλαγές στη μικροδομή των χαρτιών φίλτρου που να δικαιολογούν μεταβολές στην καμπύλη βαθμονόμησης των χαρτιών φίλτρου από παρτίδα σε παρτίδα. Μακροσκοπικά ωστόσο παρατήρησαν μεταβολές του ξηρού βάρους των χαρτιών φίλτρου ακόμα και κατά 5%. Παρά τα επιχειρήματά τους είναι αμφίβολο κατά πόσο μπορεί να γίνει αποδεκτή η έννοια μίας και μοναδικής καμπύλης βαθμονόμησης, ακόμα και για τον ίδιο τύπο χαρτιού φίλτρου.

Πριν από τους Marinho & Oliveira (2006) και οι Bulut, et al. (2001) και οι Bulut & Wray (2005) είχαν υποστηρίξει ότι είναι κοινή η καμπύλη βαθμονόμησης χαρτιών φίλτρου για τη μέτρηση και της ολικής αλλά και της μύζησης εδαφικού σκελετού, όπως προκύπτει από έλεγχο της μύζησης με υδατικά διαλύματα.

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με χαρτιά φίλτρου αποτελεί σήμερα μία εγκεκριμένη μέθοδο της ASTM (πρότυπο D 5298-03, ASTM, 2006). Προτείνεται η χρήση της μεθόδου με τα χαρτιά φίλτρου σε επαφή με το εδαφικό υλικό για τη μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού και με τα χαρτιά φίλτρου να μην βρίσκονται σε επαφή με το εδαφικό υλικό για τη μέτρηση της ολικής μύζησης, πάντοτε με την παρατήρηση ότι εάν το εδαφικό υλικό έχει γίνει πολύ ξηρό, τότε και η μέθοδος με το χαρτί φίλτρου σε επαφή με το εδαφικό υλικό μετρά την ολική μύζηση. Για τη μέτρηση της ολικής μύζησης δύο χαρτιά φίλτρου τοποθετούνται στο ίδιο στεγανό δοχείο με το εδαφικό δείγμα και διαχωρίζονται από αυτό με συρμάτινο πλέγμα ή άλλο παρόμοιο διαχωριστικό, χωρίς να ακουμπούν στο δείγμα ή τα τοιχώματα του δοχείου και το σκέπασμά του<sup>6</sup>. Για τη μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού ένα χαρτί φίλτρου τοποθετείται ανάμεσα σε δύο προστατευτικά χαρτιά φίλτρου του ίδιου τύπου με ελαφρά μεγαλύτερη διάμετρο και όλα μαζί τοποθετούνται ανάμεσα σε ένα σχισμένο εδαφικό δείγμα και σφραγίζονται μέσα σε μεταλλικό στεγανό δοχείο. Και για τα δύο είδη μετρήσεων τα δοχεία κλείνονται αεροστεγώς μέσα σε μεγαλύτερα θερμομονωμένα κουτιά<sup>7</sup> ώστε να παραμένει πρακτικά σταθερή η θερμοκρασία τους και αφήνονται εκεί για 7 ημέρες για να επιτευχθεί υδραυλική ισορροπία (ή για τον χρόνο που κρίνεται κατάλληλος). Προτείνεται όλα τα χαρτιά φίλτρου να ξηραίνονται πριν από την χρήση τους σε φούρνο θερμοκρασίας 110 °C. Το πρότυπο παρέχει τυπικές καμπύλες βαθμονόμησης για χαρτιά φίλτρου Whatman No. 42 και Schleicher & Schuell No. 589

---

<sup>6</sup> Αφού εκεί μπορεί να υγροποιηθούν υδρατμοί, οι οποίοι ακουμπώντας το χαρτί φίλτρου θα αυξήσουν το ποσοστό υγρασίας του αλλοιώνοντας τη μέτρηση.

<sup>7</sup> Για παράδειγμα κουτιά από φελιζόλ ή άλλο παρόμοιο θερμομονωτικό υλικό.



(καμπύλες βαθμονόμησης των Greacen, et al., 1987) αν και προτείνει τον προσδιορισμό καμπυλών βαθμονόμησης για τα συγκεκριμένα χαρτιά φίλτρου που θα χρησιμοποιηθούν. Σε ό,τι αφορά τη διγραμμική μορφή των καμπυλών βαθμονόμησης, αναφέρεται ότι για ποσοστά υγρασίας των χαρτιών φίλτρου μικρότερα του αντιστοιχούντος στο σημείο καμπής, η υγρασία συγκρατείται σε λεπτές στρώσεις απορροφημένες στην επιφάνεια των πλακιδίων που αποτελούν το εδαφικό υλικό, ενώ για τις υψηλότερες τιμές του ποσοστού υγρασίας το νερό συγκρατείται ανάμεσα στους κόκκους και τα πλακίδια των εδαφικών υλικών λόγω τριχοειδών φαινομένων.

Οι διάφορες εξισώσεις των καμπυλών βαθμονόμησης που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα συγκεντρώνονται στον Πίν. 3.4.

### 3.4.3 Σχολιασμός της μεθόδου

Συνοψίζοντας την εξέλιξη και χρήση της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με χαρτιά φίλτρου μέχρι σήμερα καταλήγουμε στα εξής:

- Οι μέχρι στιγμής έρευνες έχουν εστιαστεί περισσότερο στη διερεύνηση των καμπυλών βαθμονόμησης των διαφόρων τύπων χαρτιού φίλτρου παρά στις πραγματικές μετρήσεις μύζησης με τη μέθοδο αυτή και την εφαρμογή τους.
- Από όλους τους ερευνητές που έχουν ασχοληθεί μέχρι σήμερα με τη μέθοδο αυτή έχει διαφύγει το γεγονός ότι οι ονομαζόμενες «καμπύλες βαθμονόμησης» των διαφόρων ειδών χαρτιού φίλτρου είναι κατ' ουσία *οι καμπύλες συγκράτησης ύδατος (χαρακτηριστικές καμπύλες απορροφητικού υλικού-νερού) των χαρτιών φίλτρου* και ως εκ τούτου κατά τον προσδιορισμό τους ισχύουν τα ίδια σημεία στα οποία πρέπει να επιδεικνύεται προσοχή όπως και με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού οποιουδήποτε εδαφικού υλικού.
- Αναγνωρίζοντας το παραπάνω γίνεται προφανές ότι κάθε τύπος χαρτιού φίλτρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη μέθοδο αυτή, αρκεί να προσδιορίζεται πρώτα η χαρακτηριστική καμπύλη απορροφητικού υλικού-νερού για το υλικό αυτό διαμορφωμένο και τοποθετημένο όπως θα χρησιμοποιηθεί και κατά τη μέτρηση της μύζησης εδαφικών υλικών. Η χαρακτηριστική καμπύλη δηλαδή πρέπει να είναι εκείνη που αντιστοιχεί στην επεξεργασία του χαρτιού φίλτρου που θα χρησιμοποιηθεί και στα χαρτιά φίλτρου κατά τη μέτρηση, δηλαδή προξηραμένα χαρτιά φίλτρου σε φούρνο ή πλήρως κορεσμένα χαρτιά φίλτρου.

**Πίνακας 3.4.** Εξισώσεις προταθεισών καμπυλών βαθμονόμησης χαρτιών φίλτρου.

Βιβλιογραφική αναφορά	Τύπος χαρτιού φίλτρου	Εύρος τιμών ποσοστού υγρασίας χαρτιού φίλτρου	Εξίσωση <sup>5</sup>	
Fawcett & Collis-George (1967)	W42 <sup>1</sup>	$w_{fp} < 43$	$\log s = 4.777 - 0.0600 w_{fp}$	
		$w_{fp} > 43$	$\log s = 2.271 - 0.0230 w_{fp}$	
McQueen & Miller (1968)	S&S 589 <sup>2</sup>	$w_{fp} < 54$	$\log s = 5.246 - 0.0723 w_{fp}$	
		$w_{fp} > 54$	$\log s = 1.895 - 0.0103 w_{fp}$	
Al-Khafaf & Hanks (1974)	S&S 589	$w_{fp} < 83$	$\log s = 5.117 - 0.0337 w_{fp}$	
		$w_{fp} > 83$	$\log s = 1.983 - 0.0090 w_{fp}$	
McKeen (1980)	S&S 589	$w_{fp} < 66\%$	$\log s = 4.900 - 0.0624 w_{fp}$	
		$w_{fp} > 66\%$	$\log s = 1.250 - 0.0069 w_{fp}$	
Hamblin (1981)	W42		$\log s = 5.281 - 0.0822 w_{fp}$	
Chandler & Gutierrez (1986)	W42		$\log s = 4.850 - 0.0622 w_{fp}$	
Greacen et al (1987)	S&S 589	$w_{fp} < 54\%$	$\log s = 5.058 - 0.0688 w_{fp}$	
		$w_{fp} > 54\%$	$\log s = 1.882 - 0.0102 w_{fp}$	
	W42	$w_{fp} < 45.3\%$	$\log s = 5.327 - 0.0780 w_{fp}$	
		$w_{fp} > 45.3\%$	$\log s = 2.413 - 0.0135 w_{fp}$	
Chandler et al (1992)	W42	$w_{fp} < 47\%$	$\log s = 4.842 - 0.0622 w_{fp}$	
		$w_{fp} > 47\%$	$\log s = 6.050 - 2.48 \log w_{fp}$	
Miller & Nelson (1992)	TS 4705-F10 <sup>3</sup>	$w_{fp} < 43\%$	$\log s = 4.883 - 0.0599 w_{fp}$	
Jiang et al. (2000)	SQ 202 <sup>4</sup>	$w_{fp} > 30\%$	$\log s = 3.663 - 0.0147 w_{fp}$	
Bulut et al. (2000α)	S&S 589	$w_{fp} > 25\%$	$\log s = 1.1247 w_{fp}^{-0.8473}$	
Leong et al. (2002)	W42	Μύζηση εδαφικού σκελετού	$w_{fp} < 47\%$	$\log s = 4.945 - 0.0673 w_{fp}$
			$w_{fp} > 47\%$	$\log s = 2.909 - 0.0229 w_{fp}$
		Ολική μύζηση	$w_{fp} < 26\%$	$\log s = 5.310 - 0.3010 w_{fp}$
			$w_{fp} > 26\%$	$\log s = 8.778 - 0.2220 w_{fp}$

<sup>1</sup> W42: Whatman No. 42

<sup>2</sup> S&S 589: Schleicher & Schuell No. 589

<sup>3</sup> TS 4705-F10: Thomas Scientific 4705-F10

<sup>4</sup> SQ 202: ShuangQuan No. 202

<sup>5</sup> Η μύζηση είναι σε kPa και ο λογάριθμος είναι δεκαδικός.

- Αντίστοιχα το είδος της μύζησης που ρυθμίζεται κατά τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης απορροφητικού υλικού-νερού του χαρτιού φίλτρου πρέπει να είναι το ίδιο με το είδος της μύζησης που θα μετρηθεί και στο εδαφικό υλικό, δηλαδή ολική μύζηση ή μύζηση εδαφικού σκελετού, και να μην συγχέονται οι καμπύλες βαθμονόμησης κατά τον προσδιορισμό της μύζησης. Πάντοτε βέβαια ισχύει η παρατήρηση ότι για τιμές της μύζησης τέτοιες που το εδαφικό υλικό βρίσκεται κοντά ή και πέρα από το παραμένον ποσοστό υγρασίας του η μετρούμενη μύζηση εδαφικού σκελετού με τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου σε επαφή είναι στην πραγματικότητα ολική μύζηση.
- Σε ό,τι αφορά τη χρήση υγρών ή ξηρών χαρτιών φίλτρου, η διαφορά στην πραγματικότητα βρίσκεται ανάμεσα σε χαρτιά φίλτρου με μεγαλύτερο ή μικρότερο ποσοστό υγρασίας του χαρτιού φίλτρου από εκείνο που αντιστοιχεί στη μύζηση ισορροπίας μεταξύ εδαφικού υλικού και χαρτιού φίλτρου. Αν θεωρητικά το χαρτί φίλτρου που χρησιμοποιείται βρισκόταν στο ποσοστό υγρασίας του που αντιστοιχεί στην ίδια μύζηση με τη μύζηση του εδαφικού υλικού, τότε δεν θα υπήρχε μετακίνηση νερού από το εδαφικό υλικό στο χαρτί φίλτρου ή αντίστροφα κατά την εξισορρόπηση της μύζησης και δεν θα υπήρχε καμιά απόκλιση της μετρούμενης μύζησης από την πραγματική μύζηση του δοκιμίου. Αν από την άλλη πλευρά το χαρτί φίλτρου είναι πιο υγρό, νερό θα μετακινηθεί από το χαρτί φίλτρου προς το εδαφικό υλικό με αποτέλεσμα η ισορροπία να επιτευχθεί σε μία τιμή της μύζησης μικρότερη της πραγματικής μύζησης του εδαφικού υλικού. Αν αντίθετα το χαρτί φίλτρου είναι πιο ξηρό, νερό θα μετακινηθεί από το εδαφικό υλικό προς το χαρτί φίλτρου και άρα η ισορροπία θα επιτευχθεί σε μια τιμή της μύζησης μεγαλύτερη της πραγματικής μύζησης. Δεδομένης της πρακτικής δυσκολίας αρχικής γνώσης του ποσοστού υγρασίας του φίλτρου που αντιστοιχεί στην –ίση– μύζηση του εδαφικού υλικού ώστε να κλειστεί εντός ενός μικρού λογικού ορίου, εύλογα οι δύο τρόποι που μπορεί να πραγματοποιήσει κανείς τη μέτρηση της μύζησης με τη μέθοδο αυτή είναι, είτε με χρήση αρχικά ξηρού φίλτρου, είτε με χρήση αρχικά υγρού φίλτρου –και πλήρως κορεσμένου προς αποφυγή αβεβαιοτήτων μέτρησης για μικρές τιμές της μύζησης. Δεδομένων αυτών όμως σκόπιμη είναι η μέτρηση της μύζησης με χρήση και αρχικά ξηρού χαρτιού φίλτρου και αρχικά πλήρως κορεσμένου χαρτιού φίλτρου, ώστε αφού εκτιμηθεί η μύζηση από την αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη χαρτιού φίλτρου-νερού να υπολογιστεί ο μέσος όρος των δύο τιμών. Η αναγνώριση της σημασίας αυτών είναι άσχετη από την αναγκαιότητα χρήσης της ορθής καμπύλης βαθμονόμησης. Επί τη βάση του συλλογισμού αυτού η προτεινόμενη από αρκετούς ερευνητές αλλά και το ASTM διαδικασία οδηγεί σε υπερεκτίμηση της μύζησης, η οποία απλώς είναι μικρή επειδή είναι μεγάλη η διαφορά της μάζας των χαρτιών φίλτρου (~ 0.2g) από τη μάζα των εδαφικών δοκιμίων.

- Δεδομένου ότι η καμπύλη βαθμονόμησης των χαρτιών φίλτρου είναι η χαρακτηριστική καμπύλη απορροφητικού υλικού-νερού του χρησιμοποιούμενου χαρτιού φίλτρου στο σχήμα που έχει μορφωθεί κατά τις μετρήσεις, μπορούν να αναγνωριστούν σε αυτήν και τα ίδια χαρακτηριστικά σημεία καμπής όπως και σε μια χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού λαμβάνοντας υπόψη και τις ιδιαιτερότητες του υλικού. Δηλαδή επειδή το χαρτί φίλτρου είναι αρκετά ανοικτής δομής δεν μπορεί να παρατηρηθεί πίεση διείσδυσης αέρα (το ίδιο παρατηρείται και σε πολύ διαπερατά υλικά), οπότε δεν υπάρχει πρώτο σημείο καμπής. Αντίθετα παρατηρείται παραμένον ποσοστό υγρασίας (το σημείο καμπής των καμπυλών βαθμονόμησης για το οποίο πολλοί ερευνητές αναγνωρίζουν ότι πριν από αυτό τα χαρτιά φίλτρου είναι πιο ευαίσθητα στις μεταβολές του ποσοστού υγρασίας).
- Κατά συνέπεια το σημείο καμπής στην καμπύλη βαθμονόμησης ενός χαρτιού φίλτρου, είναι χαρακτηριστικό του χαρτιού φίλτρου στο οποίο προσδιορίζεται αυτή η χαρακτηριστική καμπύλη απορροφητικού υλικού-νερού και όχι χαρακτηριστικό του εδαφικού υλικού στο οποίο γίνεται η μέτρηση. Δηλαδή τιμές της μετρούμενης μύζησης με το τμήμα της καμπύλης βαθμονόμησης μετά το σημείο καμπής της δεν σημαίνουν ότι και το εδαφικό υλικό στο οποίο έγινε η μέτρηση βρίσκεται σε ποσοστά υγρασίας που αντιστοιχούν στο τμήμα της δικής του χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού πέρα από το παραμένον ποσοστό υγρασίας του.
- Οι Chandler & Gutierrez (1986) είναι οι μόνοι που αναγνώρισαν τη σκοπιμότητα χρησιμοποίησης της μεθόδου για τον υπολογισμό της επιτόπου ενεργού τάσης.
- Η ταχύτητα επίτευξης των μετρήσεων με χρήση της μεθόδου αυτής κατατάσσουν την μέθοδο από μέτρια έως εξαιρετικά αργή από πλευράς ταχύτητας υλοποίησης μέτρησης.
- Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά απλή στην εφαρμογή της με ελάχιστες απαιτήσεις εργαστηριακού εξοπλισμού όταν χρησιμοποιείται γνωστή καμπύλη βαθμονόμησης (απαιτεί μόνο συσκευές που υπάρχουν συνήθως σε ένα εργαστήριο εδαφομηχανικής με εξαίρεση τον αναλυτικό ζυγό πολύ υψηλής ακρίβειας<sup>8</sup>: 0.0001 g).
- Αντίθετα απαιτεί ιδιαίτερη επιδεξιότητα από αυτόν που την εφαρμόζει καθώς απαιτεί και ιδιαίτερη ταχύτητα κινήσεων για να μη μεταβληθεί το ποσοστό υγρασίας των χαρτιών φίλτρου από την υπερβολική παραμονή τους στην ατμόσφαιρα, αλλά και ιδιαίτερη προσοχή για να μην παραμένουν τα χαρτιά φίλτρου πολλή ώρα σε επαφή με τα χέρια ή εργαλεία. Τα μεγαλύτερα λάθη κατά τη μέτρηση της μύζησης με τη μέθοδο αυτή προέρχονται από αυτά τα δύο μειονεκτήματα.

---

<sup>8</sup> Κάτι που ομολογουμένως συχνά παραγνωρίζεται.

- Οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό αυξάνονται όταν προσδιορίζεται η καμπύλη βαθμονόμησης των χαρτιών φίλτρου που θα χρησιμοποιηθούν, αφού πρέπει να υπάρχει διαθέσιμη κάποια μέθοδος ελέγχου της μύζησης, ακόμα και αν αυτή βασίζεται στη χρήση υδατικών διαλυμάτων.
- Συνολικά ωστόσο η απλότητα της μεθόδου και οι χαμηλές απαιτήσεις σε εξοπλισμό την καθιστούν αρκετά ελκυστική, ιδίως μάλιστα όταν στενότητα κονδυλίων ή αρχική επαφή με τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών δεν επιτρέπουν υψηλότερες οικονομικές επενδύσεις σε εργαστηριακό εξοπλισμό.

Στον Πίν. 3.5 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με χαρτιά φίλτρου, ευρισκόμενα σε επαφή ή όχι με το εδαφικό δείγμα.

**Πίνακας 3.5.** Συνοψιση χαρακτηριστικών της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με χαρτιά φίλτρου (σε επαφή ή όχι με το εδαφικό δείγμα).

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Είδος μετρούμενης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Χαρτιών φίλτρου σε επαφή με το εδαφικό δείγμα	NAI	NAI (;)	0 έως 500000 kPa (ακριβέστερα 30 έως 3000 kPa)	Μύζηση εδαφικού σκελετού*	Τουλάχιστον 7 ημέρες
Χαρτιών φίλτρου σε απόσταση από το εδαφικό δείγμα	NAI	NAI (;)	1000 έως 500000 kPa (ακριβέστερα 1000 έως 30000 kPa)	Ολική μύζηση	Τουλάχιστον 7-14 ημέρες

\*Εάν η μύζηση είναι τόσο υψηλή για το εδαφικό υλικό που να έχει προσεγγιστεί το παραμένον ποσοστό υγρασίας του, τότε και σε αυτή τη μέθοδο μετρείται η ολική μύζηση.

### 3.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΕΜΑΧΙΩΝ ΠΟΡΩΔΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### 3.5.1 Εισαγωγή

Τεμάχια πορωδών υλικών έχουν χρησιμοποιηθεί με διάφορους τρόπους για τη μέτρηση της μύζησης των εδαφικών υλικών. Οι διάφορες επιμέρους μέθοδοι βασίζονται στην αρχή της μεταβολής μίας χαρακτηριστικής ιδιότητας των πορωδών υλικών με το βαθμό κορεσμού τους

και άρα τη μύζηση που αντιστοιχεί σε αυτόν με τη διαφοροποίηση της μεθόδου να προέρχεται από το είδος της μετρούμενης ιδιότητας παρά το είδος του πορώδους υλικού. Τέτοιες χαρακτηριστικές ιδιότητες μπορεί να είναι η ηλεκτρική αντίσταση του πορώδους υλικού (μέθοδος τεμαχίων πορώδους υλικού ή απλούστερα μέθοδος τεμαχίων γύψου, βλ. §3.5.2), η θερμική του αγωγιμότητα (μέθοδος αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας, βλ. §3.5.3) ή η ικανότητά του στη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ηλεκτρομαγνητική μέθοδος, βλ. §3.5.4). Η μεταβολή αυτή οφείλεται στη μεγάλη διαφορά της τιμής της χαρακτηριστικής αυτής ιδιότητας στο νερό και το πορώδες υλικό όταν είναι ξηρό. Η ανάμειξή τους λοιπόν όταν το πορώδες υλικό έχει και νερό στους πόρους του προκαλεί τη διαφοροποίηση της τιμής αυτής της χαρακτηριστικής ιδιότητας ανάμεσα στο όριο της τιμής της για το ξηρό πορώδες υλικό (στην πράξη για το πορώδες υλικό στο παραμένον ποσοστό υγρασίας του) και της τιμής της για το πορώδες υλικό πλήρως κορεσμένο με νερό. Ανεξάρτητα από το είδος της μετρούμενης ιδιότητας, όσο πιο μεγάλη είναι η διαφοροποίηση της τιμής της μεταξύ των δύο ακραίων τιμών για το ξηρό και το πλήρως κορεσμένο πορώδες υλικό, τόσο πιο ευαίσθητο είναι το όργανο μέτρησης. Επίσης όσο πιο μικρή είναι η πίεση διείσδυσης αέρα του πορώδους υλικού, τόσο πιο μικρές τιμές της μύζησης μπορούν να μετρηθούν με τη μέθοδο, και αντίστοιχα για όσο πιο μεγάλες τιμές της μύζησης επιτυγχάνεται το παραμένον ποσοστό υγρασίας του, τόσο μεγαλύτερες τιμές της μύζησης μπορούν να μετρηθούν. Επειδή η τιμή της χαρακτηριστικής ιδιότητας είναι συνάρτηση της ποσότητας του νερού στο πορώδες υλικό και όχι της εντατικής κατάστασης του νερού στους πόρους του πορώδους υλικού, για να είναι γνωστή η μύζηση πρέπει να είναι γνωστή η σχέση της με το ποσοστό υγρασίας του πορώδους υλικού, δηλαδή η καμπύλη συγκράτησης ύδατος του πορώδους υλικού. Επειδή η καμπύλη αυτή παρουσιάζει υστερητικά φαινόμενα σε κύκλους ξήρανσης-ύγρανσης (βλ. Κεφ. 4), τα υστερητικά αυτά φαινόμενα μεταφέρονται και στις ζητούμενες καμπύλες τιμών της χαρακτηριστικής ιδιότητας-μύζησης (καμπύλες βαθμονόμησης των πορώδων υλικών σε αντιστοιχία με τις καμπύλες βαθμονόμησης των χαρτιών φίλτρου). Για αυτό οι μέθοδοι αυτές είναι σκόπιμο να περιορίζονται σε περιβάλλοντα μονοτονικής μεταβολής της μύζησης, ή διαφορετικά να μετρείται η υστέρηση της καμπύλης βαθμονόμησης του πορώδους υλικού σε κύκλους ξήρανσης-ύγρανσης. Το βασικό πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών σε σχέση με τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου, η οποία επίσης βασίζεται στην καμπύλη βαθμονόμησης ενός απορροφητικού υλικού όπως το χαρτί φίλτρου για τον προσδιορισμό της μύζησης, είναι ότι τα τεμάχια πορώδους υλικού δεν απαιτείται να ανακτηθούν από τη θέση μέτρησης της μύζησης, αφού η μέτρηση της χαρακτηριστικής ιδιότητας γίνεται επιτόπου μέσω καλωδίων που συνδέουν το τεμάχιο του πορώδους υλικού με κάποια θέση πρόσβασης ή ακόμα και με αυτόματα συστήματα καταγραφής και αισθητήρες μέτρησης της ιδιότητας αυτής εντός του τεμαχίου ή του

συστήματος καταγραφής. Έτσι οι μέθοδοι αυτές προσφέρονται για επιτόπου μετρήσεις της μύζησης και μάλιστα μακροχρόνιες, με μόνα ουσιαστικά μειονεκτήματα τη συγκριτικά με άλλες μεθόδους χαμηλότερη ακρίβειά τους και τον μεγαλύτερο χρόνο απόκρισής τους. Οι μέθοδοι αυτές θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της ίδιας χαρακτηριστικής ιδιότητας απευθείας στο έδαφος, αντί σε ένα τεμάχιο πορώδους υλικού τοποθετημένο μέσα στο έδαφος, αλλά τότε θα έπρεπε να είναι γνωστή για κάθε θέση μέτρησης η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού του απαντώμενου εδαφικού υλικού, αντί για τη μία μόνο καμπύλη του πορώδους υλικού που επιτρέπει έτσι τη μέτρηση της μύζησης ανεξάρτητα από τη φύση του απαντώμενου εδάφους.

### **3.5.2 Μέθοδος τεμαχίων πορώδους υλικού (Porous blocks method) – Μέθοδος τεμαχίων γύψου (Gypsum blocks method)**

#### *3.5.2.1 Εισαγωγή*

Η μέθοδος τεμαχίων πορώδους υλικού (porous blocks) είναι μία μέθοδος έμμεσου προσδιορισμού της μύζησης των εδαφικών υλικών. Βασίζεται στην αρχή της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης ενός απορροφητικού υλικού με το βαθμό κορεσμού του. Αν ένα τεμάχιο απορροφητικού υλικού είναι αρχικά πλήρως κορεσμένο με νερό και η ηλεκτρική του αντίσταση είναι σταθερή υπό αυτές τις συνθήκες, τότε όταν το τεμάχιο αυτό θα αρχίσει να χάνει υγρασία από το έδαφος με το οποίο βρίσκεται σε επαφή (λόγω της μύζησης του εδαφικού υλικού) θα υπάρξει μεταβολή της ηλεκτρικής του αντίστασης ανάλογη ουσιαστικά της μύζησης του εδαφικού υλικού. Αντίστοιχα το τεμάχιο μπορεί να είναι αρχικά ξηρό και να προσροφήσει νερό από το περιβάλλον έδαφος μέχρι την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας.

Για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου στην περίπτωση αρχικά πλήρως κορεσμένων τεμαχίων πρέπει η μύζηση του εδαφικού υλικού να είναι μεγαλύτερη της πίεσης διείδυσης αέρα του απορροφητικού υλικού ώστε να προκαλέσει τον αποκορεσμό του (οπότε θα υπάρξει μεταβολή στην ηλεκτρική αντίσταση του απορροφητικού υλικού) χωρίς όμως να του προκαλέσει και ξήρανση πέραν του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας του (οπότε πάλι πέραν του σημείου αυτού δεν θα καταγράφεται μεταβολή στην ηλεκτρική αντίσταση του απορροφητικού υλικού). Αντίστοιχα, στην περίπτωση χρήσης αρχικά ξηρών τεμαχίων, η μύζηση του εδαφικού υλικού πρέπει να είναι τόση ώστε να αυξήσει το ποσοστό υγρασίας του απορροφητικού υλικού πάνω

από την τιμή του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας του, αλλά όχι τόσο που το τεμάχιο να κορεστεί πλήρως.

Σε αντίθεση λοιπόν με τα πορώδη υλικά των κεραμικών πορολίθων που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο μετατόπισης άξονα, όπου ζητούμενο είναι ο απότομος αποκορεσμός τους (Σχ. 3.3, καμπύλη α), στα πορώδη υλικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο τεμαχίων πορώδους υλικού ζητούμενο είναι ο βαθμιαίος αποκορεσμός (Σχ. 3.3, καμπύλη β), αφού όσο πιο μεγάλο το εύρος μεταξύ πλήρους κορεσμού του υλικού και παραμένοντος ποσοστού υγρασίας του, τόσο πιο μεγάλο το εύρος μέτρησης της μύζησης. Αντίθετα αν ο αποκορεσμός είναι απότομος, τότε είναι αδύνατη η μέτρηση της μύζησης, αφού μετρείται μία τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης του υλικού που αντιστοιχεί στο πλήρως κορεσμένο τεμάχιο και μία τιμή της που αντιστοιχεί στο τεμάχιο όταν βρίσκεται στο παραμένον ποσοστό υγρασίας του, χωρίς αυτές να μπορούν να συσχετιστούν μονοσήμαντα με τιμές της μύζησης.

Ζητούμενο επίσης αποτελεί και η μικρή πίεση διείσδυσης αέρα του πορώδους υλικού, αφού όσο πιο μικρή είναι αυτή, από τόσο πιο μικρή τιμή της μύζησης των εδαφικών υλικών προκαλείται ο αποκορεσμός των τεμαχίων, οπότε μπορεί να μετρηθεί η μύζηση των εδαφικών υλικών. Αντίθετα αν η πίεση διείσδυσης αέρα του πορώδους υλικού του τεμαχίου είναι μεγάλη, τότε ο αποκορεσμός του θα προκαλείται μόνο για μεγάλες τιμές της μύζησης των εδαφικών υλικών και θα μετρούνται μόνο αντίστοιχα μεγάλες τιμές της μύζησης.

Τα τεμάχια πορώδους υλικού υποβάλλονται πριν τη χρήση τους σε διαδοχικές γνωστές τιμές της μύζησης για τις οποίες μετρείται η ηλεκτρική αντίστασή τους ώστε να προκύψει μία καμπύλη βαθμονόμησης (όπως και στη μέθοδο χαρτιού φίλτρου), από την οποία προσδιορίζεται η τιμή της μετρούμενης μύζησης, όταν το τεμάχιο χρησιμοποιείται για να μετρήσει τη μύζηση σε ένα εδαφικό υλικό. Αντίστοιχα με τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου, η καμπύλη βαθμονόμησης που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι εκείνη που αντιστοιχεί στον τρόπο χρήσης του τεμαχίου (αρχικά πλήρως κορεσμένο ή ξηρό). Πρέπει επίσης να προσδιορίζεται για κάθε τεμάχιο ξεχωριστά αφού η βιομηχανική ομογενοποίηση των τεμαχίων δεν είναι τόσο μεγάλη όσο στα χαρτιά φίλτρου, όπου η διερεύνησή της περιορίζεται μόνο από παρτίδα σε παρτίδα χαρτιών φίλτρου. Σε σχέση με τη μέθοδο μέτρησης της μύζησης με χαρτιά φίλτρου, η μέθοδος τεμαχίων πορώδους υλικού έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί την ανάκτηση του τεμαχίου από τη θέση μέτρησης (όπως συμβαίνει με το χαρτί φίλτρου, όταν χρησιμοποιείται για επιτόπου μέτρηση της μύζησης), αφού η ηλεκτρική του αντίσταση μπορεί να μετρείται μέσω καλωδίων συνδεδεμένων με το τεμάχιο



στη θέση που αυτό έχει τοποθετηθεί. Γι' αυτόν το λόγο τα τεμάχια απορροφητικού υλικού προσφέρονται για επιτόπου μετρήσεις της μύζησης και μάλιστα μακροχρόνιες, γεγονός το οποίο συνιστά έναν επιπλέον λόγο για τη βαθμονόμηση κάθε τεμαχίου ξεχωριστά.

Έτσι, κυλινδρικά τεμάχια πορώδους υλικού, μικρού μεγέθους, με ενσωματωμένα ηλεκτρόδια που καταλήγουν σε καλώδια που φτάνουν έως τη συσκευή μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης τους τοποθετούνται σε επαφή με το εδαφικό υλικό του οποίου η μύζηση πρέπει να μετρηθεί και αφήνονται μέχρι να επέλθει υδραυλική ισορροπία ανάμεσα στο πορώδες υλικό και το περιβάλλον έδαφος. Τότε παρέχεται ηλεκτρικό ρεύμα στο δίκτυο (γίνεται δηλαδή διέγερση – excitation- του αισθητήρα) και μετρείται η ηλεκτρική αντίσταση του πορώδους υλικού του τεμαχίου για την επιτευχθείσα υδραυλική ισορροπία και από την καμπύλη βαθμονόμησης του τεμαχίου προσδιορίζεται η μύζηση (Σχ. 3.6). Το ηλεκτρικό ρεύμα που θα παρασχεθεί στο δίκτυο μπορεί να είναι συνεχές ή εναλλασσόμενο, αλλά στη μεν πρώτη περίπτωση πρέπει να παρασχεθεί για πολύ μικρό χρονικό διάστημα (ms), αλλιώς θα εμφανιστούν φυσαλίδες στις άκρες των ηλεκτροδίων αλλοιώνοντας την μέτρηση, στη δε δεύτερη πρέπει να υπάρχει ειδικός εξοπλισμός για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης.

Η μέθοδος έχει επικρατήσει κυρίως με την ονομασία *μέθοδος τεμαχίων γύψου* (gypsum blocks method), αφού η γύψος αποτελεί το πορώδες υλικό που έχει επικρατήσει κατά την εφαρμογή της μεθόδου –§3.5.2.2. Σήμερα χρησιμοποιούνται και παρόμοιοι αισθητήρες με την ονομασία *αισθητήρες κοκκώδους σκελετού* (granular matrix sensors), οι οποίοι επίσης βασίζονται στην αρχή της μεταβολής της ηλεκτρικής αντίστασης του υλικού από το οποίο αποτελούνται με το βαθμό κορεσμού του ή τη μελέτη της συχνότητας του ηλεκτρικού σήματος που επιστρέφει από αυτούς κατά τη διέγερσή τους από τη συσκευή ανάγνωσής τους (frequency domain reflectometry -FDR- sensors –βλ. §3.5.4). Στις Φωτ. 3.5α και 3.5β παρουσιάζονται τεμάχια γύψου και ο μετρητής/καταγραφικό τους κατασκευής Soil Moisture Inc και στις Φωτ. 3.5γ και 3.5δ τεμάχια πορώδους υλικού FDR κατασκευής Decagon Devices, και τα δύο του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.. Τα τεμάχια παραλαμβάνονται συνήθως με ενσωματωμένο το καλώδιο σύνδεσης του μετρητή/καταγραφικού με τα ηλεκτρόδια στο εσωτερικό του τεμαχίου. Εκτός από τον μετρητή/καταγραφικό, απαραίτητο στοιχείο του εξοπλισμού είναι και ο απεικονιζόμενος στη Φωτ. 3.5α υποδοχέας βαθμονόμησης των τεμαχίων γύψου. Αυτό αποτελεί συνήθως τυποποιημένο εξάρτημα εντός του οποίου μπορεί να τοποθετηθεί κάθε τεμάχιο γύψου περιβεβλημένο από εδαφικό δείγμα και το σύνολο εντός θαλάμου μύζησης. Ο σωλήνας του υποδοχέα βαθμονόμησης επιτρέπει την απαγωγή του νερού από το σύστημα εδαφικό δείγμα-

τεμάχιο γύψου εκτός θαλάμου μύζησης, ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση πρέπει να είναι εφοδιασμένος και με οπές εξόδου των καλωδίων σύνδεσης τεμαχίου γύψου-μετρητή.

Δεδομένου ότι η δομή του απορροφητικού υλικού των τεμαχίων επιτρέπει την κίνηση και όλων των διαλυμένων στο νερό των πόρων ουσιών κατά την προσρόφηση ή την αποβολή ύδατος από τους πόρους του απορροφητικού υλικού μέχρι την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας, τα τεμάχια πορώδων υλικών μετρούν μύζηση εδαφικού σκελετού.



**Φωτογραφία 3.5.** α) Τεμάχια γύψου, μετρητής/καταγραφικό και υποδοχέας βαθμονόμησης του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Soil Moisture Inc, β) τρία διαφορετικά τεμάχια γύψου: από κάτω προς τα πάνω: ανέπαφο, σε φάση διάλυσης της γύψου, μετά από πλήρη απομάκρυνση της γύψου λόγω διάλυσης (διακρίνεται η μορφή του ηλεκτροδίου), γ) τεμάχιο πορώδους υλικού FDR κατασκευής Decagon Devices του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. σε κάτοψη, και δ) το ίδιο μετά από ανάκτηση από θέση επιτόπου μετρήσεων μύζησης (πλάγια όψη, διακρίνεται το τυπωμένο κύκλωμα στο κέντρο και το άνω και κάτω τμήμα του πορώδους υλικού).

### 3.5.2.2 Εξέλιξη της μεθόδου

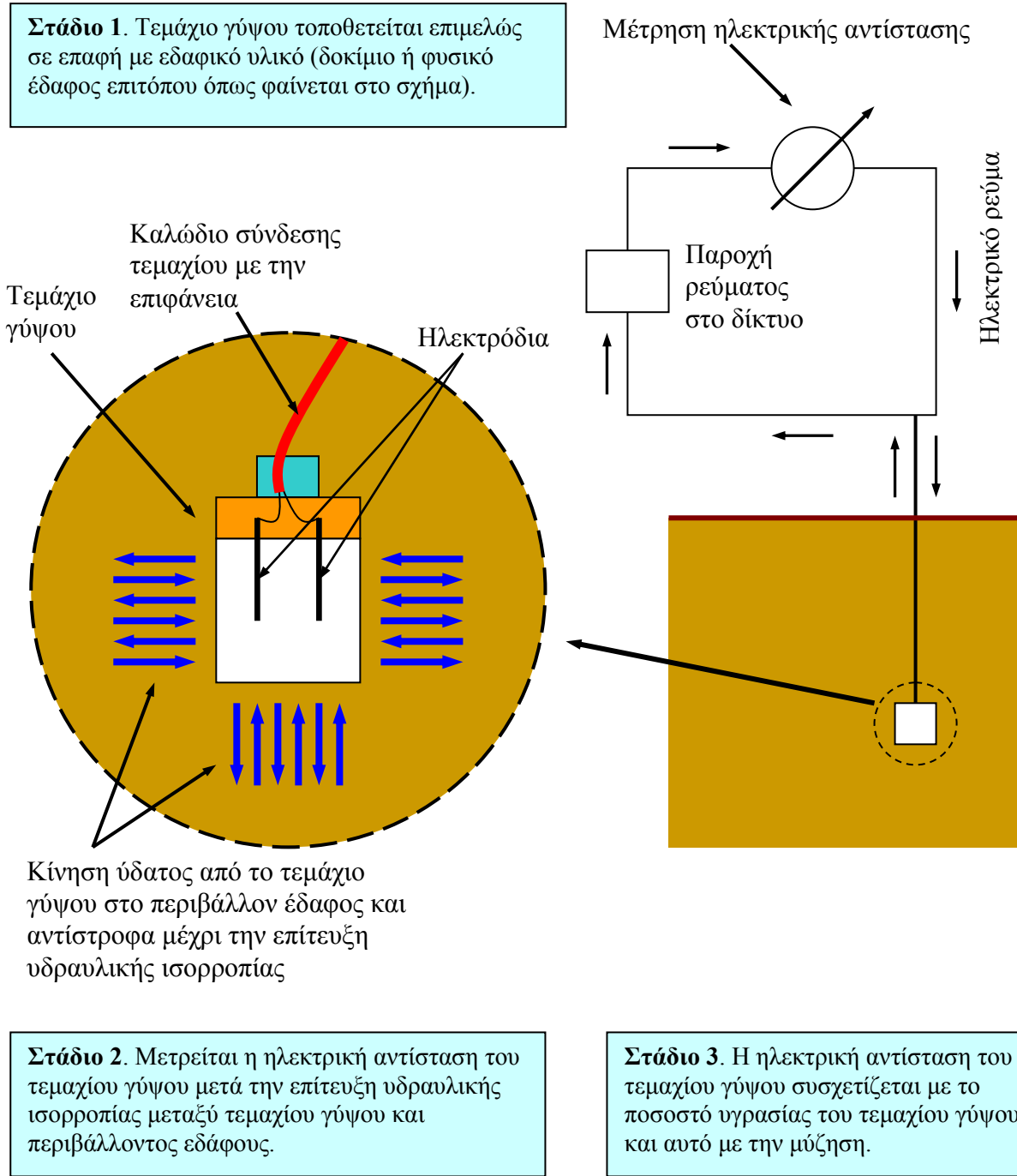
Τα τεμάχια πορωδών υλικών και η χρήση τους παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά από τους Bouyoucos & Mick (1940) ως εξέλιξη της αρχικής ιδέας των Whitney, et al. (1897). Μεταξύ των απορροφητικών υλικών που δοκίμασαν οι Bouyoucos & Mick (1940) ήταν η μαρμαρόσκονη, το τσιμέντο, το σκυρόδεμα και η οδοντιατρική γύψος<sup>9</sup>, αλλά κατέληξαν ότι το καταλληλότερο υλικό για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης ήταν η κοινή γύψος (plaster of paris). Το υλικό αυτό απαιτούσε το μικρότερο χρόνο για να κορεστεί πλήρως, αποκρινόταν ταχύτερα από κάθε άλλο υλικό όταν είχε τοποθετηθεί πια μέσα στο έδαφος και είχε τις σταθερότερες ηλεκτρικές ιδιότητες για δεδομένη τιμή του βαθμού κορεσμού του. Το βασικό όμως μειονέκτημά του είναι ότι μαλακώνει όταν κορεστεί. Κατέληξαν επίσης και στις επιθυμητές ιδιότητες ενός απορροφητικού υλικού προκειμένου αυτό να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της μύζησης με βάση αυτήν την αρχή μέτρησης:

1. Σκληρή, πορώδης δομή ικανή να επιτρέπει την ταχεία απορρόφηση και την ταχεία αποβολή ύδατος.
2. Μεγάλη ικανότητα απορρόφησης προκειμένου να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη ευαισθησία.
3. Μικρή διαλυτότητα για να περιοριστεί η επιρροή των μεταβολών στην περιεκτικότητα σε άλατα των εδαφικών υλικών.

Οι Cummings & Chandler (1940) χρησιμοποίησαν τεμάχια γύψου όπως αυτά των Bouyoucos & Mick (1940) σε συνδυασμό με ηλεκτροθερμικές μεθόδους και τενσιόμετρα σε μετρήσεις πεδίου για να προσδιορίσουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία της μεθόδου. Τα αποτελέσματά τους περιορίζονται στο εύρος μύζησης 10-70 kPa και έδειξαν ότι υπάρχει κάποια διακύμανση στην ηλεκτρική αντίσταση γειτονικών τεμαχίων, παρόλο που οι τάσεις που καταγράφονταν στις μετρήσεις ήταν οι ίδιες. Μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση ωστόσο διαπιστώθηκε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων με τα τεμάχια γύψου και τα τενσιόμετρα σε αυτό το εύρος τιμών μύζησης.

Οι Haise & Kelley (1946) επέκτειναν το εύρος της βαθμονόμησης χρησιμοποιώντας τεμάχια γύψου του ίδιου σχεδίου με αυτά των Bouyoucos & Mick (1940) σε άμεση επαφή με μία

<sup>9</sup> Σε αντίθεση με την κοινή γύψο η οδοντιατρική γύψος διακρίνεται για την πολύ μεγαλύτερη σκληρότητά της (υπάρχουν δύο μορφές, η σκληρή γύψος γνωστή εμπορικά και ως “MOLDANO” και η υπέρσκληρη, γνωστή εμπορικά ως “VELMIX”) και τις πολύ μικρές μεταβολές του όγκου της όταν πήζει (η βέλτιστη τιμή της μεταβολής που έχει επιτευχθεί είναι της τάξης του 0.002%) –Βαρβατάκος, 2006.



**Σχήμα 3.6.** Αρχή της μεθόδου έμμεσης μέτρησης της μύζησης με τεμάχια γύψου/πορώδους υλικού (η απεικόνιση των ηλεκτροδίων εντός του τεμαχίου γύψου είναι ενδεικτική).

μεμβράνη σελουλόζης εντός θαλάμου μύζησης. Αυτό ωστόσο δεν θεωρήθηκε καταληκτική απόδειξη της απόκρισης των τεμαχίων γύψου όταν βρίσκονται σε επαφή με το εδαφικό υλικό.

Οι Cummings & Chandler (1940) παρατήρησαν ότι αν το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από το ηλεκτρόδιο των τεμαχίων γύψου εκτείνεται και εκτός του απορροφητικού υλικού, η αντίσταση της επαφής μεταξύ τεμαχίου και εδαφικού υλικού συνεισφέρει στη μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση. Δεδομένου δε ότι η αντίσταση της επαφής δεν μπορεί να θεωρηθεί ποτέ σταθερή αφού τα τεμάχια έρχονται σε επαφή με διαφορετικά εδαφικά υλικά η κατάσταση αυτή δεν ήταν επιθυμητή. Επιλύοντας το πρόβλημα αυτό οι Cronney & Coleman (1947) πρότειναν ένα εναλλακτικό σχέδιο τεμαχίου γύψου με ομόκεντρα ηλεκτρόδια.

Οι Aitchison, et al. (1951) διερεύνησαν την επιρροή της θερμοκρασίας και της αλατότητας στις ιδιότητες τριών διαφορετικών ειδών τεμαχίων γύψου. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν η πτώση της ηλεκτρικής αντίστασης με την άνοδο της θερμοκρασίας (στο εύρος 0-33.5 °C) για την αντιμετώπιση της οποίας δημιούργησαν ένα νομογράφημα για τη διόρθωση των μετρήσεων στην ισοδύναμη τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης των τεμαχίων στους 20 °C. Σε όλα τα εδαφικά υλικά που περιείχαν λιγότερο από 0.07% διαλυμένα άλατα και λιγότερο από 0.02% χλωριούχο νάτριο ειδικά, τα τεμάχια γύψου που εξετάστηκαν μετά από 2 χρόνια λειτουργίας σε αυτό το χημικό περιβάλλον δεν είχαν υποστεί προφανείς ζημιές. Σε εδαφικά υλικά περιεκτικότητας τουλάχιστον 0.3% σε διαλυμένα άλατα και τουλάχιστον 0.2% χλωριούχο νάτριο, τα τεμάχια γύψου που εξετάστηκαν μετά από 2 χρόνια λειτουργίας σε αυτό το χημικό περιβάλλον έδιναν αμφισβητούμενα αποτελέσματα και πρακτικά δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω. Σε τεμάχια γύψου τοποθετημένα σε επιβλαβή εδαφικά υλικά παρουσιάστηκε επίσης μία γενική μείωση της μετρούμενης ηλεκτρικής αντίστασης αυτών με το ποσοστό διαλυμένων αλάτων και γι' αυτό προτάθηκε η σχετική διόρθωση των μετρήσεων με το ποσοστό αυτό από τους συγγραφείς για ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών μύζησης.

Οι Aitchison & Butler (1951) χρησιμοποίησαν τα ίδια τρία υλικά των Aitchison, et al. (1951) τοποθετημένα σε δύο διαφορετικά εδαφικά υλικά, έναν αργιλοπηλό (loam) και μία καστανέρυθη άργιλο, και τα βαθμονόμησαν χρησιμοποιώντας θάλαμο μύζησης μεμβράνης. Τα εδαφικά υλικά και τα τεμάχια ήταν αρχικά πλήρως κορεσμένα. Παρατηρήθηκε καλή συμφωνία μεταξύ της απόκρισης της μετρούμενης ηλεκτρικής αντίστασης και της επιβαλλόμενης μύζησης για κάθε τύπο απορροφητικού υλικού των τεμαχίων. Ο χρόνος απόκρισης των τεμαχίων ήταν από μερικές ημέρες για μύζηση 25 kPa έως μερικές εβδομάδες για μύζηση 1600 kPa.

Σήμερα τα τεμάχια γύψου αποτελούν μία διαδεδομένη μέθοδο μέτρησης της μύζησης, ειδικά στην επιστημονική περιοχή της γεωπονικής επιστήμης και σε γεωργικές εφαρμογές για τον

προγραμματισμό της άρδευσης στα πλαίσια της γεωργίας ακριβείας, παρόλο που αναγνωρίζεται ότι λόγω της αργής απόκρισής τους, οι μετρήσεις τους έχουν περισσότερη αξία για την καταγραφή μίας τάσης εξέλιξης της μύζησης παρά για τις ακριβείς τιμές τους. Εκτός από τα τεμάχια γύψου που αποτελούν την πιο συνηθισμένη μορφή εφαρμογής της μεθόδου τεμαχίων πορώδους υλικού, υπάρχουν και οι αισθητήρες κοκκώδους σκελετού (ενδεικτικά Bertolino, et al., 2002), στους οποίους το πορώδες υλικό αποτελείται από ιλύ χαλαζιακής σύστασης και είναι καλυμμένο από μεμβράνη συνθετικού υλικού με το σύνολο εγκιβωτισμένο σε πλέγμα ανοξείδωτου χάλυβα με μόνο τα ηλεκτρόδια στο κέντρο να καλύπτονται από γύψο. Η διαμόρφωση αυτή εξασφαλίζει καλύτερα τη μηχανική ακεραιότητα των αισθητήρων (η γύψος μαλακώνει όταν το τεμάχιο είναι πλήρως κορεσμένο), διορθώνει τα προβλήματα που ανακύπτουν από την παρουσία διαλυμένων ουσιών στο νερό των πόρων των εδαφών και επίσης εξασφαλίζει ταχύτερη απόκριση (Pullin, 2004). Ακόμα νεώτεροι αισθητήρες επίσης όπως τα τεμάχια πορώδους υλικού FDR προσφέρουν ακόμα μεγαλύτερο εύρος μετρήσεων της μύζησης (έως και 100 MPa) και καλύτερους χρόνους απόκρισης, στιβαρότητα και αντοχή στην διάλυση του πορώδους υλικού λόγω παρουσίας αλάτων (ενδεικτικά Bardanis, 2015, για τη χρήση τους).

### 3.5.2.3 Σχολιασμός της μεθόδου

Οι Aitchison & Richards (1965) συνόψισαν τα πλεονεκτήματα των τεμαχίων γύψου ως εξής:

- Κανένα άλλο όργανο (τότε αλλά και μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του '90) δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για επιτόπου μετρήσεις της μύζησης σε μεγάλο εύρος τιμών.
- Τα τεμάχια γύψου αποτελούν πολύ φθηνά όργανα που τοποθετούνται με ιδιαίτερη ευκολία επιτόπου. Εξίσου εύκολα γίνονται και οι μετρήσεις τους, οι οποίες διορθώνονται εύκολα όταν αυτό επιβάλλεται.

Οι ίδιοι συγγραφείς συνόψισαν τα μειονεκτήματα της μεθόδου ως εξής:

- Τα τεμάχια γύψου παρουσιάζουν πολύ μεγάλη υστέρηση και τα λάθη στην εκτίμηση της μύζησης μπορεί να είναι πολύ μεγάλα λόγω αυτής. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, προτείνουν τη χρήση μικρού μόνο μέρους της καμπύλης βαθμονόμησης, δηλαδή τα όργανα αυτά να χρησιμοποιούνται πρακτικά μόνο εκεί που δεν αναμένονται μεγάλες μεταβολές της μύζησης.

- Τα τεμάχια γύψου επηρεάζονται πολύ από την περιεκτικότητα του νερού των πόρων των εδαφικών υλικών σε διαλυμένα άλατα, η οποία οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα των μετρήσεων. Είναι δυνατή η διόρθωση των μετρήσεων αλλά η μεγάλη περιεκτικότητα σε άλατα οδηγεί αναπόφευκτα και σε φθορά των τεμαχίων (Φωτ. 3.5β).
- Η απόκριση των τεμαχίων στις μεταβολές της μύζησης είναι αργή. Κατά συνέπεια τα τεμάχια γύψου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ακριβή προσδιορισμό της μύζησης σε περιβάλλον ταχείας μεταβολής της.

Οι ίδιοι συγγραφείς κατέληξαν ότι ιδανικές συνθήκες χρήσης των τεμαχίων γύψου προς επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας και αποτελεσματικότητας της μεθόδου είναι σε εδαφικά υλικά μικρής περιεκτικότητας του νερού των πόρων τους σε διαλυμένα άλατα, στο εύρος τιμών της μύζησης 80 έως 1600 kPa, υποκείμενα σε αργές, μικρού μεγέθους, μονοτονικές μεταβολές της μύζησης (για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της αργής απόκρισης και των σφαλμάτων μέτρησης λόγω υστέρησης). Αντίθετα, οι χειρότερες συνθήκες χρήσης των τεμαχίων γύψου είναι σε εδαφικά υλικά μεγάλης περιεκτικότητας του νερού των πόρων τους σε διαλυμένα άλατα υποκείμενα σε ραγδαίους κύκλους ξήρανσης-ύγρανσης.

Γενικά, λόγω της –κατά τη βιβλιογραφία– αργής απόκρισής τους, τα συνήθη τεμάχια γύψου είναι περισσότερο κατάλληλα για αργίλους που οι μεταβολές στη μύζηση είναι αντίστοιχα αργές. Σε κοκκώδη εδάφη που οι μεταβολές της μύζησης μπορεί να γίνουν ραγδαία, η αργή απόκριση των συνήθων τεμαχίων γύψου τα καθιστά ακατάλληλα για την παρακολούθηση της μύζησης. Οι αισθητήρες κοκκώδους σκελετού αντίθετα μπορούν να παρακολουθήσουν καλύτερα τις μεταβολές της μύζησης σε κοκκώδη εδάφη, με τίμημα το μικρότερο εύρος μέτρησης της μύζησης (0 έως 200 kPa). Από την άλλη πλευρά τα συνήθη τεμάχια γύψου μπορούν να μετρήσουν πρακτικά από 10 kPa και πάνω, αλλά μέχρι τιμές της μύζησης που φτάνουν τα 1500 kPa. Νεώτερα τεμάχια πορωδών υλικών FDR μπορούν να μετρήσουν στο εύρος 10 kPa έως 100 MPa. Σε ό,τι αφορά την ανθεκτικότητά τους στο χρόνο, τα τεμάχια πορώδους υλικού μπορούν να διατηρηθούν έως και 5 χρόνια σε βασικό ή ουδέτερο περιβάλλον και μεταξύ 2 και 3 χρόνων σε όξινο περιβάλλον (Pullin, 2004). Μετά από αυτά τα χρονικά διαστήματα, οι μετρήσεις τους πρακτικά δεν έχουν νόημα και τα τεμάχια είναι σκόπιμο να αντικατασταθούν. Επίσης, μετά από μακρόχρονη παραμονή των τεμαχίων πορώδους υλικού σε πολύ λεπτόκοκκα εδάφη μπορεί να φράξουν οι πόροι τους, καθιστώντας ακόμα πιο αργή την απόκρισή τους (Pullin, 2004).

Στον Πίν. 3.6 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με τεμάχια πορώδους υλικού (τεμάχια γύψου, τεμάχια κοκκώδους σκελετού, τεμάχια πορωδών υλικών FDR) κατά τη βιβλιογραφία.

**Πίνακας 3.6.** Συνοψιση χαρακτηριστικών της μεθόδου τεμαχίων πορώδους υλικού.

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Είδος μετρούμενης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Τεμαχίων γύψου	NAI	NAI	10 – 3000 kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Εβδομάδες (2-3)
Τεμαχίων κοκκώδους σκελετού	NAI	NAI	0 – 200 kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Ωρες έως 24ώρα
Τεμαχίων πορωδών υλικών FDR	NAI	NAI	10 – 100000 kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Λεπτά έως 24ώρα

Εκτός από τα προαναφερθέντα, σκόπιμο είναι να αναφερθεί και η εμπειρία από τη χρήση τεμαχίων πορώδους υλικού στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε., όπως έχουν χρησιμοποιηθεί από τον γράφοντα.

Το πρώτο παράδειγμα χρήσης τους αφορά στην τοποθέτηση δύο διαφορετικών τεμαχίων γύψου κατασκευής Soil Moisture Inc. μέσα σε συμπυκνωμένη θραυστή χονδρόκοκκη άμμο εντός μίας μήτρας της δοκιμής Proctor διαμέτρου 4΄΄. Στη Φωτ. 3.6α παρουσιάζεται η διάταξη μέτρησης με τα καλώδια των τεμαχίων και το σωλήνα του εργαστηριακού τενσιομέτρου κατασκευής Soil Moisture Inc. που τοποθετήθηκε επίσης, τα συστήματα μέτρησης/καταγραφής και το μανόμετρο μέτρησης της μύζησης από το εργαστηριακό τενσιόμετρο. Το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν μία χονδρόκοκκη άμμος με ίχνη πολύ λεπτών χαλίκων το οποίο συμπυκνώθηκε με χειροκίνητο κόπανο πρότυπης ενέργειας της δοκιμής Proctor σε υγρασία 3% και ξηρό φαινόμενο βάρος  $17 \text{ kN/m}^3$ . Υλικό τοποθετήθηκε και στο κολάρο προέκτασης της μήτρας φτάνοντας μετά τη συμπύκνωση μέχρι ελαφρώς κάτω από τα χείλη και στη συνέχεια διανοίχθηκαν από την επιφάνεια του συμπυκνωμένου δείγματος οι οπές τοποθέτησης των αισθητήρων στο ίδιο βάθος (περί τη μέση του συνολικού ύψους) μέσω σωλήνων της

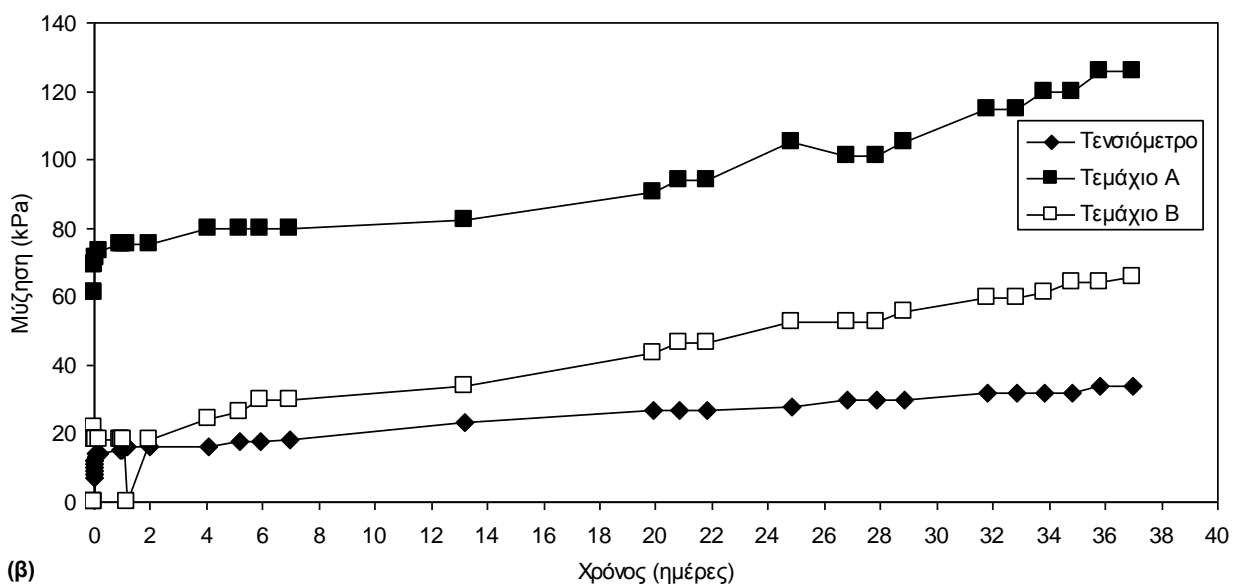
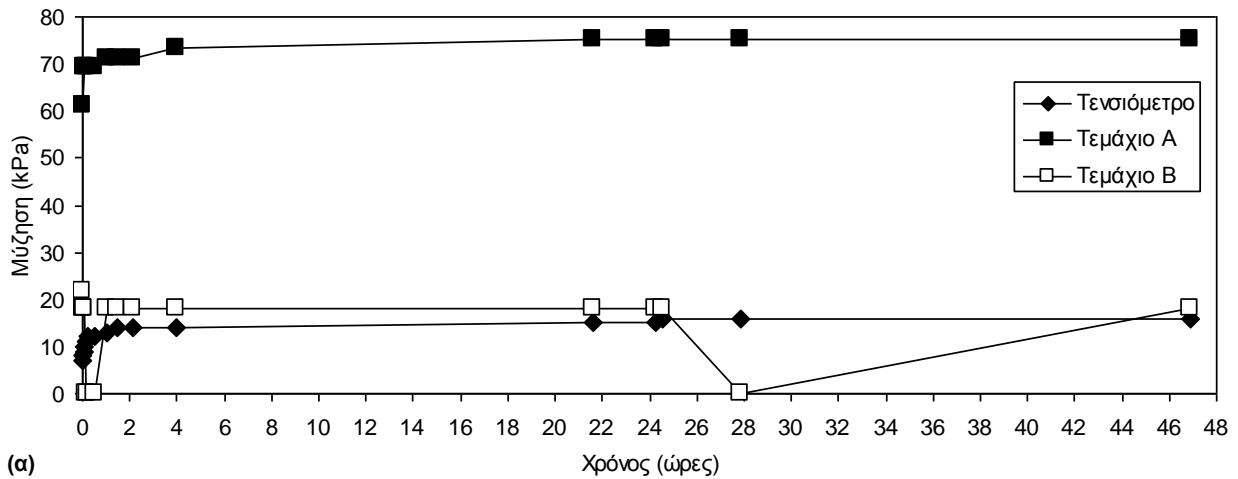


κατάλληλης διαμέτρου. Το κενό μεταξύ των οπών και των καλωδίων των τεμαχίων γύψου και του σωλήνα του τενσιομέτρου πληρώθηκε με το υλικό που βγήκε από τις οπές και συμπυκνώθηκε με μία λεπτή μεταλλική ράβδο. Μετά την τοποθέτηση των αισθητήρων, η επιφάνεια καλύφθηκε με υγρή παραφίνη (Φωτ. 3.6β) με σκοπό όταν αυτή πήξει να προκαλέσει πλήρη στεγάνωση της άνω επιφάνειας (Φωτ. 3.6γ) παρά την έξοδο των σωλήνων και των καλωδίων. Έτσι οποιαδήποτε απώλεια υγρασίας θα μπορούσε να συμβεί μόνο από το σημείο ένωσης της μήτρας με την βάση και του κολάρου με την μήτρα. Τα τεμάχια γύψου είχαν τοποθετηθεί πρώτα σε δοχείο με απιονισμένο απαερωμένο νερό (Φωτ. 3.6δ) όπου είχαν αφεθεί 48 ώρες για τον πλήρη κορεσμό τους. Η γύψος μαλάκωσε κατά το στάδιο αυτό, οπότε απαιτήθηκαν πολύ λεπτοί χειρισμοί κατά την τοποθέτηση των αισθητήρων εντός των οπών που διανοίχθηκαν στο δείγμα, ενώ όπως φαίνεται στην Φωτ. 3.6ε, μικρό μέρος της γύψου διαλύθηκε και αποτέθηκε στον πυθμένα του δοχείου.

Οι αισθητήρες που τοποθετήθηκαν στο δείγμα της Φωτ. 3.6α παρακολουθούντο για περίπου ενάμιση μήνα. Στο Σχ. 3.7α παρουσιάζονται οι μετρήσεις των αισθητήρων για τις πρώτες 48 ώρες και στο Σχ. 3.7β το σύνολο των πραγματοποιηθεισών μετρήσεων. Για την ερμηνεία των καταγραφεισών ενδείξεων των τεμαχίων γύψου χρησιμοποιήθηκε και για τους δύο αισθητήρες η καμπύλη βαθμονόμησης του κατασκευαστή. Όπως προκύπτει από την εικόνα της εξέλιξης των μετρήσεων στο Σχ. 3.7α σε περίπου 2-4 ώρες είχε επέλθει η σταθεροποίηση των καταγραφών των τεμαχίων γύψου ενώ σε περίπου 30' η σταθεροποίηση των μετρήσεων του τενσιομέτρου. Από το Σχ. 3.7β προκύπτει ότι από το χρονικό διάστημα των 2-4 ημερών και μετά αρχίζει μία προοδευτική απώλεια υγρασίας η οποία οδηγεί σε αύξηση των τιμών της μύζησης που καταγράφονται από τα όργανα. Ο χρόνος απόκρισης που καταγράφηκε για τα τεμάχια γύψου (ακόμα και αν ληφθεί υπόψη ότι το υλικό στο οποίο γίνεται η μέτρηση είναι ένα πολύ διαπερατό υλικό) είναι πολύ μικρός, σίγουρα δε πολύ μικρότερος των αναφερόμενων στη βιβλιογραφία τιμών. Οι ενδείξεις μάλιστα του Τεμαχίου Β βρίσκονται πολύ κοντά στις ενδείξεις του τενσιομέτρου για τις πρώτες 48 ώρες. Οι ενδείξεις του Τεμαχίου Α ωστόσο είναι πολύ διαφορετικές, ενώ και το Τεμάχιο Β καταγράφει προοδευτικά ολοένα και μεγαλύτερη τιμή της μύζησης από το τενσιόμετρο, ευρισκόμενη πρακτικά σε σταθερή απόσταση από τις μετρήσεις του Τεμαχίου Α. Το δοκίμιο είχε προετοιμαστεί αρκετά προσεκτικά ώστε να θεωρείται επαρκώς ομοιογενές για να μην δικαιολογούνται τόσο μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές της μύζησης από σημείο σε σημείο στο ίδιο βάθος. Η εξέταση της θέσης των αισθητήρων μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής αποκάλυψε ότι δεν είχαν παραμείνει θύλακες αέρα κατά την τοποθέτηση που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν τις ενδείξεις. Κατά συνέπεια, αν θεωρηθούν πιο ακριβείς οι τιμές του



**Φωτογραφία 3.6.** α) Διάταξη μέτρησης της μύζησης με εργαστηριακό тенσιόμετρο και τεμάχια γύψου (διακρίνονται οι μετρητές/καταγραφικά και το μανόμετρο μέτρησης του тенσιομέτρου) του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Soil Moisture Inc. σε συμπυκνωμένη χονδρόκοκκη άμμο εντός μήτρας Proctor 4'', β) επιφάνεια μήτρας με την παραφίνη υγρή αμέσως μόλις χύθηκε, και γ) μετά την πήξη της, δ) και ε) τα δύο τεμάχια γύψου που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εμβάπτισή τους σε νερό για επίτευξη πλήρους κορεσμού τους πριν την χρησιμοποίησή τους (διακρίνονται ίχνη γύψου που έχει διαλυθεί και κάθεται σαν ίζημα στον πυθμένα του δοχείου).



**Σχήμα 3.7.** Μετρήσεις μύζησης από δύο τεμάχια γύψου και ένα εργαστηριακό τενσιόμετρο σε συμπυκνωμένη χονδρόκοκκη άμμο α) για τις πρώτες 48 ώρες, και β) για το σύνολο του χρόνου που γίνονταν μετρήσεις.

τενσιομέτρου, τότε τα τεμάχια γύψου επέδειξαν σημαντικότερη διαφοροποίηση των τιμών μεταξύ τους (για χρήση της –κοινής για όλα τα τεμάχια– καμπύλης του κατασκευαστή), ενώ και το ένα, οι τιμές του οποίου συνέπεσαν αρχικά με αυτές του τενσιομέτρου, προοδευτικά είχε σημαντικότερη απόκλιση από τις καταγραφείσες τιμές στο τενσιόμετρο.

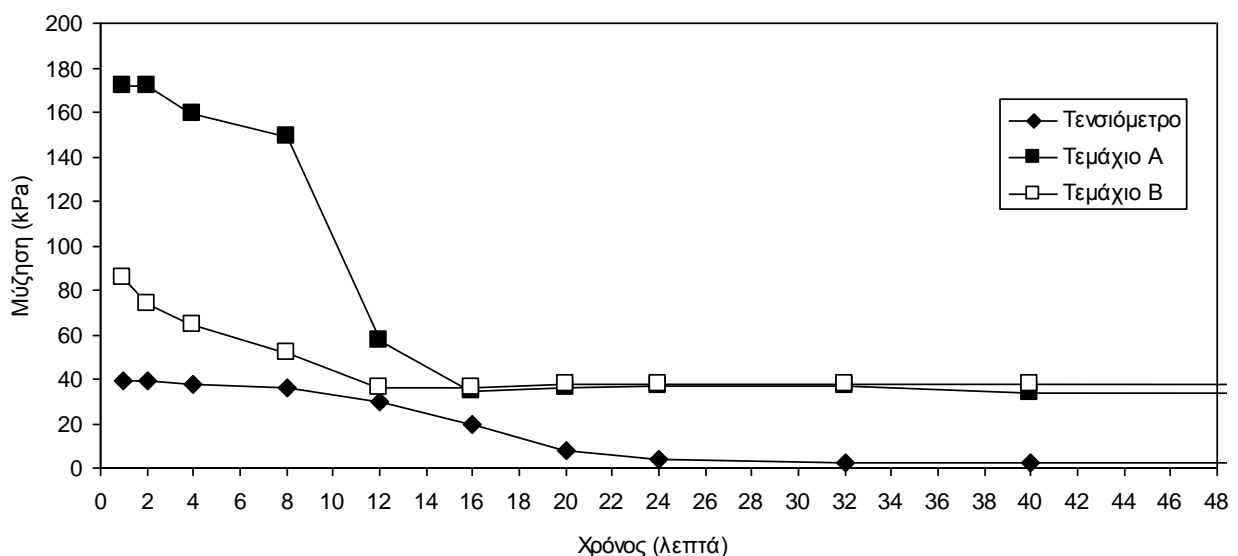
Μετά την παρακολούθηση της ξήρανσης, το σύνολο της μήτρας, των αισθητήρων και του δοκιμίου τοποθετήθηκαν σε δοχείο για να γίνει ο πλήρης εμποτισμός. Στη Φωτ. 3.7α διακρίνεται



**Φωτογραφία 3.7.** α) Διάταξη μέτρησης της μύζησης με εργαστηριακό тенσιόμετρο και τεμάχια γύψου (διακρίνονται οι μετρητές/καταγραφικά και το μανόμετρο μέτρησης του тенσιόμετρου) του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Soil Moisture Inc. σε συμπυκνωμένη χονδρόκοκκη άμμο εντός μήτρας Proctor 4'' κατά την τοποθέτησή της σε δοχείο με νερό, β) επιφάνεια μήτρας με την παραφίνη από όπου φαίνονται να διαφεύγουν φυσαλίδες αέρα από μικρή αδιόρατη οπή, και γ) επιφάνεια της μήτρας μετά την διάτρηση της παραφίνης και της αποκόλλησης και ενός τμήματός της (διακρίνεται από κάτω το κενό λόγω συρρίκνωσης της άμμου κατά την διαβροχή –επισημαίνεται με βέλος).

το σύνολο της διάταξης όπως τοποθετήθηκε μέσα σε δοχείο με νερό καθώς και οι αισθητήρες/καταγραφικά μέτρησης και το μανόμετρο του τενσιομέτρου. Μετά την πλήρωση του δοχείου με νερό άρχισαν να εξέρχονται φυσαλίδες αέρα από μία μικρή αδιόρατη οπή στα όρια παραφίνης-χειλούς μήτρας (Φωτ. 3.7β). Η παρατήρηση αυτή υπενθύμισε ότι ειδικά αν δεν υπήρχε διαφυγή του αέρα (παρόλο που τελικά υπήρχε από την μικρή οπή) υπήρχε ο κίνδυνος εγκλωβισμού του περιεχόμενου αέρα στο πάνω μέρος του δοκιμίου κάτω από την παραφίνη και άρα η καταγραφή από τους αισθητήρες μίας «τεχνητής» ψευδούς τιμής της μύζησης κατά τον υδρεμποτισμό. Έτσι έγινε αμέσως διάτρηση της επιφάνειας της παραφίνης (Φωτ. 3.7γ), η οποία μάλιστα αποκάλυψε κατά την αποκόλληση ενός τμήματος της παραφίνης ότι κάτω από αυτήν είχε συμβεί συρρίκνωση της άμμου κατά τον υδρεμποτισμό (το βέλος στην Φωτ. 3.7γ υποδεικνύει το κενό μεταξύ παραφίνης και κολλημένων σε αυτήν κόκκων άμμου και την άμμο κάτω από αυτήν). Στο Σχ. 3.8 παρουσιάζονται οι μετρήσεις των αισθητήρων κατά το στάδιο του υδρεμποτισμού. Όλα τα όργανα αποκρίθηκαν εντυπωσιακά γρήγορα σε σχέση με τις αναφορές στη βιβλιογραφία αλλά και πάλι με σημαντικές αποκλίσεις ακόμα και στο τέλος που θα έπρεπε να καταγράφουν μηδενικές τιμές της μύζησης (πλην του τενσιομέτρου).

Το δεύτερο παράδειγμα χρήσης τεμαχίων γύψου αφορά στην τοποθέτηση δύο τεμαχίων γύψου, ενός εργαστηριακού τενσιομέτρου και ενός αισθητήρα FDR κατασκευής Delta-T για την μέτρηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας σε δύο μεγάλα δοκίμια άμεσης διάτμησης στην

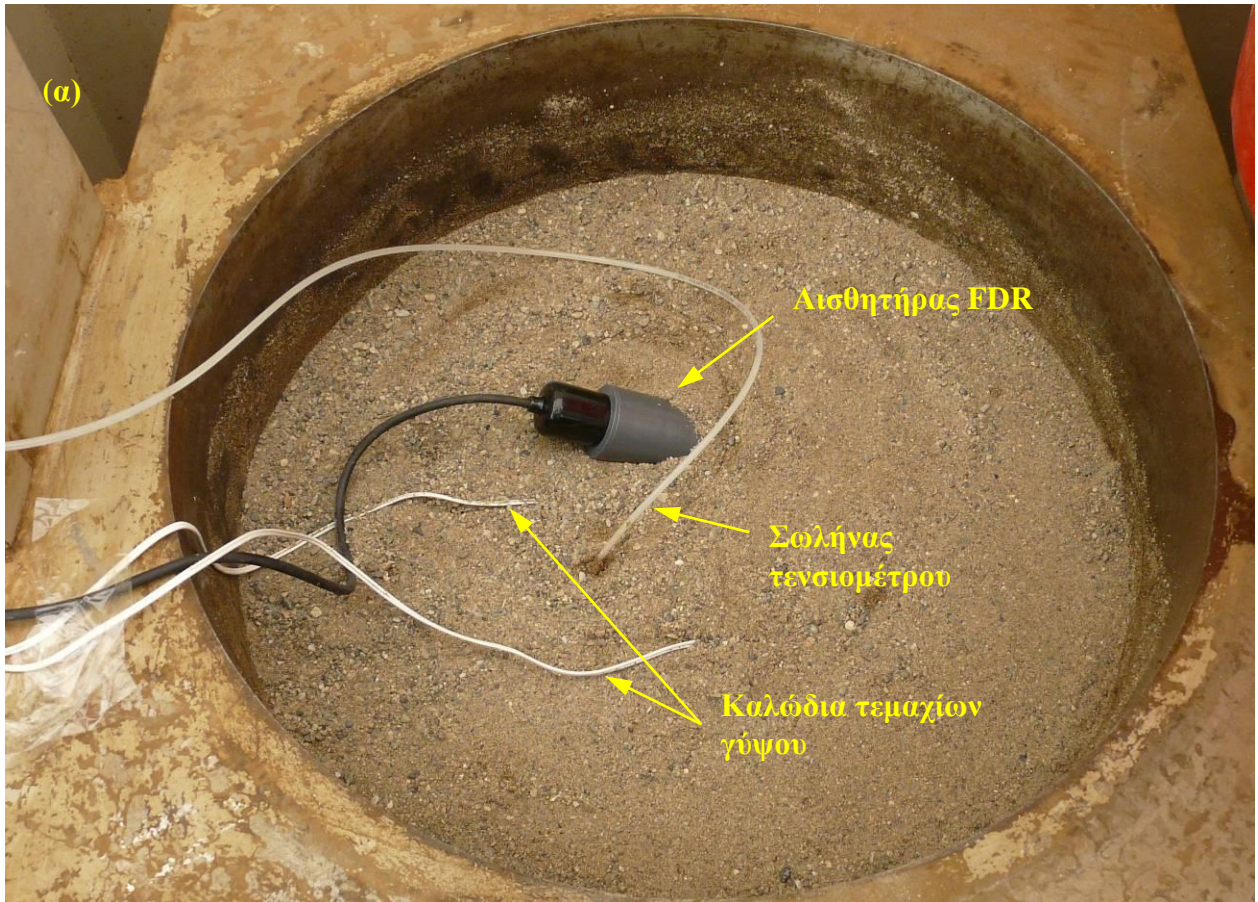


**Σχήμα 3.8.** Μετρήσεις μύζησης από δύο τεμάχια γύψου και ένα εργαστηριακό τενσιόμετρο σε συμπυκνωμένη χονδρόκοκκη άμμο κατά το στάδιο του υδρεμποτισμού (συνέχεια μετρήσεων Σχ. 3.7).

μεγάλη συσκευή διάτμησης του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής ΥΦΑΝΤΙΔΗΣ. Οι δοκιμές αυτές περιελάμβαναν παρακολούθηση των καθιζήσεων κατά τη φόρτιση με κατακόρυφο φορτίο και κατά τον υδρεμποτισμό, καθώς και το στάδιο της διάτμησης. Δεδομένου ότι αυτά τα στάδια παρουσιάζονται αναλυτικά στο Κεφ. 6, σε αυτό το σημείο δε γίνεται περιγραφή της μεγάλης συσκευής άμεσης διάτμησης αλλά μόνο της τοποθέτησης των αισθητήρων και της απόκρισής τους. Στη Φωτ. 3.8α παρουσιάζεται η στάθμη του δοκιμίου από την οποία τοποθετήθηκαν όλοι οι αισθητήρες. Αυτή βρισκόταν ελαφρώς ψηλότερα από τη στάθμη της επιφάνειας διάτμησης έτσι ώστε οι κεφαλές όλων των αισθητήρων να τοποθετηθούν στη στάθμη της επιφάνειας διάτμησης. Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν έτσι ώστε τα καλώδιά τους και ο σωλήνας του тенσιομέτρου να οδηγηθούν στην περιφέρεια του δοκιμίου και να βγουν έξω από αυτό στο διάκενο μεταξύ πορολίθου και πλακών μετάδοσης κατακόρυφου φορτίου με την κυσέλη (Φωτ. 3.8β και 3.8γ). Και τα δύο τεμάχια γύψου και το πορώδες άκρο του εργαστηριακού тенσιομέτρου εμβαπτίστηκαν σε πολύ του διερχόμενου από το κόσκινο Νο 200 του υλικού που χρησιμοποιήθηκε στα δοκίμια και μετά τοποθετήθηκαν στις οπές που ανοίχθηκαν από τη στάθμη τοποθέτησης δοκιμίων (Φωτ. 3.8δ ως 3.8ζ) προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη υδραυλική επαφή ανάμεσα στους αισθητήρες και στο υλικό. Τέλος στις Φωτ. 3.8η και 3.8θ παρουσιάζονται ένα τεμάχιο γύψου και το πορώδες άκρο του тенσιομέτρου μετά την εξαγωγή τους από το δοκίμιο στο τέλος της δοκιμής.

Το υλικό των δοκιμίων ήταν χονδρόκοκκη άμμος ποτάμιας προέλευσης, η οποία συμπυκνώθηκε σε ξηρό φαινόμενο βάρος  $18 \text{ kN/m}^3$  με ποσοστό υγρασίας 2%. Παρασκευάστηκαν δύο δοκίμια με τα ίδια χαρακτηριστικά ξηρού φαινόμενου βάρους και ποσοστού υγρασίας κατά τη συμπύκνωση. Το ένα παρασκευάστηκε με σκοπό να παραμείνει στην υγρασία που συμπυκνώθηκε και να εκτελεστεί η συμπίεσή του μέχρι τα 50 kPa και μετά η διάτμησή του υπό το κατακόρυφο αυτό φορτίο απλώς παρακολουθώντας την εξέλιξη της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας του. Το άλλο παρασκευάστηκε με σκοπό να προηγηθεί υδρεμποτισμός του δοκιμίου πριν από τη διάτμηση ώστε να μετρηθεί η μεταβολή της μύζησης του και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας του κατά το στάδιο αυτό και στη συνέχεια να μετρηθεί και η διατμητική του αντοχή κατά το στάδιο της διάτμησης για να συγκριθεί με εκείνη του μη κορεσμένου δοκιμίου.

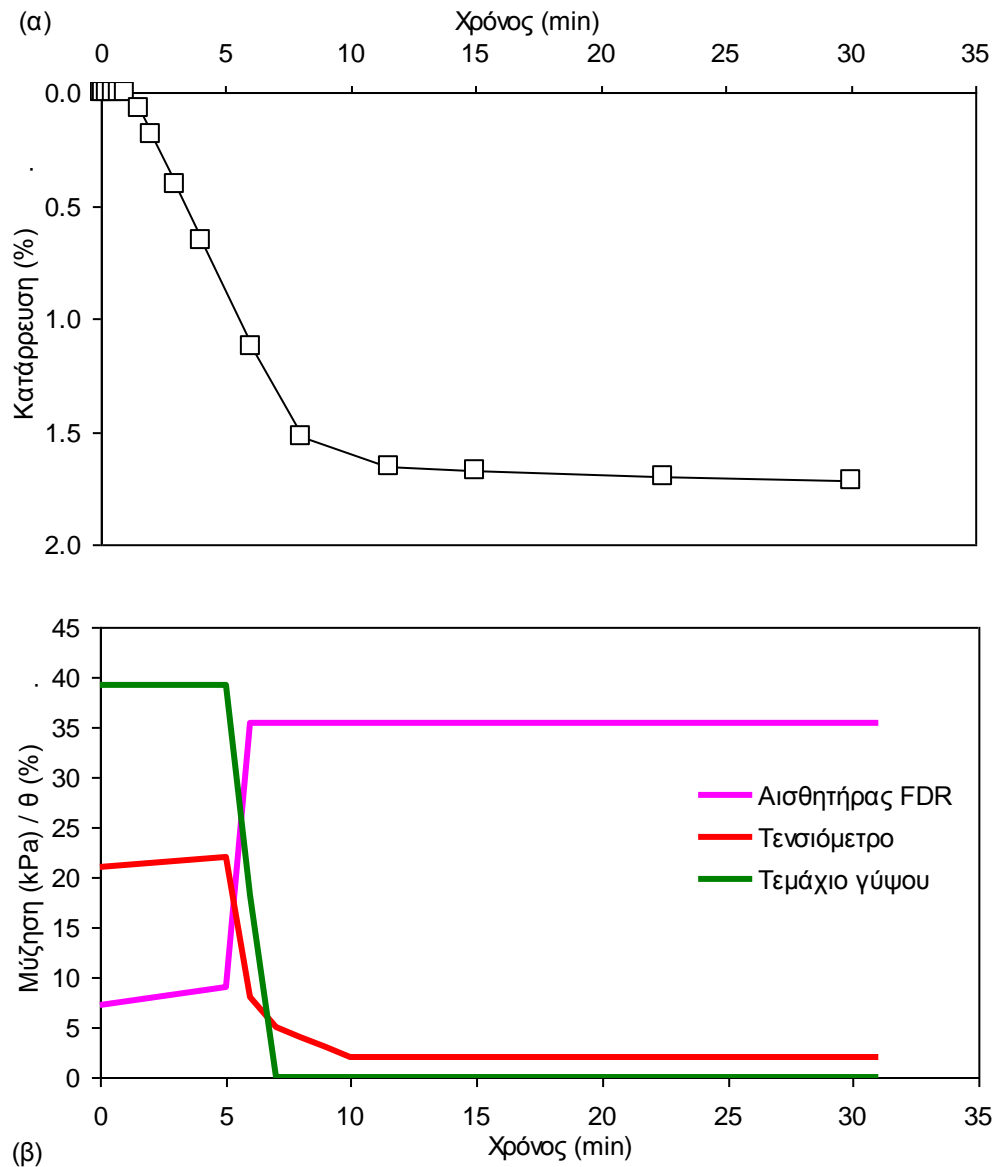
Στο Σχ. 3.9 παρουσιάζονται η εξέλιξη της καθίζησης κατά τον υδρεμποτισμό του δεύτερου δοκιμίου (Σχ. 3.9α) και η εξέλιξη των μετρήσεων των τοποθετηθέντων αισθητήρων κατά το ίδιο στάδιο (Σχ. 3.9β). Η πρώτη παρατήρηση είναι ότι το ένα τεμάχιο γύψου δεν κατέγραψε





**Φωτογραφία 3.8.** α) Στάθμη εγκατάστασης οργάνων παρακολούθησης μύζησης και υγρασίας σε δοκίμιο της μεγάλης συσκευής άμεσης διάτμησης (ελαφρά ψηλότερα από τη στάθμη της επιφάνειας διάτμησης οπότε οι κεφαλές των οργάνων να τοποθετηθούν στην επιφάνεια διάτμησης) από όπου διακρίνονται ο αισθητήρας FDR για τη μέτρηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας, τα καλώδια των δύο τεμαχίων γύψου και ο σωλήνας του εργαστηριακού тенσιομέτρου, β) τελική επιφάνεια δοκιμίου με τα καλώδια και τον σωλήνα του εργαστηριακού тенσιομέτρου να εξέχουν από την μία άκρη, γ) λήψη από την ίδια θέση μετά την τοποθέτηση του άνω πορολίθου και των πλακών μετάδοσης φορτίου (προέρχονται από συλλογή δοκιμής φόρτισης πλακόσ), δ) τα δύο τεμάχια γύψου που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εμβάπτισή τους σε πολύτο του διερχομένου από το κόσκινο No 200 του υλικού της δοκιμής, ε) το ένα από τα τεμάχια κατά την τοποθέτησή του εντός της οπής που διανοίχθηκε από την στάθμη τοποθέτησης οργάνων, στ) και ζ) οι αντίστοιχες φωτογραφίες για το εργαστηριακό тенσιοόμετρο, η) και θ) το ένα τεμάχιο γύψου και το πορώδες άκρο του εργαστηριακού тенσιομέτρου μετά την αφαίρεσή τους από το δοκίμιο.





**Σχήμα 3.9.** α) Καθίζηση δοκιμίου μεγάλης συσκευής διάτμησης εργαστηρίου ΕΛΑΦΟΣ Α.Ε. κατά τον εμποτισμό του δοκιμίου με νερό υπό κατακόρυφη τάση 50 kPa, και β) εξέλιξη των τοποθετηθέντων αισθητήρων κατά το ίδιο χρονικό διάστημα.

πραγματικές μετρήσεις (πολύ μεγάλη αύξηση στην αρχή, μείωση στο 0 στη συνέχεια, ξανά πολύ μεγάλη αύξηση κ.ο.κ.). Το άλλο τεμάχιο γύψου κατέγραψε σχεδόν διπλάσια τιμή της μύζησης από το тенσιόμετρο (πάλι με ερμηνεία των καταγραφών μέσω της καμπύλης βαθμονόμησης του κατασκευαστή). Από την άλλη πλευρά, όλοι οι αισθητήρες αποκρίθηκαν εξαιρετικά γρήγορα, σε απόλυτη συμφωνία με τις μακροσκοπικές παρατηρήσεις της αύξησης της καθίζησης λόγω υδρεμοτισμού του δοκιμίου, με το τεμάχιο γύψου να καταγράφει 0 από 38 kPa εντός 2', το

τενσιόμετρο να καταγράφει 2 από 21 kPa εντός 5' (γενικά τα τενσιόμετρα δεν καταγράφουν ποτέ 0, έχοντας ένα πρόβλημα στις πάρα πολύ μικρές τιμές της μύζησης), και τον αισθητήρα FDR να καταγράφει μεταβολή του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας σε 35.5% από 9.1% εντός 1'. Ενώ η μακροσκοπική καταγραφή καθιζήσεων του δοκιμίου αρχίζει μεταξύ 60'' και 90'' από την έναρξη της πλήρωσης του φορείου της συσκευής, η απόκριση των αισθητήρων αρχίζει 5' από την έναρξη πλήρωσης του φορείου. Σε πρώτη ανάγνωση αυτό θα μπορούσε να μεταφραστεί σε υστέρηση απόκρισης των αισθητήρων. Στην πραγματικότητα όμως αν ληφθεί υπόψη η στάθμη τοποθέτησής τους εντός του δοκιμίου, τότε η απόκρισή τους συνέβη με πάρα πολύ μικρή χρονική διαφορά από τη χρονική στιγμή που η στάθμη στο φορείο βρισκόταν στο ίδιο επίπεδο με τη στάθμη τοποθέτησης των αισθητήρων.

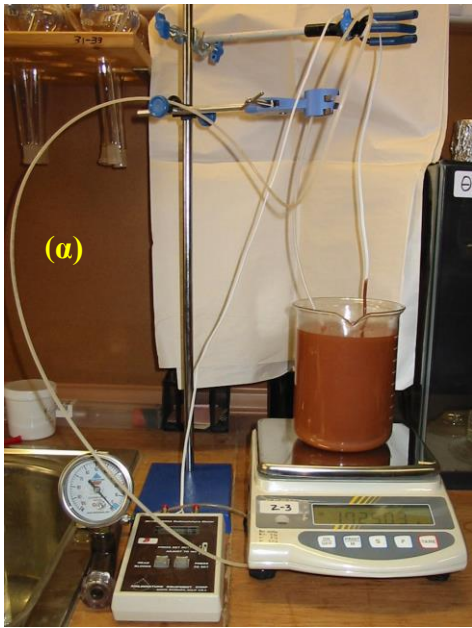
Με βάση τα δύο παραδείγματα χρήσης τεμαχίων γύψου που παρουσιάστηκαν ως εδώ εγείρεται σαφώς ζήτημα αξιοπιστίας των ενδείξεών τους με χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης του κατασκευαστή. Σε μία μάλιστα περίπτωση (το ένα από τα δύο τεμάχια γύψου στο δεύτερο παράδειγμα που κατέγραφε ενδείξεις χωρίς νόημα) δεν επρόκειτο απλώς για μη αξιόπιστες μετρήσεις ή σε απόσταση από τις καταγραφείσες ενδείξεις ενός πολύ πιο αξιόπιστου οργάνου όπως το τενσιόμετρο αλλά για παντελή αδυναμία καταγραφής μίας «λογικής» εξέλιξης ενδείξεων. Εφόσον αυτό μπορεί να διορθωθεί μέσω της βαθμονόμησης κάθε τεμαχίου γύψου, το θετικό συμπέρασμα που προέκυψε είναι η εξαιρετικά ταχεία απόκριση των αισθητήρων, τόσο στην περίπτωση επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας όπως στο πρώτο παράδειγμα για την καταγραφή της τιμής της μύζησης του υλικού του δοκιμίου, όσο και στην περίπτωση της απόκρισης σε μία ραγδαία επιβαλλόμενη μεταβολή της μύζησης, όπως για παράδειγμα λόγω υδρεμποτισμού και στο πρώτο και στο δεύτερο παράδειγμα. Εν όψει αυτών των συμπερασμάτων συστήνεται η βαθμονόμηση κάθε τεμαχίου γύψου και η χρήση περισσότερων του ενός αισθητήρων (το πολύ χαμηλό τους κόστος επιτρέπει κάτι τέτοιο με ευκολία).

Προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο όντως διαφοροποιούνται τα αποτελέσματα των προηγούμενων παραδειγμάτων στην περίπτωση χρήσης ειδικής καμπύλης βαθμονόμησης, επιχειρήθηκε να γίνει η βαθμονόμηση ενός τεμαχίου γύψου του ίδιου «πακέτου» (lot) με τα προηγούμενα που είχαν χρησιμοποιηθεί στις δύο περιπτώσεις που προαναφέρθηκαν. Για να γίνει η βαθμονόμηση αυτή υλοποιήθηκε μία διάταξη παρόμοια στη λογική με αυτή του πρώτου παραδείγματος αλλά για άργιλο και μάλιστα σε μορφή πολτού. Χρησιμοποιήθηκε μία άργιλος μέσης πλαστικότητας (άργιλος Αμαρουσίου:  $w_L=47.5\%$ ,  $I_p=24.5$  και 86% διερχόμενο από το κόσκινο No 200 –περισσότερα για τις ιδιότητες αυτού του υλικού αναφέρονται στο Κεφ. 11) η

οποία αναζυμώθηκε σε ποσοστό υγρασίας ίσο με 2 φορές το όριο υδαρότητάς της και τοποθετήθηκε μέσα σε ποτήρι ζέσεως χωρητικότητας 1 l στο οποίο είχε προηγουμένως λιπανθεί επιμελώς η εσωτερική του επιφάνεια (για να μην επικολλάται υλικό του πολτού κατά την ξήρανση πάνω σε αυτήν και η συρρίκνωση να συνεχιστεί για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με το υλικό να διατηρεί γεωμετρικά ομοιόθετο σχήμα με αυτό που έλαβε αρχικά μέσα στο ποτήρι ζέσεως). Εντός του πολτού τοποθετήθηκε στο ίδιο βάθος και σε μικρή απόσταση ένα τεμάχιο γύψου και το πορώδες άκρου ενός κοινού τενσιομέτρου, ενώ το καλώδιο του τεμαχίου γύψου και ο σωλήνας του τενσιομέτρου αναρτήθηκαν πάνω από το ποτήρι ζέσεως με επαρκές μήκος χαλαρό ωστόσο (ώστε η αναμενόμενη ξήρανση του πολτού να μην τα «τεντώσει» αλλοιώνοντας τις ενδείξεις του ζυγού). Στη διάταξη αυτή καταγράφονταν οι ενδείξεις της μύζησης από το τενσιόμετρο, οι ενδείξεις του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου και οι ενδείξεις του ζυγού. Η δοκιμή αυτή διήρκεσε 42 ημέρες οπότε και σταμάτησε δεδομένου ότι άρχισε η μείωση των ενδείξεων της μύζησης στο τενσιόμετρο, άρα το όργανο είχε πλέον αρχίσει να έχει προβλήματα «φαινόμενης» σπηλαιώσης, ενώ ταυτόχρονα στο τεμάχιο γύψου καταγράφονταν τόσο χαμηλές ενδείξεις που δεν είχε νόημα περαιτέρω παρακολούθησή. Τότε λοιπόν το δοκίμιο εξήχθη από το ποτήρι ζέσεως, διασπάστηκε έτσι ώστε να αποκαλυφθούν τα τοποθετημένα όργανα και μετρήθηκε το ποσοστό υγρασίας του δοκιμίου από τμήμα του περίξ των τοποθετημένων οργάνων και βρέθηκε ίσο με 21.05% (χωρίς διαφορά στην τιμή του για το υλικό περίξ του πορώδους άκρου του τενσιομέτρου και περίξ του τεμαχίου γύψου). Στη Φωτ. 3.9 παρουσιάζεται η γενική διάταξη που περιγράφηκε (Φωτ. 3.9α) με λεπτομέρειες της τοποθέτησης των οργάνων (Φωτ. 3.9β-στ), της εξέλιξης της ξήρανσης του πολτού (Φωτ. 3.9ζ) και της τελικής αποκάλυψης των οργάνων (Φωτ. 3.9η). Από ένα σημείο και μετά, εντός του πολτού τοποθετήθηκε και ένα ψηφιακό θερμόμετρο έτσι ώστε να καταγράφεται και η θερμοκρασία για να μπορεί να διαπιστωθεί τυχόν επιρροή της στις μετρήσεις των οργάνων<sup>10</sup>.

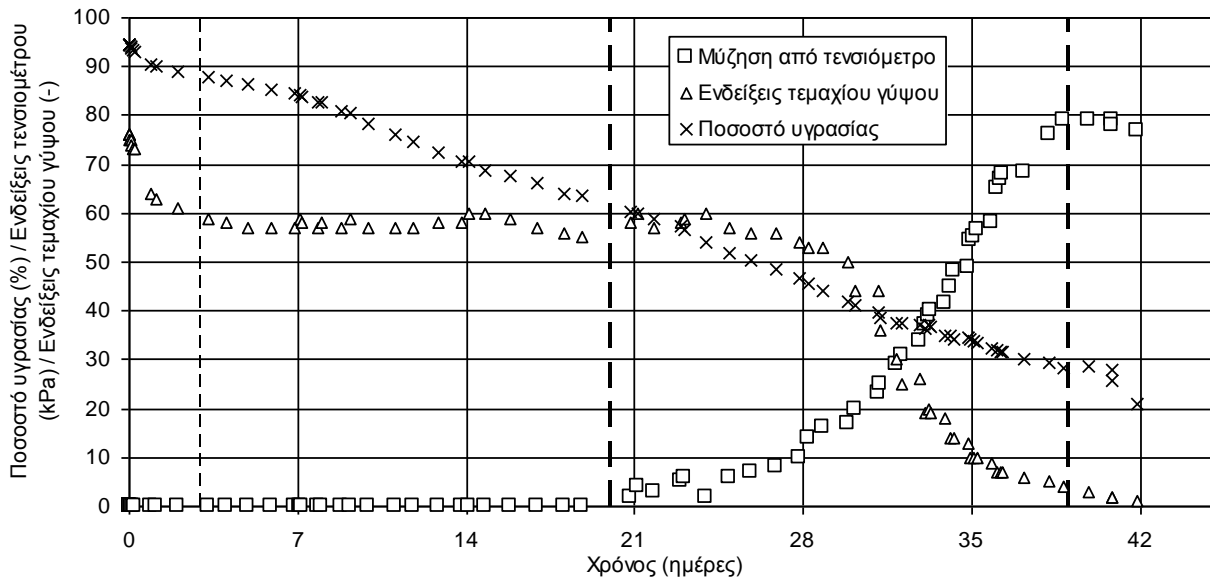
Στο Σχ. 3.10 παρουσιάζεται η εξέλιξη της μύζησης όπως καταγράφηκε στο τενσιόμετρο, των ενδείξεων του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου και του ποσοστού υγρασίας του πολτού με τον χρόνο στη διάταξη παρακολούθησης της ξήρανσης της αναζυμωμένης αργίλου Αμαρουσίου. Όπως παρατηρείται, το τενσιόμετρο για σημαντικό χρονικό διάστημα (περί τις 20 ημέρες) καταγράφει μηδενικές τιμές, ενώ στο ίδιο χρονικό διάστημα το ποσοστό υγρασίας του πολτού έχει μειωθεί από περίπου 95% σε περίπου 61% (σε όρους συσχέτισης με το όριο υδαρότητας του υλικού: από περίπου 2 φορές σε περίπου 1.3 φορές). Οι ενδείξεις του καταγραφικού του

<sup>10</sup> Ούτως ή άλλως θα ήταν πολύ δύσκολο να τοποθετηθεί από την αρχή μέσα στον πολτό αφού στην αρχή αυτός είναι τόσο ρευστός που το θερμόμετρο απλά θα βυθιζόταν μέχρι τον πυθμένα του ποτηριού ζέσεως.

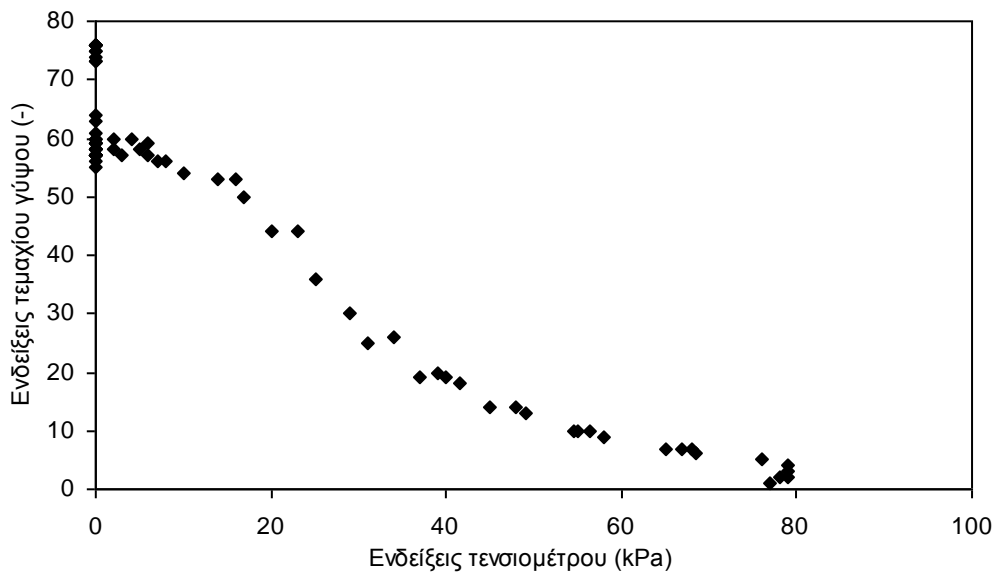




**Φωτογραφία 3.9.** α) Γενική διάταξη παρακολούθησης ξήρανσης πολτού αργίλου Αμαρουσίου (διακρίνεται το μανόμετρο του тенσιομέτρου, η συσκευή ανάγνωσης του τεμαχίου γύψου, ο ζυγός και το ποτήρι ζέσεως με τον πολτό), β) επιφάνεια του πολτού μέσα στο ποτήρι ζέσεως με το καλώδιο του τεμαχίου γύψου και τον σωλήνα του тенσιομέτρου να εξέχουν, γ) άποψη του ποτηριού ζέσεως έτσι ώστε να διακρίνεται η επιμελής λίπανση της εσωτερικής του επιφάνειας, δ) διεύρυνση οπών καλωδίου τεμαχίου γύψου και σωλήνα тенσιομέτρου λόγω συρρίκνωσης πολτού, ε) οι ίδιες οπές μετά την πλήρωσή τους, στ) το ποτήρι ζέσεως μετά την προσθήκη και του ψηφιακού θερμομέτρου, ζ) διαμπερής ρωγμή συρρίκνωσης του πολτού, και η) το πορώδες άκρο του тенσιομέτρου και το τεμάχιο γύψου μετά την αποκόλληση μέρους της αργίλου στο τέλος της δοκιμής (διακρίνεται και η οπή του θερμομέτρου).



**Σχήμα 3.10.** Εξέλιξη της μύζησης όπως καταγράφηκε στο тенσιόμετρο, των ενδείξεων του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου και του ποσοστού υγρασίας του πολτού με τον χρόνο στη διάταξη παρακολούθησης της ξήρανσης της αναζυμωμένης αργίλου Αμαρουσίου.



**Σχήμα 3.11.** Συσχέτιση των ενδείξεων του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου με την μύζηση που κατέγραφε το тенσιόμετρο στη διάταξη παρακολούθησης της ξήρανσης της αναζυμωμένης αργίλου Αμαρουσίου (πρωτογενή στοιχεία χωρίς καμία επέμβαση).

τεμαχίου γύψου μειώνονται αρχικά μέσα σε ένα διάστημα περίπου τριών ημερών από περί το 75 στο 58-60 όπου και θα παραμείνουν μέχρι να αρχίσουν να αυξάνονται οι ενδείξεις στο тенσιόμετρο. Από το χρονικό εκείνο σημείο και μετά αρχίζει μία μείωση των ενδείξεων αυτών, η

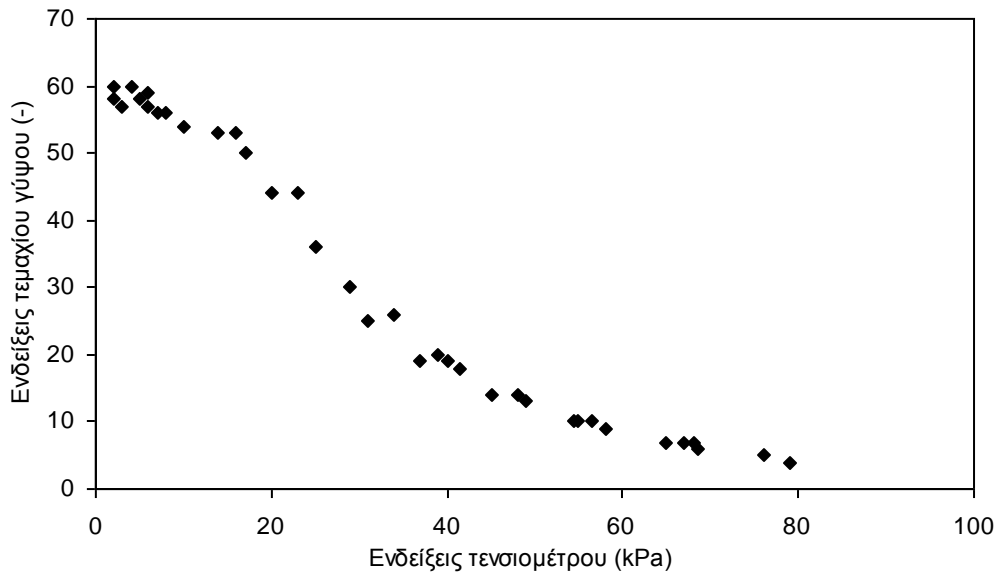
οποία παρακολουθεί την αύξηση της μύζησης στο тенσιόμετρο. Η μεταβολή αυτή θα συνεχιστεί μέχρι περίπου τις 39 ημέρες οπότε και θα αρχίσει να παρατηρείται μείωση στις τιμές της μύζησης που καταγράφεται στο тенσιόμετρο, το οποίο και συνιστά ένδειξη ότι το πορώδες άκρο του επίκειται να αποκορευτεί. Στο ίδιο χρονικό διάστημα (από 20 έως 39 ημέρες) το ποσοστό υγρασίας του πολτού μειώνεται από περίπου 61% σε περίπου 29%. Στο Σχ. 3.11 σχεδιάστηκαν οι ενδείξεις του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου με τη μύζηση που καταγραφόταν στο тенσιόμετρο χωρίς καμιά επέμβαση στα δεδομένα. Παρατηρείται λοιπόν ότι για μηδενική μύζηση το τεμάχιο γύψου μπορεί να καταγράψει ενδείξεις από 55 έως 76 χωρίς αυτές στην πραγματικότητα να αντιστοιχούν σε πραγματικές τιμές της μύζησης. Αντίστοιχα στο απόστατο των μετρήσεων η ένδειξη του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου για τιμή της μύζησης 79 kPa στο тенσιόμετρο είναι 4 και στη συνέχεια συνεχίζει να μειώνεται ενώ η τιμή της μύζησης στο тенσιόμετρο αρχίζει να μειώνεται κι εκείνη υποδεικνύοντας ότι επίκειται αποκορευμός του πορώδους άκρου. Εφόσον λοιπόν οι τιμές αυτές αποκλειστούν, τότε προκύπτει το Σχ. 3.12 στο οποίο έχουν συσχετιστεί μόνο οι τιμές της μύζησης από το тенσιόμετρο και οι ενδείξεις από το καταγραφικό του τεμαχίου γύψου που έχουν νόημα. Όπως προκύπτει από το γεωμετρικό σχήμα της καμπύλης οι ενδείξεις του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου έχουν μία εξάρτηση από τη μύζηση παρόμοια με τον βαθμό κορεσμού (πρακτικά σταθερή τιμή μέχρι μία τιμή περί τα 15 kPa, και στη συνέχεια μείωση της τιμής αρχικά πιο ραγδαία, η οποία προοδευτικά γίνεται μικρότερου ρυθμού). Η συσχέτιση αυτή εξηγεί φυσικά τη συσχέτιση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του υλικού του τεμαχίου γύψου με τη μύζηση αλλά δεν προσφέρεται για τη συσχέτιση εκτιμώμενου μεγέθους-πρωτογενώς μετρούμενου μεγέθους. Έτσι η συσχέτιση των δύο παραμέτρων αντιστρέφεται στο Σχ. 3.13 όπου παρατίθεται και η καμπύλη βέλτιστης συσχέτισης της μύζησης με την ένδειξη του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου του συγκεκριμένου τύπου και εταιρείας κατασκευής και περιγράφεται από την Εξ. 3.15 όπου R είναι η ένδειξη του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου (συντελεστής συσχέτισης  $R^2=0.994$ ).

$$s = 95 - 4.87 \cdot R + 0.122 \cdot R^2 - 0.0011 \cdot R^3$$

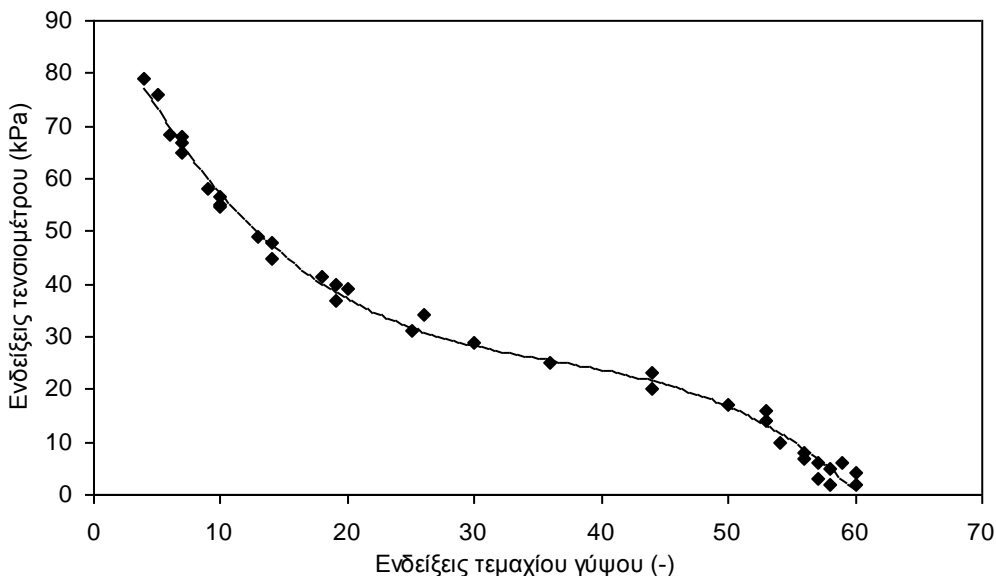
Εξ. 3.15

Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.13 υπάρχουν κοινές ενδείξεις του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου που αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της μύζησης. Αναζητώντας τις τιμές της θερμοκρασίας για αυτά τα ζεύγη τιμών προκύπτει ότι οι μεγαλύτερες τιμές της μύζησης για την ίδια τιμή της ένδειξης του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Δεδομένου ότι κατά τη δοκιμή αυτή δεν υπήρχε έλεγχος της θερμοκρασίας αλλά απλώς παρακολούθησή της, δεν μπορούν να διαμοιραστούν τα δεδομένα σε ακριβείς τιμές

θερμοκρασίας αλλά μόνο σε εύρη αυτής (ώστε να υπάρχουν αρκετά δεδομένα και να έχει άλλωστε νόημα να επιχειρηθεί και συσχέτιση για κάθε εύρος θερμοκρασίας). Έτσι τα δεδομένα διαμοιράστηκαν σε εκείνες τις μετρήσεις που ελήφθησαν υπό εύρος θερμοκρασίας από 15.5 έως



**Σχήμα 3.12.** Συσχέτιση των ενδείξεων του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου με την μύζηση που κατέγραφε το τενοσίμετρο στη διάταξη παρακολούθησης της ξήρανσης της αναζυμωμένης αργίλου Αμαρουσίου (μετρήσεις και των δύο μεγεθών που έχουν νόημα).



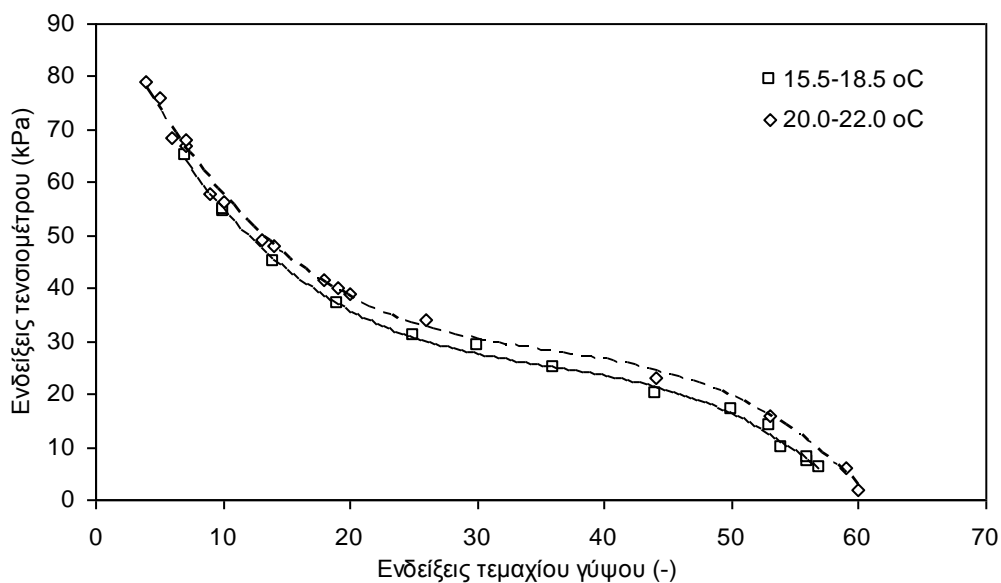
**Σχήμα 3.13.** Συσχέτιση της μύζησης που κατέγραφε το τενοσίμετρο με τις ενδείξεις του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου στη διάταξη παρακολούθησης της ξήρανσης της αναζυμωμένης αργίλου Αμαρουσίου μαζί με την γενική καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης για την εκτίμησης της μύζησης που περιγράφεται από την Εξ. 3.15.



18.5 °C και εκείνες που ελήφθησαν υπό εύρος θερμοκρασίας από 20.0 έως 22.0 °C και παρουσιάζονται στο Σχ. 3.14 μαζί με τις καμπύλες βέλτιστης προσέγγισης για κάθε ομάδα δεδομένων. Οι εξισώσεις που περιγράφουν αυτές τις καμπύλες βέλτιστης προσέγγισης είναι οι Εξ. 3.16α ( $R^2=0.998$ ) και 3.16β ( $R^2=0.997$ ) για τις μικρότερες και τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες αντίστοιχα.

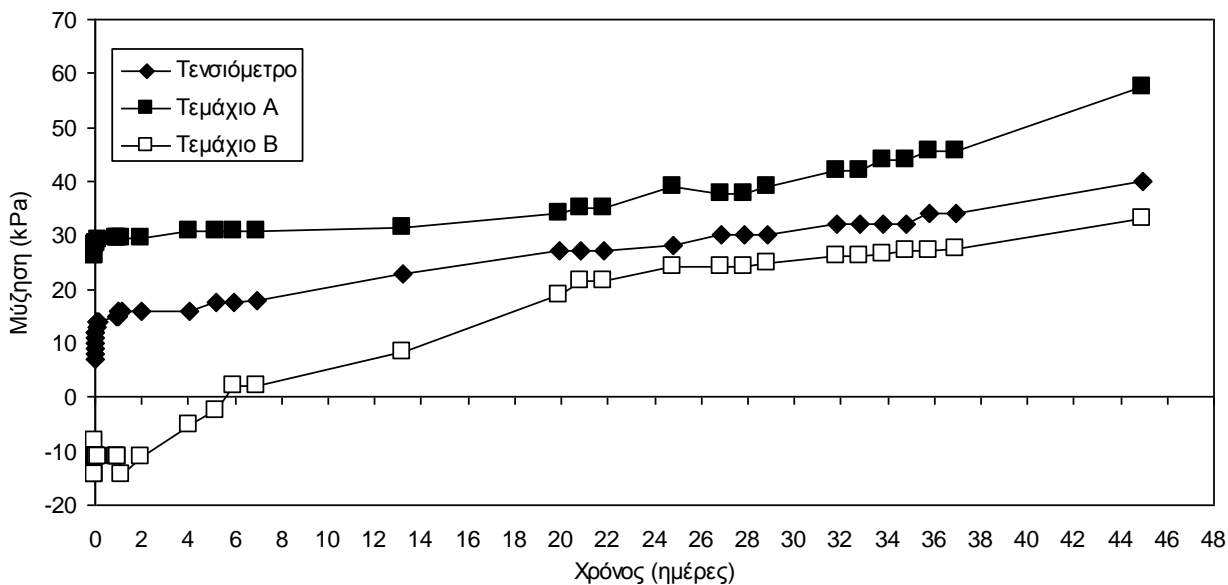
$$s = 93 - 4.90 \cdot R + 0.127 \cdot R^2 - 0.0012 \cdot R^3 \quad \text{Εξ. 3.16α}$$

$$s = 96 - 4.99 \cdot R + 0.129 \cdot R^2 - 0.0012 \cdot R^3 \quad \text{Εξ. 3.16β}$$



**Σχήμα 3.14.** Συσχέτιση της μύζησης που κατέγραφε το τετασιόμετρο με τις ενδείξεις του καταγραφικού τεμαχίου γύψου στη διάταξη παρακολούθησης της ξήρανσης της αναζυμωμένης αργίλου Αμαρουσίου για δύο διαφορετικά εύρη θερμοκρασίας μαζί με τις καμπύλες βέλτιστης προσέγγισης για την εκτίμηση της μύζησης για κάθε εύρος θερμοκρασίας που περιγράφονται από τις Εξ. 3.16α και 3.16β.

Με τις παρατηρήσεις από αυτήν την δοκιμή επιχειρήθηκε να αναμορφωθούν οι εκτιμήσεις της μύζησης από τις πρωτότυπες μετρήσεις στις προηγούμενες δοκιμές. Στην περίπτωση της θραυστής χονδρόκοκκης άμμου εντός της μήτρας της δοκιμής Proctor επιχειρήθηκε η επανεκτίμηση των τιμών της μύζησης από τα τεμάχια γύψου η εξέλιξη της οποίας απεικονίζεται στο Σχ. 3.7β. Αντί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη βαθμονόμησης του κατασκευαστή χρησιμοποιήθηκε η γενική συσχέτιση που δε λαμβάνει υπόψη της την επιρροή της θερμοκρασίας (Εξ. 3.15). Αντί για το Σχ. 3.7β λοιπόν προέκυψε το Σχ. 3.15 στο οποίο καταγράφεται σημαντική μείωση της απόστασης των εκτιμώμενων τιμών της μύζησης από τα



**Σχήμα 3.15.** Μετρήσεις μύζησης από δύο τεμάχια γύψου και ένα εργαστηριακό τενσιόμετρο σε συμπυκνωμένη χονδρόκοκκη άμμο για το σύνολο του χρόνου που γίνονταν μετρήσεις. Εκτίμηση της μύζησης από τις ενδείξεις του καταγραφικού των τεμαχίων γύψου με χρήση της Εξ. 3.15.

τεμάχια γύψου σε σχέση με τις μετρήσεις της μύζησης στο τενσιόμετρο αλλά από την άλλη πλευρά για το τεμάχιο γύψου Β στην αρχή των μετρήσεων καταγράφονται αρνητικές τιμές, το οποίο δεν έχει νόημα. Η παρατήρηση αυτή ωστόσο οδήγησε στην αναμόρφωση της Εξ. 3.15 έτσι ώστε να συνδέει όχι πια τη μύζηση με την ένδειξη του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου, αλλά τη μύζηση με την κανονικοποιημένη ένδειξη του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου  $R_n$ , η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της ένδειξης του καταγραφικού  $R$  προς τη μέγιστη για το κάθε τεμάχιο  $R_{max}$ .

$$R_n = R / R_{max} \tag{Εξ. 3.17}$$

Πράγματι, τροποποιώντας το Σχ. 3.13 έτσι ώστε οι τιμές της μύζησης από το τενσιόμετρο να συσχετίζονται με την κανονικοποιημένη ένδειξη από τις μετρήσεις του τεμαχίου γύψου που τοποθετήθηκαν στο ποτήρι ζέσεως με την αναζυμωμένη άργιλο Αμαρουσίου προκύπτει το Σχ. 3.16 όπου παρατίθεται και η καμπύλη βέλτιστης συσχέτισης της μύζησης με την κανονικοποιημένη ένδειξη του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου του συγκεκριμένου τύπου και εταιρείας κατασκευής και περιγράφεται από την Εξ. 3.18 όπου  $R_n$  είναι η κανονικοποιημένη ένδειξη του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου (συντελεστής συσχέτισης  $R^2=0.994$ ) όπως ορίστηκε στην Εξ. 3.17. Τροποποιώντας αντίστοιχα το Σχ. 3.14 προκύπτει το Σχ. 3.17 στο οποίο

παρουσιάζονται οι συσχετίσεις της μύζησης με τις κανονικοποιημένες ενδείξεις του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου μαζί με τις καμπύλες βέλτιστης προσέγγισης για κάθε ομάδα δεδομένων. Οι εξισώσεις που περιγράφουν αυτές τις καμπύλες βέλτιστης προσέγγισης είναι οι Εξ. 3.19α ( $R^2 = 0.998$ ) και 3.19β ( $R^2 = 0.997$ ) για τις μικρότερες και τις μεγαλύτερες θερμοκρασίες αντίστοιχα.

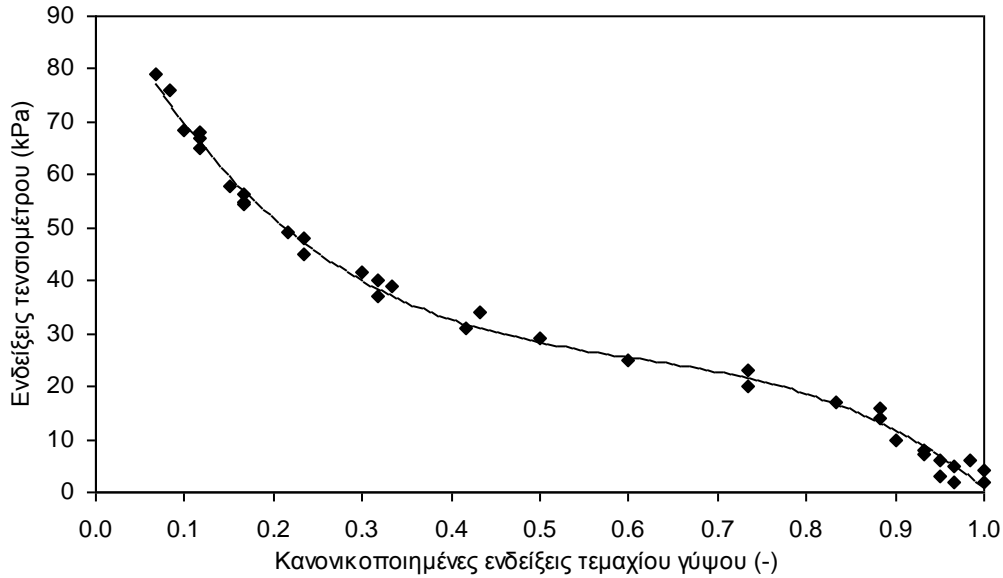
$$s = 94.7 - 292.1 \cdot R_n + 439.5 \cdot R_n^2 - 241.3 \cdot R_n^3 \quad \text{Εξ. 3.18}$$

$$s = 92.7 - 294.2 \cdot R_n + 456.4 \cdot R_n^2 - 255.9 \cdot R_n^3 \quad \text{Εξ. 3.19α}$$

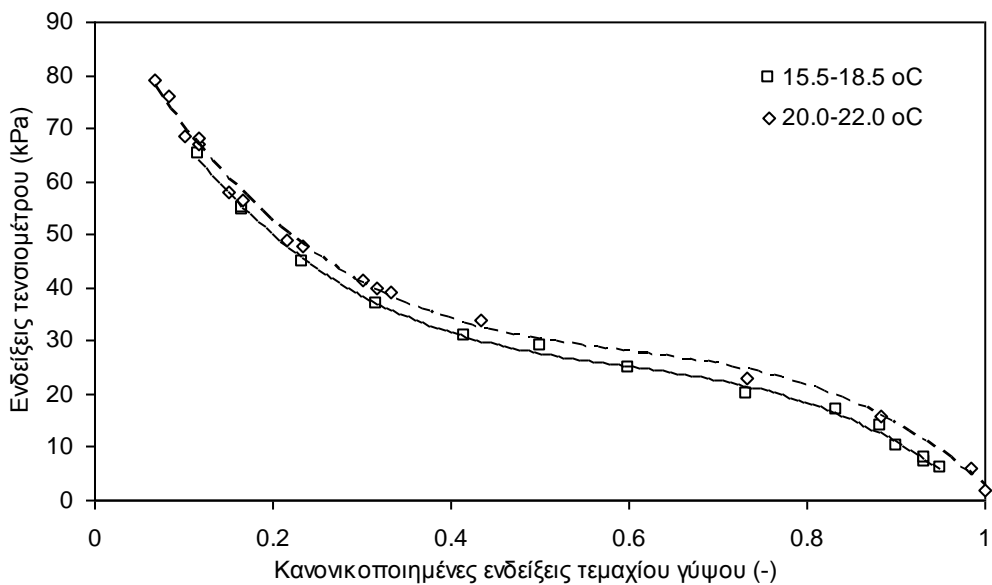
$$s = 95.8 - 299.4 \cdot R_n + 466.0 \cdot R_n^2 - 259.8 \cdot R_n^3 \quad \text{Εξ. 3.19β}$$

Μετά τη διατύπωση και των Εξ. 3.18, 3.19α και 3.19β επιχειρήθηκε να αναμορφωθούν εκ νέου οι εκτιμήσεις της μύζησης από τις πρωτότυπες μετρήσεις στις προηγούμενες δοκιμές. Στην περίπτωση της θραυστής χονδρόκοκκης άμμου εντός της μήτρας της δοκιμής Proctor επιχειρήθηκε η επανεκτίμηση των τιμών της μύζησης από τα τεμάχια γύψου η εξέλιξη της οποίας απεικονίζεται στο Σχ. 3.7β με χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης του κατασκευαστή και στο Σχ. 3.15 με χρήση της Εξ. 3.15. Αυτή τη φορά χρησιμοποιήθηκε η γενική συσχέτιση που δεν λαμβάνει υπόψη της την επιρροή της θερμοκρασίας αλλά χρησιμοποιεί τις κανονικοποιημένες ενδείξεις του καταγραφικού (Εξ. 3.18). Αντί για το Σχ. 3.7β και το Σχ. 3.15 λοιπόν προέκυψε το Σχ. 3.18 στο οποίο καταγράφεται ακόμα πιο σημαντική μείωση της απόστασης των εκτιμώμενων τιμών της μύζησης από τα τεμάχια γύψου σε σχέση με τις μετρήσεις της μύζησης στο τενσιόμετρο και από αυτή που καταγράφηκε στο Σχ. 3.15 αλλά οι εκτιμώμενες τιμές της μύζησης για το τεμάχιο γύψου Β στην αρχή των μετρήσεων δεν είναι πια αρνητικές και έχουν φυσικό νόημα.

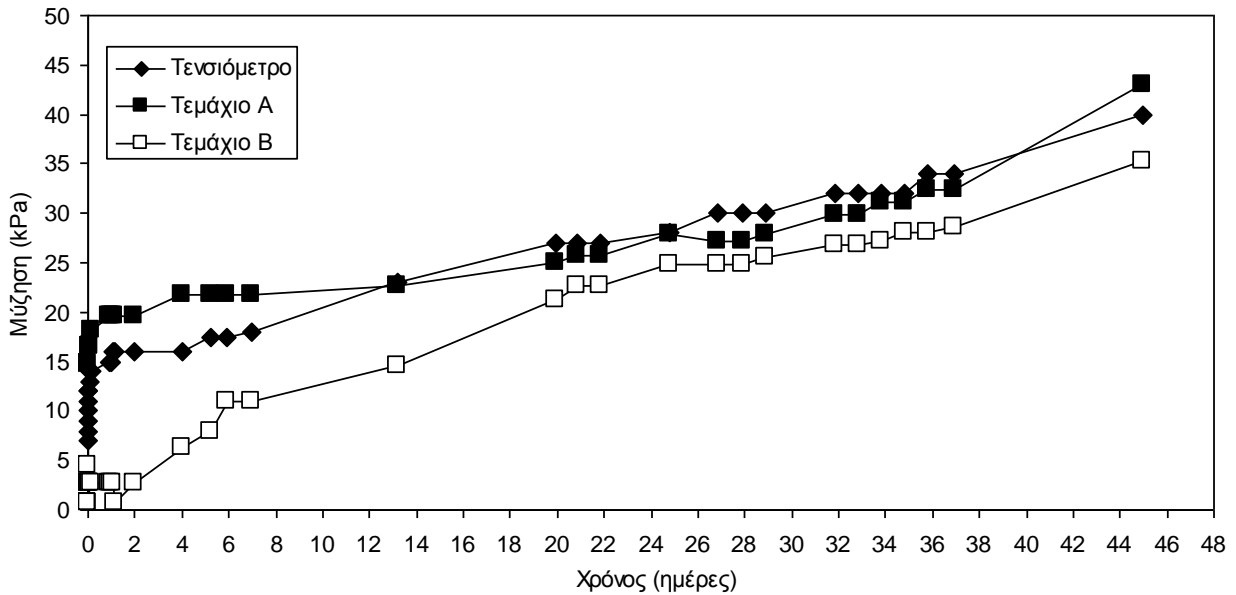
Προκειμένου να γίνει καλύτερα αντιληπτή η επιρροή όλων αυτών των τροποποιήσεων παρατίθενται τα Σχ. 3.19 και 3.20. Στο Σχ. 3.19 συνδυάζονται τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν στα Σχ. 3.7β, 3.15 και 3.18, δηλ. οι εκτιμήσεις της μύζησης με βάση την καμπύλη βαθμονόμησης του κατασκευαστή, με βάση την Εξ. 3.15 και με βάση την Εξ. 3.18, ενώ στο Σχ. 3.20 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις (εκπεφρασμένες σε ποσοστό επί τοις εκατό) των ίδιων τιμών από τις μετρήσεις του τενσιομέτρου. Και από το Σχ. 3.19 φαίνονται οι πάρα πολύ μεγάλες αποκλίσεις που προκύπτουν για χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης του κατασκευαστή αλλά και της Εξ. 3.15 (αν και μικρότερες από πριν), οι οποίες γίνονται οι ελάχιστες όταν χρησιμοποιείται η Εξ. 3.18.



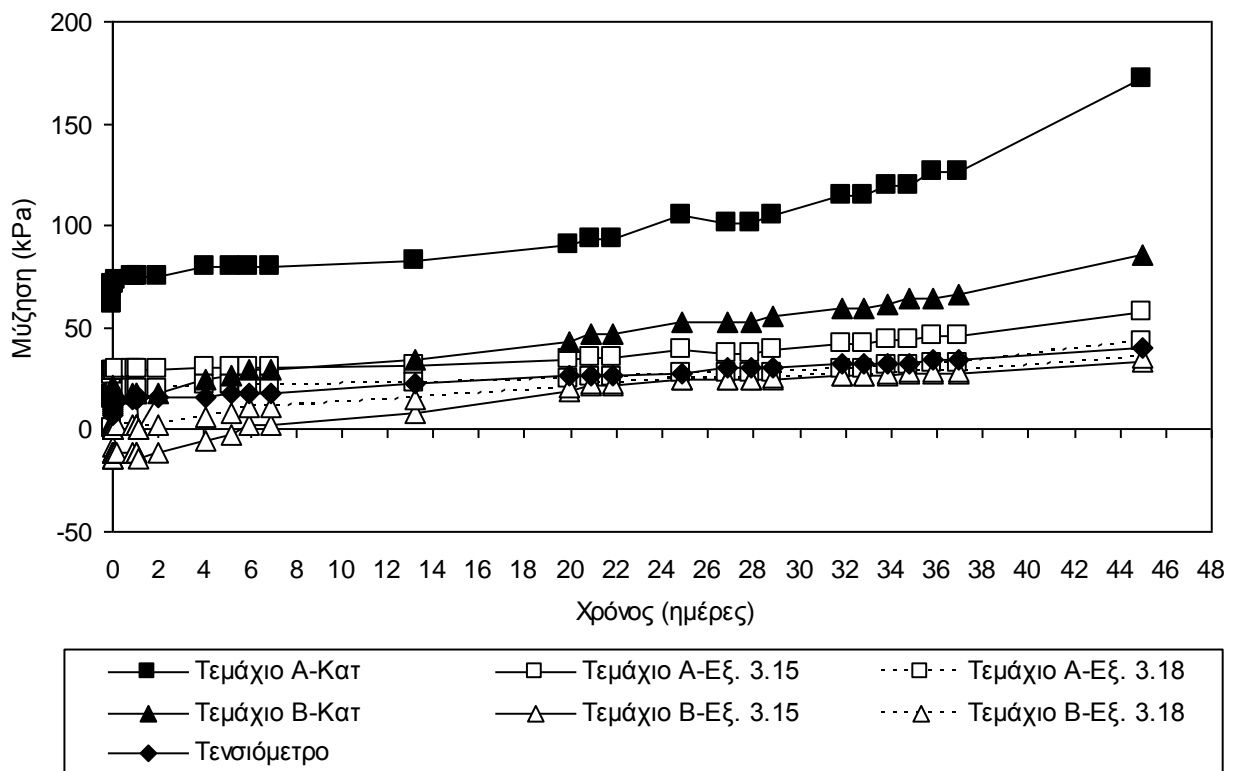
**Σχήμα 3.16.** Συσχέτιση της μύζησης που κατέγραφε το тенσιόμετρο με τις κανονικοποιημένες ενδείξεις του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου στη διάταξη παρακολούθησης της ξήρανσης της αναζυμωμένης αργίλου Αμαρουσίου μαζί με την γενική καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης για την εκτίμησης της μύζησης που περιγράφεται από την Εξ. 3.18.



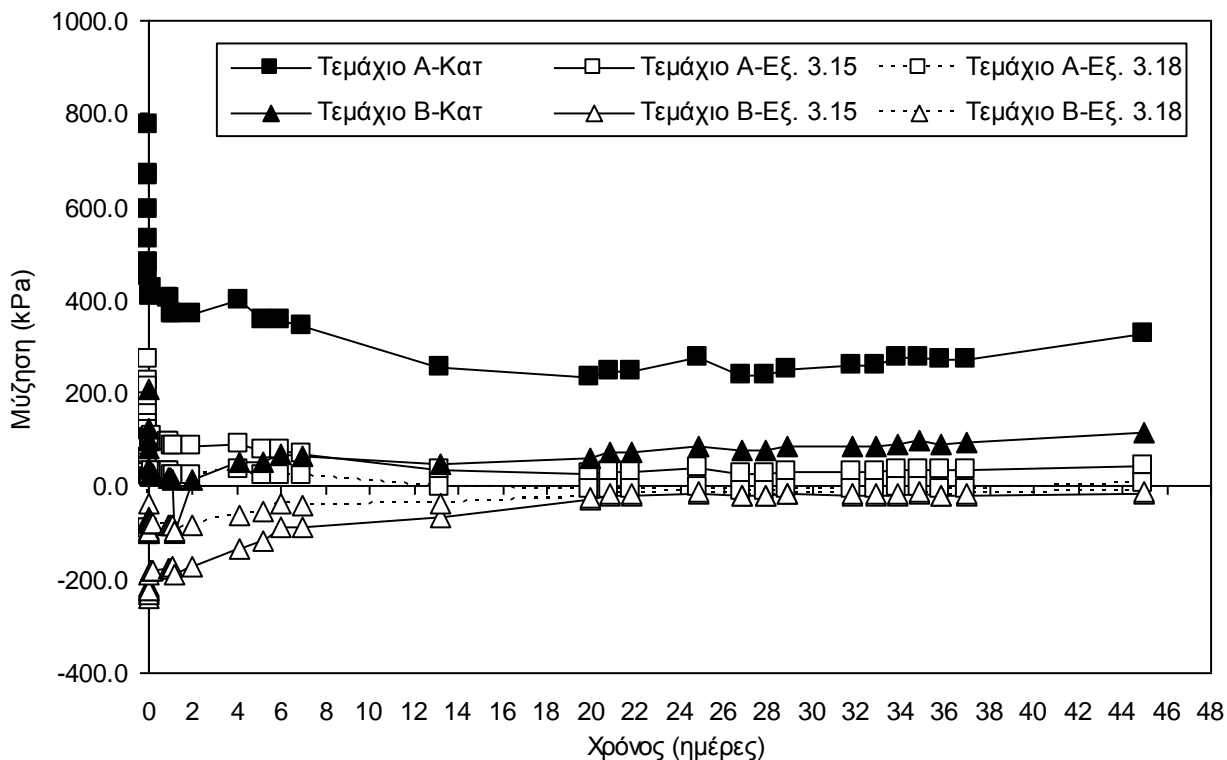
**Σχήμα 3.17.** Συσχέτιση της μύζησης που κατέγραφε το тенσιόμετρο με τις κανονικοποιημένες ενδείξεις του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου στη διάταξη παρακολούθησης της ξήρανσης της αναζυμωμένης αργίλου Αμαρουσίου για δύο διαφορετικά εύρη θερμοκρασίας μαζί με τις καμπύλες βέλτιστης προσέγγισης για την εκτίμησης της μύζησης για κάθε εύρος θερμοκρασίας που περιγράφονται από τις Εξ. 3.19α και 3.19β.



**Σχήμα 3.18.** Μετρήσεις μύζησης από δύο τεμάχια γύψου και ένα εργαστηριακό τενσιόμετρο σε συμπυκνωμένη χονδρόκοκκη άμμο για το σύνολο του χρόνου που γίνονταν μετρήσεις. Εκτίμηση της μύζησης από τις ενδείξεις του καταγραφικού των τεμαχίων γύψου με χρήση της Εξ. 3.18.



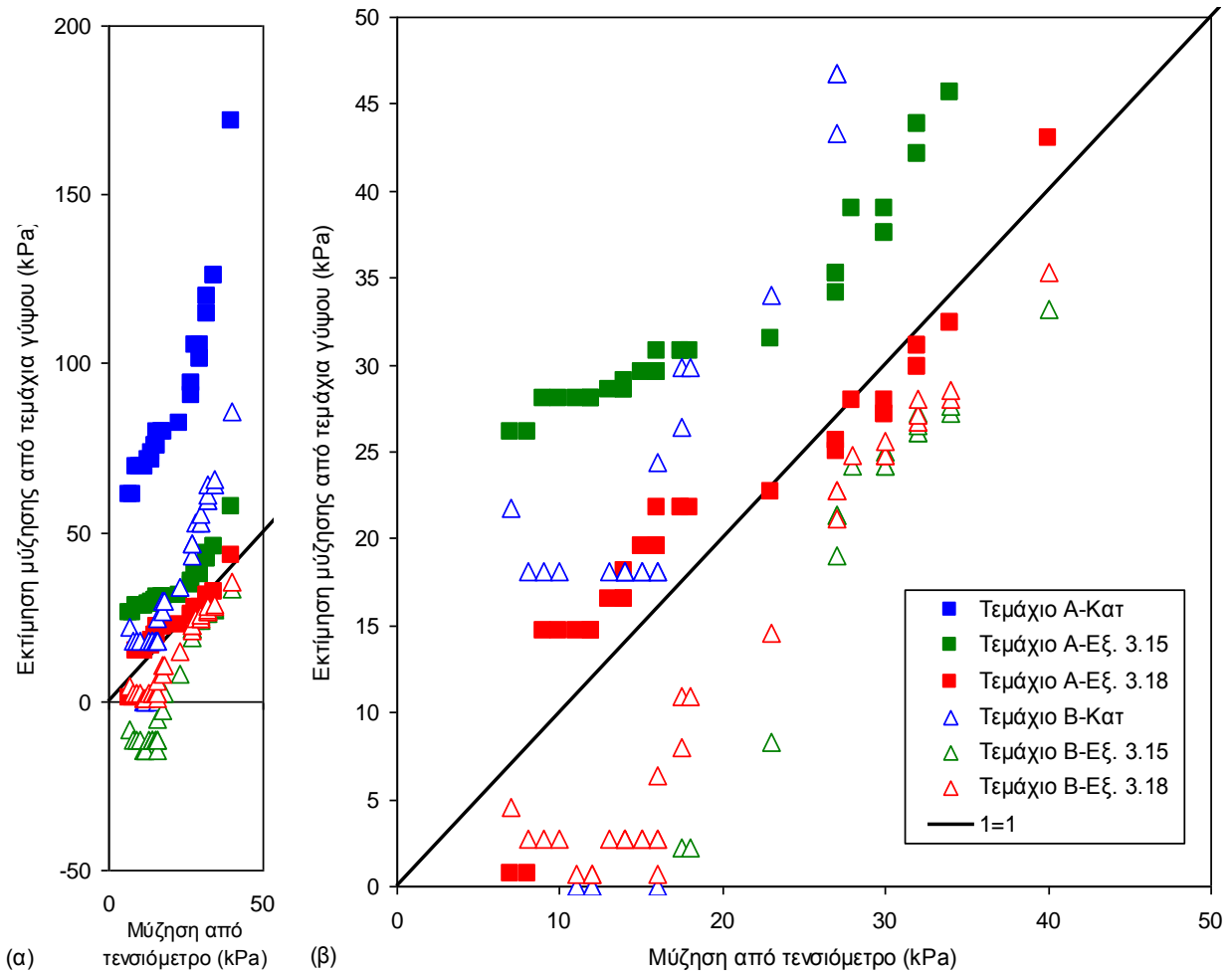
**Σχήμα 3.19.** Μετρήσεις μύζησης από δύο τεμάχια γύψου και ένα εργαστηριακό τενσιόμετρο σε συμπυκνωμένη χονδρόκοκκη άμμο για το σύνολο του χρόνου που γίνονταν μετρήσεις. Εκτίμηση της μύζησης από τις ενδείξεις του καταγραφικού των τεμαχίων γύψου με χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης του κατασκευαστή, της Εξ. 3.15 και της Εξ. 3.18.



**Σχήμα 3.20.** Ποσοστιαία απόκλιση των εκτιμήσεων της μύζησης από δύο τεμάχια γύψου ως προς την μύζηση από ένα εργαστηριακό тенσιόμετρο σε συμπυκνωμένη χονδρόκοκκη άμμο για το σύνολο του χρόνου που γίνονταν μετρήσεις. Εκτίμηση της μύζησης από τις ενδείξεις του καταγραφικού των τεμαχίων γύψου με χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης του κατασκευαστή, της Εξ. 3.15 και της Εξ. 3.18.

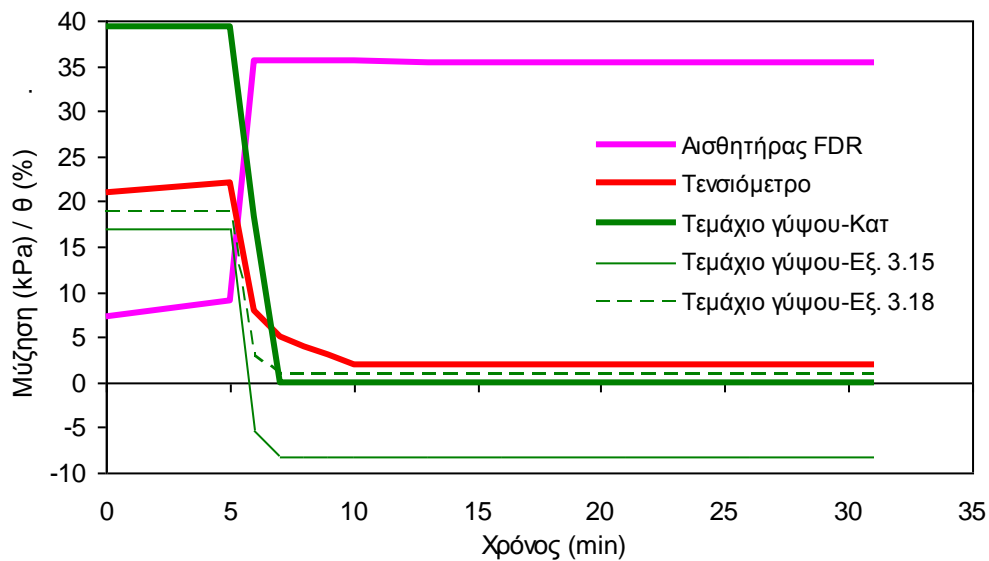
Για χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης του κατασκευαστή (και μετά από αρκετό χρόνο μετρήσεων ώστε τυχόν προβλήματα της αρχής των μετρήσεων στα τεμάχια γύψου να έχουν εξαλειφθεί) το ποσοστό του λάθους έφτασε το 100% για το ένα τεμάχιο και το 300% για το άλλο τεμάχιο γύψου, τα οποία όμως περιορίστηκαν αντίστοιχα περί το -10% και το -15% μετά και από χρήση της Εξ. 3.18. Τέλος, στο Σχ. 3.21 παρουσιάζεται η συσχέτιση των εκτιμήσεων της μύζησης από τα τεμάχια γύψου για όλες τις εξισώσεις με τις τιμές της μύζησης από το тенσιόμετρο.

Η ίδια επανεκτίμηση των τιμών της μύζησης που παρατέθηκε μέχρι εδώ για τα τεμάχια γύψου που τοποθετήθηκαν στη θραυστή χονδρόκοκκη άμμο έγινε και για τις ενδείξεις από το τεμάχιο γύψου που τοποθετήθηκε στο δοκίμιο της μεγάλης συσκευής διάτμησης (βλ. Σχ. 3.9β). Στο Σχ. 3.22 παρατίθενται οι ίδιες μετρήσεις με αυτές στο Σχ. 3.9β προσθέτοντας στην εκτίμηση της μύζησης από το τεμάχιο γύψου με βάση την καμπύλη βαθμονόμησης του κατασκευαστή και τις



**Σχήμα 3.21.** Σύγκριση των εκτιμήσεων της μύζησης από δύο τεμάχια γύψου με τη μύζηση από ένα τενσιόμετρο σε συμπυκνωμένη χονδρόκοκκη άμμο για το σύνολο του χρόνου που γίνονταν μετρήσεις. Εκτίμηση της μύζησης από τα τεμάχια γύψου με χρήση της καμπύλης βαθμονόμησης του κατασκευαστή, της Εξ. 3.15 και της Εξ. 3.18: α) για το σύνολο των τιμών της μύζησης που εκτιμήθηκαν, και β) για το εύρος τιμών της μύζησης 0 έως 50 kPa.

εκτιμήσεις με βάση την Εξ. 3.15 και την Εξ. 3.18. Και πάλι οι εκτιμήσεις με βάση την Εξ. 3.15 έχουν το πρόβλημα ότι οδηγούν σε εκτίμηση αρνητικών τιμών της μύζησης για μεγάλες τιμές των ενδείξεων (παρόλο που βελτιώνουν την εγγύτητα των εκτιμήσεων στο εύρος των θετικών τιμών), ενώ αντίθετα η χρήση της Εξ. 3.18 βελτιώνει και την εγγύτητα των εκτιμήσεων της μύζησης από τις ενδείξεις του καταγραφικού του τεμαχίου γύψου με τις μετρήσεις από το τενσιόμετρο αλλά διορθώνει και το πρόβλημα των αρνητικών τιμών της μύζησης για τις μεγάλες τιμές των ενδείξεων.



**Σχήμα 3.22.** Εξέλιξη των μετρήσεων στους αισθητήρες σε δοκίμιο μεγάλης συσκευής διάτμησης του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατά τον υδρεμποτισμό του δοκιμίου υπό κατακόρυφη τάση 50 kPa.

Εν όψει όλων αυτών των παραδειγμάτων πρέπει να αναθεωρηθούν οι τιμές του Πίν. 3.6, ως προς την ικανότητα μέτρησης μύζησης, καθώς αυτή πρέπει να περιοριστεί σε ένα εύρος 5-200 kPa, και ως προς το χρόνο απόκρισης των αισθητήρων ο οποίος αποδείχθηκε τελικά ότι είναι λεπτά της ώρας. Μια άλλη κρίσιμη παρατήρηση είναι η αναγκαιότητα χρήσης διαφορετικής καμπύλης βαθμονόμησης από αυτήν που προτείνει ο κατασκευαστής ως γενικής χρήσης καμπύλη. Στις προηγούμενες παραγράφους επιδείχθηκε μια πολύ απλή μεθοδολογία η οποία επέτρεψε τον προσδιορισμό μιας καμπύλης βαθμονόμησης για συγκεκριμένη παρτίδα τεμαχίων γύψου, η οποία με τη σειρά της επέτρεψε τη διόρθωση των τιμών της μύζησης που είχαν εκτιμηθεί με βάση την καμπύλη βαθμονόμησης του κατασκευαστή.

### 3.5.3 Μέθοδος αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας (Thermal conductivity sensors)

#### 3.5.3.1 Αρχή της μεθόδου

Η μέθοδος αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας (thermal conductivity sensors) είναι και αυτή μία μέθοδος έμμεσης μέτρησης της μύζησης των εδαφικών υλικών. Βασίζεται στην αρχή της



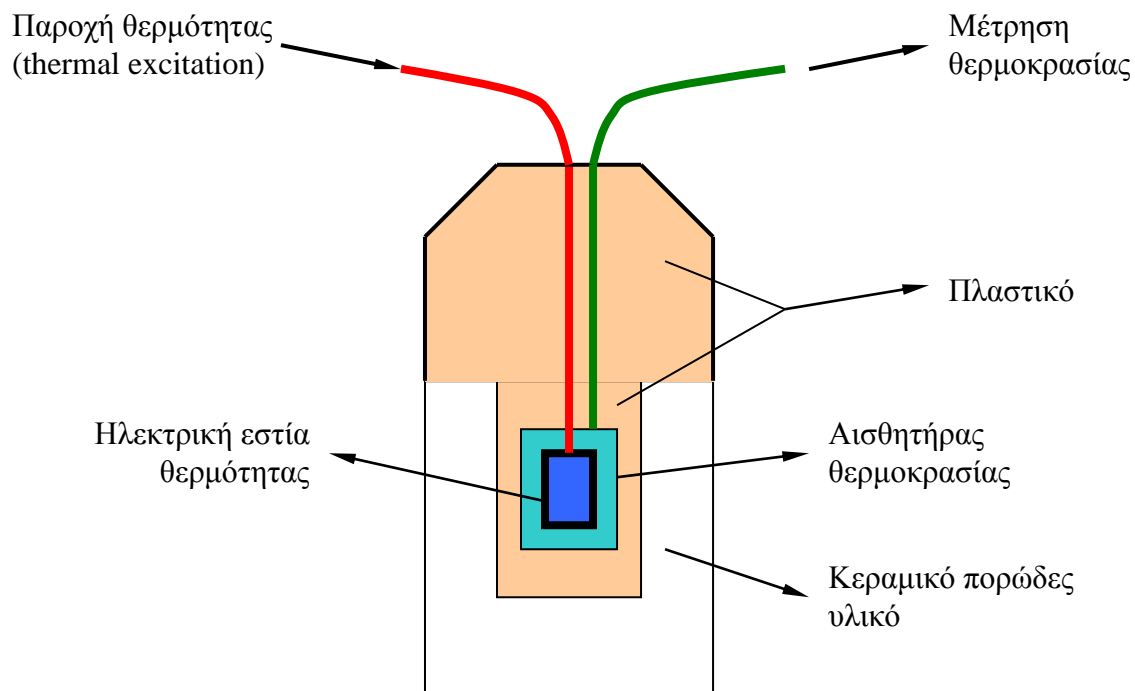
μεταβολής της θερμικής αγωγιμότητας ενός απορροφητικού υλικού με το βαθμό κορεσμού του. Αν ένα τεμάχιο απορροφητικού υλικού είναι αρχικά πλήρως κορεσμένο με νερό και η θερμική του αγωγιμότητα είναι σταθερή υπό αυτές τις συνθήκες, τότε όταν το τεμάχιο αυτό θα αρχίσει να χάνει υγρασία από το έδαφος με το οποίο βρίσκεται σε επαφή (λόγω της μύζησης του εδαφικού υλικού) θα υπάρξει μεταβολή της θερμικής του αγωγιμότητας ανάλογη της μύζησης του εδαφικού υλικού. Αντίστοιχα το τεμάχιο μπορεί να είναι ξηρό και να προσροφήσει νερό από το περιβάλλον έδαφος μέχρι την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας.

Ένας αισθητήρας θερμικής αγωγιμότητας αποτελείται από ένα κυλινδρικό τεμάχιο σκληρού πορώδους κεραμικού υλικού, μέσα στο οποίο βρίσκεται ένας αισθητήρας θερμοκρασίας και μία ηλεκτρική εστία θερμότητας (Σχ. 3.23)<sup>11</sup>. Το τεμάχιο τοποθετείται σε άμεση επαφή με το εδαφικό υλικό σε μία προδιατηρημένη οπή σε ένα εδαφικό δείγμα ή επιτόπου και το πορώδες υλικό του τεμαχίου αφήνεται να έρθει σε υδραυλική ισορροπία με τη μύζηση του περιβάλλοντος εδαφικού υλικού. Η ποσότητα του νερού στο τεμάχιο επηρεάζει το ρυθμό απώλειας θερμότητας εντός αυτού. Κατά συνέπεια όταν έχει επιτευχθεί ισορροπία στη μύζηση εδαφικού σκελετού του εδαφικού υλικού, παρέχεται ένα ελεγχόμενο ποσό θερμότητας στο κέντρο του τεμαχίου μέσω της εστίας θερμότητας (thermal excitation) και η θερμική ενέργεια που δεν διαφεύγει μέσω του πορώδους υλικού του αισθητήρα προκαλεί μία αύξηση στη θερμοκρασία του τεμαχίου, η οποία καταγράφεται μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα από τον περιεχόμενο αισθητήρα θερμοκρασίας. Τόσο περισσότερη θερμότητα χάνεται μέσω του τεμαχίου, όσο αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας του, δηλαδή όσο μικρότερη είναι η μύζηση του εδαφικού υλικού.

Η μέθοδος είναι παρόμοια με τη μέθοδο τεμαχίων πορώδους υλικού. Αντί ωστόσο για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης του πορώδους υλικού μετά την ηλεκτρική του διέγερση, εδώ μετρείται ο ρυθμός απώλειας θερμότητας του πορώδους υλικού μετά από την παροχή θερμότητας στο τεμάχιο (θερμική διέγερση). Το βασικό της πλεονέκτημα σε σχέση με τη μέθοδο τεμαχίων πορώδους υλικού έγκειται στο ότι η θερμική αγωγιμότητα του πορώδους υλικού των αισθητήρων δεν επηρεάζεται από την παρουσία διαλυμένων ουσιών στο νερό των πόρων του εδαφικού υλικού, όπως επηρεάζεται η ηλεκτρική αντίσταση. Οι αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις στο εργαστήριο ή επιτόπου με

---

<sup>11</sup> Ο αισθητήρας θερμοκρασίας μπορεί να είναι ένα στοιχείο διαφορετικών μετάλλων για την ανάπτυξη ηλεκτρικού δυναμικού από τη διαφορά της θερμοκρασίας στα άκρα της σύνδεσης κατά το φαινόμενο Seebeck (thermocouple), ή μία θερμικά ευαίσθητη ηλεκτρική αντίσταση (θερμοστοιχείο: thermistor). Συνήθως προτιμάται η δεύτερη λύση, καθώς η πρώτη παράγει πολύ μικρό ηλεκτρικό δυναμικό. Περισσότερα σχετικά με αυτούς τους αισθητήρες βλ. §3.6.



**Σχήμα 3.23.** Ενδεικτική διάταξη αισθητήρα θερμικής αγωγιμότητας με την ηλεκτρική εστία θερμότητας και τον αισθητήρα θερμοκρασίας εγκιβωτισμένα σε κεραμικό πορώδες υλικό.

διάταξη παρόμοια με εκείνη που απεικονίζεται στο Σχ. 3.6 για τα τεμάχια πορώδους υλικού, με τη διαφορά ότι η συσκευή παροχής ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο χρησιμοποιείται για τη δημιουργία θερμότητας στην εστία στο εσωτερικό του αισθητήρα.

Όπως και στη μέθοδο τεμαχίων πορώδους υλικού, για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου στην περίπτωση αρχικά πλήρως κορεσμένων τεμαχίων πρέπει η μύζηση του εδαφικού υλικού να είναι μεγαλύτερη της πίεσης διείδυσης αέρα του απορροφητικού υλικού ώστε να προκαλέσει τον αποκορεσμό του, χωρίς όμως να του προκαλέσει και ξήρανση πέραν του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας του. Αντίστοιχα, στην περίπτωση χρήσης αρχικά ξηρών τεμαχίων, η μύζηση του εδαφικού υλικού πρέπει να είναι τόση ώστε να αυξήσει το ποσοστό υγρασίας του απορροφητικού υλικού πάνω από την τιμή του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας του, αλλά όχι τόσο που το τεμάχιο να κορεστεί. Γι' αυτόν το λόγο πρέπει και στην περίπτωση των αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας να είναι βαθμιαίος ο αποκορεσμός του πορώδους υλικού του αισθητήρα (Σχ. 3.3) και μικρή η πίεση διείδυσης αέρα του πορώδους υλικού.

Και στη μέθοδο αυτή πρέπει να προσδιοριστεί καμπύλη βαθμονόμησης για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά (μέσω της οποίας προσδιορίζεται η μύζηση), η οποία πρέπει να είναι εκείνη που αντιστοιχεί στον τρόπο χρήσης του αισθητήρα (αρχικά πλήρως κορεσμένος ή ξηρός). Και εδώ *δεν απαιτείται η ανάκτηση του αισθητήρα από τη θέση μέτρησης*, οπότε η μέθοδος προσφέρεται για επιτόπου μετρήσεις της μύζησης και μάλιστα μακροχρόνιες.

Δεδομένου ότι η δομή του απορροφητικού υλικού των αισθητήρων επιτρέπει την κίνηση και των διαλυμένων ουσιών στο νερό των πόρων κατά την προσρόφηση ή την αποβολή ύδατος από τους πόρους του απορροφητικού υλικού μέχρι την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας, οι αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας μετρούν και αυτοί μύζηση εδαφικού σκελετού.

### 3.5.3.2 Εξέλιξη της μεθόδου

Οι Shaw & Baver (1939α και 1939β) παρουσίασαν τη χρήση μίας ηλεκτροθερμικής μεθόδου για την επιτόπου μέτρηση του ποσοστού υγρασίας, βασιζόμενη στη συσχέτιση μεταξύ της απώλειας θερμότητας και του ποσοστού υγρασίας ενός εδαφικού υλικού. Στη διάταξη που παρουσίασαν, η εστία θερμότητας και ο αισθητήρας θερμοκρασίας βρίσκονταν σε απευθείας επαφή με το ίδιο το εδαφικό υλικό και όχι εγκιβωτισμένοι σε τεμάχιο πορώδους υλικού. Η διάταξη αυτή, αν και επιτρέπει τον προσδιορισμό του ποσοστού υγρασίας και από αυτόν, τον προσδιορισμό της μύζησης του εδαφικού υλικού, *απαιτεί ξεχωριστή καμπύλη βαθμονόμησης για κάθε διαφορετικό εδαφικό υλικό, δηλαδή γνώση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού κάθε εδαφικού υλικού*.

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, ο Johnston (1942) τοποθέτησε την εστία θερμότητας και τον αισθητήρα θερμοκρασίας μέσα σε τεμάχιο γύψου με αποτέλεσμα οι μετρήσεις της θερμικής αγωγιμότητας να είναι συνάρτηση του ποσοστού υγρασίας του τεμαχίου γύψου, οπότε να απαιτείται μία μοναδική καμπύλη βαθμονόμησης για το τεμάχιο γύψου και όχι το εδαφικό υλικό.

Οι Phene, et al. (1971α) ήταν οι πρώτοι που δημοσίευσαν τη χρήση των αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας για τη μέτρηση της μύζησης των εδαφικών υλικών (στις προαναφερθείσες αναφορές είχαν χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του ποσοστού υγρασίας). Παρουσίασαν την αρχή λειτουργίας της μεθόδου και διερεύνησαν την απόδοση τέτοιων αισθητήρων ανάλογα με

τις διαστάσεις τους και το είδος του πορώδους υλικού. Κάθε σχέδιο αισθητήρα βαθμονομήθηκε σε θάλαμο μύζησης με κεραμικό πορόλιθο για τιμές της μύζησης από 0 έως 1000 kPa. Όλα τα πορώδη υλικά που χρησιμοποιήθηκαν αποκρίθηκαν γραμμικά από 0 έως 150 kPa εκτός από τη γύψο που είχε μη γραμμική απόκριση σε όλο το εύρος τιμών της μύζησης. Το κεραμικό πορώδες υλικό που χρησιμοποίησαν ωστόσο είχε γραμμική απόκριση στο εύρος 0 έως 600 kPa. Γενικά, για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες αυτής οι αισθητήρες δεν ήταν ιδιαίτερα ευαίσθητοι. Οι Phene, et al. (1971β) περιέγραψαν τη χρήση των αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας για τη μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού επιτόπου. Συγκρίσεις των μετρήσεων τους με άλλα όργανα μέτρησης, έδειξαν πιο καλή συμφωνία μεταξύ των οργάνων για αργιλικά εδάφη ( $\pm 50$  kPa) παρά για αμμώδη εδάφη ( $\pm 200$  kPa) αλλά οι κυκλικές μεταβολές στη μύζηση εδαφικού σκελετού που προκαλούνταν από τις ημερήσιες κλιματολογικές μεταβολές ήταν αντίστοιχες και στα δύο όργανα. Κατέληξαν λοιπόν σε ακρίβεια μέτρησης  $\pm 50$  kPa και χρόνο απόκρισης μικρότερο των 2 ωρών.

Η χρήση των αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας για μέτρηση της μύζησης στο εργαστήριο και επιτόπου έχει επιδειχθεί και από τους Picornell, et al. (1983), τους van der Raadt, et al. (1987) και τους Sattler & Fredlund (1989). Ειδικά οι Sattler & Fredlund (1989) και οι Fredlund & Wong (1989) συνέβαλαν στην περαιτέρω ανάπτυξη των αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας. Ένας θάλαμος μύζησης με κεραμικό πορόλιθο τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να ενσωματωθούν εντός αυτού διάφοροι αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας οι οποίοι ήταν αρχικά ξηροί. Αυτοί τοποθετήθηκαν εντός του εδαφικού δείγματος που είχε τοποθετηθεί μέσα στο θάλαμο μύζησης ως πολτός και ξηράνθηκε υπό την επίδραση της εφαρμοζόμενης στο θάλαμο μύζησης πίεσης αέρα. Η καμπύλη βαθμονόμησης που ελήφθη με αυτόν τον τρόπο ήταν διγραμμική στο εύρος τιμών μύζησης από 0 έως 300 kPa με το σημείο καμπής στα 175 kPa. Η ευαισθησία του οργάνου ήταν καλύτερη στο εύρος τιμών 0 έως 175 kPa. Επαναλαμβάνοντας τη βαθμονόμηση στον ίδιο αισθητήρα προέκυψε η ίδια κλίση και στους δύο κλάδους της καμπύλης και το ίδιο σημείο καμπής. Αντίθετα η κλίση των κλάδων δεν ήταν σταθερή για διαφορετικούς αισθητήρες παρόλο που το σημείο καμπής ήταν συστηματικά το ίδιο.

Δοκιμές σε διαφορετικά εδάφη πραγματοποιήθηκαν από τους Sattler & Fredlund (1989). Οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στα δείγματα ξηροί όπως στις συνθήκες της βαθμονόμησης και υγροί και μετρήθηκε ο χρόνος σταθεροποίησης της μετρούμενης τιμής της μύζησης εδαφικού σκελετού. Οι αρχικά ξηροί αισθητήρες έφτασαν σε σταθερή τιμή της μετρούμενης μύζησης ταχύτερα και κατέγραψαν υψηλότερη τιμή της μύζησης από τους αρχικά υγρούς αισθητήρες

(όπως άλλωστε αναμενόταν αφού στους ξηρούς αισθητήρες οποιουδήποτε είδους, νερό πρέπει να διαφύγει από το δείγμα ξηραίνοντάς το τόσο, όσο καθορίζεται από την ποσότητα υγρασίας που διαφεύγει και τη συνολική ποσότητα υγρασίας στο δείγμα). Ο χρόνος απόκρισης κυμάνθηκε από 24 ώρες έως 3 εβδομάδες. Οι αρχικά ξηροί αισθητήρες προσρόφησαν νερό και κατά συνέπεια υπερεκτιμούν την μύζηση. Οι υγροί αισθητήρες αντίθετα έχασαν νερό και υποεκτιμούν την μύζηση. Αυτό ήταν πολύ χαρακτηριστικό στα αποτελέσματα των Sattler & Fredlund (1989) και οδηγεί στην απαίτηση για κάποιου είδους παρεμβολή μεταξύ των αποτελεσμάτων από τους αρχικά ξηρούς και αρχικά υγρούς αισθητήρες.

Οι Fredlund, et al. (2000) παρουσίασαν έναν βελτιωμένο αισθητήρα θερμικής αγωγιμότητας με τεμάχιο από πορώδες κεραμικό υλικό υψηλού πορώδους (60%) και μεγάλο εύρος μεγέθους πόρων (0.05mm έως 0.0001mm) με ικανότητα μέτρησης της μύζησης στο εύρος 5 έως 1500 kPa. Η προσδιορισθείσα καμπύλη βαθμονόμησης (με χρήση της μεθόδου μετατόπισης άξονα σε θάλαμο μύζησης με κεραμικό πορόλιθο) είναι μή γραμμική γενικά στο εύρος αυτό αλλά με γραμμικό το τμήμα της στο εύρος τιμών της μύζησης μεταξύ 5 και 500 kPa. Μεταξύ των βελτιώσεων του αισθητήρα αυτού ήταν και η αυξημένη αντοχή του κεραμικού πορώδους υλικού, η αντοχή του οποίου σε θλίψη είναι 2100 kPa και η εφελκυστική αντοχή του 600 kPa (Shuai & Fredlund, 2000), και οι οποίες εξασφαλίζουν μεγαλύτερη αντοχή και ανθεκτικότητα του αισθητήρα κατά την τοποθέτησή του στο έδαφος για επιτόπου μετρήσεις της μύζησης (ειδικά μάλιστα σε μεγάλα βάθη, άρα σε μεγάλες τάσεις). Οι Fredlund, et al. (2000) επέδειξαν την επιρροή της θερμοκρασίας του εδάφους στις μετρήσεις του αισθητήρα (η οποία οφείλεται στη μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του νερού με τη μεταβολή της θερμοκρασίας) και πρότειναν τον τρόπο για τη διόρθωση των μετρήσεων. Μελέτησαν την επιρροή του παγετού στις μετρήσεις αυτού του είδους των αισθητήρων και παρατήρησαν ότι παρόλο που όταν πάγωνε το νερό των πόρων των εδαφικών υλικών δεν μπορούσε να πραγματοποιηθεί μέτρηση, δεν επηρεαζόταν η απόκριση των αισθητήρων μετά από κύκλους ψύξης-επαναθέρμανσης. Μέτρησαν επίσης την υστέρηση στην καμπύλη βαθμονόμησης του συγκεκριμένου αισθητήρα και την αξιολογήσαν για την επιτυχή διόρθωση των μετρήσεων, ενώ οι Shuai, et al. (2002) παρατήρησαν για τον ίδιο τύπο αισθητήρα ότι ακόμα και μετά από δύο χρόνια λειτουργίας οι καμπύλες βαθμονόμησης για κύκλους ξήρανσης-ύγρυνσης των αισθητήρων μπορούν να αναπαραχθούν συστηματικά επιτρέποντας έτσι τη διόρθωση των μετρήσεων λόγω υστέρησης των καμπυλών βαθμονόμησης, εφόσον μετρηθεί από την αρχή η υστέρηση των καμπυλών βαθμονόμησης για κύκλους ξήρανσης-ύγρυνσης. Οι Shuai, et al. (2002) επέδειξαν επίσης για τον ίδιο τύπο αισθητήρα ότι οι μετρήσεις του δεν επηρεάζονται από την οξύτητα του νερού των

πόρων (και άρα την παρουσία διαλυμένων ουσιών σε αυτό) εμβαπτίζοντας αισθητήρες του τύπου σε απεσταγμένο νερό, όξινο διάλυμα με pH 4.25 και βασικό διάλυμα με pH 10.9 πριν από τις μετρήσεις, οι οποίες προέκυψαν οι ίδιες και στις τρεις περιπτώσεις. Σε ό,τι αφορά τον χρόνο επίτευξης μέτρησης με τον συγκεκριμένο αισθητήρα, οι Shuai & Fredlund (2000) πραγματοποίησαν δοκιμές με τον αισθητήρα αρχικά πλήρως κορεσμένο και αρχικά ξηρό και παρατήρησαν χρόνους της τάξης των 10 ημερών για να βρεθεί η τιμή της μετρούμενης μύζησης μέσα σε ένα εύρος  $\pm 10\%$  από την πραγματική, 20 ημερών για να βρεθεί μέσα σε ένα εύρος  $\pm 2\%$  και 25 ημερών για να μετρήσει ακριβώς την πραγματική τιμή. Ο αρχικά ξηρός αισθητήρας είχε ελαφρά ταχύτερη απόκριση (5 ημέρες για να βρεθεί η μέτρηση σε ένα εύρος  $\pm 10\%$  από την πραγματική τιμή) αλλά τελικά και οι δύο αισθητήρες μέτρησαν την ίδια τιμή (λαμβάνομένης υπόψη της υστέρησης της καμπύλης βαθμονόμησής τους). Προφανώς ο αρχικά ξηρός αισθητήρας υπερεκτιμούσε αρχικά την μύζηση και ο αρχικά πλήρως κορεσμένος την υποεκτιμούσε. Το μόνο μειονέκτημα της εργασίας των Fredlund, et al. (2000) είναι ότι για την σύγκριση των μετρήσεων του νέου αισθητήρα θερμικής αγωγιμότητας με κάποιο άλλο όργανο μέτρησης της μύζησης, χρησιμοποιήθηκε ένα τενσιόμετρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα περιορίζοντας έτσι το εύρος τιμών της μύζησης που επιβεβαιώθηκε συμφωνία των μετρήσεων των δύο οργάνων στο εύρος 15 έως 75 kPa (για τα τενσιόμετρα χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα, ιδέ §3.7).

Οι Rahardjo & Leong (2006) παρουσίασαν παρόμοια αποτελέσματα για έναν άλλο τύπο αισθητήρα θερμικής αγωγιμότητας σε ό,τι αφορά την επιρροή της υστέρησης της καμπύλης βαθμονόμησης του αισθητήρα. Προσδιόρισαν τον μέγιστο χρόνο παροχής θερμότητας μέσω της θερμικής εστίας στα 30 s, καθώς για χρόνους μεγαλύτερους από αυτούς μειώνεται η ακρίβεια μέτρησης του οργάνου, επειδή η παρεχόμενη θερμότητα επηρεάζει πλέον και το έδαφος που περιβάλλει τον αισθητήρα αλλοιώνοντας τις μετρήσεις (αφού παίζει πια ρόλο και το ποσοστό υγρασίας του εδάφους και όχι μόνο το ποσοστό υγρασίας του πορώδους υλικού του αισθητήρα, ένα συμπέρασμα αντίστοιχο εκείνου των Cummings & Chandler, 1940, για τα τεμάχια πορώδους υλικού με μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης –βλέπε §3.5.2.2). Σε ό,τι αφορά τον χρόνο επίτευξης μέτρησης, αυτός βρέθηκε να ποικίλλει από μερικές ώρες έως και σχεδόν οκτώ ημέρες, χωρίς να καταγράφεται κάποια συσχέτιση ανάμεσα σε αυτόν και το επίπεδο μύζησης. Αντίθετα σπουδαιότερος παράγοντας που συνδράμει στη μείωση του χρόνου επίτευξης μέτρησης κατά τους Rahardjo & Leong (2006) είναι η καλή επαφή του αισθητήρα με το περιβάλλον έδαφος. Οι ίδιοι συγγραφείς θίγουν και ένα άλλο ενδιαφέρον ζήτημα, αφού από τους 32 αισθητήρες του συγκεκριμένου τύπου που χρησιμοποίησαν, οι 10 βρέθηκαν να έχουν

κάποιου είδους πρόβλημα που δεν επέτρεψε την αξιοποίησή τους (πρόβλημα του αισθητήρα θερμοκρασίας ή της θερμικής εστίας ή καταστροφή του κεραμικού κατά την τοποθέτηση). Σε ό,τι αφορά το εύρος των τιμών της μύζησης που μετρήθηκαν, καταγράφηκαν μέγιστες τιμές από 500 kPa μέχρι και 32000 kPa, αλλά όπως αναφέρουν το μέγιστο του εύρους τιμών μύζησης που μπορούν να καταγραφούν από τον συγκεκριμένο αισθητήρα εντοπίζεται γενικά σε μία τιμή περί τα 600 kPa.

### 3.5.3.3 Σχολιασμός της μεθόδου

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας (ειδικά σε σχέση με τη μέθοδο τεμαχίων πορώδους υλικού) είναι ότι δεν επηρεάζεται από την παρουσία διαλυμένων ουσιών στο νερό των πόρων των εδαφικών υλικών. Κατά τα άλλα επιτυγχάνει μετρήσεις της μύζησης σε πολύ μεγάλο εύρος τιμών (5 έως 1500 kPa) σε χρόνο αντίστοιχο των τεμαχίων πορώδους υλικού, και στο εργαστήριο και επιτόπου, ενώ η τοποθέτηση, λειτουργία και ενσωμάτωση σε ένα αυτόματο σύστημα καταγραφής είναι πολύ απλές διαδικασίες (όπως άλλωστε ισχύει και για τα τεμάχια πορώδους υλικού). Τα μειονεκτήματά της είναι η απαίτηση για βαθμονόμηση κάθε αισθητήρα ξεχωριστά (όπως και στα τεμάχια πορώδους υλικού), η φθορά των αισθητήρων όταν παραμένουν τοποθετημένοι στο έδαφος για μεγάλο χρονικό διάστημα και τα προβλήματα που προκύπτουν λόγω υστέρησης των καμπυλών βαθμονόμησης και επιρροής της θερμοκρασίας. Οι αποκλίσεις και λόγω υστέρησης και λόγω επιρροής της θερμοκρασίας μπορούν να διορθωθούν εύκολα, υπό την προϋπόθεση ότι μπορεί να γίνει επιμελής βαθμονόμηση με έλεγχο της μύζησης σε κύκλους ξήρανσης-ύγρανσης υπό ελεγχόμενη θερμοκρασία. Στον Πίν. 3.7 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας.

**Πίνακας 3.7.** Συνοψιση χαρακτηριστικών της μεθόδου αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας.

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Είδος μετρούμενης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Αισθητήρων θερμοκής αγωγιμότητας	NAI	NAI	5 – 1500 kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	5-25 ημέρες (υπάρχουν ενδείξεις για επίτευξη μέσα σε ώρες για καλή επαφή αισθητήρα-εδάφους)

### 3.5.4 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος μέτρησης

Πιο πρόσφατα σε σχέση με τη μέθοδο τεμαχίων πορώδους υλικού και τη μέθοδο αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας έχει αναπτυχθεί μία μέθοδος που χρησιμοποιεί τεμάχια πορώδους υλικού, εντός των οποίων εγκιβωτίζονται αισθητήρες ηλεκτρομαγνητικής μέτρησης του ποσοστού υγρασίας του πορώδους υλικού.

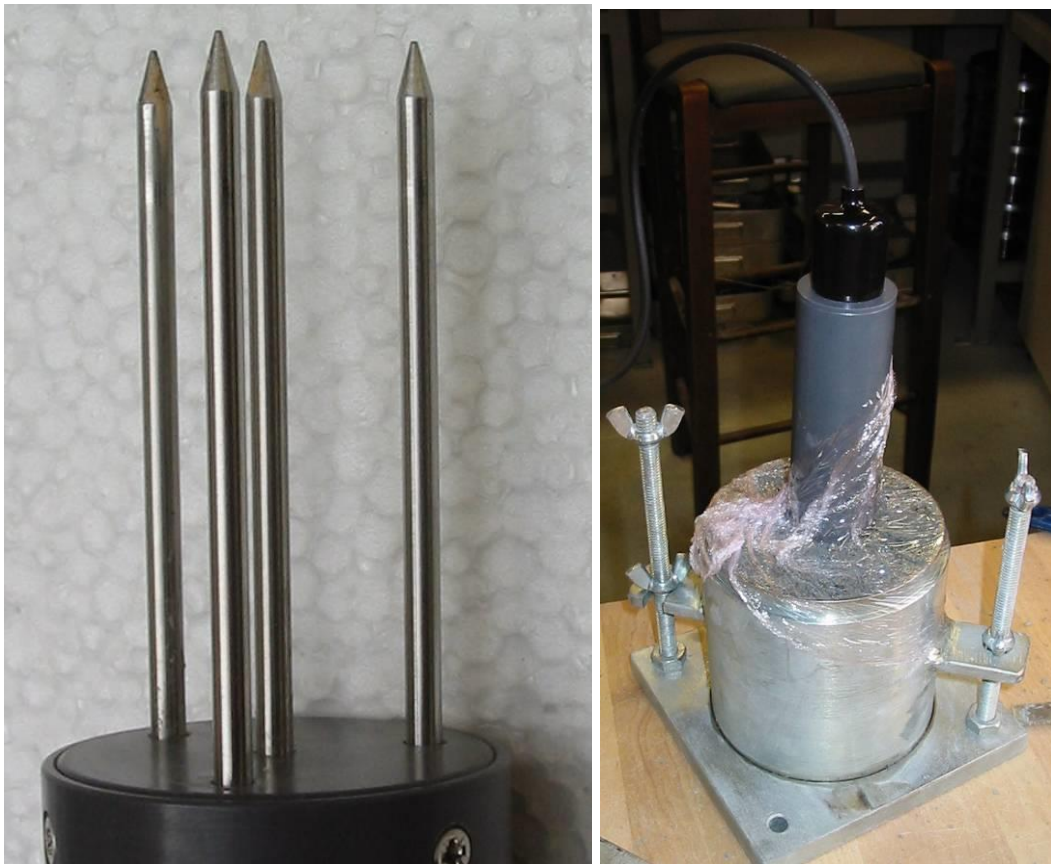
Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι αποτελούν καθιερωμένες μεθόδους μέτρησης του ποσοστού υγρασίας των εδαφικών υλικών επιτόπου, διαδεδομένες ιδιαίτερα στο χώρο της γεωπονικής επιστήμης αλλά και σε γεωργικές εφαρμογές για τον προγραμματισμό της άρδευσης καλλιεργειών. Πιο πρόσφατα έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα και για μετρήσεις της επιτόπου μέτρησης της πυκνότητας των υλικών (Μπαρδάνης, 2013). Βασίζονται στη μέτρηση της ηλεκτρικής σταθεράς (dielectric constant) του εδάφους, η οποία αποτελεί συνάρτηση του ποσοστού υγρασίας του. Αν είναι γνωστή λοιπόν η ηλεκτρική σταθερά του εδάφους, τότε από την καμπύλη βαθμονόμησης του εδάφους (καμπύλη ηλεκτρικής σταθεράς-ποσοστού υγρασίας) προσδιορίζεται το ποσοστό υγρασίας του εδάφους. Για να μετρηθεί η ηλεκτρική σταθερά του εδάφους πρέπει να είναι γνωστός ή ο χρόνος μέσα στον οποίο διαδίδεται ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα μέσα στο εδαφικό υλικό (time domain reflectometry: TDR), ή η συχνότητα του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται μέσα στο εδαφικό υλικό (frequency domain reflectometry: FDR). Η δεύτερη μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί και για τη μέτρηση της μύζησης. Τα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται για να μεταδώσουν έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό (electromagnetic excitation) απευθείας μέσα στο έδαφος έχουν εγκιβωτιστεί μέσα σε ένα πορώδες υλικό γνωστής συσχέτισης ηλεκτρικής σταθεράς-ποσοστού υγρασίας και γνωστής συσχέτισης ποσοστού υγρασίας-μύζησης. Στην Φωτ. 3.10 παρουσιάζεται η πλήρης συλλογή των εξαρτημάτων μίας συσκευής τέτοιου είδους (Φωτ. 3.10α), η διάταξη των ακίδων με μία ακίδα στο κέντρο και τρεις άλλες περιμετρικά πάνω σε κύκλο κάθε  $120^\circ$  με την κεντρική ακίδα να βρίσκεται στο κέντρο του κύκλου (Φωτ. 3.10β και 3.10γ) και η συσκευή σε χρήση με τις ακίδες εντός δοκιμίου συμπυκνωμένου αποσαθρωμένου σερπεντινίτη Σκύρου μέσα στη μήτρα συμπύκνωσης (Φωτ. 3.10δ). Η συγκεκριμένη διάταξη των ακίδων με ταυτόχρονη μέτρηση της συχνότητας του ηλεκτρικού πεδίου σε τρεις θέσεις (στο έδαφος που τέμνεται από κάθε επίπεδο που σχηματίζεται ανάμεσα στην κεντρική ακίδα και κάθε μία από τις περιφερειακές) εξασφαλίζει την υψηλότερη δυνατή ακρίβεια μέτρησης και το συγκεκριμένο όργανο, τουλάχιστον στην έκδοση για μέτρηση του ογκομετρικού ποσοστού εργασίας, αποτελεί το κορυφαίο όργανο του είδους του.





(α)

(β)



(γ)

(δ)

**Φωτογραφία 3.10.** Αισθητήρας FDR για την μέτρηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (γνωστός και ως Theta Probe) του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Delta-T. α) Πλήρης συλλογή εξαρτημάτων της συσκευής: αισθητήρας, μετρητής/καταγραφικό, χαλύβδινος τύπος διόρθωσης της θέσης των ακίδων μέτρησης σε περίπτωση κάμψης, β) & γ) λεπτομερέστερες φωτογραφίες που διακρίνεται η διάταξη των ακίδων, και δ) η συσκευή σε χρήση με τις ακίδες εντός συμπακνωμένου δοκιμίου αποσαθρωμένου σερπεντινίτη Σκύρου μέσα στην μήτρα συμύκνωσης.

Το όργανο αυτό, στην έκδοσή του για μέτρηση της μύζησης, διατίθεται σήμερα εμπορικά με αναφερόμενη ικανότητα μέτρησης της μύζησης από 0 έως 1000 kPa με ακρίβεια  $\pm 10$  kPa από 0 έως 100 kPa και  $\pm 10\%$  της καταγραφόμενης μέτρησης από 100 έως 1000 kPa, με χρόνο απόκρισης της τάξης των λεπτών έως ωρών. Και αυτό το όργανο επηρεάζεται από την αλατότητα του εδάφους και την υστέρηση της καμπύλης βαθμονόμησής του, ενώ έχει ανθεκτικότητα στον χρόνο της τάξης των δύο ετών (όχι τόσο λόγω μηχανικής ακεραιότητας, όσο λόγω μεταβολής της καμπύλης βαθμονόμησης του οργάνου). Τα όργανα αυτά είναι γνωστά στην αγγλική βιβλιογραφία με τον όρο *equitensimeter*. Αντίστοιχο όργανο είναι το τεμάχιο πορώδους υλικού που δείχνεται στη Φωτ. 3.

Η συγκεκριμένη μέθοδος μέτρησης της μύζησης είναι αρκετά πρόσφατη για να μπορεί να γίνει εκτεταμένη αναφορά στην εξέλιξή της ή την εφαρμογή της. Ενδεικτικά γίνεται παραπομπή στους Mahler, et al. (2002) και στους Mahler & Mendes (2003), οι οποίοι επέδειξαν συμφωνία μετρήσεων της μύζησης με το όργανο αυτό και με τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου.

Δεδομένου ότι το πορώδες υλικό του οργάνου επιτρέπει τη διέλευση των διαλυμένων ουσιών του νερού των πόρων του εδαφικού υλικού μέχρι την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας, και με αυτή τη μέθοδο μετρείται η μύζηση εδαφικού σκελετού.

Στον Πίν. 3.8 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου μέτρησης της μύζησης.

**Πίνακας 3.8.** Συνοψιση χαρακτηριστικών της ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου μέτρησης της μύζησης.

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Είδος μετρούμενης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Ηλεκτρομαγνητική	NAI (;	NAI	0 – 1000 kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Λεπτά έως ημέρες

### 3.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ

#### 3.6.1 Εισαγωγή

Στο Κεφ. 2 παρουσιάστηκε η εξίσωση του Kelvin (Εξ. 2.11) για έναν τριχοειδή σωλήνα και επιδείχθηκε η συσχέτιση της σχετικής υγρασίας στον αέρα του σωλήνα με τη μύζηση που αναπτύσσεται στο νερό του σωλήνα (Εξ. 2.13). Υπενθυμίζεται ότι σχετική υγρασία, RH, είναι ο λόγος της μερικής πίεσης των υδρατμών στην ατμόσφαιρα προς την πίεση των υδρατμών όταν αυτή είναι κορεσμένη με αυτούς στην ίδια θερμοκρασία. Δεδομένου ότι η ισορροπία μεταξύ των υδρατμών στον περιβάλλοντα ένα δείγμα μή κορεσμένου εδάφους χώρο και το νερό των πόρων του εδάφους αφορά και στη μηχανική και στη χημική συνιστώσα της αντίστασης στην απώλεια νερού από το έδαφος, η μύζηση που συσχετίζεται με τη σχετική υγρασία είναι η ολική μύζηση. Στην Εξ. 3.20 λοιπόν διατυπώνεται η εξίσωση του Kelvin για την ολική μύζηση:

$$s_{ολ} = - \frac{RT}{v_{w0}\omega_v} \ln(RH) \quad (3.20)$$

όπου  $s_{ολ}$  είναι η ολική μύζηση, R είναι η παγκόσμια σταθερά των ιδανικών αερίων (8.314 J / mol · °K), T η απόλυτη θερμοκρασία (°K),  $v_{w0}$  είναι ο ειδικός όγκος του νερού ( $m^3 / kg$ ) και  $\omega_v$  είναι η μοριακή μάζα των υδρατμών (18.016 kg / kmol)<sup>12</sup> –Lu & Likos, 2004.

Ένα όργανο λοιπόν το οποίο θα μπορούσε να προσδιορίζει τη σχετική υγρασία του αέρα μέσα σε ένα δοχείο, όταν ο αέρας έχει περιέλθει σε ισορροπία με το νερό των πόρων μή κορεσμένου εδάφους που βρίσκεται στο ίδιο δοχείο σε ό,τι αφορά την ανταλλαγή υδρατμών, θα επέτρεπε τον προσδιορισμό της ολικής μύζησης του εδαφικού αυτού υλικού μέσω της Εξ. 3.20. Η μέθοδος ομοιάζει προς τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου μή ευρισκόμενου σε επαφή με το δείγμα του εδαφικού υλικού, με δύο όμως σημαντικά πλεονεκτήματα: α) δεν απαιτεί την ανάκτηση του οργάνου, όπως απαιτείται με το χαρτί φίλτρου, άρα προσφέρεται για μακροχρόνια παρακολούθηση της μύζησης, και β) όπως παρουσιάζεται στις παραγράφους που ακολουθούν, απαιτεί πολύ μικρότερο χρόνο για την επίτευξη μέτρησης από τον χρόνο που απαιτείται για να πραγματοποιηθούν μετρήσεις της μύζησης με τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου. Προϋπόθεση για την

<sup>12</sup> Το γινόμενο της μοριακής μάζας των υδρατμών με τον ειδικό όγκο του νερού δίνει τον μερικό μοριακό όγκο των υδρατμών,  $v_w$  ( $m^3 / mol$ ), που χρησιμοποιήθηκε στις Εξ. 2.11 και 2.13.

ορθή εφαρμογή της μεθόδου είναι ο αέρας που περιβάλλει το δείγμα του μή κορεσμένου εδάφους να βρίσκεται σε μικρή ποσότητα, ώστε η ανταλλαγή υδρατμών μεταξύ αέρα και νερού των πόρων μέχρι την επίτευξη της ισορροπίας να αφορά μικρές ποσότητες νερού για να μην αλλοιώνεται η τιμή της μύζησης του εδάφους. Επίσης για να γίνουν αξιόπιστες μετρήσεις με αυτά τα όργανα απαιτείται πολύ καλός έλεγχος της θερμοκρασίας, αφενός γιατί η μέτρηση της σχετικής υγρασίας (σε κάποιες παραλλαγές της μεθόδου) βασίζεται σε μετρήσεις θερμοκρασιών και αφετέρου γιατί μεταβολές στη θερμοκρασία μπορεί να αλλοιώσουν την ισορροπία μεταξύ υγρασίας του εδαφικού δείγματος και του περιβάλλοντος αέρα.

Τα όργανα που μετρούν τη σχετική υγρασία ονομάζονται *ψυχρόμετρα* και βασίζονται στις αρχές μέτρησης που περιγράφονται στις ακόλουθες παραγράφους. Τα κύρια είδη τους είναι: α) τα ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης (thermistor psychrometers), βλ. §3.6.2, β) τα ψυχρόμετρα φαινομένου Peltier (thermocouple psychrometers), βλ. §3.6.3, γ) τα υγρόμετρα σημείου δρόσου (dew-point hygrometers), βλ. §3.6.4, δ) τα υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου (chilled-mirror hygrometers), βλ. §3.6.5, ε) οι αισθητήρες αντίστασης/χωρητικότητας πολυμερών (polymer resistance/capacitance sensors), βλ. §3.6.6, και στ) οι αισθητήρες οργανικών μέσων, βλ. §3.6.7.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα διάφορα είδη των ψυχομέτρων, οι αρχές μέτρησης στις οποίες βασίζονται και τα χαρακτηριστικά τους ως όργανα έμμεσου προσδιορισμού της μύζησης, με τη σύγκριση μεταξύ τους να γίνεται στην §3.6.8.

### **3.6.2 Ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης (thermistor psychrometers)**

Τα ψυχρόμετρα μετρούν τη σχετική υγρασία μέσω της διαφοράς θερμοκρασίας που καταγράφεται ανάμεσα σε μία επιφάνεια από την οποία υπάρχει εξάτμιση νερού (γνωστή στην αγγλική βιβλιογραφία ως “wet bulb”), προκαλώντας πτώση της θερμοκρασίας, και μία επιφάνεια που δεν υπάρχει νερό για να εξατμιστεί (γνωστή στην αγγλική βιβλιογραφία ως “dry bulb”). Η καταγραφόμενη πτώση της θερμοκρασίας είναι συνάρτηση της σχετικής υγρασίας στον αέρα που περιβάλλει τις επιφάνειες και για τον προσδιορισμό της σχετικής υγρασίας σε μετρήσεις σε εδαφικά υλικά, πρέπει να έχει προηγηθεί βαθμονόμηση της διάταξης για γνωστή σχετική υγρασία. Η βαθμονόμηση γίνεται με χρήση υδατικών διαλυμάτων διαφορετικής περιεκτικότητας σε διαλυμένες ουσίες, γνωστής σχετικής υγρασίας. Η μέθοδος αυτή αποτελεί

καθιερωμένη μέθοδο ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω της σχετικής υγρασίας και παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφ. 4.

Στην απλούστερη δυνατή διάταξη ενός ψυχομέτρου, οι δύο επιφάνειες (η στεγνή και αυτή από την οποία γίνεται η εξάτμιση) μπορούν να είναι δύο θερμόμετρα υπό την ίδια αρχική θερμοκρασία, οπότε η προκαλούμενη διαφορά θερμοκρασίας λόγω της εξάτμισης μετρείται απευθείας από τις ενδείξεις των θερμομέτρων. Για τον περιορισμό του μεγέθους του οργάνου και τη δυνατότητα καταγραφής ακόμα και μικρών μεταβολών της θερμοκρασίας λόγω εξάτμισης (άρα μεγάλων τιμών της σχετικής υγρασίας, δηλαδή μικρών τιμών της μύζησης των εδαφικών υλικών), οι επιφάνειες που χρησιμοποιούνται δεν είναι θερμόμετρα αλλά, στην περίπτωση των ψυχομέτρων του συγκεκριμένου τύπου, θερμικά ευαίσθητες ηλεκτρικές αντιστάσεις. Ο όρος «θερμικά ευαίσθητη ηλεκτρική αντίσταση» αποδίδει τον αγγλικό όρο *thermistor*, δηλαδή μία ηλεκτρική αντίσταση<sup>13</sup>, η ονομαστική τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης<sup>14</sup> της οποίας μεταβάλλεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της.

Στα ψυχόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης χρησιμοποιούνται δύο όμοιες θερμικά ευαίσθητες ηλεκτρικές αντιστάσεις, σε κάθε μία από τις οποίες βρίσκεται μία σταγόνα διαφορετικών διαλυμάτων. Εάν τότε και οι δύο αντιστάσεις εκτεθούν σε ένα στεγανό περιβάλλον παρουσία του ενός από τα δύο διαλύματα, εξάτμιση από την αντίσταση με το άλλο διάλυμα ή υγροποίηση επί αυτής θα προκαλέσει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο αντιστάσεων που σχετίζεται με τη διαφορά της πίεσης των ατμών μεταξύ των δύο διαλυμάτων. Εάν το ένα από τα δύο διαλύματα είναι το καθαρό νερό και το σύστημα βρίσκεται σε περιβάλλον με καθαρό νερό, τότε θα μετρηθεί η απόλυτη πίεση των ατμών του άλλου διαλύματος.

Ο Hill (1930) υπήρξε ο πρώτος που παρουσίασε αυτή τη μέθοδο μέτρησης της σχετικής υγρασίας χρησιμοποιώντας δύο ηλεκτρικά πηνία με μπρούτζινο πυρήνα τυλιγμένα σε χαρτιά φίλτρου εμβαπτισμένα σε διαφορετικά διαλύματα. Όταν τα δύο αυτά πηνία με τα τυλιγμένα χαρτιά φίλτρου εισέρχονταν σε δοκιμαστικό σωλήνα που περιείχε ένα τρίτο διάλυμα, το δημιουργούμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που καταγραφόταν από το επαγωγικό ρεύμα στα πηνία ήταν ανάλογο της διαφοράς πίεσης ατμών των διαλυμάτων στα χαρτιά φίλτρου γύρω από τα δύο πηνία.

<sup>13</sup> Ο όρος «ηλεκτρική αντίσταση» σε αυτό το σημείο είναι το αντίστοιχο ηλεκτρικό στοιχείο.

<sup>14</sup> Ο όρος «ηλεκτρική αντίσταση» σε αυτό το σημείο είναι το φυσικό μέγεθος της ηλεκτρικής αντίστασης,  $R$  ( $\Omega$ ).

Οι Brady, et al. (1951) εισήγαγαν πρώτοι τη χρήση των θερμικά ευαίσθητων ηλεκτρικών αντιστάσεων στη θέση των πηνίων, και πάλι για τη μέτρηση της διαφοράς στην πίεση ατμών δύο διαλυμάτων.

Ο Richards (1965) παραθέτει λεπτομερή περιγραφή της θεωρίας, της κατασκευής και της βαθμονόμησης ψυχομέτρων θερμικά ευαίσθητης ηλεκτρικής αντίστασης. Για τη βαθμονόμηση των ψυχομέτρων χρησιμοποίησε διαλύματα χλωριούχου νατρίου διαφορετικών συγκεντρώσεων. Διαγράμματα της καταγραφόμενης μέτρησης με το χρόνο έδειξαν ότι για μύζηση μεγαλύτερη των 300 kPa η ισορροπία επιτυγχανόταν συνήθως μέσα σε μία ώρα, ενώ για τιμές της μύζησης μικρότερες των 300 kPa οι χρόνοι επίτευξης ισορροπίας ήταν συνήθως μεγαλύτεροι των 2 ωρών φτάνοντας μέχρι και τις 24 ώρες για μηδενική μύζηση. Για τη λειτουργία των οργάνων απαιτείται η τοποθέτηση μίας σταγόνας πάνω στη θερμικά ευαίσθητη ηλεκτρική αντίσταση από την οποία γίνεται η εξάτμιση. Η εξάτμισή της όμως συνεχίζεται ακόμα και μετά την επίτευξη ισορροπίας και είναι τόσο εντονότερη όσο ξηρότερο είναι το περιβάλλον. Στα 10 MPa η σταγόνα νερού παρέμενε μόνο για 3 ώρες πριν εξατμιστεί ολόκληρη (γεγονός το οποίο περιόριζε την ωφέλιμη ζωή των ψυχομέτρων σε τέτοια επίπεδα μύζησης). Η επίτευξη ισορροπίας όμως σε αυτά τα επίπεδα μύζησης γινόταν πάρα πολύ γρήγορα.

Οι Mokady & Low (1968) υιοθέτησαν τη μέθοδο για τη μέτρηση της πίεσης ατμών σε εδαφικά υλικά. Χρησιμοποίησαν δύο θερμικά ευαίσθητες ηλεκτρικές αντιστάσεις τοποθετημένες σε ξεχωριστά δοχεία με το ένα να περιέχει το εδαφικό υλικό και το άλλο ένα διάλυμα αναφοράς. Όμοιες σταγόνες νερού τοποθετημένες στην κάθε αντίσταση εξατμίζονταν με διαφορετικούς ρυθμούς και η δημιουργούμενη με αυτό τον τρόπο διαφορά θερμοκρασίας ήταν ανάλογη της διαφοράς της πίεσης ατμών στον αέρα πάνω από το διάλυμα αναφοράς (γνωστής πίεσης ατμών) και το δείγμα του εδαφικού υλικού. Για χρήση του ίδιου διαλύματος αναφοράς κάθε φορά και χρήση διαλυμάτων γνωστής πίεσης ατμών στη θέση του εδαφικού υλικού, ο εξοπλισμός μπορούσε να βαθμονομηθεί με ιδιαίτερη ευκολία.

Οι Kay & Low (1970) παραθέτουν λεπτομέρειες του σχεδίου, της βαθμονόμησης και της λειτουργίας του ψυχομέτρου που χρησιμοποίησαν βελτιώνοντας το ψυχόμετρο των Mokady & Low (1968) και τη λειτουργία του. Τα βασικά χαρακτηριστικά του δικού τους ψυχομέτρου είναι δίδυμες θερμικά ευαίσθητες αντιστάσεις, γεγονός το οποίο μείωσε τη διαφορική θερμική απόκριση, τοποθέτηση των δύο αντιστάσεων όσο το δυνατόν πιο κοντά ώστε η θερμοκρασία περιβάλλοντος να είναι ακριβώς η ίδια και για τις δύο, και τοποθέτηση κατά το δυνατόν όμοιων

σταγόνων νερού για επίτευξη ίδιας απώλειας θερμότητας από αυτές. Η καμπύλη βαθμονόμησης που παραθέτουν είναι γραμμική από 45 έως 450 kPa. Η σύγκριση μεταξύ της μέτρησης της μύζησης με τα ψυχρόμετρα και με θάλαμο μύζησης έδειξε τα ίδια αποτελέσματα για έναν ιλυώδη αργιλοπηλό (loam) στο εύρος 50 έως 1500 kPa.

Οι Baker, et al. (1973) διερεύνησαν ακόμα περισσότερο τη χρήση των ψυχομέτρων. Κατέληξαν ότι η ευαισθησία τους στο εύρος μικρών τιμών μύζησης είναι πολύ μικρή, η βαθμονόμησή τους έχει την τάση για συστηματική μεταβολή της με το χρόνο (drift) και ότι είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση κάθε οργάνου αντί για τη χρήση των καμπυλών βαθμονόμησης των κατασκευαστών των οργάνων. Οι βαθμονομήσεις έγιναν με χρήση διαλύματος χλωριούχου νατρίου σε λουτρό σταθερής θερμοκρασίας 30 °C. Για τρία όργανα που προσδιορίστηκαν καμπύλες βαθμονόμησης, αυτές βρέθηκαν συστηματικές στο εύρος 0 έως 2400 kPa, παρά τη μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων. Για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες των 2400 kPa η βαθμονόμηση ήταν πιο ευαίσθητη, η διασπορά ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με τις μικρότερες τιμές της μύζησης και οι καμπύλες βαθμονόμησης ήταν διαφορετικές για κάθε ψυχρόμετρο.

Οι Richards & Peter (1987) αναφέρουν την αντικατάσταση των θερμικά ευαίσθητων ηλεκτρικών αντιστάσεων με ημιαγωγικές διατάξεις στερεάς κατάστασης (transistors), στα ψυχρόμετρα που δοκίμασαν. Αυτές είναι σχετικά φθηνές και επιτρέπουν τη χρήση απλούστερων και φθηνότερων μετρητών διαφοράς δυναμικού σε σχέση με τα ακριβά βολτόμετρα για μετρήσεις στο εύρος  $\mu\text{V}$  που απαιτούνται στην περίπτωση των θερμικά ευαίσθητων ηλεκτρικών αντιστάσεων, ενώ σήμερα πια έχουν επικρατήσει αντικαθιστώντας τις θερμικά ευαίσθητες ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Εκτεταμένη παρουσίαση των ψυχομέτρων ημιαγωγικών διατάξεων στερεάς κατάστασης μπορεί να βρεθεί στους Woodburn, et al. (1993) και παραδείγματα του τρόπου χρήσης τους στους Truong & Holden (1995). Οι τελευταίοι αναφέρουν χρόνους πραγματοποίησης μέτρησης της τάξης της μία ώρας, ακρίβεια μετρήσεων της τάξης των 10 kPa για μεγάλες τιμές της μύζησης και επαναληψιμότητα των καμπυλών βαθμονόμησης σε εύρος της τάξης των 10 kPa (οι δοκιμές βαθμονόμησης επαναλήφθηκαν 3-4 φορές για κάθε όργανο, ενώ προτείνεται η βαθμονόμηση να γίνεται τουλάχιστον μία φορά ανά έτος για λόγους ελέγχου τυχόν συστηματικής μεταβολής της με το χρόνο, ενώ ανά βαθμονόμηση να πραγματοποιούνται τουλάχιστον τρεις δοκιμές βαθμονόμησης). Σε όλο το εύρος τιμών μύζησης η ακρίβεια των μετρήσεων ήταν  $\pm 50$  kPa για ελεγχόμενη θερμοκρασία ( $22.5 \pm 0.5$  °C), ενώ ακόμα και χωρίς έλεγχο της θερμοκρασίας αλλά με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος να βρίσκεται στο εύρος 20-25

°C, η ακρίβεια σε όλο το εύρος μετρήσεων δεν υπερβαίνει τα  $\pm 100$  kPa. Προτείνουν επίσης ότι για λόγους υστέρησης πρέπει να μετρούνται πρώτα οι μικρότερες τιμές της μύζησης και μετά οι μεγαλύτερες, ενώ αν μετρηθούν τυχόν μικρότερες τιμές της μύζησης από κάποια προηγούμενη, αυτές να απορριφθούν και τα δείγματα να διατηρηθούν ώστε να επαναληφθούν οι μετρήσεις της μύζησης σε αυτά την επόμενη ημέρα μετά από νέα προετοιμασία του ψυχομέτρου. Οι Woodburn & Lucas (1995) τέλος αναφέρουν εύρος μέτρησης μεταξύ 100 και 10000 kPa για τα συγκεκριμένα όργανα.

Εξαιτίας της ανάγκης για τοποθέτηση μίας καινούργιας σταγόνας νερού στην υγρή θερμικά ευαίσθητη ηλεκτρική αντίσταση ή ημιαγωγική διάταξη στερεάς κατάστασης πριν από κάθε σειρά μετρήσεων, τα ψυχόμετρα τέτοιου τύπου δεν προσφέρονται για μέτρηση της μύζησης επιτόπου. Για τον ίδιο λόγο, πρέπει να αποφεύγεται η μέτρηση τιμών της μύζησης μικρότερων από αυτές της προηγούμενης μέτρησης, αφού τότε η τιμή της πραγματικής μύζησης των εδαφικών υλικών υπερεκτιμάται λόγω υστέρησης της καμπύλης βαθμονόμησης (Truong & Holden, 1995). Σε περίπτωση μάλιστα καταγραφής μίας τιμής της μύζησης μικρότερης από την προηγούμενη, αυτή συνιστάται να απορρίπτεται και να αρχίζει η διαδικασία χρησιμοποίησης του οργάνου από την αρχή, δηλαδή τοποθέτηση καινούργιας σταγόνας και παραμονή του οργάνου για 24h σε ισορροπία με διάλυμα σχετικής υγρασίας που να αντιστοιχεί σε μύζηση περίπου 10 kPa. Επίσης, λόγω της συστηματικής μεταβολής της καμπύλης βαθμονόμησης του κάθε οργάνου με το χρόνο, εκτός από την απαίτηση για μέτρηση της καμπύλης βαθμονόμησης για κάθε όργανο ξεχωριστά, επιβάλλεται και η τακτική μέτρησή της καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του οργάνου.

Για τη μέτρηση της μύζησης η ποσότητα του εδαφικού υλικού που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο είναι περίπου  $1 \text{ cm}^3$ . *Η χρήση εδαφικών δειγμάτων τόσο μικρού μεγέθους είναι από μόνη της ένας παράγοντας αβεβαιότητας λόγω μικρής αντιπροσωπευτικότητας, ενώ προφανώς τέτοιες ποσότητες μεταφράζονται σε μετρήσεις μόνο σε λεπτόκοκκα εδάφη.*

Ψυχόμετρο και δείγμα εδαφικού υλικού πρέπει να τοποθετούνται μέσα σε ένα θερμομονωμένο δοχείο για την πραγματοποίηση της μέτρησης και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος να είναι γνωστή, ώστε να μπορούν να γίνουν τυχόν απαιτούμενες διορθώσεις των μετρήσεων. Αυτό αποτελεί σημαντική απαίτηση αφού οι μετρήσεις επηρεάζονται πάρα πολύ από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, εκτός εάν η αναφερόμενη ακρίβεια  $\pm 100$  kPa των Truong & Holden (1995) για το εύρος θερμοκρασίας 20-25 °C επαρκεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Αν μάλιστα



επιδιώκεται μεγαλύτερος έλεγχος της ακρίβειας μέτρησης τότε το δοχείο που περιέχει εδαφικό δείγμα και ψυχρόμετρο, είναι σκόπιμο να τοποθετείται σε λουτρό σταθερής θερμοκρασίας.

Η ισορροπία υδρατμών περιβάλλοντος αέρα-ποσοστού υγρασίας εδαφικού υλικού επέρχεται συνήθως μέσα σε μία ώρα και τα όργανα του τύπου αυτού προσφέρονται για μετρήσεις της μύζησης στο εύρος 100 kPa έως 70 MPa με ακρίβεια μέτρησης της τάξης του  $\pm 2\%$ .

### 3.6.3 Ψυχρόμετρα φαινομένου Peltier (thermocouple psychrometers)

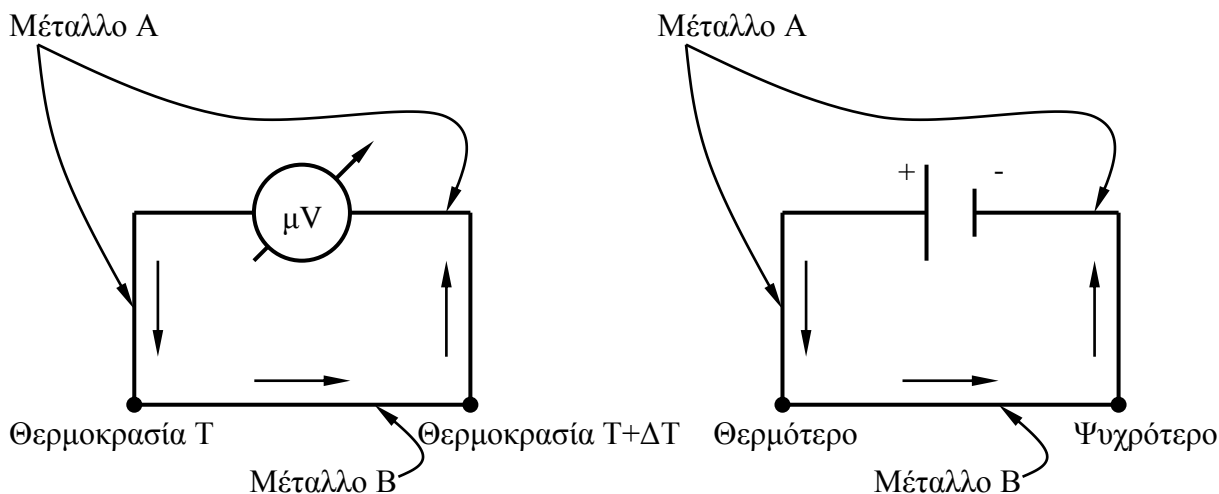
Η πρώτη παρουσίαση ψυχομέτρων φαινομένου Peltier αποδίδεται στον Spanner (1951) ο οποίος εργαζόταν στο χώρο της φυσιολογίας των φυτών (plant physiology) και αναγνώρισε τη δυνατότητα χρήσης του φαινομένου Peltier για τη μέτρηση της μύζησης στα φύλλα των φυτών.

Ο Seebeck (1821) ανακάλυψε ότι σε ένα κύκλωμα διαφορετικών μετάλλων αναπτύσσεται ηλεκτρικό ρεύμα, καταγραφόμενο ως διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού, αν τα μέταλλα βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία (φαινόμενο Seebeck). Ο Peltier (1834) ανακάλυψε ότι και το αντίστροφο είναι αληθές, δηλαδή ότι κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος διά της επαφής δύο διαφορετικών μετάλλων, παρατηρείται μεταβολή της θερμοκρασίας, προσήμου ανάλογου της φοράς του ρεύματος και του είδους των μετάλλων (φαινόμενο Peltier) –Σχ. 3.24.

Αν μια τέτοια επαφή διαφορετικών μετάλλων (thermocouple junction) τοποθετηθεί σε περιβάλλοντα υγρό αέρα και συνεχές ρεύμα τη διαπεράσει στη φορά που προκαλείται μείωση της θερμοκρασίας, με επαρκή ένταση για να προκαλέσει τόση πτώση της θερμοκρασίας ώστε να προκληθεί υγροποίηση υδρατμών επί της επαφής<sup>15</sup>, τότε η σύνδεση αυτή μετατρέπεται σε επιφάνεια από την οποία γίνεται εξάτμιση (wet bulb), και μάλιστα με τη σταγόνα να δημιουργείται αυτόματα και όχι να τοποθετείται από τον χρήστη όπως στα ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης ηλεκτρικής αντίστασης. Με τη διακοπή του κυκλώματος και την παύση του συνεχούς ρεύματος που διαπερνά τη σύνδεση, η σταγόνα επί της σύνδεσης θα εξατμιστεί προκαλώντας μεταβολή της θερμοκρασίας η οποία θα δημιουργήσει διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού ανάλογη του μεγέθους της πτώσης της θερμοκρασίας στη σύνδεση και μπορεί να μετρηθεί με ένα ευαίσθητο βολτόμετρο. Το φαινόμενο Peltier δηλαδή χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της

<sup>15</sup> Δηλαδή η θερμοκρασία να μειωθεί στο σημείο δρόσου (dew point).

σταγόνας που θα εξατμιστεί προκαλώντας πτώση της θερμοκρασίας, η οποία μετρείται χάρη στο φαινόμενο Seebeck.



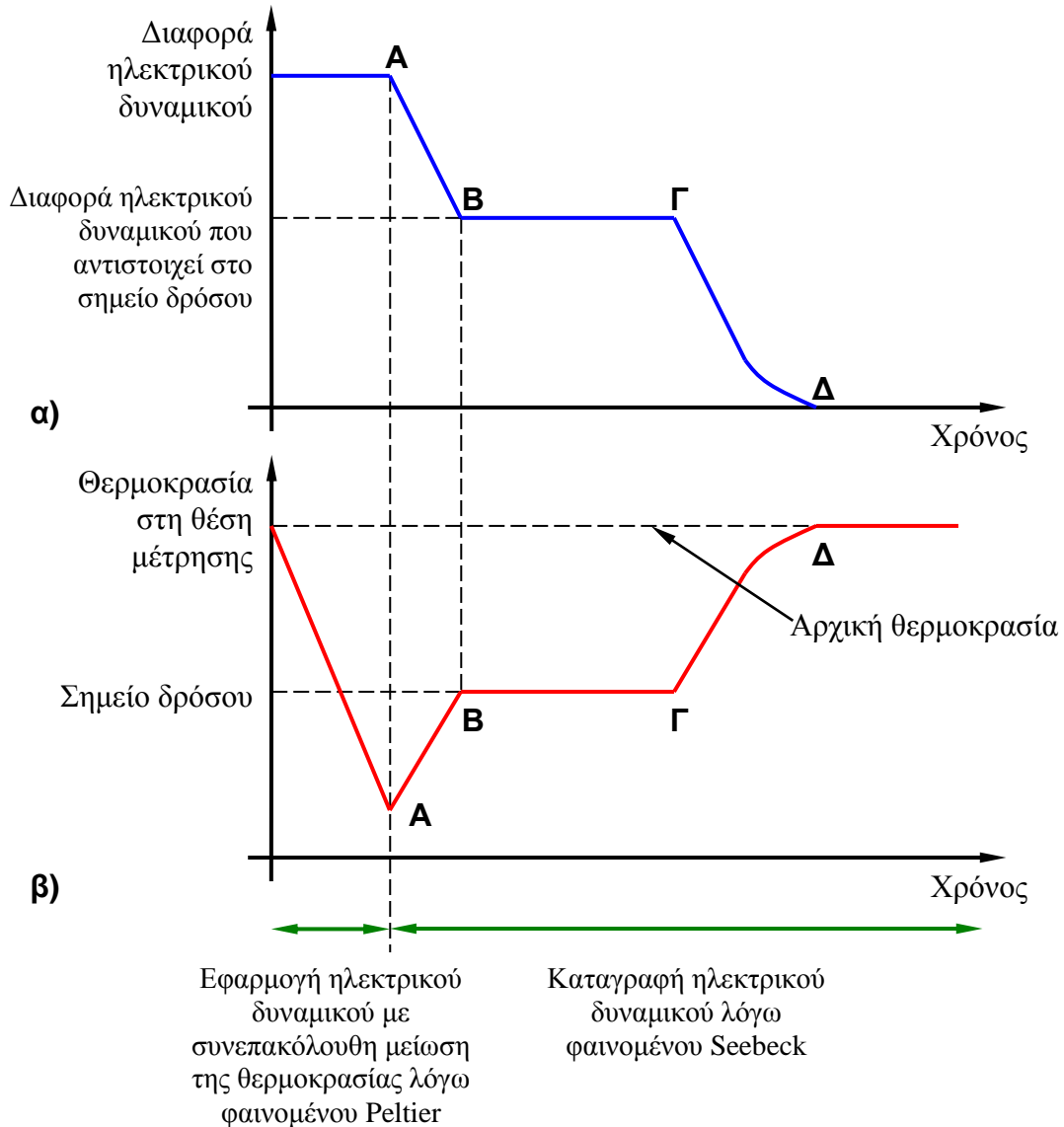
α) **Φαινόμενο Seebeck:** Η επιβαλλόμενη διαφορά θερμοκρασίας προκαλεί τη διέλευση ενός ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα

β) **Φαινόμενο Peltier:** Η επιβαλλόμενη τάση προκαλεί τη διέλευση ενός ηλεκτρικού ρεύματος που προκαλεί μεταβολή θερμοκρασίας στο κύκλωμα

**Σχήμα 3.24.** Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικών κυκλωμάτων διαφορετικών μετάλλων προς επίδειξη α) του φαινομένου Seebeck, και β) του φαινομένου Peltier.

Η καμπύλη της καταγραφόμενης διαφοράς δυναμικού για αυτό τον τύπο ψυχομέτρου παρουσιάζει ένα τμήμα σταθερού ηλεκτρικού δυναμικού με το χρόνο κατά την επίτευξη ισορροπίας (Σχ. 3.25). Στο Σχ. 3.25 παρουσιάζεται ενδεικτική καμπύλη εξέλιξης του ηλεκτρικού δυναμικού που επιβάλλεται και στη συνέχεια καταγράφεται σε ένα ψυχρόμετρο φαινομένου Peltier, με την αντίστοιχη εξέλιξη της θερμοκρασίας στο σημείο μέτρησης στο ψυχρόμετρο. Αρχικά επιβάλλεται μία διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού η οποία προκαλεί με βάση το φαινόμενο Peltier τη μείωση της θερμοκρασίας κάτω από το σημείο δρόσου, η εφαρμογή της οποίας σταματά στο σημείο A. Στη συνέχεια καθώς το κύκλωμα επιστρέφει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος καταγράφεται το ηλεκτρικό δυναμικό λόγω φαινομένου Seebeck μεταξύ A και B. Το σημείο B αντιστοιχεί στο σημείο της δρόσου κατά το οποίο αρχίζει η εξάτμιση των υγροποιημένων υδρατμών. Η εξάτμιση αυτή προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας καθυστερώντας την επιστροφή στη θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι να ολοκληρωθεί η εξάτμιση, οπότε το καταγραφόμενο ηλεκτρικό δυναμικό παραμένει περίπου σταθερό στην τιμή

που είχε στο σημείο Β μέχρι το σημείο Γ. Από το σημείο Γ και μετά συνεχίζεται η μείωση του καταγραφόμενου ηλεκτρικού δυναμικού μέχρι το σημείο Δ όπου έχει αποκατασταθεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος στο κύκλωμα.

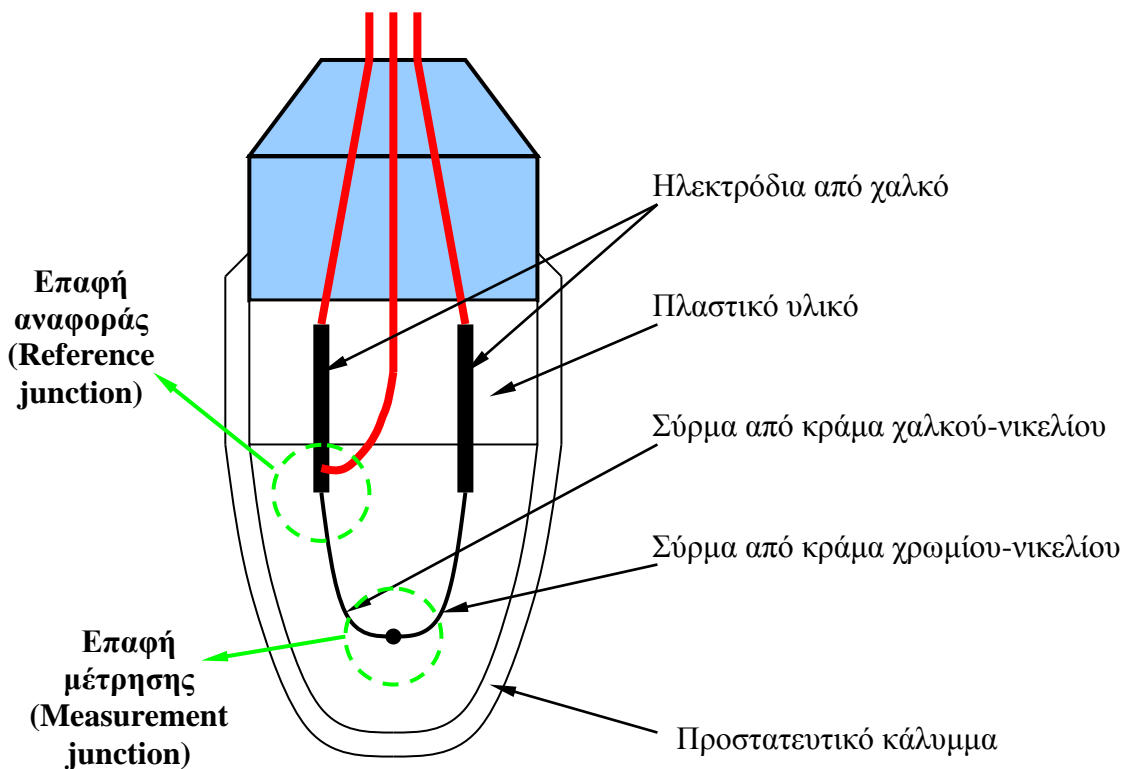


**Σχήμα 3.25.** Ενδεικτική απεικόνιση της εξέλιξης του εφαρμοζόμενου/καταγραφόμενου ηλεκτρικού δυναμικού (α) σε ένα ψυχρόμετρο θερμικού ζεύγους με την αντίστοιχη εξέλιξη της θερμοκρασίας στο σημείο μέτρησης (β).

Η τιμή του ηλεκτρικού δυναμικού στο σημείο Β είναι συνάρτηση της σχετικής υγρασίας του αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ ψυχομέτρου και δείγματος εδαφικού υλικού. Πριν τη

χρησιμοποίηση των ψυχομέτρων του τύπου, αυτά πρέπει να βαθμονομηθούν για γνωστές τιμές της σχετικής υγρασίας (με χρήση υδατικών διαλυμάτων). Οι καμπύλες βαθμονόμησης λοιπόν είναι καμπύλες σχετικής υγρασίας-χαρακτηριστικού ηλεκτρικού δυναμικού στο σημείο της δρόσου.

Τα ψυχοόμετρα φαινομένου Peltier αποτελούνται από μία «υγρή» επαφή, συνήθως κατασκευασμένη από κράμα χρωμίου-νικελίου και κράμα χαλκού-νικελίου, και μία επαφή αναφοράς (reference junction) η οποία χρησιμοποιείται ως σημείο μέτρησης, κατασκευασμένη συνήθως από χαλκό και κράμα χαλκού-νικελίου (Σχ. 3.26). Οι επαφές έχουν στερεωθεί σε κάποιο πλαστικό υλικό που συνιστά κακό αγωγό του ηλεκτρισμού και περιβάλλονται από πορώδες προστατευτικό κάλυμμα αποτελούμενο συνήθως από πλέγμα από ανοξείδωτο χάλυβα ή κεραμικό υλικό. Εάν δεν υπάρχει κίνδυνος καταστροφής των επαφών από απρόσεκτη χρήση ή τυχαία επαφή με το εδαφικό δείγμα, το κάλυμμα μπορεί να αφαιρεθεί. Σε αυτή την περίπτωση μειώνεται και ο χρόνος επίτευξης ισορροπίας για τη μέτρηση, ο οποίος είναι πιο μεγάλος όταν το κάλυμμα είναι από μεταλλικό πλέγμα και ακόμα μεγαλύτερος όταν το κάλυμμα είναι από κεραμικό υλικό (προφανώς γιατί δυσχεραίνεται η ανταλλαγή υδρατμών μεταξύ αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ οργάνου και δείγματος και αέρα εντός του καλύμματος των επαφών).



Σχήμα 3.26. Ενδεικτική απεικόνιση διάταξης επαφών εντός ψυχομέτρου φαινομένου Peltier.

Ο Spanner (1951) χρησιμοποίησε ένα ψυχρόμετρο με διπλή επαφή (thermocouple junction), η μία από τις οποίες χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού λόγω φαινομένου Peltier και η άλλη για τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Οι επαφές ήταν κατασκευασμένες από βισμούθιο και ένα κράμα βισμούθιου με 5% ψευδάργυρο. Οι επαφές ήταν τοποθετημένες σε ένα μικρό γυάλινο στεγανό δοχείο μαζί με ένα διάλυμα αλάτων γνωστής σχετικής υγρασίας, και ολόκληρο το σύστημα εμβαπτίστηκε σε ένα λουτρό ελεγχόμενης θερμοκρασίας. Χρησιμοποιώντας διαλύματα χλωριούχου βαρίου διερεύνησε την επιρροή της μεταβολής της έντασης του ρεύματος για την επίτευξη της μείωσης της θερμοκρασίας και της χρονικής διάρκειας εφαρμογής του στο κύκλωμα. Ένταση ρεύματος 2 mA εφαρμοζόμενη για 10 δευτερόλεπτα επιλέχθηκε ως η κατάλληλη και το όργανο βαθμονομήθηκε για διαλύματα χλωριούχου βαρίου με διάφορες συγκεντρώσεις. Με αυτό το όργανο ο Spanner (1951) μέτρησε την υγρασία κατά την ισορροπία στη διάρκεια της ξήρανσης ενός υγρού φύλλου. Παρατηρήθηκε ότι η επίτευξη ισορροπίας χρειαζόταν περισσότερο χρόνο καθώς η υγρασία μειωνόταν (10 λεπτά στα 200 kPa και 80 λεπτά στα 2000 kPa).

Μία άλλη μορφή ψυχομέτρου φαινομένου Peltier είναι αυτή που παρουσίασαν οι Richards & Ogata (1958), η οποία υιοθετεί μία αρχή παρόμοια με αυτή του ψυχομέτρου θερμικά ευαίσθητης ηλεκτρικής αντίστασης. Σε μία επαφή τοποθετείται μία σταγόνα νερού πριν από την τοποθέτηση του οργάνου σε στεγανό δοχείο μαζί με το δείγμα. Ολόκληρη η διάταξη διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία και η πτώση της θερμοκρασίας που προκαλείται στην επαφή λόγω εξάτμισης της σταγόνας νερού μετρείται ως διαφορά δυναμικού η οποία τελικά φτάνει σε μία σταθερή τιμή.

Οι Zollinger, et al. (1966) αναγνώρισαν ότι όταν ένα ψυχρόμετρο φαινομένου Peltier χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας μικρού όγκου αέρα ευρισκόμενου σε ισορροπία με δείγμα εδαφικού υλικού, μπορεί να προκληθεί μεταβολή της σχετικής υγρασίας που αντιστοιχεί στη μύζηση του εδαφικού δείγματος από τη μικρή ποσότητα του νερού που ανταλλάσσεται στο σύστημα. Αυτό θα οδηγούσε στον προσδιορισμό μίας τιμής της μύζησης υψηλότερης της πραγματικής για ψυχρόμετρα όπως αυτό του Spanner (1951) και χαμηλότερης της πραγματικής για ψυχρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης. Συγκρίνοντας τις μετρήσεις των δύο οργάνων στο ίδιο εδαφικό δείγμα, οι Zollinger, et al. (1966) παρατήρησαν ότι το ψυχρόμετρο του Spanner (1951) κατέγραφε τιμή της μύζησης με μικρότερη διαφορά από την πραγματική σε σχέση με το άλλο όργανο. Αν και η διαφορά αυτή ήταν μεγαλύτερη σε ξηρότερα εδαφικά υλικά (πιθανότατα λόγω της μικρότερης περιεχόμενης υγρασίας στον αέρα που

περιέβαλε τα εδάφη αυτά), κατέληξαν ότι η μικρή ποσότητα υδρατμών που υγροποιείται στην επαφή Peltier φαίνεται να έχει μικρότερη επιρροή και είναι πιθανότατα αμελητέα στις περισσότερες περιπτώσεις.

Οι επαφές των ψυχομέτρων φαινομένου Peltier είναι ευαίσθητες στις μεταβολές της θερμοκρασίας και γι' αυτό και τα ψυχρόμετρα αυτού του τύπου επηρεάζονται από θερμοκρασιακές μεταβολές όπως επέδειξαν οι Rawlins & Dalton (1967). Όταν η επαφή μέτρησης ψυχραίνεται, θερμότητα δημιουργείται στην επαφή αναφοράς. Είναι κρίσιμης σημασίας για τη σωστή μέτρηση της σχετικής υγρασίας η διατήρηση της επαφής αναφοράς σε θερμοκρασία ίδια με αυτή του περιβάλλοντος. Θερμοκρασιακές μεταβολές μεταξύ της επαφής μέτρησης και της επαφής αναφοράς στην αρχή της δοκιμής μπορεί να καταλήξουν σε μεγάλα σφάλματα στη μετρούμενη σχετική υγρασία. Κατά συνέπεια ο έλεγχος της θερμοκρασίας πρέπει να γίνεται σε εύρος 0.001 °C. Η αποτελεσματικότητα του οργάνου λοιπόν εξαρτάται από τη θερμοκρασία και η καμπύλη βαθμονόμησης χρειάζεται διόρθωση ανάλογα με τη θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του οργάνου.

Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ψυχρόμετρα φαινομένου Peltier με διπλή επαφή μέτρησης (double-junction psychrometer ή εναλλακτικά temperature-compensated psychrometer, όπως προτείνουν οι Fredlund & Rahardjo, 1993) αντίστροφα τοποθετημένων μετάλλων (van Haveren & Brown, 1972). Όποια θερμοκρασιακή μεταβολή προκαλείται στη μία επαφή μέτρησης, εξισορροπείται από το αντίστοιχο φαινόμενο στην άλλη επαφή μέτρησης λόγω των αντίστροφα τοποθετημένων συρμάτων διαφορετικών μετάλλων που τη σχηματίζουν.

Η μέγιστη πτώση θερμοκρασίας που μπορεί να διατηρηθεί στη θέση μέτρησης ενός ψυχομέτρου φαινομένου Peltier περιορίζεται από την άνοδο της θερμοκρασίας που προκαλείται από τη διέλευση ρεύματος στο κύκλωμα. Όπως αναφέρουν οι Lu & Likos (2004), στην πράξη, η ελάχιστη τιμή της σχετικής υγρασίας που μπορεί να μετρηθεί με ένα τέτοιο ψυχρόμετρο είναι περί το 94%, τιμή η οποία με τη σειρά της αντιστοιχεί σε ένα ανώτατο όριο της μύζησης που μπορεί να μετρηθεί περί τα 8000 kPa. Οι μετρήσεις κοντά σε αυτό όριο παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά. Αντίστοιχα μεγάλη διασπορά παρουσιάζουν και οι μετρήσεις της μύζησης με τέτοιου είδους ψυχρόμετρα και για τιμές της μύζησης κάτω από τα 100 kPa, όπου η σχετική πυκνότητα προσεγγίζει το 100%. Τα σφάλματα μέτρησης σε αυτό το όριο του εύρους μετρούμενων τιμών απορρέουν από το ότι πολύ μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας μπορούν να προκαλέσουν ανεξέλεγκτη υγροποίηση υδρατμών επί της θέσης μέτρησης του

ψυχομέτρου. Γι' αυτό το λόγο οι μετρήσεις της μύζησης για τιμές μικρότερες των 100 kPa με συνήθη εξοπλισμό θεωρούνται αναξιόπιστες. Γενικά δε η αξιοπιστία των μετρήσεων των ψυχομέτρων φαινομένου Peltier γίνεται μέγιστη στο εύρος τιμών 1000-4000 kPa.

Ο χρόνος μέτρησης είναι ο ελάχιστος δυνατός για ψυχόμετρα χωρίς προστατευτικό κάλυμμα. Αυτός είναι δύο φορές μεγαλύτερος στην περίπτωση καλύμματος από πλέγμα από ανοξείδωτο χάλυβα και έξι φορές μεγαλύτερος στην περίπτωση καλύμματος από πορώδες κεραμικό υλικό (Brown, 1970).

Επίσης, όπως επέδειξε ο Zerhouni (1995), τα ψυχόμετρα επηρεάζονται σημαντικά όταν έχει αποθεθεί σκόνη πάνω στις επαφές ή όταν παλιώνουν, ειδικά αν αυτό συνδυάζεται με διάβρωση των μεταλλικών συρμάτων των επαφών. Στην περίπτωση αυτή εκτός από τη συστηματική απόκλιση της καμπύλης βαθμονόμησης με το χρόνο, οι καταγραφές μπορεί να γίνουν ιδιαίτερα δυσανάγνωστες στο βαθμό που να μην μπορούν να ερμηνευτούν για τον προσδιορισμό της μύζησης, αφού δεν παρουσιάζεται πια χαρακτηριστικό τμήμα σταθερής τιμής της διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού λόγω φαινομένου Peltier.

#### **3.6.4 Υγρόμετρα σημείου δρόσου (dew-point hygrometers)**

Στα υγρόμετρα σημείου δρόσου (dew point hygrometers) χρησιμοποιείται το φαινόμενο Peltier για να κρατηθεί η επαφή στο σημείο της δρόσου. Εξ ορισμού τότε, δεν πρέπει ούτε να χάνεται υγρασία λόγω εξάτμισης ούτε να προστίθεται υγρασία λόγω περαιτέρω συμπύκνωσης υδρατμών από τον περιβάλλοντα αέρα, αφού όσο η σύνδεση παραμένει στο σημείο δρόσου δεν υπάρχει ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον.

Οι Campbell, et al. (1973) ανέφεραν το σχεδιασμό ενός τέτοιου οργάνου. Η «ξηρή» επαφή ψύχεται πρώτα ώστε να συμπυκνωθούν υδρατμοί επί αυτής. Γνωρίζοντας το συντελεστή ψύχρασης (cooling coefficient) της επαφής, αυτή στη συνέχεια ψύχεται ή θερμαίνεται (μέσω του φαινομένου Seebeck) μέχρι να φτάσει στη θερμοκρασία εκείνη που δεν χάνει ή παίρνει πια θερμική ενέργεια από το περιβάλλον (σημείο δρόσου). Σε αυτή την κατάσταση η καταγραφόμενη διαφορά δυναμικού του σημείου δρόσου σχετίζεται μονοσήμαντα με τη σχετική υγρασία στη δεδομένη θερμοκρασία. Ο συντελεστής ψύχρασης της επαφής εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Υπό την προϋπόθεση ωστόσο ότι αυτός έχει μετρηθεί σωστά στην αρχή της

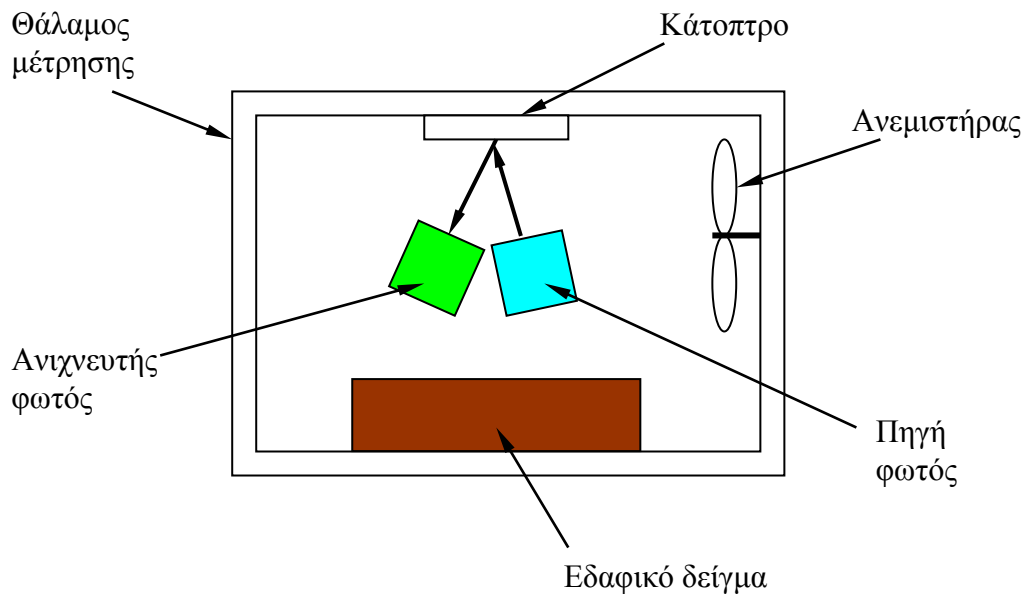
δοκιμής, τα υγρόμετρα σημείου δρόσου μπορούν να προσδιορίζουν με ακρίβεια τη σχετική υγρασία.

Το πλεονέκτημα του υγρομέτρου σημείου δρόσου σε σχέση με το ψυχρόμετρο φαινομένου Peltier είναι ότι παράγει μεγαλύτερη διαφορά δυναμικού, η οποία παραμένει σταθερή για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα, επιτρέποντας στον χειριστή να πραγματοποιήσει τη μέτρηση με ευκολία. Σήμερα διατίθενται συνδυασμένα ψυχρόμετρα φαινομένου Peltier, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν στη συνήθη διαμόρφωση των ψυχομέτρων του τύπου ή στη διαμόρφωση υγρομέτρου σημείου δρόσου.

### **3.6.5 Υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου (chilled-mirror hygrometers)**

Η τεχνολογία ψυχρών κατόπτρων (chilled mirrors) έχει χρησιμοποιηθεί ήδη από τη δεκαετία του 1950 για τον προσδιορισμό του σημείου της δρόσου σε ένα κλειστό, υγρό περιβάλλον. Οι Gee, et al. (1992) περιγράφουν τη χρήση ενός συστήματος ψυχρού κατόπτρου για τη μέτρηση της μύζησης. Στο Σχ. 3.27 απεικονίζεται η αρχή μέτρησης της συγκεκριμένης μεθόδου. Το δείγμα του εδαφικού υλικού τοποθετείται σε έναν κλειστό θάλαμο και η περιεχόμενη σε αυτό υγρασία αφήνεται να έρθει σε ισορροπία με τους υδρατμούς στον αέρα εντός του θαλάμου. Μέσα στο θάλαμο υπάρχει ένα μεταλλικό –συνήθως– κάτοπτρο, ένας ανεμιστήρας, μία πηγή φωτός και ένας ανιχνευτής φωτός. Το φως από την πηγή φωτός κατευθύνεται προς το κάτοπτρο όπου ανακλάται και επιστρέφει στον ανιχνευτή φωτός, ο οποίος αναγνωρίζει φως δεδομένης έντασης. Όταν έχει επέλθει ισορροπία μεταξύ των υδρατμών του αέρα του θαλάμου και της υγρασίας του εδαφικού δείγματος, ο ανεμιστήρας τίθεται σε λειτουργία ψυχραίνοντας την επιφάνεια του κατόπτρου, τόσο ώστε να υγροποιηθούν επί αυτής υδρατμοί. Τότε το φως αντί να ανακλάται επί του κατόπτρου, διαχέεται και η ένταση του φωτός που καταγράφεται στον ανιχνευτή φωτός μειώνεται. Το σημείο της δρόσου επί του κατόπτρου διατηρείται μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος και η θερμοκρασία μετρείται μέσω ενός θερμομέτρου ηλεκτρικής αντίστασης τοποθετημένου μέσα στο κάτοπτρο. Το σημείο της δρόσου συσχετίζεται με τη σχετική υγρασία και από αυτήν προσδιορίζεται η μύζηση του εδαφικού δείγματος που τοποθετήθηκε στο θάλαμο. Για τη βαθμονόμηση του οργάνου χρησιμοποιούνται υδατικά διαλύματα διαφόρων συγκεντρώσεων μέσω των οποίων καθορίζεται η σχετική υγρασία εντός του θαλάμου για την οποία μετρείται το σημείο της δρόσου. Έτσι προκύπτει καμπύλη βαθμονόμησης στην οποία συσχετίζεται η σχετική υγρασία με το σημείο της δρόσου.





**Σχήμα 3.27.** Ενδεικτική απεικόνιση της αρχής μέτρησης της μύζησης με υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου.

Η αναφερόμενη ακρίβεια μέτρησης της σχετικής υγρασίας από τα συνηθισμένα όργανα του είδους είναι της τάξης του  $\pm 0.3\%$ . Το εύρος τιμών της σχετικής υγρασίας που μπορούν να μετρηθούν εκτείνεται μεταξύ 3% (που αντιστοιχεί σε μύζηση περί τα 450000 kPa) και 99.9% (που αντιστοιχεί σε μύζηση περί τα 100 kPa). Η διασπορά στις μετρήσεις αυξάνεται αρκετά για τιμές της σχετικής υγρασίας μεγαλύτερες του 99% (που αντιστοιχεί σε μύζηση περί τα 1000 kPa).

Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτών των οργάνων είναι η απλότητα της χρήσης τους και η ταχύτητα μέτρησης. Τα δείγματα στα οποία επιθυμείται η μέτρηση της μύζησης απλά τοποθετούνται μέσα στο θάλαμο της συσκευής μέτρησης και η μέτρηση γίνεται αυτοματοποιημένα από εκεί και μετά. Ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη μίας μέτρησης μπορεί να είναι της τάξης των 5'. Οι Leong, et al. (2003) αναφέρουν χρόνους επίτευξης μέτρησης μικρότερους των 2' για τα υδατικά διαλύματα που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση και μικρότερους των 4' για τα εδαφικά δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν (συμπυκνωμένοι αργιλόλιθοι και ψαμμίτες).

Σήμερα υπάρχει και πρότυπο της ASTM (D6836-02, ASTM, 2006), το οποίο παραθέτει οδηγίες για τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας με υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκε το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Decagon Devices, Inc. (Φωτ. 3.11).



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

**Φωτογραφία 3.11.** Το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Decagon Devices, Inc. α) το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου, β) η συσκευή ρύθμισης της θερμοκρασίας των δειγμάτων πριν την εισαγωγή τους στο υγρόμετρο, γ) το υγρόμετρο με ανοικτό τον θάλαμο εισαγωγής δοκιμίου, δ) φιαλίδιο υδατικού διαλύματος KCl συγκέντρωσης 0.5 Mol/l για ταχεία βαθμονόμηση του οργάνου και πλαστικός υποδοχέας δείγματος, ε) εισαγωγή του διαλύματος στον υποδοχέα, και στ) εισαγωγή του υποδοχέα με το υδατικό διάλυμα στον θάλαμο του υγρομέτρου.

Το όργανο αυτό είναι πράγματι εξαιρετικά εύκολο στον χειρισμό με συστηματικά αποτελέσματα κατά τις μετρήσεις. Η εμπειρία από την χρήση του είναι ότι ενώ πράγματι πολύ γρήγορα (μέσα σε 2-4') πραγματοποιείται μέτρηση της μύζησης από το όργανο, δεν είναι απαραίτητο ότι αυτή είναι και η *μύζηση του δοκιμίου*. Για να προσδιοριστεί η μύζηση του δοκιμίου, οι μετρήσεις πρέπει να συνεχιστούν μέχρι να γίνει εξισορρόπηση των καταγραφόμενων ενδείξεων, κάτι το οποίο μπορεί να κρατήσει ακόμα και 30'. Το όργανο είναι ευαίσθητο ως προς την θερμοκρασία του δοκιμίου. Για να αρχίσει να πραγματοποιεί μετρήσεις θα πρέπει η διαφορά της θερμοκρασίας του θαλάμου μέτρησης και του δοκιμίου να είναι μικρότερη από 1°C. Αν αυτό δεν συμβαίνει, τότε υπάρχουν δύο τρόποι πραγματοποίησης της μέτρησης. Ο ένας είναι να τοποθετηθεί το δοκίμιο με τον υποδοχέα πάνω στην συσκευή ρύθμισης της θερμοκρασίας<sup>16</sup> που συνοδεύει το όργανο εφόσον το επιθυμεί ο χρήστης και ο άλλος να τοποθετηθεί ο υποδοχέας με το δοκίμιο εντός του θαλάμου μέτρησης και να αφηθεί μέχρι να εξισορροπηθούν οι θερμοκρασίες του θαλάμου μέτρησης και του δοκιμίου.



**Φωτογραφία 3.12.** Το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Decagon Devices, Inc. κατά την λήψη μετρήσεων σε πρότυπο υδατικό διάλυμα KCl συγκέντρωσης 0.5 Mol/l για ταχεία βαθμονόμηση του οργάνου. Το όργανο αναφέρει απευθείας τιμές της μύζησης και όχι σχετικής υγρασίας (εκφρασμένες σε MPa ή pF –βλ. §2.3.7) καθώς και την θερμοκρασία εντός του θαλάμου κατά την μέτρηση.

<sup>16</sup> Πρόκειται ουσιαστικά για μια πλάκα Peltier πολύ υψηλής ακρίβειας ρύθμισης της θερμοκρασίας.

### 3.6.6 Αισθητήρες αντίστασης/χωρητικότητας πολυμερών (polymer resistance/capacitance sensors)

Οι αισθητήρες αντίστασης/χωρητικότητας πολυμερών αποτελούνται από ένα τεμάχιο πορώδους υλικού το οποίο περιέχει δύο ηλεκτρόδια που διαχωρίζονται από ένα λεπτό φύλλο πολυμερούς. Καθώς εξατμίζεται από την επιφάνεια του φύλλου αυτού ή συμπυκνώνεται πάνω της υγρασία, μεταβάλλεται η αντίσταση και η χωρητικότητα της διάταξης ηλεκτροδίων-φύλλου πολυμερούς. Βαθμονομώντας λοιπόν τη διάταξη για γνωστές τιμές της σχετικής υγρασίας προκύπτουν καμπύλες βαθμονόμησης στις οποίες συσχετίζεται η σχετική υγρασία με την αντίσταση ή τη χωρητικότητα των αισθητήρων. Οι αισθητήρες αυτοί προσφέρονται για μετρήσεις της σχετικής υγρασίας από σχεδόν 0% έως σχεδόν 100%.

Ο Wiederhold (1997) περιγράφει τις βασικές διαφορές των αισθητήρων αντίστασης και χωρητικότητας. Γενικά οι αισθητήρες στους οποίους μετρείται η αντίσταση παρουσιάζουν γραμμικότητα των καμπυλών βαθμονόμησης για υψηλές τιμές της σχετικής υγρασίας (>95%) αλλά πρακτικά δεν μπορούν να επιτύχουν αξιόπιστες μετρήσεις για τιμές της σχετικής υγρασίας μικρότερες του 20%. Οι αισθητήρες στους οποίους μετρείται η χωρητικότητα έχουν γραμμικές καμπύλες βαθμονόμησης για μεγαλύτερο εύρος τιμών της σχετικής υγρασίας (με το άνω όριο του εύρους να είναι μικρότερο του 95%), είναι λιγότερο ευαίσθητοι σε θερμοκρασιακές μεταβολές και πρακτικά δεν επηρεάζονται από ξένες ουσίες στο εδαφικό υλικό. Και τα δύο είδη αισθητήρων έχουν χαμηλό κόστος, ελάχιστο χρόνο απόκρισης (της τάξης των δευτερολέπτων), παρουσιάζουν μικρή υστέρηση (1 έως 6% σχετικής υγρασίας), άριστη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά ( $\pm 1$  έως  $\pm 3\%$  σχετικής υγρασίας ανά έτος) και έχουν αρκετά μικρό μέγεθος ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν σε συσκευές εκτέλεσης δοκιμών μηχανικών χαρακτηριστικών για συνεχή παρακολούθηση της μύζησης, ή στο ύπαιθρο για μακροχρόνια, συνεχή παρακολούθηση της μύζησης επιτόπου. Όταν προβλέπεται ιδιαίτερη μηχανική καταπόνηση του αισθητήρα, αυτός πρέπει να περιβάλλεται από κάποιο προστατευτικό κάλυμμα, το οποίο συνήθως είναι ένα πλέγμα από πλαστικό ή ανοξείδωτο χάλυβα. Σήμερα διατίθενται εμπορικά διάφοροι τύποι αισθητήρων με ακρίβειες που κυμαίνονται από  $\pm 1$  έως  $\pm 3\%$  σχετικής υγρασίας ανάλογα με την εφαρμογή και το κόστος. Γενικά η ακρίβειά τους γίνεται μικρότερη στα άκρα του εύρους μετρήσεων (σχετική υγρασία <10% ή >95%). Περισσότερα για την ακρίβεια και την υστέρηση στις καμπύλες βαθμονόμησης των οργάνων του συγκεκριμένου τύπου και τη σύγκριση των μετρήσεων τους με άλλου είδους ψυχρόμετρα μπορούν να βρεθούν στους Albrecht, et al. (2003).

### 3.6.7 Αισθητήρες οργανικών μέσων

Οι Siemens & Blatz (2005) αναφέρουν τη χρήση ενός νέου τύπου οργάνου για τη μέτρηση της ολικής μύζησης των εδαφικών υλικών μέσω της μέτρησης της σχετικής υγρασίας. Το όργανο αποτελείται από μία μικρή χαλύβδινη ράβδο η οποία περιβάλλεται από κρυστάλλους οργανικής και μη οργανικής σύστασης. Οι κρύσταλλοι οργανικής σύστασης προέρχονται από τις ίνες ενός φυτού νοτιοαφρικανικής προέλευσης και ο όγκος τους έχει την ιδιότητα να μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές της σχετικής υγρασίας στον περιβάλλοντα αέρα. Μετρητές παραμόρφωσης (strain gauges) επί της χαλύβδινης ράβδου επιτρέπουν τη μέτρηση της διόγκωσης ή της συρρίκνωσης των οργανικής σύστασης κρυστάλλων και από αυτήν μπορεί να προσδιοριστεί η τιμή της σχετικής υγρασίας εάν έχει γίνει βαθμονόμηση για γνωστές τιμές της σχετικής υγρασίας. Ο αισθητήρας διατίθεται εμπορικά με ή χωρίς προστατευτικό κάλυμμα με αναφερόμενη ικανότητα μέτρησης της σχετικής υγρασίας από 0% έως 100% με ακρίβεια  $\pm 3\%$  (περιλαμβάνει φαινόμενα μή γραμμικότητας, υστέρησης και επαναληψιμότητας) και ευαισθησία 0.01% για ολόκληρο το εύρος τιμών μέτρησης της σχετικής υγρασίας. Η καμπύλη βαθμονόμησης δίνεται γραμμική για όλο το εύρος τιμών μέτρησης της σχετικής υγρασίας. Παρά την οργανική σύσταση των κρυστάλλων, τέτοια όργανα έχουν χρησιμοποιηθεί συνεχώς ακόμα και για 10 χρόνια για τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας, σε περιβάλλοντα μάλιστα που συνήθη ψυχρόμετρα δεν θα μπορούσαν να λειτουργούν αξιόπιστα έστω και για μικρότερα χρονικά διαστήματα.

Αισθητήρας του είδους αυτού τροποποιήθηκε από τους Siemens & Blatz (2005) έτσι ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί μέσα σε δοκίμιο τριαξονικής δοκιμής που μορφώνεται ακόμα και με συμπίκνωση. Η αυξημένη ικανότητα διατήρησης της μηχανικής ακεραιότητας του αισθητήρα (ακόμα και αν συμπυκνώνεται το περιβάλλον εδαφικό υλικό) εξασφαλίστηκε με την τοποθέτηση ενός μεταλλικού πλέγματος γύρω από τους κρυστάλλους, το οποίο επιτρέπει την ανταλλαγή αέρα μεταξύ αυτών και του περιβάλλοντος εδαφικού υλικού ώστε να μετρείται η μύζηση, αλλά αποτρέπει την επαφή του ίδιου του εδαφικού υλικού με το υλικό του αισθητήρα, κάτι το οποίο θα αλλοίωνε τη μέτρηση. Στη συγκεκριμένη διαμόρφωση λοιπόν, ο αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και για μετρήσεις της μύζησης στο εσωτερικό δοκιμίου δοκιμής προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών, όπως η τριαξονική δοκιμή, για τη συνεχή μέτρηση της μύζησης κατά τη διάρκεια της δοκιμής αφού έχει πολύ μικρό μέγεθος (7.7mm διάμετρος και 37.5mm μήκος). Οι Siemens & Blatz (2005) πραγματοποίησαν βαθμονόμηση για το εύρος τιμών σχετικής υγρασίας 33% έως 100% επιβεβαιώνοντας τη γραμμικότητα της καμπύλης

βαθμονόμησης, παρόλο που οι μετρήσεις της μύζησης σε εδαφικά υλικά που αναφέρουν περιορίζεται στο εύρος 1000 έως 4000 kPa. Για αυτό το εύρος ωστόσο αναφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια από εκείνη του κατασκευαστή.

### 3.6.8 Σχολιασμός της μεθόδου

Τα ψυχρόμετρα μετρούν *ολική μύζηση*. Γι' αυτό θα πρέπει πάντοτε να επιδιώκεται η ταυτόχρονη μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού, ή τουλάχιστον να γίνεται μία εκτίμηση της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης στο επίπεδο μύζησης που αντιστοιχεί στη μετρούμενη τιμή της ολικής μύζησης, και σε κάθε περίπτωση κατά την αξιολόγηση τέτοιων μετρήσεων να υπάρχει επίγνωση ότι πρόκειται για τιμές της ολικής μύζησης. Από την άλλη πλευρά, στο εύρος τιμών της μύζησης για το οποίο υπάρχουν και όργανα ή μέθοδοι που μπορούν να μετρούν τη μύζηση εδαφικού σκελετού, τα ψυχρόμετρα προσφέρουν έναν εναλλακτικό τρόπο μέτρησης της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης, από τη διαφορά ολικής μύζησης και μύζησης εδαφικού σκελετού (βλ. §3.8).

Γενικά επιτρέπουν μετρήσεις σε πολύ μεγάλο εύρος τιμών της μύζησης και μάλιστα με χρόνους επίτευξης μέτρησης που κυμαίνονται από λεπτά της ώρας έως μία ώρα. Επίσης, τα ψυχρόμετρα φαινομένου Peltier, οι αισθητήρες αντίστασης/χωρητικότητας πολυμερών και οι αισθητήρες οργανικών μέσων έχουν αρκετά μικρό μέγεθος ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν στο εσωτερικό δοκιμίων για την παρακολούθηση της μύζησης κατά τη διάρκεια δοκιμών προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών μή κορεσμένων εδαφών. Οι ίδιοι αισθητήρες επίσης επιτρέπουν τη μέτρηση της ολικής μύζησης επιτόπου, ακόμα και στα πλαίσια μακροχρόνιας παρακολούθησης.

Επειδή τα ψυχρόμετρα βασίζονται στη μέτρηση της σχετικής υγρασίας για τον προσδιορισμό της μύζησης των εδαφικών υλικών, είναι πολύ ευαίσθητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Γι' αυτό συνιστάται ο έλεγχος της θερμοκρασίας στο χώρο πραγματοποίησης της μέτρησης. Αυτό μπορεί να αποτελεί ιδιότητα της συσκευής, όπως συμβαίνει με κάποιες παραλλαγές των υγρομέτρων ψυχρού κατόπτρου, ή μπορεί να πρέπει να εξασφαλιστεί από το χρήστη με την τοποθέτηση οργάνου μέτρησης και δείγματος μέσα σε θερμομονωμένο δοχείο ή μέσα σε υδατοστεγανό δοχείο και όλο αυτό μαζί μέσα σε λουτρό σταθερής θερμοκρασίας. Εναλλακτικά, όταν δεν είναι δυνατός ο έλεγχος της θερμοκρασίας (π.χ. σε επιτόπου μετρήσεις) θα πρέπει να

μετρείται και να καταγράφεται και η θερμοκρασία κατά το χρόνο μέτρησης, ώστε, μέσω της κατάλληλης βαθμονόμησης του οργάνου για διάφορες θερμοκρασίες, να μπορεί να γίνει διόρθωση των μετρήσεων ως προς τη θερμοκρασία.

Σε ό,τι αφορά τη βαθμονόμηση των συσκευών της συγκεκριμένης κατηγορίας, είναι σκόπιμο να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για την προσεκτική παρασκευή των υδατικών διαλυμάτων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της σχετικής υγρασίας, όπως περιγράφεται και στο Κεφ. 4, και βέβαια να εξασφαλίζεται ο κατάλληλος έλεγχος της θερμοκρασίας ή, όπως προαναφέρθηκε, να γίνεται βαθμονόμηση για διάφορες θερμοκρασίες. Δεδομένης της τάσης για συστηματική μεταβολή της καμπύλης βαθμονόμησης με το χρόνο για τις περισσότερες κατηγορίες οργάνων, επιβάλλεται η επανάληψη της βαθμονόμησης σε τακτά χρονικά διαστήματα, προκειμένου για μετρήσεις εργαστηρίου, ή η εκτίμηση της μεταβολής της καμπύλης βαθμονόμησης με το χρόνο πριν την εγκατάσταση ενός τέτοιου οργάνου για μακροχρόνιες μετρήσεις επιτόπου.

Στον Πίν. 3.9 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά της μεθόδου μέτρησης της μύζησης μέσω μέτρησης της σχετικής υγρασίας.

**Πίνακας 3.9.** Συνοψιση χαρακτηριστικών των διαφόρων επιμέρους μεθόδων μέτρησης της μύζησης μέσω μέτρησης της σχετικής υγρασίας.

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Είδος μετρούμενης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Ψυθρόμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης	NAI	OXI	100 – 70000 kPa	Ολική μύζηση	Λεπτά έως μία ώρα
Ψυθρόμετρα θερμικού ζεύγους	NAI	NAI	100 – 8000 kPa	Ολική μύζηση	Λεπτά έως μία ώρα
Υγρόμετρα σημείου δρόσου	NAI	NAI	100 – 8000 kPa	Ολική μύζηση	Λεπτά έως μία ώρα
Υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου	NAI	OXI	100 – 450000 kPa	Ολική μύζηση	Λεπτά
Αισθητήρες αντίστασης/ χωρητικότητας πολυμερών	NAI	NAI	1000 – 1000000 kPa	Ολική μύζηση	Δευτερόλεπτα
Αισθητήρες οργανικών μέσων	NAI	NAI	1000 – 1000000 kPa	Ολική μύζηση	Λεπτά

### 3.7 ΤΕΝΣΙΟΜΕΤΡΑ (TENSIO METERS)

#### 3.7.1 Εισαγωγή

Τα τενσιόμετρα αποτελούν όργανα τα οποία μετρούν απευθείας την αρνητική πίεση πόρων ή τη μύζηση των εδαφικών υλικών. Αποτελούνται από ένα πορώδες άκρο από κεραμικό υλικό, ένα δοχείο νερού πίσω από αυτό και ένα όργανο μέτρησης της πίεσης. Στην απλούστερη δυνατή διάταξή τους, το δοχείο νερού είναι ένας πλαστικός σωλήνας (εύκαμπτος ή άκαμπτος), με το πορώδες άκρο στη μία του άκρη και το όργανο μέτρησης της πίεσης στην άλλη (Σχ. 3.15α). Το πορώδες άκρο βρίσκεται σε επαφή με το εδαφικό υλικό στο οποίο επιθυμείται η μέτρηση της μύζησης. Το δοχείο του νερού εξασφαλίζει την επικοινωνία του νερού μέσα στο όργανο και τη συνέχειά του μεταξύ πορώδους άκρου και οργάνου μέτρησης της πίεσης. Το όργανο μέτρησης της πίεσης μπορεί να είναι ένα μανόμετρο ή ένας μορφοτροπέας (transducer). Βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία των οργάνων αυτών είναι η μεγάλη πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού του πορώδους άκρου και η αποτροπή εμφάνισης αέρα μέσα στο δοχείο του νερού. Για να γίνει η μέτρηση της μύζησης του εδάφους, πρέπει να μετακινηθεί νερό από το όργανο προς το έδαφος, ή αντίστροφα, μέχρι την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας.

Εάν η μύζηση του εδαφικού υλικού με το οποίο έρχεται σε επαφή το πορώδες άκρο του τενσιομέτρου είναι μεγαλύτερη από την πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού του πορώδους άκρου, τότε θα αρχίσει να εισέρχεται αέρας μέσα στο δοχείο του νερού. Ακόμα και για τιμές της μύζησης μικρότερες της πίεσης διείσδυσης αέρα του υλικού του πορώδους άκρου, οι οποίες όμως διατηρούνται για μεγάλο χρονικό διάστημα (όπως π.χ. σε μόνιμα τοποθετημένα όργανα για μετρήσεις πεδίου), είναι δυνατόν να διηθηθεί αέρας διά μέσω του πορώδους άκρου και να συγκεντρωθεί στο δοχείο νερού. Γι' αυτό, ζητούμενα είναι, αφενός η υψηλή πίεση διείσδυσης αέρα, αφετέρου η ικανότητα απομάκρυνσης τυχόν αέρα πίσω από το πορώδες άκρο και μέσα στο δοχείο νερού. Υπάρχουν τενσιόμετρα με διατάξεις οι οποίες επιτρέπουν την πλήρωση του δοχείου νερού όταν έχει εμφανιστεί αέρας μέσα σε αυτό (Σχ. 3.28β). Το υλικό του πορώδους άκρου έχει μικρούς πόρους εντός των οποίων διατηρείται η συνέχεια της υγρής φάσης χωρίς να μπορεί να διεισδύσει αέρας όσο η μύζηση παραμένει μικρότερη της πίεσης διείσδυσης αέρα. Το νερό λοιπόν στους πόρους του πορώδους άκρου λειτουργεί σαν μία μεμβράνη που εξασφαλίζει ότι μπορεί να υπάρξει ανταλλαγή νερού μεταξύ πορώδους άκρου-δοχείου νερού και του εδαφικού υλικού στο οποίο επιθυμείται η μέτρηση, χωρίς όμως κίνηση και αέρα. Από την άλλη πλευρά, οι πόροι του υλικού του πορώδους άκρου δεν είναι τόσο μικροί που να εμποδίζουν την



κίνηση τυχόν διαλυμένων ουσιών στο νερό των πόρων του εδάφους με αποτέλεσμα τα τενσιόμετρα να μετρούν μύζηση εδαφικού σκελετού.

Ο σπουδαιότερος παράγοντας εμφάνισης φυσαλίδων αέρα μέσα στο δοχείο νερού των τενσιομέτρων προέρχεται από τη φαινόμενη σπηλαιώση κατά τη μείωση της πίεσης του νερού μέσα στο δοχείο, καθώς αυτή τείνει να εξισωθεί με τη μύζηση του εδαφικού υλικού. Γι' αυτό το λόγο λοιπόν, ένας από τους βασικούς τρόπους περιορισμού των προβλημάτων που σχετίζονται με την εμφάνιση αέρα μέσα στα δοχεία νερού των τενσιομέτρων είναι ο περιορισμός του όγκου του νερού του δοχείου στον ελάχιστο δυνατό με τη συνακόλουθη τοποθέτηση του οργάνου μέτρησης της μύζησης όσο πιο κοντά στο πορώδες άκρο γίνεται. Σε συμφωνία μάλιστα με τα αναφερόμενα στην §2.3.5 αλλά και στην §3.7.3, η βελτίωση της συμπεριφοράς των οργάνων ως προς αυτό το σημείο επέρχεται και με την προσεκτική επεξεργασία της εσωτερικής επιφάνειας του δοχείου νερού, τη χρήση απεσταγμένου, απιονισμένου, απαερωμένου νερού για την πλήρωσή του και την συμπίεση του νερού του δοχείου πριν την τοποθέτηση του τενσιομέτρου για μέτρηση της μύζησης.

Υπάρχουν τρία είδη τενσιομέτρων: α) τα τενσιόμετρα με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα (βλ. §3.7.2), β) τα τενσιόμετρα με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα (βλ. §3.7.3), και γ) τα ωσμωτικά τενσιόμετρα (βλ. §3.7.4). Επίσης κάθε συμβατικό πιεζόμετρο κλειστού τύπου, το οποίο προορίζεται για τη μέτρηση της θετικής πίεσης πόρων, μπορεί να μετρήσει και αρνητική πίεση πόρων ή μύζηση, εφόσον το πορώδες άκρο του έχει επαρκώς υψηλή τιμή πίεσης διείσδυσης αέρα, έχει ληφθεί μέριμνα για την ανυπαρξία αέρα στο δοχείο νερού πίσω από το πορώδες άκρο, και το μανόμετρο ή ο μορφοτροπέας επιτρέπουν την ανάγνωση αρνητικών τιμών πίεσης. Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται αναφορά σε κάθε ένα από τα προαναφερθέντα είδη τενσιομέτρων αλλά και τα συμβατικά πιεζόμετρα κλειστού τύπου (βλ. §3.7.5).

### **3.7.2 Τενσιόμετρα με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα**

#### **3.7.2.1 Αρχή της μεθόδου**

Η αρχή μέτρησης της μύζησης από το τενσιόμετρο είναι ίδια με εκείνη της μεθόδου μεμβράνης ή πορολίθου (βλ. §3.3). Αντίθετα όμως από την εργαστηριακή μέθοδο μεμβράνης ή πορολίθου

όπου το δοκίμιο επικάθεται του πορώδους άκρου, στα тенσιόμετρα γίνεται διείσδυση του οργάνου στο έδαφος ή απλή επαφή του με το δοκίμιο, οπότε το πορώδες άκρο δεν είναι επίπεδο αλλά έχει το σχήμα που επιτρέπει τη διείσδυση ή την καλύτερη δυνατή επαφή με το έδαφος. Στις συνήθεις διατάξεις, λόγω του μεγάλου όγκου του νερού στο δοχείο πίσω από το πορώδες άκρο, η πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού από το οποίο έχει κατασκευαστεί αυτό περιορίζεται στα 100 kPa (όπως στη μέθοδο μεμβράνης). Η διάταξη μέτρησης στη βασική της μορφή περιγράφηκε ήδη στην §3.7.1.

Κατά την τοποθέτηση των οργάνων του τύπου για την πραγματοποίηση της μέτρησης, το πορώδες άκρο είτε καλύπτεται με πολύ αργιλικού υλικού πριν την τοποθέτησή του, ή μέσα στην οπή, στην οποία διεισδύει το όργανο, τοποθετείται πολύς αργιλικού υλικού και μετά την τοποθέτηση του οργάνου καλύπτεται η υπόλοιπη οπή με κάποιο υλικό που αποτρέπει την κίνηση νερού από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το πορώδες άκρο. Η παρεμβολή του αργιλικού πολτού είναι κρίσιμη για την εξασφάλιση καλής επαφής πορώδους άκρου-εδαφικού υλικού<sup>17</sup>, όπως συμβαίνει και στα συμβατικά πιεζόμετρα κλειστού τύπου για μέτρηση θετικής πίεσης πόρων. Αυτό έχει ήδη επιδειχθεί στο παράδειγμα χρήσης των τεμαχίων γύψου αλλά και των тенσιόμετρων στην §3.5.2.3 (Φωτ. 3.8στ και 3.8ζ).

Τα тенσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα διακρίνονται σε δύο είδη: τα тенσιόμετρα για μετρήσεις της μύζησης επιτόπου και τα тенσιόμετρα για μετρήσεις στο εργαστήριο. Τα тенσιόμετρα για μετρήσεις της μύζησης επιτόπου διακρίνονται στα тенσιόμετρα μακροχρόνιας παρακολούθησης και τα тенσιόμετρα ταχείας μέτρησης.

Το тенσιόμετρο για μετρήσεις επιτόπου αποτελείται από έναν σωλήνα στη μία άκρη του οποίου υπάρχει το πορώδες άκρο και στην άλλη το όργανο μέτρησης με το δοχείο του νερού να παρεμβάλλεται μεταξύ πορώδους άκρου και οργάνου μέτρησης (βλ. Σχ. 3.28). Το μέγιστο μήκος των οργάνων δεν ξεπερνά συνήθως τα 1.5 m αν και είναι δυνατή η επιμήκυνση των οργάνων αυτών με τίμημα τη μείωση της μέγιστης μύζησης που μπορούν να μετρήσουν, κύρια λόγω αύξησης της απόστασης μεταξύ πορώδους άκρου και οργάνου μέτρησης της μύζησης, και δευτερευόντως λόγω αύξησης του όγκου του νερού στο δοχείο. Αν το όργανο μέτρησης βρισκόταν στο ίδιο ύψος με το πορώδες άκρο (π.χ. αν το όργανο τοποθετείτο οριζόντια), τότε η

---

<sup>17</sup> Προφανώς δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποιο κοκκώδες υλικό όπως π.χ. άμμος στη θέση του αργιλικού πολτού, αφού αυτό δεν θα επέτρεπε τη διάδοση της μύζησης από το εδαφικό υλικό στο πορώδες άκρο του тенσιόμετρου.

μέγιστη μύζηση που θα μπορούσε θεωρητικά να μετρηθεί θα ήταν όση η πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού του πορώδους άκρου του τενσιομέτρου. Στην πράξη κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατόν γιατί, καθώς η μύζηση του εδαφικού υλικού αυξάνει προσεγγίζοντας τα 100 kPa, αέρας αρχίζει να συγκεντρώνεται στο δοχείο νερού με αποτέλεσμα ώσπου να φτάσει η μύζηση στην τιμή των 100 kPa να μην είναι πια δυνατές οι μετρήσεις με το όργανο. Έτσι, σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη τιμή της μύζησης που θα μπορούσε να μετρηθεί θα ήταν το πολύ 90-95 kPa. Αν αντίθετα υπάρχει απόσταση καθ' ύψος μεταξύ πορώδους άκρου και οργάνου μέτρησης της μύζησης (π.χ. αν το όργανο έχει τοποθετηθεί κατακόρυφα, βλ. Σχ. 3.28α), τότε η μέγιστη μετρούμενη μύζηση μειώνεται κατά μέγεθος ίσο με την υψομετρική διαφορά πορώδους άκρου-οργάνου μέτρησης της πίεσης εκφρασμένη σε όρους πίεσης (περί τα 10 kPa για κάθε 1 m). Όταν ενδιαφέρει η μέτρηση της μύζησης πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μικρού μήκους τενσιόμετρο με πρόσβαση που δημιουργείται από την επιφάνεια του εδάφους, χωρίς πρακτικά να περιορίζεται η ικανότητα μέτρησης του οργάνου. Αντίθετα αν δημιουργηθεί πρόσβαση στη θέση μέτρησης από την επιφάνεια και αυτή βρίσκεται πολύ βαθιά, τότε η ικανότητα μέτρησης του οργάνου θα περιοριζόταν σημαντικά. Για παράδειγμα, αν η επιθυμητή θέση μέτρησης βρισκόταν στα 5 m βάθος, τότε η μέγιστη μετρούμενη μύζηση από ένα τενσιόμετρο με το πορώδες άκρο στο βάθος αυτό και το όργανο μέτρησης της πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους θα ήταν το πολύ 40-45 kPa. Αυτός είναι ένας από τους κύριους λόγους που χρησιμοποιούνται μορφοτροπείς στη θέση των μανομέτρων. Όταν χρησιμοποιείται μορφοτροπέας, αυτός μπορεί να τοποθετηθεί πολύ κοντά στο πορώδες άκρο, και ολόκληρο αυτό το μικρού μήκους όργανο να τοποθετηθεί εντός προετοιμασμένης οπής με μόνο το καλώδιο σύνδεσης με τον μορφοτροπέα να φτάνει στην επιφάνεια για την προσαρμογή εκεί κάποιας συσκευής για την ανάγνωση των μετρήσεων (βλ. Σχ. 3.28β). Έτσι σε οποιοδήποτε βάθος και αν τοποθετηθεί αυτό το όργανο, θα μπορεί να εκμεταλλεύεται το πλήρες εύρος μετρήσεων μέχρι τα 90-95 kPa. Το τίμημα βέβαια σε αυτή την περίπτωση είναι η αδυναμία πρόσβασης μέχρι το δοχείο νερού του οργάνου με αποτέλεσμα την αδυναμία επαναπλήρωσής του σε περίπτωση ανάπτυξης τόσο υψηλών τιμών της μύζησης που να προκληθεί αποκορεσμός<sup>18</sup>.

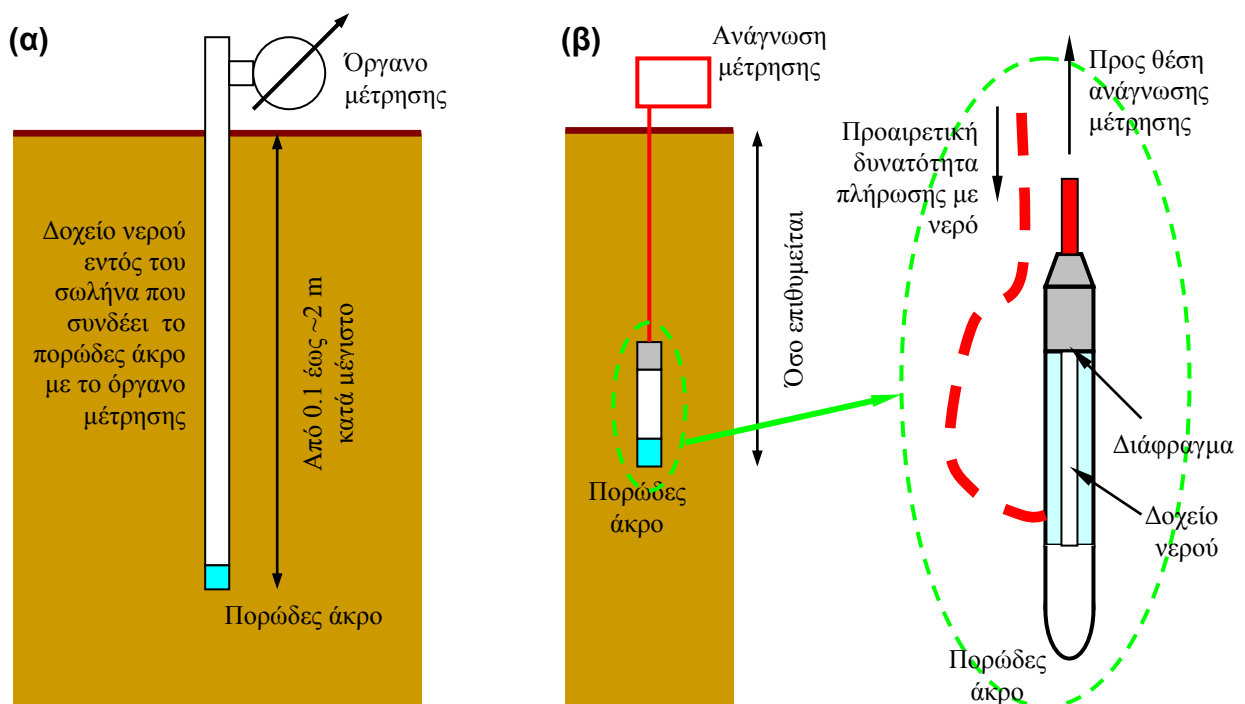
<sup>18</sup> Η εμπειρία δείχνει ότι αυτός είναι και ο κύριος παράγοντας που μπορεί να προκαλέσει την μόνιμη διατάραξη μετρήσεων τέτοιων τενσιομέτρων αλλά και πιεζομέτρων δονούμενης χορδής σε περίπτωση τοποθέτησης σε περιβάλλοντα όπου μπορεί να αναπτυχθεί μύζηση μεγαλύτερη των 100 kPa αφού μετά την –έστω και πρόσκαιρη– ανάπτυξη τέτοιων τιμών μύζησης, για να αποκατασταθεί η ικανότητα μετρήσεων του τενσιομέτρου ή του πιεζομέτρου δονούμενης χορδής πρέπει να αναπτυχθούν πολύ μεγάλες τιμές θετικής πίεσης πόρων στην ίδια θέση.

Τα όργανα αυτά εγκαθίστανται και παραμένουν τοποθετημένα για μακροχρόνιες μετρήσεις της μύζησης. Ακόμα λοιπόν και αν η μύζηση του εδαφικού υλικού δεν ξεπερνά την πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού του πορώδους άκρου, λόγω του μεγάλου όγκου νερού στο δοχείο μεταξύ πορώδους άκρου και οργάνου μέτρησης, συχνά διηθείται αέρας, ενώ αρχίζει να συμβαίνει και φαινόμενη σπηλαιώση στο νερό του δοχείου. Υπάρχει λοιπόν η ανάγκη τακτικής επαναπλήρωσης του δοχείου του νερού και εξάλειψης του εγκλωβισμένου αέρα. Έτσι αναπτύχθηκε μία παραλλαγή των οργάνων στην οποία υπάρχει στην κορυφή του σωλήνα (όπου συγκεντρώνονται και οι φυσαλίδες που εμφανίζονται στο δοχείο του νερού) ένα δοχείο με επιπλέον νερό το οποίο χρησιμοποιείται για την επαναπλήρωση του δοχείου του νερού χωρίς ανάγκη εξαγωγής του тенσιομέτρου από τη θέση μέτρησης (τα тенσιομέτρα αυτά είναι γνωστά με τον αγγλικό όρο jet-fill tensiometers). Στο δοχείο αυτό υπάρχει και ενσωματωμένη χειροκίνητη αντλία για την εξαγωγή του αέρα που έχει εμφανιστεί μέσα στο όργανο. Βασική προϋπόθεση για την πραγματοποίηση ορθών μετρήσεων της μύζησης με τα όργανα αυτού του τύπου, είναι να μην συνεχίζεται η ταχεία δημιουργία φυσαλίδων αέρα μέσα στα όργανα μετά την επαναπλήρωση του δοχείου του νερού. Αν κάτι τέτοιο συμβαίνει, τότε πιθανότατα η μύζηση του εδαφικού υλικού είναι μεγαλύτερη από εκείνη που μπορεί να μετρήσει το όργανο, ή σε αυτό το επίπεδο μύζησης το συγκεκριμένο εδαφικό υλικό έχει αρκετά χαμηλό βαθμό κορεσμού και γι' αυτό είναι μεγαλύτερη η διήθηση αέρα διά μέσω του πορώδους άκρου. Και στις δύο περιπτώσεις οι μετρούμενες τιμές της μύζησης θα είναι παραπλανητικές. Στην Φωτ. 3.13 παρουσιάζεται ένα τέτοιο тенσιομετρο της εταιρείας ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Soilmoisture Equipment Corp.

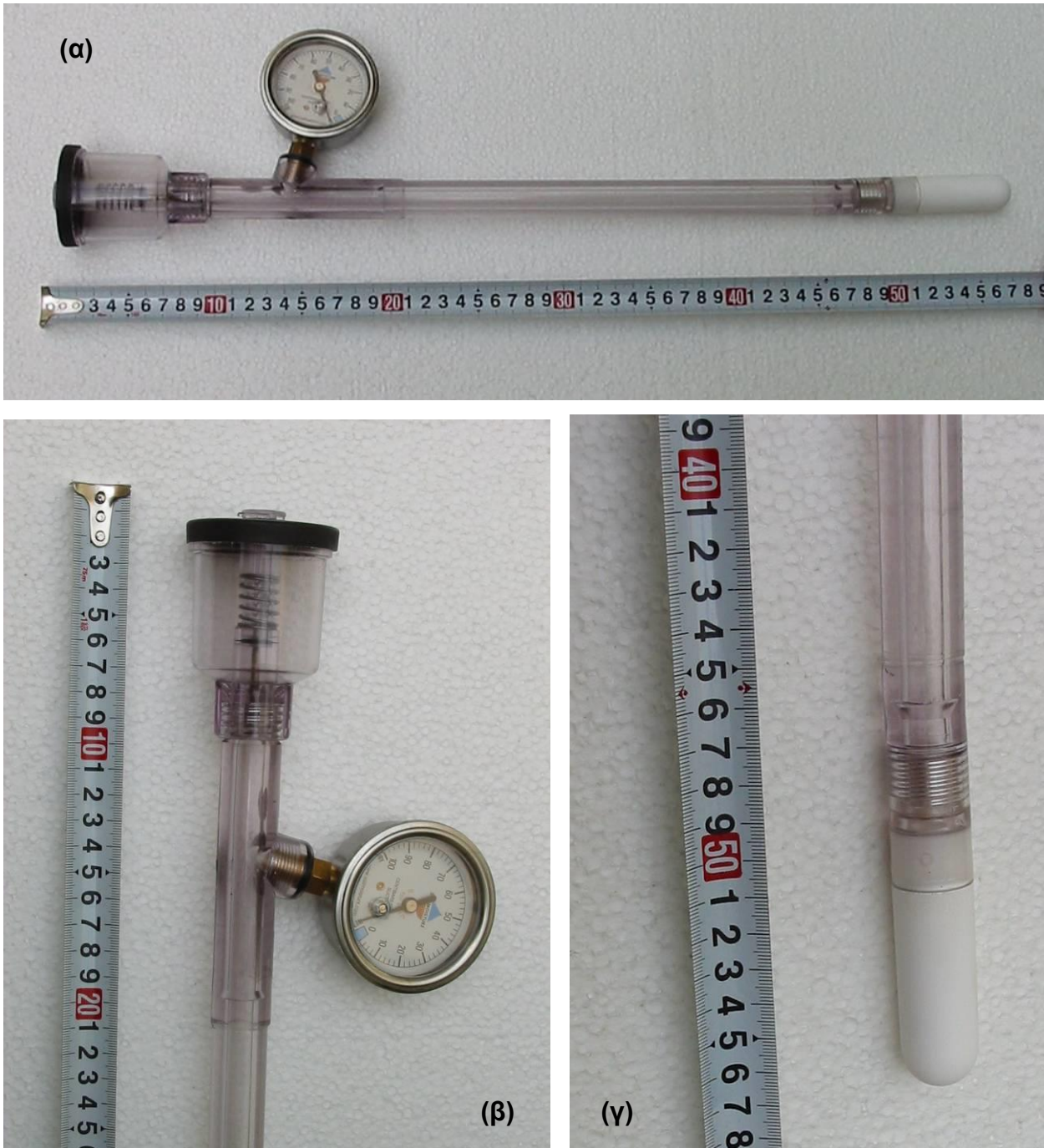
Μία άλλη παραλλαγή тенσιομέτρων για μετρήσεις της μύζησης επιτόπου είναι τα тенσιομέτρα τύπου Quickdraw. Τα όργανα αυτά προορίζονται για ταχείες μετρήσεις της μύζησης και γι' αυτό δεν τοποθετούνται μόνιμα στη θέση μέτρησης αλλά μπορούν να τοποθετούνται και στη συνέχεια να αφαιρούνται για πραγματοποίηση νέας μέτρησης σε άλλη θέση. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι μετά την τοποθέτησή τους στη θέση μέτρησης δεν χρειάζεται αναμονή μέχρι την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας αλλά επιτάχυνσή της μέσω της προσρόφησης νερού στο όργανο με επέμβαση του χρήστη. Ο χρόνος επίτευξης μέτρησης με αυτά τα όργανα είναι της τάξης του 1'. Τέτοιο тенσιομετρο διαθέτει και το Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής (Φωτ. 3.14). Το όργανο αυτό χρησιμοποιήθηκε για επιτόπου μετρήσεις της μύζησης στη θέση απόληξης των δειγμάτων Μάργας Κορίνθου που χρησιμοποιήθηκαν στην εργαστηριακή διερεύνηση στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής (βλ. Κεφ. 14). Στην Φωτ. 3.15

απεικονίζεται το ίδιο όργανο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. Και τα δύο όργανα (Φωτ. 3.14 και 3.15) είναι κατασκευής Soilmoisture Equipment Corp.

Τέλος, εκτός από τα προαναφερθέντα είδη τενσιόμετρων, τα οποία προορίζονται για μετρήσεις της μύζησης επιτόπου, υπάρχουν και μικρότερα τενσιόμετρα βασιζόμενα στην ίδια αρχή μέτρησης που προορίζονται για τη μέτρηση της μύζησης στο εργαστήριο. Η βασική διαφορά τους είναι ότι το πορώδες άκρο είναι επίπεδο στην άκρη του ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί επί ενός δοκιμίου εδαφικού υλικού για την πραγματοποίηση της μέτρησης. Γενικά υπόκεινται στους ίδιους περιορισμούς με τα τενσιόμετρα για μετρήσεις της μύζησης επιτόπου με τη διαφορά ότι είναι λιγότερο ευαίσθητα στη φαινόμενη σπηλαιώση λόγω του μικρότερου όγκου του νερού στο δοχείο μεταξύ πορώδους άκρου και οργάνου μέτρησης της μύζησης. Στην Φωτ. 3.16 παρουσιάζεται τενσιόμετρο τέτοιου τύπου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Soilmoisture Equipment Corp., ενώ έχει γίνει ήδη αναφορά σε αυτό στο παράδειγμα στην §3.5.2.3 και δείχνεται και στη Φωτ. 3.8.



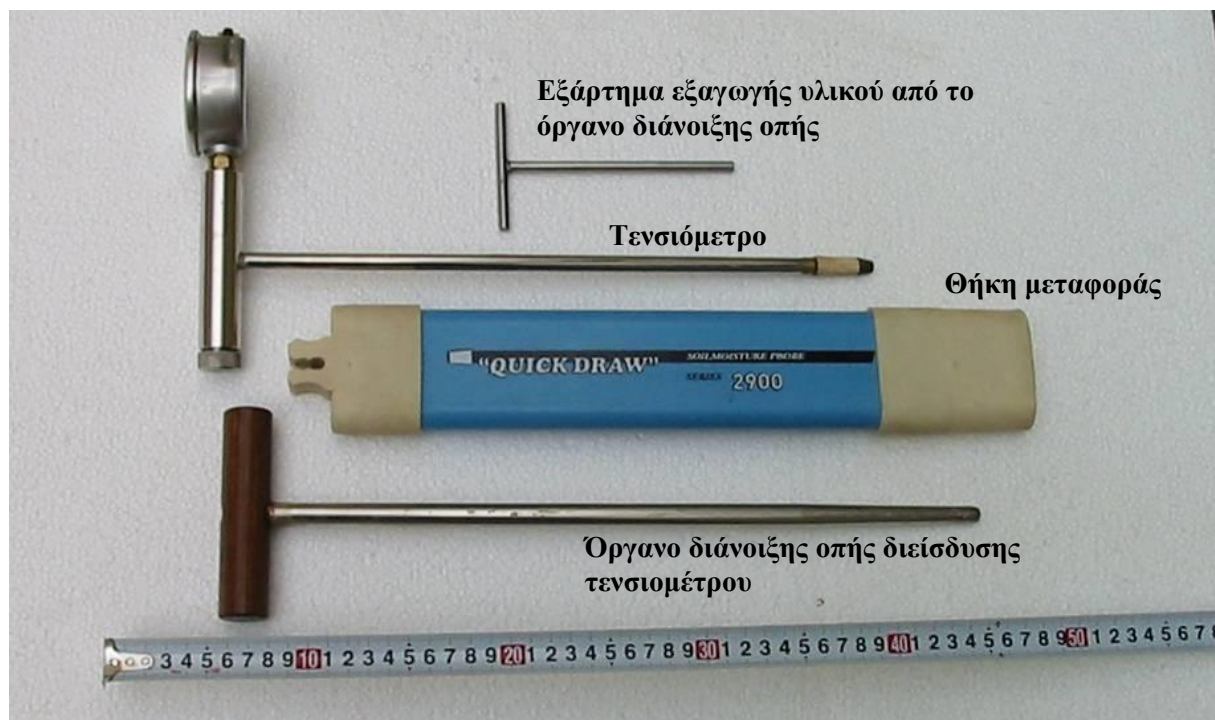
**Σχήμα 3.28.** Αρχή της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με τενσιόμετρα με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα, α) με το όργανο μέτρησης στην επιφάνεια του εδάφους, και β) με το όργανο μέτρησης κοντά στο πορώδες άκρο και τη θέση ανάγνωσης ή καταγραφής στην επιφάνεια του εδάφους.



**Φωτογραφία 3.13.** Φωτογραφία τενσιομέτρου επιτόπου μετρήσεων τύπου Jet-Fill της εταιρείας ΕΛΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Soilmoisture Equipment Corp. α) ολόκληρο το όργανο, β) λεπτομέρεια του δοχείου νερού στο επάνω μέρος του οργάνου για επαναπλήρωση (διακρίνεται η χειροκίνητη αντλία με το ελατήριο στο εσωτερικό του κεντρικού σωλήνα για εξαγωγή του αέρα και εισαγωγή νερού), και γ) το πορώδες άκρο πίεσης διείσδυσης αέρα 100 kPa στο κάτω άκρο του οργάνου.



**Φωτογραφία 3.14.** Επιτόπου μέτρηση της μύζησης με тенσιόμετρο τύπου Quickdraw του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής (κατασκευής Soilmoisture Equipment Corp.) στη θέση απόληξης των δειγμάτων Μάργας Κορίνθου που χρησιμοποιήθηκαν στην εργαστηριακή διερεύνηση στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.



**Φωτογραφία 3.15.** Τенσιόμετρο τύπου Quickdraw της εταιρείας ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Soilmoisture Equipment Corp.



**Φωτογραφία 3.16.** Μικρό εργαστηριακό τενσιόμετρο της εταιρείας ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Soilmoisture Equipment Corp. τοποθετημένο στην επάνω πλευρά συμπυκνωμένου δείγματος αποσαθρωμένου σερπεντινίτη Σκύρου (διακρίνεται μόνο ο σωλήνας που συνδέει το πορώδες άκρο με το σύστημα μέτρησης λόγω της εφαρμογής υγρού υλικού για αποφυγή ξήρανσης του πορώδους άκρου) και στην πλευρά του ίδιου δείγματος πριν την εφαρμογή υγρού υλικού γύρω από το πορώδες άκρο (δεξιά).

### 3.7.2.2 Εξέλιξη της μεθόδου

Οι Gardner, et al. (1922) αναγνωρίζονται ως οι πρώτοι που ανέφεραν τη μέτρηση της μύζησης με χρήση σωλήνων με πορώδη άκρα και όργανα μέτρησης της πίεσης στα άκρα τους και περιέγραψαν πλήρως μία διάταξη που είναι κατά βάση η ίδια με αυτή των σύγχρονων τενσιομέτρων. Ο Or (2001) ωστόσο αναφέρει ότι και άλλοι ερευνητές είχαν παρουσιάσει παρόμοιες διατάξεις για τη μέτρηση της μύζησης νωρίτερα (Livingston, 1908 & 1918, και



Livingston & Hawkins, 1915). Η ονομασία των οργάνων αυτών στα αγγλικά, «tensiometer», προέρχεται από τη λέξη εφελκυσμός, «tension», καθώς θεωρείτο αρχικά ότι μετρούσαν την εφελκυστική τάση στο νερό των πόρων του εδαφικού υλικού. Χάριν συμβατότητας με τον αγγλικό όρο και την υιοθέτηση του όρου «τενσιόμετρο» στα ελληνικά, στο χώρο της γεωπονικής επιστήμης, κρίθηκε σκόπιμη η διατήρησή του και στην παρούσα διατριβή. Στην ελληνική βιβλιογραφία απαντάται και ο όρος «τασίμετρο», αλλά αυτός είναι μάλλον λανθασμένος αφού δεν αποδίδει καταρχήν εννοιολογικά την φύση του μεγέθους που μετρείται με το όργανο.

Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των οργάνων του τύπου είναι ο μεγάλος όγκος του νερού που παρεμβάλλεται μεταξύ πορώδους άκρου και οργάνου μέτρησης της πίεσης. Επειδή αρχικά σε όλες τις περιπτώσεις το όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της πίεσης βρισκόταν στην επιφάνεια του εδάφους και το πορώδες άκρο βρισκόταν στο σημείο μέτρησης της μύζησης, ο Watson (1967) αναγνώρισε την επιρροή αυτής της απόστασης και σχεδίασε ένα όργανο στο οποίο η μέτρηση της πίεσης γινόταν με μορφοτροπέα, τοποθετημένο αμέσως πίσω από το πορώδες άκρο. Ο όγκος του νερού μέσα σε αυτό το όργανο ήταν πολύ μικρότερος από αυτόν σε άλλα тенσιόμετρα και ο χρόνος απόκρισης του οργάνου πολύ μικρός. Το εύρος τιμών της μύζησης για το οποίο χρησιμοποιήθηκε ωστόσο ήταν μόλις από 0 έως 3 kPa. Σήμερα βέβαια, όπως προαναφέρθηκε, όργανα τέτοιου τύπου είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα για τη μέτρηση της μύζησης σε όλο το εύρος τιμών που μπορούν να μετρηθούν από αυτή την κατηγορία οργάνων.

Οι παρατηρήσεις σε αυτή την ομάδα οργάνων έχουν δείξει ότι το εύρος ικανοποιητικής μέτρησης της μύζησης περιορίζεται μεταξύ 0 και 90 kPa (Stannard, 1992). Η ακρίβεια μέτρησης τους ωστόσο είναι η κορυφαία που έχει καταγραφεί, ειδικά μάλιστα από τα тенσιόμετρα μικρού πορώδους άκρου για μετρήσεις στο εργαστήριο και έχει βρεθεί της τάξης του  $\pm 0.05$  kPa (Yang, et al., 2004α). Ακόμα δε και για τα όργανα του τύπου που χρησιμοποιούνται για επιτόπου μετρήσεις της μύζησης, ακρίβεια της τάξης του  $\pm 1$  kPa μπορεί να επιτευχθεί με μικρή μόλις εξοικείωση με τα όργανα. Τα тенσιόμετρα αποτελούν τα πιο διαδεδομένα όργανα επιτόπου μέτρησης της μύζησης, ειδικά μάλιστα για μετρήσεις της μύζησης κοντά στην επιφάνεια πρανών για την αξιολόγηση της ευστάθειάς τους έναντι ρηχών αστοχιών (βλ. Κεφ. 6) με διατάξεις μετρήσεων πεδίου όπως αυτές που παρουσιάζονται από τους Springman, et al. (2003), Ng, et al. (2003), Li, et al. (2005), Rahardjo, et al. (2005) και Smethurst, et al. (2006). Αντίστοιχα τα тенσιόμετρα μικρού πορώδους άκρου για μετρήσεις της μύζησης στο εργαστήριο αποτελούν τα πιο διαδεδομένα όργανα μέτρησης της μύζησης σε στήλες συμπυκνωμένων εδαφών (Yang, et al., 2004β) και φυσικά προσομοιώματα πρανών υπό κλίμακα (Tami, et al., 2004).

### 3.7.2.3 Σχολιασμός της μεθόδου

Τα τενσιόμετρα μπορούν να μετρήσουν μικρές μόνο τιμές της μύζησης οι οποίες, όπως κατέληξε ο Stannard (1992), δεν ξεπερνούν πρακτικά τα 90 kPa. Ωστόσο είναι ιδιαίτερα προσιτά χάρη στο μικρό τους κόστος και ιδίως στην έκδοση Quickdraw επιτρέπουν την ιδιαίτερα ακριβή μέτρηση της μύζησης ( $\pm 1$  kPa) ακόμα και σε 1 μόλις λεπτό. Επί δεκαετίες άλλωστε υπήρξαν τα μόνα όργανα που μπορούσαν να μετρήσουν με τέτοια ακρίβεια ταχείες μεταβολές της μύζησης, είτε επιτόπου, είτε στο εργαστήριο, με μόνο περιορισμό το μικρό εύρος τιμών μύζησης που μπορούν να μετρήσουν και την απαίτηση για τακτική πλήρωση του δοχείου νερού. Ταυτόχρονα, σε όλες τις παραλλαγές τους αποτελούν όργανα αρκετά στιβαρά που δεν απαιτούν πολύπλοκους ή λεπτεπίλεπτους χειρισμούς με αποτέλεσμα να καθίστανται ιδανικά για μετρήσεις στο ύπαιθρο. Συνολικά λοιπόν, το χαμηλό τους κόστος, η απλότητα χειρισμού και η στιβαρή, ανθεκτική τους κατασκευή σε συνδυασμό με την υψηλή ακρίβεια μέτρησης και τον μικρό χρόνο επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας τα καθιστούν αρκετά ελκυστικά όργανα μέτρησης της μύζησης, ιδίως σε αρχικά στάδια της ενασχόλησης με τη μηχανική συμπεριφορά των μή κορεσμένων εδαφών και όταν στενότητα οικονομικών πόρων δεν επιτρέπει την αγορά ακριβότερου εξοπλισμού. Βασικό μειονέκτημά τους αποτελεί το πολύ στενό εύρος τιμών της μύζησης που μπορούν να μετρήσουν, το οποίο μάλιστα περιορίζεται στις χαμηλότερες τιμές της. Επίσης απαιτούν ιδιαίτερη μέριμνα για την τακτική επαναπλήρωση του δοχείου νερού. Τέλος, σε περιοχές που το νερό στο έδαφος παγώνει, ή πέφτει και διατηρείται χιόνι στην επιφάνεια του εδάφους, μπορούν να καταστραφούν λόγω πάγου (αν και η προσθήκη συνήθων αντιπαγωτικών μέσα στο νερό του δοχείου βελτιώνει την κατάσταση). Στον Πίν. 3.10 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με τενσιόμετρα με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα.

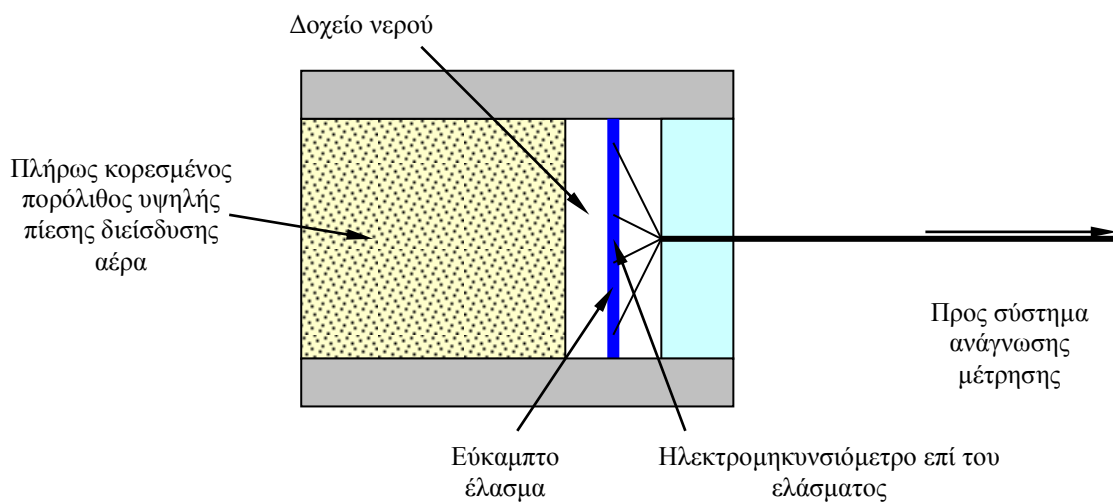
**Πίνακας 3.10.** Συνοψιση χαρακτηριστικών της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με τενσιόμετρα με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα (απλά και τύπου Quickdraw).

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Είδος μετρούμενης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Τενσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	NAI	NAI	0 - 90 kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Λεπτά (1 - 30')
Τενσιόμετρα τύπου Quickdraw	NAI	NAI	0 - 90 kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Λεπτά (2 - 10')

### 3.7.3 Τενσιόμετρα με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα

#### 3.7.3.1 Αρχή της μεθόδου

Αντίθετα από το κοινό τενσιόμετρο με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα και δοχείο νερού με αρκετά μεγάλο όγκο, στο τενσιόμετρο με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα ο όγκος του δοχείου νερού είναι ελάχιστος και η μέτρηση της μύζησης γίνεται μόνο με μορφοτροπέα. Η πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού του πορώδους άκρου φτάνει τα 1500 kPa. Όπως και στο κοινό τενσιόμετρο, το πορώδες άκρο του οργάνου έρχεται σε καλή επαφή με το εδαφικό υλικό, στο οποίο επιθυμείται η μέτρηση της μύζησης, και το όργανο αφήνεται μέχρι να εξισορροπηθεί η τιμή της μύζησης μεταξύ του εδαφικού υλικού και του νερού του δοχείου. Ανάλογα με το μέγεθος της μετρούμενης τιμής της μύζησης ο χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος φτάνοντας ακόμα και διψήφιο αριθμό ωρών. Με τα τενσιόμετρα του συγκεκριμένου τύπου έχουν καταγραφεί μετρήσεις της μύζησης ακόμα και 2 MPa. Στο Σχ. 3.29 παρουσιάζεται ενδεικτική απεικόνιση της διάταξης ενός τενσιομέτρου με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα.



**Σχήμα 3.29.** Ενδεικτική απεικόνιση της διάταξης ενός τενσιομέτρου με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα.

Οι βασικοί παράγοντες που επιτρέπουν στα τενσιόμετρα αυτά να μετρούν απευθείας τόσο υψηλές τιμές της μύζησης χωρίς να συμβαίνει φαινόμενη (ή ακόμα και πραγματική, δεδομένου του μεγέθους των τιμών της μετρούμενης μύζησης) σπηλαίωση στο νερό του δοχείου είναι:

- αυτή καθεαυτή η υψηλή τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα του υλικού του πορώδους άκρου,
- η προσεκτική κατεργασία της εσωτερικής επιφάνειας του δοχείου νερού,
- η χρήση αποκλειστικά απεσταγμένου, απιονισμένου, απαερωμένου νερού για την πλήρωση του δοχείου νερού και τον κορεσμό του πορώδους άκρου,
- η προσεκτική απαέρωση του πορώδους άκρου και του δοχείου νερού πριν από τον κορεσμό, και
- η συμπίεση του νερού του δοχείου και του πορώδους άκρου μέχρι σημαντικότερες τιμές της πίεσης πριν από τη χρήση του οργάνου για μέτρηση της μύζησης.

Η υψηλή πίεση διείσδυσης αέρα του πορώδους άκρου εξασφαλίζει από μόνη της ότι δεν μπορεί να διέλθει αέρας απευθείας μέσα στο δοχείο του νερού μέχρι αντίστοιχα υψηλές τιμές της μύζησης του εδαφικού υλικού. Μέχρι αυτές τις τιμές λοιπόν το νερό μέσα στους πολύ λεπτούς πόρους του υλικού του πορώδους άκρου μπορεί να λειτουργεί ως μεμβράνη που διαχωρίζει την αέρια φάση στο εδαφικό υλικό από το νερό του μικροσκοπικού δοχείου πίσω από το πορώδες άκρο (βλ. Πιν. 3.2 για τα χαρακτηριστικά των κεραμικών πορολίθων υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα).

Όπως εξηγήθηκε στο Κεφ. 2 (§2.3.5) η εμφάνιση φυσαλίδων αέρα ή άλλων αερίων μέσα στο νερό δεν οφείλεται τόσο σε πραγματική σπηλαιώση (μετάπτωση μορίων ενός υγρού από την υγρή κατάσταση στην αέρια λόγω μείωσης της πίεσης), όσο σε φαινόμενη σπηλαιώση. Αυτή περιλαμβάνει την εμφάνιση φυσαλίδων αερίων που είχαν διαλυθεί μέσα στο νερό και τη μεγέθυνση φυσαλίδων που είχαν εγκλωβιστεί σε κοιλότητες του δοχείου στο οποίο βρίσκεται το νερό (και οι οποίες όταν βρίσκονται σε μία κοιλότητα παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή και δεν διαλύονται στο νερό για μικρή αύξηση της πίεσης του υγρού). Χρησιμοποιώντας λοιπόν απεσταγμένο, απιονισμένο, απαερωμένο νερό σε πολύ μικρή ποσότητα (γι' αυτό και το δοχείο του νερού σε αυτά τα τενσιόμετρα είναι μικροσκοπικό) εξασφαλίζεται ότι τα φαινόμενα αυτά θα είναι πάρα πολύ μειωμένα. Μειώνονται δε ακόμα περισσότερο φροντίζοντας η εσωτερική επιφάνεια του δοχείου του νερού να είναι όσο το δυνατόν πιο λεία, ώστε να μην υπάρχουν μικροκοιλότητες όπου εγκλωβίζονται μικροφυσαλίδες, και επίσης με την απαέρωση του πορώδους άκρου και του δοχείου νερού πριν τον κορεσμό (μέσω της εφαρμογής υποπίεσης). Τέλος, για την εξασφάλιση της συντριβής τυχόν μικροφυσαλίδων που ενδέχεται να έχουν παραμείνει παρά την επεξεργασία του νερού και της εσωτερικής επιφάνειας του δοχείου, εφαρμόζεται πολύ υψηλή πίεση στο νερό του δοχείου και των πόρων του πορολίθου *διά μέσω*

του πορολίθου. Οι διάφορες τεχνικές προβλέπουν την εφαρμογή πολύ υψηλής πίεσης για μεγάλο χρονικό διάστημα ή την εφαρμογή κύκλων θετικής πίεσης μικρότερης τιμής και αρνητικής πίεσης.

### 3.7.3.2 Εξέλιξη της μεθόδου

Ο Ridley (1993) αναγνώρισε πρώτος τη σημασία του περιορισμού του όγκου του νερού μεταξύ σημείου μέτρησης και οργάνου μέτρησης αλλά εστίασε την προσοχή του και στα δύο σημεία που τονίστηκαν ήδη: α) την ποιότητα του νερού και του δοχείου που το περιέχει, και β) την πίεση διείσδυσης αέρα του πορολίθου. Σε ό,τι αφορά το πρώτο σημείο, συγκέντρωσε πρώτα αποτελέσματα μετρήσεων της εφελκυστικής αντοχής του νερού από διάφορους ερευνητές (βλ. §2.3.5) αποδεικνύοντας ότι η πραγματική εφελκυστική αντοχή του νερού δεν βρίσκεται στην τάξη μεγέθους της μύζησης που μπορούσαν να μετρήσουν τα κοινά тенσιόμετρα αλλά ήταν πολύ μεγαλύτερη. Έχοντας καταλήξει λοιπόν ότι η αδυναμία μέτρησης από τα απλά тенσιόμετρα τιμών της μύζησης μεγαλύτερων των 100 kPa δεν οφείλεται στην πραγματική σπηλαιώση του νερού του δοχείου, εστίασε την προσοχή του στον πορολίθο. Αντί για τη χρησιμοποίηση πορολίθων με πίεση διείσδυσης αέρα μόλις 100 kPa, χρησιμοποίησε κεραμικούς πορολίθους πίεσης διείσδυσης αέρα 1500 kPa. Ταυτόχρονα επέδειξε ότι η χρήση απεσταγμένου, απιονισμένου, απαερωμένου νερού σε δοχείο πολύ υψηλής ποιότητας κατασκευής, εντός του οποίου δεν θα μπορούσαν να εγκλωβιστούν μικροφουσαλίδες αέρα στις μικροκοιλότητες της επιφάνειάς του, επιτρέπει τη μέτρηση μεγαλύτερων τιμών μύζησης. Για την εξάλειψη τυχόν μικροφουσαλίδων που είχαν παραμείνει στους πόρους του πορώδους άκρου και στο δοχείο νερού φρόντισε για την πολύ υψηλή συμπίεση του νερού του δοχείου πριν από κάθε μέτρηση, ώστε ο αέρας αυτός να περάσει σε διάλυση μέσα στο νερό του δοχείου και των πόρων του πορώδους άκρου. Το πρώτο λειτουργικό тенσιόμετρο πορώδους άκρου από υλικό υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα παρουσιάστηκε από τον Ridley (1993) και τους Ridley & Burland (1993). Οι Marinho & Chandler (1994) υποστήριξαν ότι το μικρό μέγεθος των πόρων του κεραμικού πορολίθου μπορεί να εμποδίζει μέρος των διαλυμένων ουσιών στο νερό των πόρων του εδαφικού υλικού να κινηθεί κατά την επίτευξη ισορροπίας και άρα να δημιουργείται κάποια διαφορά ωσμωτικού δυναμικού, οδηγώντας τα όργανα της συγκεκριμένης κατηγορίας να μετρούν κάτι ανάμεσα στη μύζηση εδαφικού σκελετού και στην ολική μύζηση του εδαφικού υλικού. Παρόλο που η πολυετής εμπειρία από την εφαρμογή της μεθόδου μετατόπισης άξονα (όπου χρησιμοποιούνται πορολίθοι ίδιας πίεσης διείσδυσης αέρα κατασκευασμένοι από το ίδιο

υλικό) έχει δείξει ότι κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, ο Tarantino (2004β) προσπάθησε να το επιδείξει αυτό και πειραματικά εμβαπτίζοντας тенσιόμετρα διαδοχικά σε υδατικά διαλύματα και καθαρό νερό και παρατηρώντας ότι οι καταγραφόμενες μετρήσεις του οργάνου δεν αλλάζουν, οπότε οι διαλυμένες ουσίες μπορούν όντως να διέρχονται διά μέσω των πόρων του υλικού των πορωδών άκρων.

Οι Ridley & Burland (1994) παρουσίασαν τρεις εναλλακτικές μορφές του αρχικού тенσιόμετρου με διάφορα μεγέθη δοχείου νερού και πορολίθων. Στις δύο από αυτές το δοχείο νερού πίσω από το πορώδες άκρο είχε πάχος μόλις 0.1 mm και το πορώδες άκρο 2.5 mm στη μία περίπτωση και 5 mm στην άλλη, ενώ στην τρίτη περίπτωση το δοχείο νερού είχε πάχος 3 mm και ο πορόλιθος 2.5 mm. Ενώ τα δύο πρώτα тенσιόμετρα απαιτούσαν μόλις 24 h υπό πίεση 3500 kPa για την επίτευξη πλήρους κορεσμού, το τρίτο χρειαζόταν αρκετές ημέρες. Αντίστοιχα το τρίτο μπορούσε να διατηρήσει για το μικρότερο χρονικό διάστημα την καταγραφόμενη μύζηση πριν παρουσιαστεί φαινόμενη σπηλαιώση και η καταγραφόμενη τιμή μειωθεί ραγδαία στα 100 kPa, ενώ το δεύτερο μπορούσε να διατηρήσει για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα την καταγραφόμενη μύζηση πριν παρουσιαστεί φαινόμενη σπηλαιώση. Επίσης οι Ridley & Burland (1994) αναφέρουν την πρώτη απόπειρα επίδειξης χρήσης τέτοιου οργάνου για τη μέτρηση της μύζησης επιτόπου. Κατασκεύασαν μεγάλων διαστάσεων δείγμα εδαφικού υλικού (περίπου 2.5 m<sup>3</sup>) και εντός αυτού άνοιξαν οπή, εντός της οποίας τοποθετήθηκε тенσιόμετρο σε επαφή με τον πυθμένα της για τη μέτρηση της μύζησης (επιτυχάνοντας χρόνο απόκρισης 30'). Επιχείρησαν μάλιστα (από όσο γνωρίζει ο γράφων για πρώτη φορά) τη χρήση του συγκεκριμένου οργάνου για μέτρηση της ολικής μύζησης αφήνοντάς το πορώδες άκρο σε μικρή απόσταση από τον πυθμένα της οπής χωρίς να ακουμπάει στο εδαφικό υλικό (με χρόνο απόκρισης 60'). Η δυνατότητα μέτρησης της ολικής μύζησης με тенσιόμετρο ελέγχεται ως μάλλον αδύνατη. Σε κάθε περίπτωση, το όργανο αυτό όπως παρουσιάστηκε από τους Ridley & Burland (1994), μπορούσε να επιτυγχάνει μετρήσεις της μύζησης από 0 έως 1500 kPa και της θετικής πίεσης πόρων από 0 έως 3500 kPa, χάρη στην ενσωμάτωση του κατάλληλου μορφοτροπέα.

Η πιο αξιόπιστη μορφή του συγκεκριμένου οργάνου ωστόσο παρουσιάστηκε από τους Ridley & Burland (1996) με βελτιωμένο μορφοτροπέα και ακόμα μικρότερο δοχείο νερού. Τα συγκεκριμένα тенσιόμετρα δοκιμάστηκαν εντατικά από τους Tarantino & Mongioni (2000α) σε μετρήσεις της μύζησης κατά την εκτέλεση δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης και από τους Tarantino, et al. (2000) σε δοκιμές ελέγχου των παραμέτρων τάσης για μή κορεσμένα εδάφη, ενώ οι Tarantino & Mongioni (2001) διερεύνησαν την ακρίβεια μετρήσεων του οργάνου και τις

διαδικασίες κορεσμού του πορώδους άκρου. Οι Tarantino & Mongioli (2001) μάλιστα παρατήρησαν πρώτοι ότι η φαινόμενη σπηλαιώση ενδέχεται να συμβαίνει πρώτα στο νερό των πόρων του πορώδους άκρου και όχι στο νερό του δοχείου νερού<sup>19</sup>. Υπό την προϋπόθεση ότι το πορώδες άκρο έχει κορεστεί κατάλληλα, η ακρίβεια του οργάνου βρέθηκε να είναι  $\pm 5$  kPa με ικανότητα διατήρησης της μετρούμενης μύζησης για αρκετές ημέρες εφόσον αυτή ήταν μικρότερη από 1500 kPa. Επιδείχθηκε μάλιστα και η ικανότητα μέτρησης τιμών της μύζησης ακόμα και μεγαλύτερων των 1500 kPa (μέχρι μάλιστα 3000 kPa) αλλά διατηρούμενες για μικρότερα χρονικά διαστήματα.

Οι Marinho & Chandler (1995) συγκέντρωσαν και άλλες μετρήσεις της εφελκυστικής αντοχής του νερού και παρουσίασαν μεγάλο αριθμό καταγεγραμμένων τιμών μεγαλύτερων του 1 MPa (Chapman, et al., 1975: 1.2 MPa, Rees & Trevena, 1966: 1.3 MPa, Richards & Trevena, 1976: 3 MPa, Meyer, 1911: 3.4 MPa, Jones, et al., 1981: 4.6 MPa), αλλά και τιμές που φτάνουν ακόμα και τα 17 MPa (Henderson & Speedy, 1980: 16 MPa, Ohde, et al., 1991: 17 MPa).

Οι Guan & Fredlund (1997) αναφέρουν την κατασκευή ενός τενσιομέτρου με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διεϊσδυσης αέρα, παρόμοιο με αυτό του Ridley (1993). Η διάμετρος του πορολίθου του οργάνου ήταν 7 mm και το πάχος του δοχείου του νερού πίσω από τον πορολίθο ήταν 0.1 έως 0.5 mm. Η διαδικασία που ακολούθησαν για τον αρχικό κορεσμό του πορολίθου περιελάμβανε 6 κύκλους συμπίεσης σε πάρα πολύ υψηλή πίεση (12000 kPa) για 1 h και υποπίεση  $-85$  kPa (εφαρμοζόμενη με αντλία κενού) για 1 h. Αν και δεν παρέθεσαν αριθμητικά δεδομένα, υποστήριξαν ότι για το εύρος τιμών που δοκίμασαν, το μέγεθος του δοχείου νερού δεν παίζει κάποιο ρόλο στην ικανότητα μέτρησης του οργάνου ή στο χρόνο διατήρησης της καταγραφόμενης μύζησης χωρίς να συμβεί φαινόμενη σπηλαιώση. Οι μετρήσεις που παρέθεσαν εκτείνονται μεταξύ 50 και 950 kPa με αναφερόμενη ακρίβεια  $\pm 5\%$  και χρόνους απόκρισης μεταξύ 1 h και 24 h, οι οποίοι αυξάνουν με την αύξηση της τιμής της μύζησης. Η σημαντικότερη ίσως συνεισφορά τους είναι ότι περιέγραψαν τον μηχανισμό επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας στο νερό του δοχείου του τενσιομέτρου. Η εφελκυστική τάση στο νερό του δοχείου (εάν δεν έχει συμβεί καθόλου εξάτμιση νερού από τον πορολίθο) αρχικά αυξάνεται ραγδαία μέχρι ένα δεύτερο στάδιο πιο αργής αύξησης μέχρι πρακτικά τη σταθεροποίηση της τιμής της μετρούμενης μύζησης. Μετά από αυτό όμως παρατήρησαν ότι εμφανίζεται ένα στάδιο μικρής

<sup>19</sup> Το οποίο μοιάζει τελικά πιο λογικό, δεδομένου ότι η βασική αιτία συγκράτησης μικροσκοπικών φυσαλίδων στο νερό είναι η παρουσία μικροκοιλιοτήτων στο δοχείο που περιέχει το νερό και ισχύει πολύ περισσότερο για τον πορολίθο παρά για το επεξεργασμένης επιφάνειας δοχείο νερού πίσω από αυτόν.

αλλά σαφούς περαιτέρω αύξησης, το οποίο απέδωσαν στην εξάτμιση νερού από τον πορόλιθο του οργάνου, όταν αυτό χρησιμοποιείται για μετρήσεις της μύζησης σε εδάφη με χαμηλό βαθμό κορεσμού. Εναλλακτικά, εάν έχει συμβεί εξάτμιση νερού από τον πορόλιθο πριν τη μέτρηση, η εφελκυστική τάση στο νερό του δοχείου αρχικά αυξάνεται ραγδαία μέχρι τιμές ελαφρά μεγαλύτερες και από την τιμή της μετρούμενης μύζησης για να αρχίσει μετά να μειώνεται μέχρι την επίτευξη ισορροπίας, αλλά και πάλι να εμφανίζεται μετά το στάδιο της μικρής αλλά σαφούς περαιτέρω αύξησης λόγω εξάτμισης. Γι' αυτό κατέληξαν ότι *τα όργανα του είδους είναι καταλληλότερα για μετρήσεις της μύζησης σε εδάφη με αρκετά μεγάλο βαθμό κορεσμού*, ενώ είναι σκόπιμο να πραγματοποιούνται μετρήσεις με αυτά σε χώρους ελεγχόμενης θερμοκρασίας και υγρασίας για αποφυγή εξάτμισης από τον πορόλιθο διαρκούς της μέτρησης. Η εξάτμιση μάλιστα από τον πορόλιθο προτείνουν ότι πρέπει να αποφεύγεται και πριν από την έναρξη της μέτρησης.

Οι Ridley & Burland (1999) παρέθεσαν τη δική τους διαδικασία κορεσμού, η οποία βασίζεται περισσότερο στην επίτευξη πολύ καλής αρχικής απαέρωσης μέσω εφαρμογής υψηλής πίεσης κενού (φροντίζοντας μάλιστα οι πορόλιθοι να είναι απολύτως ξηροί πριν αρχίσει η διαδικασία κορεσμού) και λιγότερο στην εφαρμογή θετικής πίεσης νερού (η οποία ούτως ή άλλως είναι μικρότερη εκείνης που αναφέρουν οι Guan & Fredlund, 1997). Κατέστησαν σαφές δε, ότι κατά τη δική τους εμπειρία, *εφόσον χρησιμοποιηθεί απαερωμένο νερό και επιτευχθεί πλήρης κορεσμός του οργάνου, τότε η μέγιστη μύζηση που μπορεί να μετρηθεί με ένα τέτοιο τενσιόμετρο είναι συνάρτηση μόνο της πίεσης διείσδυσης αέρα του υλικού του πορολίθου και δεν μπορεί να είναι υψηλότερη από αυτήν*.

Οι Tarantino & Mongiovi (2002) παρουσίασαν ένα τενσιόμετρο πρακτικά όμοιο με εκείνο των Ridley & Burland (1993) με το οποίο μετρήθηκε μέγιστη τιμή της μύζησης 2 MPa και τιμές της μύζησης 1000 kPa διατηρήθηκαν για 16 ημέρες. Για την ανάπτυξη του μελέτησαν τις απαιτήσεις για το εύκαμπτο διάφραγμα του μορφοτροπέα πάνω στο οποίο επικολλάται το ηλεκτρομηκυσσιόμετρο, καθόρισαν το ελάχιστο δυνατό πάχος του δοχείου νερού με βάση την παραμόρφωση του διαφράγματος του μορφοτροπέα και τις ανωμαλίες της εσωτερικής επιφάνειας του πορολίθου (0.1mm) και παρατήρησαν ότι μπορεί να υπάρξει συστηματική μεταβολή με το χρόνο της καμπύλης βαθμονόμησης του ηλεκτρομηκυσσιόμετρου. Αυτή την απέδωσαν στον ερπυσμό του χαλύβδινου διαφράγματος επί του οποίου αυτό επικολλάται. Οι Tarantino & Mongiovi (2003) μελέτησαν τη σημασία της βαθμονόμησης του διαφράγματος επί του οποίου επικολλάται το ηλεκτρομηκυσσιόμετρο για παραμορφώσεις του που αντιστοιχούν σε



μέτρηση της μύζησης με το όργανο και όχι επιβολή θετικής πίεσης και γραμμική προέκταση για τις αρνητικές τιμές. Οι Hoffmann, et al. (2006) μελέτησαν την επίδραση της θερμοκρασίας στην καμπύλη βαθμονόμησης του ηλεκτρομηκυνσιομέτρου αυτού του οργάνου στο εύρος 20-40 °C και βρήκαν ότι μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στις μετρήσεις της μύζησης στο χαμηλό εύρος τιμών (ακόμα και κατά 100 kPa υπερεκτίμηση της μύζησης για θερμοκρασία 40 °C).

Οι Meilani, et al. (2002) παρουσίασαν ένα παρόμοιο τενσιόμετρο με πορόλιθο πίεσης διείσδυσης αέρα 500 kPa και εξαιρετικά μικρές διαστάσεις (πορόλιθος πάχους 1 mm και διαμέτρου 5.8 mm και δοχείο νερού πάχους 0.4 mm). Λόγω των μικρών διαστάσεών του και του πολύ μικρού του βάρους (3 g) μπορεί να τοποθετηθεί πάνω σε δοκίμια τριαξονικής δοκιμής για τοπικές μετρήσεις της μύζησης επί των δοκιμίων. Για τον κορεσμό του πορώδους άκρου μέσω εφαρμογής υψηλής θετικής πίεσης στο νερό του δοχείου και των πόρων του πορολίθου χρησιμοποίησαν μία κυψέλη της τριαξονικής συσκευής γεμάτη νερό εντός της οποίας επέβαλαν πίεση 800 kPa χωρίς να αναφέρουν κύκλους επανάληψης της επιβολής της πίεσης ή συνδυασμό της με εφαρμογή πίεσης κενού. Όταν τα τενσιόμετρα είχαν κορεστεί πλήρως ο χρόνος απόκρισής τους σε μεταβολές της μύζησης ήταν περί τα 3'', ενώ είχαν την ικανότητα να διατηρήσουν μύζηση της τάξης των 400 kPa για 15 h πριν τον αποκορεσμό του πορώδους άκρου και της τάξης των 200 kPa για 155 h.

Οι Take & Bolton (2003) διερεύνησαν τις διαδικασίες αρχικού κορεσμού του πορώδους άκρου των τενσιομέτρων με την κατασκευή ενός δικού τους οργάνου για αυτό το σκοπό. Τα υλικά των πορώδων άκρων που χρησιμοποίησαν ωστόσο σε αυτή τη φάση της έρευνάς τους είχαν τιμές πίεσης διείσδυσης αέρα μόνο 100 και 300 kPa. Σε κάθε περίπτωση τα βασικά συμπεράσματά τους είναι σημαντικά, αφού παρατήρησαν και επέδειξαν θεωρητικά και πειραματικά την αναγκαιότητα τα πορώδη άκρα να είναι απολύτως ξηρά πριν την έναρξη της διαδικασίας κορεσμού, η οποία πρέπει να βασίζεται κυρίως στην επιβολή υποπίεσης μέχρι εξαιρετικά χαμηλές τιμές (απόλυτη πίεση <1 kPa) για την απομάκρυνση του αέρα από τους πόρους του πορώδους άκρου παρά την επιβολή υψηλής θετικής πίεσης. Επίσης, κατ' αυτούς, ο έλεγχος του κορεσμού του πορώδους άκρου και της απόδοσης του τενσιομέτρου που αυτός εξασφαλίζει δεν ελέγχεται με τη σύγκριση των καταγραφόμενων τιμών ως προς επιβαλλόμενες θετικές ή αρνητικές πιέσεις αλλά από τον χρόνο απόκρισης των οργάνων στις μεταβολές της επιβαλλόμενης πίεσης, ο οποίος πρέπει να είναι ελάχιστος. Ο κακός κορεσμός των πορολίθων έχει τέτοια επιρροή στις μετρήσεις που εισάγει σημαντική καθυστέρηση στην απόκριση ακόμα και κατά τη μέτρηση θετικών πιέσεων από τα τενσιόμετρα. Από την άλλη πλευρά ο Tarantino

(2004α) διαφώνησε ως προς τη σκοπιμότητα χρήσης του χρόνου απόκρισης ως βασικού κριτηρίου της επίτευξης καλού κορεσμού των πορωδών άκρων και υπογράμμισε ότι οι Take & Bolton (2003) εργάστηκαν με πορώδη άκρα από υλικά που είχαν τιμές πίεσης διείσδυσης αέρα μόλις 100 και 300 kPa, και πάλι με την μέθοδό τους να μην μπορεί να επιτύχει πλήρη κορεσμό στον πορόλιθο πίεσης διείσδυσης αέρα 300 kPa (πολλώ δε μάλλον αν είχε πίεση διείσδυσης αέρα 1500 kPa, όπως αυτός άλλων тенσιομέτρων). Προτείνει δε εναλλακτικά ότι ο καλύτερος τρόπος επιβεβαίωσης της ορθής απόδοσης ενός тенσιομέτρου είναι η χρησιμοποίηση περισσότερων του ενός.

Οι Toker, et al. (2004) αναφέρουν την κατασκευή ενός νέου тенσιομέτρου για την ενσωμάτωσή του σε μία μέθοδο ταχέως προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (βλ. Κεφ. 4). Χρησιμοποίησαν διαφορετικό υλικό για το πορώδες άκρο του тенσιομέτρου με πίεση διείσδυσης αέρα της τάξης των 2 MPa και ικανότητα κορεσμού υπό μικρότερη θετική πίεση από εκείνη που απαιτείται για τα συνήθη κεραμικά υλικά των πορωδών άκρων αυτών των тенσιομέτρων (2.5-2.8 MPa για 24 h). Το μειονέκτημά του είναι ότι αυτό δεν διατίθεται εμπορικά (και επίσης σήμερα ούτε καν κατασκευάζεται σε κάποιο ερευνητικό ίδρυμα) και εκτός αυτού καταστρέφεται μετά από 5-20 κύκλους κορεσμού-αποκορεσμού εν αντιθέσει με τα συνήθη υλικά των πορωδών άκρων που δεν έχουν τέτοιο πρόβλημα. Επίσης, απαιτεί σχετικά αργή μεταβολή της πίεσης που εφαρμόζεται κατά τον κορεσμό (είτε όταν αυτή αυξάνεται, είτε όταν αυτή μειώνεται) προκειμένου να μην προκληθεί ζημιά σε αυτό. Το σημαντικό σημείο ωστόσο είναι ότι η μεγαλύτερη πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού αυτού και η απαίτηση για χαμηλότερη πίεση για την επίτευξη κορεσμού, αναγνωρίζεται από τους Toker, et al. (2004) ότι οφείλεται στην καλύτερη επικοινωνία (interconnectivity) των πόρων του συγκεκριμένου υλικού. Το συγκεκριμένο тенσιόμετρο είναι μεγαλύτερων διαστάσεων (διάμετρος 38 mm) και δεν παρουσιάστηκαν μετρήσεις της μύζησης σε εδαφικά υλικά που να ξεπερνούν τα 100 kPa παρά τις δυνατότητες του οργάνου (οι οποίες επιδείχθηκαν σε δοκιμές ξήρανσης του πορολίθου τους στην ατμόσφαιρα).

Οι Chiu, et al. (2005) παρουσίασαν ένα тенσιόμετρο για μετρήσεις στο εργαστήριο αλλά και σε φυγοκεντρική (centrifuge). Το υλικό του πορώδους άκρου έχει πίεση διείσδυσης αέρα 500 kPa, ενώ το όργανο έχει χρόνο επίτευξης ισορροπίας 4 h και μέγιστο καταγεγραμμένο χρόνο διατήρησης μετρούμενης μύζησης 24 h. Η μέγιστη τιμή μετρηθείσας μύζησης που αναφέρουν είναι 472 kPa. Για τον αρχικό κορεσμό χρησιμοποίησαν αρχικά υποπίεση (μέχρι απόλυτη πίεση περί το 1 kPa) για 1 h, παροχή διοξειδίου του άνθρακα υπό ελαφρά θετική πίεση και στη

συνέχεια εμβάπτιση των тенσιομέτρων για 24 h. Μετά από αυτό το στάδιο ακολούθησαν 5 κύκλοι συμπίεσης του νερού του πορολίθου και του δοχείου νερού ως τα 700 kPa για 24 h με ενδιάμεσο αποκορεσμό. Όπως αναφέρουν, εφόσον ο αρχικός κορεσμός ήταν επιτυχής, η ικανότητα μέτρησης των οργάνων δεν μεταβάλλεται με τους κύκλους συμπίεσης/αποκορεσμού. Στην αντίθετη περίπτωση οι κύκλοι αυτοί συμβάλλουν στην επίτευξη της μέγιστης ικανότητας μέτρησης της μύζησης με το όργανο.

Οι Lourenço, et al. (2006) παρουσίασαν και εκείνοι ένα тенσιόμετρο μικρών διαστάσεων (διάμετρος 14 mm και μήκος 35 mm) με πορώδες άκρο πάχους 10 mm και πίεσης διείσδυσης αέρα 1500 kPa. Το μικροσκοπικό δοχείο νερού έχει όγκο 10 mm<sup>3</sup>. Για τον κορεσμό του πορώδους άκρου εφαρμόζεται αρχικά υποπίεση και στη συνέχεια υψηλή θετική πίεση στο νερό του πορολίθου και του δοχείου. Η ιδιαιτερότητα έγκειται στο ότι οι Lourenço, et al. (2006) χρησιμοποίησαν θετική πίεση 800 kPa, η οποία είναι πολύ χαμηλότερη εκείνης που έχει χρησιμοποιηθεί από άλλους ερευνητές. Ασκείται ωστόσο για 48 έως 72 h μέχρι την πρώτη χρησιμοποίηση του οργάνου μέχρι την επίτευξη αποκορεσμού και τότε επαναλαμβάνεται με τιμές μεταξύ 800 και 1000 kPa εφαρμοζόμενες για 5 έως 24 h. Ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον σημείο της διερεύνησης τους είναι ότι παρατήρησαν κάποιες φορές καταγραφή σημαντικής θετικής πίεσης πόρων σε тенσιόμετρα εντός των οποίων είχε γίνει αποκορεσμός όταν τα έβαλαν σε νερό, παρόλο που αυτό δεν βρισκόταν υπό πίεση. Τα тенσιόμετρα μάλιστα στα οποία είχε συμβεί αυτό διακρίνονταν από αργή απόκριση μετά τον κορεσμό τους υπό θετική πίεση. Η εξήγηση που δόθηκε για αυτό ήταν ότι μερικές φορές αναπτύσσεται ένα μέτωπο ύγρανσης (wetting front) το οποίο κινείται μέσω του πορολίθου προς το δοχείο νερού πιέζοντας προς τα εκεί τον εγκλωβισμένο αέρα (οπότε καταγράφονται από τον μορφοτροπέα θετικές πιέσεις πόρων) και αυτός με τη σειρά του δυσκολεύεται να διαφύγει ή να περάσει σε διάλυση καθιστώντας πιο αργή την απόκριση.

Τέλος ένα тенσιόμετρο παρόμοιο με των Meilani, et al. (2002) παρουσίασαν και οι He, et al. (2006). Το тенσιόμετρο αυτό επέδειξε ικανότητα μέτρησης μύζησης έως και 550 kPa μετά από αρχικό κορεσμό του πορώδους άκρου με θετική πίεση 2000 kPa, με χρόνους απόκρισης της τάξης των 2-3 min και μεγάλους χρόνους διατήρησης της μετρούμενης μύζησης. Όπως παρατήρησαν οι He, et al. (2006) οι δοκιμές εξάτμισης του πορώδους άκρου δεν είναι κατάλληλες για την αξιολόγηση του χρόνου απόκρισης των тенσιομέτρων, αφού η μύζηση που αντιστοιχεί στο πορώδες άκρο για την εξάτμιση του νερού των πόρων του από αυτό (προς την οποία τείνει η υδραυλική ισορροπία) είναι πολύ μεγαλύτερη της πίεσης διείσδυσης αέρα του

πορώδους υλικού. Μετά τον αποκορεσμό του πορώδους άκρου του οργάνου, παρατήρησαν επίσης ότι απαιτείται εφαρμογή θετικής πίεσης στο νερό του δοχείου και του πορώδους άκρου, μόλις 400 kPa για να επανακτήσει πλήρως το όργανο την ικανότητα μέτρησης της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα του πορώδους άκρου του (500 kPa).

### 3.7.3.3 Σχολιασμός της μεθόδου

Το τενσιόμετρο με πορόλιθο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα αποτελεί το μοναδικό όργανο άμεσης μέτρησης της μύζησης είτε επιτόπου, είτε στο εργαστήριο στο εύρος τιμών 0-2 MPa με ταχύτητα επίτευξης μέτρησης επαρκή για την παρακολούθηση ταχέων μεταβολών της μύζησης. Ταυτόχρονα δεν επηρεάζεται από την περιεκτικότητα του νερού των πόρων σε διαλυμένα άλατα και τοποθετείται εύκολα και επιτόπου και στο εργαστήριο, είτε αυτόνομα, είτε επί άλλων εργαστηριακών συσκευών. Η ταχύτητα επίτευξης μέτρησης, αν και είναι μεγάλη σε σχέση με άλλες μεθόδους, είναι αρκετά μικρή ώστε σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές της μύζησης που μετρούνται να μπορεί να γίνει φαινόμενη σπηλαίωση πριν την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας και άρα επίτευξης της μέτρησης της ορθής τιμής της μύζησης. Ιδίως μάλιστα κατά τις μετρήσεις της μύζησης επιτόπου, το γεγονός αυτό μπορεί να καταστήσει ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρα την χρήση της μεθόδου. Στο εργαστήριο αντίθετα, αν και εξακολουθεί να αποτελεί μέθοδο που απαιτεί προσεκτικούς χειρισμούς και γενικά εφαρμογή από μάλλον έμπειρο χειριστή, είναι λιγότερο επίπονη και χρονοβόρα στην εφαρμογή της, υπό τη βασική προϋπόθεση της σωστής και επιμελούς προετοιμασίας των τενσιομέτρων πριν τη μέτρηση. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού (οι απόπειρες μέτρησης της ολικής μύζησης ελέγχονται μάλλον ως αδύνατες). Σε ό,τι αφορά τις υπόλοιπες απαιτήσεις για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου, εκτός από τα ίδια τα τενσιόμετρα απαιτείται η χρήση ειδικών κλινών για τον κορεσμό των πορολίθων με την εφαρμογή υψηλής πίεσης αλλά και υψηλής πίεσης κενού στο νερό του δοχείου (και προφανώς την ικανότητα παροχής τέτοιων πιέσεων στο εργαστήριο). Συνολικά λοιπόν η μέθοδος τενσιομέτρου με πορόλιθο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα είναι μάλλον υψηλού κόστους, απαιτεί λεπτούς και ιδιαίτερα προσεκτικούς χειρισμούς κατά την προετοιμασία των οργάνων αλλά και την ίδια τη μέτρηση και μπορεί να απαιτήσει αρκετές απόπειρες μέτρησης μέχρι την επίτευξη ορθής μέτρησης (αν και όταν η μέτρηση είναι επιτυχής μπορεί να απαιτήσει μόνο μερικές ώρες μέχρι την επίτευξή της). Επίσης διατηρείται η επιφύλαξη σχετικά με την ακρίβεια της μεθόδου όταν ο βαθμός κορεσμού που αντιστοιχεί στη μετρούμενη μύζηση είναι αρκετά χαμηλός και η ανάγκη διόρθωσης της βαθμονόμησης του

μορφοτροπεία για τη θερμοκρασία και τη συστηματική μεταβολή με το χρόνο, καθώς και η επιφύλαξη για την ορθότητα των μετρούμενων τιμών της μύζησης που είναι υψηλότερες της πίεσης διείσδυσης αέρα του πορολίθου. Επιπρόσθετα, μέχρι πρότινος ήταν αρκετά δύσκολη η προμήθεια τέτοιων οργάνων αφού κατασκευάζονταν μόνο σε πανεπιστήμια. Πρόσφατα ωστόσο άρχισαν να διατίθενται εμπορικά και από οίκους προμήθειας εργαστηριακού εξοπλισμού. Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, τα тенσιόμετρα του τύπου αποτελούν τα μόνα όργανα που μπορούν να μετρήσουν απευθείας τη μύζηση στο εύρος τιμών της από 0 έως και 2 MPa με ταυτόχρονη ικανότητα παρακολούθησης σχετικά ταχέων μεταβολών της μύζησης όταν χρησιμοποιούνται για συνεχείς μετρήσεις. Στον Πίν. 3.11 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με тенσιόμετρα με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα.

**Πίνακας 3.11.** Συνοψιση χαρακτηριστικών της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με тенσιόμετρα με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα.

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Είδος μετρούμενης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Τенσιόμετρα πορώδους άκρου υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	NAI	NAI	0 - 2000 kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Λεπτά της ώρας έως ώρες

### 3.7.4 Ωσμωτικά тенσιόμετρα

Προκειμένου να παρακάμψουν τα προβλήματα των тенσιομέτρων πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα και κυρίως να επεκτείνουν το εύρος της μετρούμενης μύζησης από τα тенσιόμετρα αυτά, οι Peck & Rabbage (1969) αντικατέστησαν το νερό στο тенσιόμετρο που είχε σχεδιάσει ο Watson (1967) με ένα υγρό πολύ υψηλής ωσμωτικής πίεσης (πολυαιθυλική γλυκόλη –polyethylene glycol) και τοποθέτησαν μία ημιδιαπερατή στο υγρό αυτό μεμβράνη στο πίσω μέρος του πορώδους άκρου. Όταν το όργανο αυτό τοποθετείτο σε λουτρό καθαρού νερού υπό ατμοσφαιρική πίεση, δημιουργείται πολύ υψηλή πίεση στο δοχείο που περιέχει το υγρό αυτό λόγω ώσμωσης, με ταυτόχρονη κίνηση ύδατος από το λουτρό καθαρού νερού προς το εσωτερικό του οργάνου. Βγάζοντας τότε το όργανο αυτό από το λουτρό καθαρού νερού και τοποθετώντας το σε επαφή με εδαφικό υλικό η πίεση του νερού των πόρων του οποίου είναι αρνητική, νερό

εξερχόταν από το δοχείο μέσω της μεμβράνης προς το έδαφος μειώνοντας τη –θετική- πίεση εντός του δοχείου. Αυτή ωστόσο παρέμενε θετική αποτρέποντας τη φαινόμενη σπηλαιώση στο εσωτερικό του δοχείου. Ο χρόνος απόκρισης του οργάνου αυτού μπορεί να είναι μεγάλος (έως και 2 ώρες) και όταν χρησιμοποιείται για συνεχή καταγραφή της μύζησης, η πίεση αναφοράς μπορεί να μειωθεί με το χρόνο λόγω διαρροής του περιεχόμενου διαλύματος ή τη μείωση της συγκέντρωσης αυτού. Παρόμοιο όργανο με αυτό των Peck & Rabbage (1969) περιγράφουν και οι Bocking & Fredlund (1980). Στην πράξη ωστόσο κανένα από τα δύο αυτά παραδείγματα του συγκεκριμένου тенσιομέτρου δεν ξεπέρασε το ερευνητικό στάδιο, κυρίως λόγω συστηματικών μεταβολών της πίεσης στο διάλυμα με το χρόνο και τις μεταβολές της θερμοκρασίας (παρόλο που καταγράφονται νεώτερες προσπάθειες χρησιμοποίησής του –π.χ. Biesheuvel, et al., 1999). Στον Πίν. 3.12 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με ωσμωτικά тенσιομέτρα.

**Πίνακας 3.12.** Σύνοψη χαρακτηριστικών της μεθόδου μέτρησης της μύζησης με ωσμωτικά тенσιομέτρα.

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Είδος μετρούμενης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Ωσμωτικά тенσιομέτρα	NAI	OXI	0 - 1500 kPa	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Ώρες

### 3.7.5 Συνήθη πιεζόμετρα με ικανότητα μέτρησης αρνητικής πίεσης πόρων

Συνήθη πιεζόμετρα κλειστού τύπου με πορώδες άκρο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της μύζησης μέχρι τιμές περίπου αυτές της πίεσης διείσδυσης αέρα του υλικού του πορώδους άκρου. Για πιεζόμετρα με απόσταση μεταξύ του πορώδους άκρου και του οργάνου μέτρησης της πίεσης ισχύουν οι περαιτέρω περιορισμοί των тенσιομέτρων με πορώδη άκρα χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα (μείωση της ικανότητας μέτρησης της μύζησης κατά 10 kPa ανά μέτρο κατακόρυφης απόστασης μεταξύ πορώδους άκρου και οργάνου μέτρησης της πίεσης). Το πρόβλημα αυτό είναι συνήθως ελάχιστο (αν υπάρχει) στα ηλεκτρικά πιεζόμετρα όπου πορώδες άκρο και μορφοτροπέας βρίσκονται πολύ κοντά (το ίδιο συμβαίνει και με τα тенσιομέτρα όπως αυτό του Watson, 1967). Είτε πρόκειται για πιεζόμετρα

ηλεκτρομηκυσιομέτρου, είτε για πιεζόμετρα δονούμενης χορδής, ο συνδυασμός πορώδους άκρου πίεσης διείσδυσης αέρα 100 kPa, το –σχετικά– μικρό δοχείο νερού, η χρήση αξιόπιστων μορφοτροπέων για χρήση στο ύπαιθρο, και η ικανότητα σε κάποια όργανα για επαναπλήρωση του δοχείου νερού, μπορεί να καταστήσει τα όργανα αυτά αρκετά αξιόπιστα για τη μέτρηση της μύζησης μέχρι τα 90 kPa περίπου (για πορολίθους πίεσης διείσδυσης αέρα 100 kPa). Μοναδικό μειονέκτημα, όπως εξηγήθηκε στην §3.7.3, μπορεί να αποτελέσει η προέκταση της καμπύλης βαθμονόμησης των διαφραγμάτων των μορφοτροπέων τους στο εύρος αρνητικών τιμών αντί για τον απευθείας προσδιορισμό τους σε αυτό το εύρος<sup>20</sup>. Η ενσωμάτωση πορολίθων πίεσης διείσδυσης αέρα υψηλότερης των 100 kPa είναι αμφίβολο κατά πόσο μπορεί να επιτρέψει τη μέτρηση τιμών της μύζησης μεγαλύτερων από 100 kPa, δεδομένου ότι δεν έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες που επιτρέπουν κάτι τέτοιο και αναφέρονται στην §3.7.3.

### 3.8 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΩΣΜΩΤΙΚΗΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ

Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι μετρούν είτε την ολική μύζηση, είτε τη μύζηση εδαφικού σκελετού. Η μέτρηση της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης είναι αφενός πιο δύσκολη, αφετέρου εμπεριέχει πολλές αβεβαιότητες για τους λόγους που εξηγούνται ακολούθως. Ο κυριότερος από αυτούς είναι ότι για να μετρηθεί η ωσμωτική πίεση του νερού των πόρων, θεωρούμενου αυτού ως διαλύματος, πρέπει να εξαχθεί νερό από τους πόρους μαζί με τις διαλυμένες σε αυτό ουσίες και να έχει την ίδια περιεκτικότητα σε αυτές όπως όταν βρίσκεται στους πόρους των εδαφικών υλικών. Αν κάτι τέτοιο ήταν δυνατόν, τότε μία μέθοδος μέτρησης της ολικής μύζησης, όπως η μέθοδος χαρτιού φίλτρου μή ευρισκόμενου σε επαφή με το δείγμα του εδαφικού υλικού ή κάποια από τις μεθόδους με ψυχρόμετρα, θα επέτρεπε τη μέτρηση της ωσμωτικής μύζησης του νερού των πόρων.

Ωστόσο η απόληψη νερού από ένα εδαφικό δείγμα χωρίς μεταβολή της περιεκτικότητάς του σε διαλυμένες ουσίες δεν είναι τόσο απλή διαδικασία. Απόπειρες που έχουν γίνει περιλαμβάνουν την απομάκρυνση νερού μέσω διοχέτευσης αέρα (gas extraction method), την απομάκρυνση του νερού μέσω φυγοκέντρισης (centrifuging method), και τέλος την ανάμειξη του εδάφους μέχρι να γίνει πολτός και τη συμπίεση του πολτού αυτού έτσι ώστε να συλλέγεται το νερό που εξέρχεται

<sup>20</sup> Υπενθυμίζεται ξανά και η υποσημείωση 17.

από τους πόρους κατά τη συμπίεση (mechanical squeezing method) ή τη συγκέντρωση του νερού καθώς ο πολτός έχει αφηθεί πάνω από πορώδες υλικό για να στραγγίξει (leaching ή saturation extraction technique). Η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού αυτού για διάφορες τιμές του ποσοστού υγρασίας του εδάφους κατά τη συμπίεση επιτρέπει τον προσδιορισμό της περιεκτικότητάς του σε άλατα και με προέκταση για την τιμή του ποσοστού υγρασίας του φυσικού εδάφους την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε άλατα του νερού των πόρων για αυτό το ποσοστό υγρασίας. Από την εκτίμηση αυτή για την περιεκτικότητα σε άλατα του νερού των πόρων στο φυσικό ποσοστό υγρασίας, μπορεί να γίνει μία εκτίμηση για την τιμή της ωσμωτικής μύζησης του εδαφικού υλικού σε αυτό το ποσοστό υγρασίας (υπάρχουν και εμπειρικές συσχετίσεις για την εκτίμηση της τιμής της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης απευθείας με την ηλεκτρική αγωγιμότητα, U.S.D.A., 1950, Romero, 1999). Η εκτιμηθείσα τιμή της ωσμωτικής μύζησης ωστόσο είναι αμφίβολο κατά πόσο θα βρίσκεται κοντά στην τιμή που προκύπτει από τη διαφορά της ολικής μύζησης και της μύζησης εδαφικού σκελετού αν μετρηθούν στο ποσοστό υγρασίας που ενδιαφέρει.

Κάποιες φορές παρουσιάζεται καλύτερη συμφωνία αν εξαχθεί νερό από το εδαφικό υλικό στο ποσοστό υγρασίας που έχει. Το νερό εξάγεται με συμπίεση του δοκιμίου, ενώ η στράγγιση είναι καθοδηγούμενη προς έναν συλλέκτη του στραγγιζόμενου νερού όπως μία σύριγγα. Οι Fredlund & Rahardjo (1993) θεωρούν ότι η μέθοδος αυτή είναι καλύτερη για εδαφικά υλικά με υψηλό αρχικό ποσοστό υγρασίας, αφού ζητούμενο είναι η χαμηλή ή μηδενική μύζηση, καθώς εκτιμάται ότι η μύζηση στο εδαφικό υλικό κατά την εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να επηρεάσει τη συγκέντρωση του δείγματος του νερού των πόρων που συλλέγεται (Engelhardt & Gaida, 1963, Iyer, 1990).

Μέχρι σήμερα, ο πιο αξιόπιστος τρόπος μέτρησης της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης είναι η ανεξάρτητη μέτρηση της ολικής μύζησης και της μύζησης εδαφικού σκελετού για τον υπολογισμό της διαφοράς τους.



### 3.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε μία ανασκόπηση των υπάρχουσών μεθόδων μέτρησης της μύζησης των εδαφικών υλικών. Βασικά κριτήρια κατάταξης των διαφόρων μεθόδων ήταν το είδος της μύζησης που μετρούν (ολική, εδαφικού σκελετού ή ωσμωτική), ο χώρος διεξαγωγής της μέτρησης (στο εργαστήριο ή επιτόπου), το εύρος των τιμών της μύζησης που μπορούν να μετρήσουν και ο χρόνος επίτευξης της μέτρησης. Τα ίδια αυτά κριτήρια κατάταξης αποτελούν και τους παράγοντες για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για τη μέτρηση της μύζησης για κάθε εφαρμογή. Το κόστος εφαρμογής της κάθε μεθόδου, η διαθεσιμότητα των χρησιμοποιούμενων οργάνων και η αξιοπιστία αποτελούν επίσης παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Στους Πίνακες 3.13α και 3.13β συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μεθόδων μέτρησης της ολικής μύζησης και της μύζησης εδαφικού σκελετού αντίστοιχα, όπως παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο (ειδικά για τα τεμάχια γύψου παρατίθενται πλέον και τα συμπεράσματα της έρευνας στην παρούσα διδακτορική διατριβή). Στο Κεφ. 6 παρουσιάζονται παραδείγματα μετρήσεων της μύζησης επιτόπου από διάφορες πηγές καθώς και οι μετρήσεις της μύζησης επιτόπου που πραγματοποιήθηκαν σε περιοχή της Αττικής με πολλά είδη αισθητήρων εγκατεστημένα στην ίδια θέση οργανωμένα σε δύο διατάξεις.

**Πίνακας 3.13α.** Συνόψιση χαρακτηριστικών των μεθόδων μέτρησης της ολικής μύζησης.

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Χαρτιών φίλτρου σε απόσταση από το εδαφικό δείγμα	NAI	NAI (;)	1000 έως 500000 kPa (ακριβέστερα 1000 έως 30000 kPa)	Τουλάχιστον 7-14 ημέρες
Ψυγράμετρα θερμικά ευαίσθητης αντίστασης	NAI	OXI	100 – 70000 kPa	Λεπτά έως μία ώρα
Ψυγράμετρα θερμικού ζεύγους	NAI	NAI	100 – 8000 kPa	Λεπτά έως μία ώρα
Υγράμετρα σημείου δρόσου	NAI	NAI	100 – 8000 kPa	Λεπτά έως μία ώρα
Υγράμετρα ψυχρού κατόπτρου	NAI	OXI	100 – 450000 kPa	Λεπτά
Αισθητήρες αντίστασης/ χωρητικότητας πολυμερών	NAI	NAI	1000 – 1000000 kPa	Δευτερόλεπτα
Αισθητήρες οργανικών μέσων	NAI	NAI	1000 – 1000000 kPa	Λεπτά

**Πίνακας 3.13β.** Συνόμηση χαρακτηριστικών των μεθόδων μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού.

Μέθοδος	Μέτρηση μύζησης στο εργαστήριο	Μέτρηση μύζησης επιτόπου	Εύρος μέτρησης μύζησης	Τάξη μεγέθους χρόνου επίτευξης μέτρησης
Μεμβράνης ή πορολίθου	NAI	OXI	Έως 100 kPa	Ώρες
Μετατόπισης άξονα	NAI	OXI	Όση η πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού του πορολίθου. Συνήθως 1500 kPa	Ώρες έως 24ώρα
Χαρτιών φίλτρου σε επαφή με το εδαφικό δείγμα	NAI	NAI (;)	0 έως 500000 kPa (ακριβέστερα 30 έως 3000 kPa)*	Τουλάχιστον 7 ημέρες
Τεμαχίων γύψου	NAI	NAI	5-3000 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Τεμαχίων κοκκώδους σκελετού	NAI	NAI	0 – 200 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Τεμαχίων πορωδών υλικών FDR	NAI	NAI	10 – 100000 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Αισθητήρων θερμικής αγωγιμότητας	NAI	NAI	5 – 1500 kPa	5-25 ημέρες (υπάρχουν ενδείξεις για επίτευξη μέσα σε ώρες για πολύ καλή επαφή αισθητήρα-εδάφους)
Ηλεκτρομαγνητική Τενσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	NAI (;)	NAI	0 – 1000 kPa	Λεπτά έως 24ωρα
Τενσιόμετρα τύπου Quickdraw	NAI	NAI	0 - 90 kPa	Λεπτά (1 - 30')
Τενσιόμετρα πορώδους άκρου υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα	NAI	NAI	0 - 2000 kPa	Λεπτά έως ώρες
Ωσμωτικά τενσιόμετρα	NAI	OXI	0 - 1500 kPa	Ώρες

\*Εάν η μύζηση είναι τόσο υψηλή για το εδαφικό υλικό που να έχει προσεγγιστεί το παραμένον ποσοστό υγρασίας του, τότε και σε αυτή την μέθοδο μετρείται η ολική μύζηση.

Η μέθοδος μεμβράνης ή πορολίθου και η εξέλιξη αυτής στη μέθοδο μετατόπισης άξονα απετέλεσαν την πρώτη μέθοδο μέτρησης της μύζησης που αναπτύχθηκε και επί δεκαετίες τη μόνη διαθέσιμη μέθοδο μέτρησης της μύζησης στο κρίσιμο για προβλήματα πολιτικού μηχανικού εύρος 0 - 1500 kPa<sup>21</sup>. Η μέθοδος δεν επιτρέπει τη μέτρηση της μύζησης επιτόπου αλλά μόνο στο εργαστήριο απαιτώντας μέτριου ύψους οικονομικές επενδύσεις σε εργαστηριακό εξοπλισμό και χαμηλού ύψους λειτουργικά έξοδα. Μετρήσεις της μύζησης επιτόπου μπορούν να γίνουν με τα тенσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα που αποτελούν κατ' ουσίαν παραλλαγή της μεθόδου πορολίθου αλλά μόνο για το εύρος τιμών της μύζησης 0 – 100 kPa (στην πράξη 0 – 90 kPa). Η μετρούμενη μύζηση είναι η μύζηση εδαφικού σκελετού. Ο χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας είναι της τάξης των ωρών στο εργαστήριο προκειμένου για τη μέθοδο μετατόπισης άξονα και τη μέθοδο μεμβράνης ή πορολίθου και της τάξης λεπτών της ώρας για το απλό тенσιόμετρο (εξαίρεση αποτελεί το тенσιόμετρο τύπου Quickdraw το οποίο επιτρέπει την επίτευξη μέτρησης εντός 1-2 λεπτών). Η ακρίβεια μέτρησης είναι συνήθως πολύ υψηλή (από  $\pm 0.05$  kPa έως  $\pm 1$  kPa). Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται η έλλειψη διερεύνησης της επιρροής της αύξησης της πίεσης της αέριας φάσης προκειμένου για τη μέθοδο μετατόπισης άξονα και το μικρό εύρος μέτρησης μύζησης για τη μέθοδο μεμβράνης ή πορολίθου και τα тенσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα. Η μέθοδος μετατόπισης άξονα έχει ωστόσο περισσότερο ενδιαφέρον ως μέθοδος ελέγχου της μύζησης (βλ. Κεφ. 4), ενώ με την επένδυση στη μέθοδο αυτή εξασφαλίζονται ταυτόχρονα και μία μέθοδος μέτρησης της μύζησης και μία μέθοδος ελέγχου της μύζησης (σε σημαντικό μάλιστα εύρος τιμών της μύζησης που να επιτρέπει τη βαθμονόμηση άλλων έμμεσων μεθόδων μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού στο ίδιο εύρος τιμών, οι οποίες καλύπτουν το κενό του απλού тенσιόμετρου για τη μέτρηση της μύζησης σε αυτό το εύρος τιμών στο ύπαιθρο).

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με χαρτί φίλτρου επιτρέπει τη μέτρηση είτε της μύζησης εδαφικού σκελετού είτε της ολικής μύζησης, απαιτεί ελάχιστες πρόσθετες οικονομικές επενδύσεις σε ένα εργαστήριο εδαφομηχανικής (με εξαίρεση έναν αναλυτικό ζυγό ακριβείας 0.0001 g), έχει ελάχιστα λειτουργικά έξοδα και μεγάλο εύρος τιμών μέτρησης της μύζησης. Αυτό είναι 0 – 500000 kPa (ακριβέστερα 30 – 3000 kPa) προκειμένου για τη μύζηση εδαφικού σκελετού, και 1000 – 500000 kPa (ακριβέστερα 1000 – 30000 kPa) προκειμένου για την ολική μύζηση. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται η πολύ μεγάλη διακύμανση στα

<sup>21</sup> Υπάρχουν μεμβράνες σελουλόζης με πίεση διείσδυσης αέρα 100 Bar, οπότε επιτρέπουν τη μέτρηση της μύζησης μέχρι τόσο υψηλές τιμές, αλλά αυτά τα συστήματα αποτελούν την εξαίρεση παρά τον κανόνα.

αποτελέσματα των μετρήσεων της μύζησης (η οποία για να μειωθεί πρέπει να γίνονται συχνές βαθμονομήσεις οι οποίες απαιτούν αφενός επένδυση σε κάποια μέθοδο ελέγχου της μύζησης – συνήθως την μέθοδο μετατόπισης άξονα- και αφετέρου υψηλά λειτουργικά έξοδα), η απαίτηση λεπτών χειρισμών για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου, ο μεγάλος χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας και ο περιορισμός ουσιαστικά της χρήσης της μεθόδου σε μετρήσεις εργαστηρίου (χρήση της μεθόδου επιτόπου έχει αναφερθεί μεν, με αμφίβολα αποτελέσματα δε).

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με τεμάχια γύψου απετέλεσε επί δεκαετίες τη μόνη διαθέσιμη μέθοδο μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού επιτόπου στο κρίσιμο εύρος τιμών της μύζησης 30 – 3000 kPa με δυνατότητα μακροχρόνιας παρακολούθησης και ταυτόχρονη χρήση της μεθόδου για μέτρηση της μύζησης και στο εργαστήριο. Συνιστά μέθοδο χαμηλού κόστους, το οποίο αυξάνεται μόνο από την απαίτηση βαθμονομήσεων και άρα επενδύσεων σε μία μέθοδο ελέγχου της μύζησης (όπως επιδείχθηκε στο παρόν κεφάλαιο). Η ακρίβειά της είναι σχετικά υψηλή (μετά από βαθμονόμηση) και ο χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας μάλλον μικρός (όπως προέκυψε κατά την χρήση των οργάνων από τον γράφοντα). Στα μειονεκτήματά της περιλαμβάνεται και η φθορά των τεμαχίων γύψου μετά από μέσης διάρκειας παραμονή στη θέση μέτρησης (η οποία επιταχύνεται εντυπωσιακά σε περιβάλλον με νερό υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα). Η παρεμφερής μέθοδος των τεμαχίων κοκκώδους υλικού επιτρέπει την πιο αξιόπιστη μέτρηση της μύζησης σε κοκκώδη εδάφη, με αντοχή στο χρόνο μάλιστα περίπου διπλάσια εκείνης των τεμαχίων γύψου, με τίμημα όμως το μικρότερο εύρος μέτρησης της μύζησης (κατά την βιβλιογραφία).

Οι αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας επιτρέπουν τη μέτρηση της μύζησης επιτόπου και στο εργαστήριο σε μεγάλο εύρος τιμών (5 – 1500 kPa) με τον ίδιο πρακτικά χρόνο απόκρισης των τεμαχίων γύψου, με το σημαντικό πλεονέκτημα έναντι αυτών ότι οι μετρήσεις τους δεν επηρεάζονται από την παρουσία διαλυμένων ουσιών στο νερό των πόρων. Και αυτή η μέθοδος είναι χαμηλού κόστους, το οποίο αυξάνεται μόνο από την απαίτηση βαθμονομήσεων και άρα επενδύσεων σε μία μέθοδο ελέγχου της μύζησης. Η ακρίβειά της μεθόδου είναι παραπλήσια των τεμαχίων γύψου και η υστέρηση των καμπυλών βαθμονόμησης και η επιρροή της θερμοκρασίας, αν και μπορούν να διορθωθούν, ουσιαστικά αυξάνουν το λειτουργικό κόστος λόγω της ανάγκης επιμελούς βαθμονόμησης των αισθητήρων υπό τις αντίστοιχες συνθήκες. Και αυτή η μέθοδος είναι ακατάλληλη για μέτρηση της μύζησης σε περιβάλλον ραγδαίων και μί μονοτονικών μεταβολών της μύζησης.

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με κάποιον από τους αναπτυχθέντες τύπους ψυχομέτρου επιτρέπει τη μέτρηση της *ολικής μύζησης* επιτόπου και στο ύπαιθρο με μεγάλη ακρίβεια και με πολύ μικρό χρόνο απόκρισης. Επειδή ωστόσο μετρείται η ολική μύζηση, αντί για τη μύζηση εδαφικού σκελετού, θα πρέπει πάντοτε να επιδιώκεται η ταυτόχρονη μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού, ή τουλάχιστον να γίνεται μία εκτίμηση της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης στο επίπεδο μύζησης που αντιστοιχεί στη μετρούμενη τιμή της ολικής μύζησης, και σε κάθε περίπτωση κατά την αξιολόγηση τέτοιων μετρήσεων να υπάρχει επίγνωση ότι πρόκειται για τιμές της ολικής μύζησης. Από την άλλη πλευρά, στο εύρος τιμών της μύζησης για το οποίο υπάρχουν και όργανα ή μέθοδοι που μπορούν να μετρούν τη μύζηση εδαφικού σκελετού, τα ψυχρόμετρα προσφέρουν έναν εναλλακτικό τρόπο μέτρησης της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης, από τη διαφορά ολικής μύζησης και μύζησης εδαφικού σκελετού. Επειδή τα ψυχρόμετρα βασίζονται στη μέτρηση της σχετικής υγρασίας για τον προσδιορισμό της μύζησης των εδαφικών υλικών, είναι πολύ ευαίσθητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Γι' αυτό συνιστάται ο έλεγχος της θερμοκρασίας στο χώρο πραγματοποίησης της μέτρησης. Εναλλακτικά, όταν δεν είναι δυνατός ο έλεγχος της θερμοκρασίας (π.χ. σε επιτόπου μετρήσεις) θα πρέπει να μετρείται και να καταγράφεται και η θερμοκρασία κατά το χρόνο μέτρησης, ώστε, μέσω της κατάλληλης βαθμονόμησης του οργάνου για διάφορες θερμοκρασίες, να μπορεί να γίνει διόρθωση των μετρήσεων ως προς τη θερμοκρασία. Αν και τα ψυχρόμετρα καθεαυτά δεν είναι ιδιαίτερα ακριβά, είναι ακριβοί οι μετρητές που χρησιμοποιούνται για τη διέγερσή τους και την ανάγνωση των μετρήσεων, ενώ το κόστος αυξάνεται ραγδαία και από τις απαιτήσεις ελέγχου της θερμοκρασίας, ή εναλλακτικά της βαθμονόμησης για διάφορες τιμές της, και της ανάγκης τακτικής βαθμονόμησης των οργάνων λόγω συστηματικής μεταβολής των καμπυλών βαθμονόμησης τους με το χρόνο.

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με τενσιόμετρο με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα αποτελεί την πιο πρόσφατη μέθοδο μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού και τη μοναδική μέχρι σήμερα μέθοδο άμεσης μέτρησης της μύζησης στο εύρος τιμών της μύζησης 0-2 MPa. Επιτρέπει τη μέτρηση της μύζησης στο εργαστήριο και επιτόπου ακόμα και σε περιβάλλον ραγδαίων μη μονοτονικών μεταβολών της μύζησης και με αναλογικά μικρό χρόνο επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας (λεπτά ως ώρες). Προσφέρεται επίσης και για μακροχρόνια παρακολούθηση, ενώ ταυτόχρονα το τενσιόμετρο αυτό αποτελεί το μόνο όργανο που μπορεί να ενσωματωθεί με σχετική ευκολία σε άλλες εργαστηριακές συσκευές για τη μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού στα δοκίμια εντός αυτών και μάλιστα για το εύρος τιμών της μύζησης 0 – 2 MPa. Στα μειονεκτήματά της περιλαμβάνονται οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό

προετοιμασίας των τενσιομέτρων (ικανότητα εφαρμογής πολύ υψηλής θετικής πίεσης και πίεσης κενού), αλλά και το υψηλό κόστος των ίδιων των τενσιομέτρων, η αδυναμία κορεσμού του τενσιομέτρου όταν ο πορόλιθος του αποκορεστεί διαρκούσης της μέτρησης, και η απαίτηση για λεπτούς και προσεκτικούς χειρισμούς κατά την εφαρμογή της μεθόδου (και κατά την προετοιμασία του οργάνου για μέτρηση και κατά τη μέτρηση αυτή καθεαυτή).

Προκειμένου λοιπόν για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου μέτρησης της μύζησης αποφασιστικοί παράγοντες που πρέπει να αποσαφηνιστούν πρώτα είναι το είδος των συνθηκών μέτρησης:

- α) εύρος τιμών μύζησης (μικρές ή μεγάλες τιμές ή ταυτοχρόνως και μικρές και μεγάλες τιμές),
- β) ταχύτητα, μέγεθος και φορά μεταβολών της μύζησης (υπάρχουν σημαντικές μεταβολές ή όχι, αν υπάρχουν, είναι ραγδαίες ή αργές, και τέλος είναι μονοτονικές ή ανακυκλικές)
- γ) περιβάλλον μέτρησης της μύζησης (υπάρχουν παράγοντες στο νερό των πόρων που μπορούν να προσβάλλουν το όργανο μέτρησης ή όχι).

Μόλις αποσαφηνιστούν οι παράγοντες αυτοί, πρέπει να καθοριστούν λειτουργικού χαρακτήρα παράγοντες όπως:

- α) το κόστος απόκτησης της δυνατότητας εφαρμογής της κάθε μεθόδου,
- β) το λειτουργικό της κόστος,
- γ) η διαθεσιμότητα εξειδικευμένου προσωπικού για την εφαρμογή της, προκειμένου για μέθοδο που απαιτεί λεπτεπίλεπτους χειρισμούς, και
- δ) οι απαιτήσεις σε συμπληρωματικό εξοπλισμό που χρειάζεται για την πλήρη εκμετάλλευσή της.

Οι απαιτήσεις σε συμπληρωματικό εξοπλισμό μάλιστα συχνά παραγνωρίζονται αλλά αυτός μπορεί να είναι ιδιαίτερα ακριβός (εξοπλισμός κορεσμού πορολίθων υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα, ικανότητα εφαρμογής υψηλής πίεσης αέρα προκειμένου για τη μέθοδο μετατόπισης άξονα, αναλυτικοί ζυγοί ακριβείας 0.0001 g προκειμένου για τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου, ύπαρξη κάποιας μεθόδου ελέγχου της μύζησης προκειμένου για μεθόδους που απαιτούν τακτική βαθμονόμηση κλπ.).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## Η ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετά την περιγραφή της φύσης των μη κορεσμένων εδαφών στο Κεφάλαιο 2 και την επεξήγηση βασικών εννοιών, όπως η επιφανειακή τάση του νερού (ή γενικότερα του υγρού) των πόρων ενός εδαφικού υλικού και η επιρροή της στον εδαφικό σκελετό, η οποία διαπιστώνεται μακροσκοπικά από την παράμετρο τάσης που ορίστηκε ως μύζηση, ακολουθεί η περιγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και των παραγόντων που την επηρεάζουν. Αυτή αποτελεί τη βασική πληροφορία για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών, βάσει της οποίας μπορεί να γίνει η κατάταξή τους ως προς τον βαθμό κορεσμού, αλλά και να προβλεφθεί η εξέλιξη της συμπιεστότητας, της διατμητικής αντοχής και της διαπερατότητάς τους με τον βαθμό κορεσμού. Σε αντιστοιχία με τις μεθόδους μέτρησης της μύζησης, σήμερα έχουν αναπτυχθεί και διάφορες μέθοδοι ελέγχου της μύζησης για τον εργαστηριακό προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, οι οποίες παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο. Παρουσιάζονται επίσης και διάφορα μαθηματικά προσομοιώματα, τα οποία περιγράφουν ή επιχειρούν να προβλέψουν τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού από τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών.

### 4.2 Η ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ

#### 4.2.1 Ποιοτική απεικόνιση. Γενικά χαρακτηριστικά. Σημεία καμπής

Στα πλήρως κορεσμένα εδάφη ο προσδιορισμός και η εξέταση της συσχέτισης της ορθής και της διατμητικής συνιστώσας του τανυστή των τάσεων με διάφορα παραμορφωσιακά μεγέθη (ή

φυσικά χαρακτηριστικά) ή μεταξύ τους επιτρέπει τον προσδιορισμό όλων των απαιτούμενων παραμέτρων για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς τους. Στα μή κορεσμένα εδάφη η ύπαρξη μίας ακόμα παραμέτρου τάσης -της μύζησης- σημαίνει ότι αφενός οι ίδιες συσχετίσεις πρέπει να προσδιορίζονται για διάφορες τιμές της παραμέτρου αυτής και αφετέρου ότι υπάρχει μία ακόμα συσχέτιση: αυτή μεταξύ μύζησης και της ποσότητας του νερού στο έδαφος –με όποιο τρόπο αυτή εκφράζεται. Η ποσότητα του νερού στο έδαφος περιγράφεται με τα φυσικά του χαρακτηριστικά (ποσοστό υγρασίας  $w$ , βαθμός κορεσμού  $S_r$  και ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας  $\theta$ ). Η καμπύλη αυτή ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (soil-water characteristic curve) και, ανάλογα με την ιδιαίτερη υποπεριοχή της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών που ενδιαφέρει, είθισται να εκφράζεται ως η συσχέτιση μεταξύ του κατάλληλου φυσικού χαρακτηριστικού και της μύζησης. Στην πιο πρόσφατη βιβλιογραφία απεικονίζονται όλες οι καμπύλες συσχέτισης, δηλ. ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας  $\theta$  ( $\theta=V_w/V_{ολ}$ ), βαθμός κορεσμού  $S_r$ , ποσοστό υγρασίας  $w$  και λόγος κενών  $e$  ή ειδικός όγκος (specific volume)  $n$  ( $n = 1 + e$ ) με τη μύζηση, οι οποίες και ονομάζονται χαρακτηριστικά ή χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού (soil-water characteristics). Σε αυτές περιλαμβάνονται και οι καμπύλες που συνδέουν κάποια από αυτά τα μεγέθη μεταξύ τους (καμπύλη βαθμού κορεσμού-ποσοστού υγρασίας και καμπύλη λόγου κενών-ποσοστού υγρασίας, η οποία είναι γνωστή και ως καμπύλη συρρίκνωσης –shrinkage curve).

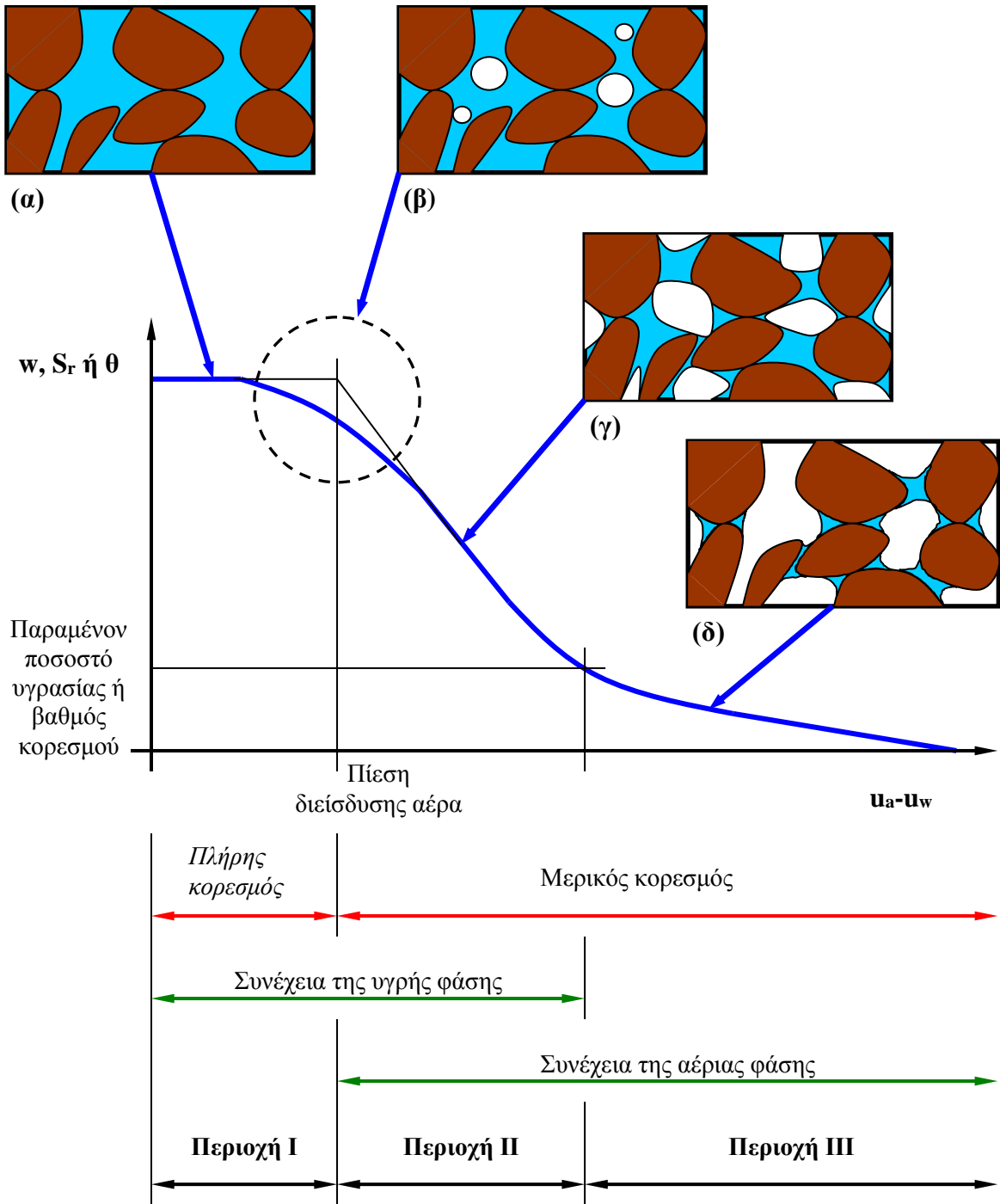
Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού έγινε γνωστή στο χώρο της γεωπονικής επιστήμης πολύ νωρίτερα από ό,τι στο χώρο της εδαφομηχανικής. Στο χώρο της γεωπονικής επιστήμης άλλωστε αναπτύχθηκε και ο ελληνικός όρος μύζηση προς απόδοση του αγγλικού όρου suction. Στο χώρο αυτό ωστόσο η καμπύλη αυτή είναι γνωστή ως καμπύλη συγκράτησης ύδατος (water retention curve), μαρτυρώντας άλλωστε και τους λόγους ενασχόλησης της γεωπονικής επιστήμης με αυτήν, δηλαδή τη μελέτη της συγκράτησης ύδατος από την ανώτερη στρώση του «γεωργικού εδάφους» (agricultural soil) για τον καθορισμό της καταλληλότητάς του για καλλιέργειες και της απαιτούμενης συχνότητας άρδευσης, προκειμένου να διατηρεί στους πόρους του την απαιτούμενη υγρασία για τα καλλιεργούμενα σε αυτό φυτά.

Στην περίπτωση της εδαφομηχανικής ωστόσο, δεν ενδιαφέρει μόνο πως συγκρατεί το έδαφος το νερό και πόσο, αλλά και πως χάνει το έδαφος νερό και πόσο (ξήρανση) και πως το ξαναπροσλαμβάνει (ύγρανση) με όλες τις συνακόλουθες μεταβολές του ολικού όγκου, της διατμητικής αντοχής και της διαπερατότητας του εδάφους. Ενδιαφέρει επίσης πως τα φαινόμενα μεταβολής του ολικού όγκου, της διατμητικής αντοχής και της διαπερατότητας εξελίσσονται



συναρτήσει της ολικής επιβαλλόμενης τάσης και της δομής των φυσικών εδαφών, οι οποίες δεν λαμβάνονται υπόψη στη γεωπονική επιστήμη, αφού το γεωργικό έδαφος έχει μικρό πάχος χωρίς υπερκείμενα φορτία και είναι αρκετά χαλαρό ή μαλακό ώστε πρακτικά να μην υπάρχει δομή. *Δομή* (structure) καλείται στην παρούσα διατριβή ο συνδυασμός της *διάταξης* των μεμονωμένων σωματιδίων -κόκκων και πλακιδίων- των εδαφικών υλικών (fabric) και των *δεσμών* (bonding), δηλαδή όλων των δυνάμεων μεταξύ των σωματιδίων των εδαφικών υλικών που δεν οφείλονται στην ανάπτυξη τριβής μεταξύ τους (Burland, 1990, και Chandler, 2000). Κατά συνέπεια στην εδαφομηχανική, εκτός από τη συσχέτιση ποσοστού υγρασίας-μύζησης, το ίδιο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον υπάρχει και για τις υπόλοιπες από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού. Εν όψει αυτών, στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιείται παντού ο όρος χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με την κατάλληλη διευκρίνιση κάθε φορά για ποιά πρόκειται.

Στο Σχ. 4.1 (ταυτίζεται με το Σχ. 2.22 του Κεφ. 2) συνοψίζονται οι ποιοτικές απεικονίσεις της κατάστασης μεταξύ στερεάς, υγρής και αέριας φάσης ενός εδαφικού υλικού, όπως επεξηγήθηκαν στο Κεφ. 2, και παρουσιάζεται η περιοχή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στην οποία αντιστοιχούν. Η σημασία της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού έγκειται στο ότι επιτρέπει οι διάφορες τιμές του βαθμού κορεσμού από 0 έως 100% να συσχετιστούν με συγκεκριμένες φυσικές καταστάσεις συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης εντός των εδαφικών υλικών, οπότε να αναζητηθεί η αντίστοιχη μηχανική συμπεριφορά για την περιγραφή των μη κορεσμένων εδαφών, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια του πρώτου μέρους. Έτσι, *η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού αποτελεί τη βασική έννοια για την ποιοτική περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και της κατάταξής τους ως προς το βαθμό κορεσμού*. Απαντά δηλαδή στο ερώτημα που συχνά διατυπώνεται «πως κατατάσσεται ένα έδαφος ως προς ένα μέγεθος (μή κορεσμένο), όταν το μέγεθος που χρησιμοποιείται για την κατάταξη λαμβάνει τόσο εκτεταμένο εύρος τιμών;». Μή κορεσμένο δηλαδή είναι και το έδαφος εκείνο με βαθμό κορεσμού 99.99% και εκείνο με βαθμό κορεσμού 50% και εκείνο με βαθμό κορεσμού 0.001%. Μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού λοιπόν γίνεται αντιληπτή η κατάσταση συνύπαρξης της στερεάς, της υγρής και της αέριας φάσης στην οποία αντιστοιχεί κάθε μία από αυτές τις τιμές, και άρα η αντίστοιχη μηχανική συμπεριφορά, με διαφορετικό τρόπο μάλιστα για κάθε εδαφικό υλικό *ανάλογα με τη δική του χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, η οποία συνιστά χαρακτηριστική ιδιότητα κάθε εδαφικού υλικού και καθορίζεται από τις φυσικές του ιδιότητες και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται*.



**Σχήμα 4.1.** Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού με τα ονομαστικά όρια πλήρους και μερικού κορεσμού, τα όρια της συνέχειας της κάθε ρευστής φάσης και την ποιοτική απεικόνιση της συνύπαρξης στερεάς, υγρής και αέριας φάσης: (α) πλήρους κορεσμός (Περιοχή I), (β) μερικός κορεσμός με την αέρια φάση σε μορφή φυσαλίδων (οριακή περιοχή μεταξύ Περιοχής I και II), (γ) μερικός κορεσμός με την υγρή και την αέρια φάση να είναι ταυτόχρονα συνεχείς (Περιοχή II) και (δ) μερικός κορεσμός με την υγρή φάση να μην είναι πια συνεχής (Περιοχή III).

Τα σημεία καμψής επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού περιγράφουν τα σημεία κατά τα οποία έχουμε ραγδαίες αλλαγές της συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης των πόρων και συνακόλουθα της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1 η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού έχει σχήμα ανάστροφης «σιγμοειδούς» καμπύλης με τα δύο σημεία καμψής της να αντιστοιχούν σε δύο χαρακτηριστικά φυσικά μεγέθη και να οριοθετούν τρεις περιοχές μεταξύ των ακραίων καταστάσεων που αντιστοιχούν στα πλήρως κορεσμένα και στα απολύτως ξηρά εδάφη. Τα μεγέθη αυτά και οι τρεις περιοχές έχουν παρουσιαστεί και επεξηγηθεί στο Κεφ. 2. Συνοπτικά, το πρώτο σημείο καμψής αντιστοιχεί στην πίεση διείσδυσης αέρα και το δεύτερο στο παραμένον ποσοστό υγρασίας (residual water content). Στην περιοχή που ορίζεται μεταξύ πλήρους κορεσμού ( $u_a - u_w = 0$ ) και πίεσης διείσδυσης αέρα (Περιοχή I), το έδαφος είναι πρακτικά πλήρως κορεσμένο, έχουμε αρνητική πίεση πόρων ασκούμενη ολόπλευρα στο στερεό σκελετό και ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων. Στην περιοχή περί την πίεση διείσδυσης αέρα, ο αέρας των πόρων βρίσκεται υπό τη μορφή διακριτών φυσαλίδων, ενώ αμέσως μετά από αυτό το στάδιο η αέρια φάση των πόρων γίνεται συνεχής, συνυπάρχοντας με τη συνεχή υγρή φάση των πόρων ως τη μύζηση που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας (Περιοχή II). Από την τιμή αυτή της μύζησης και μετά η υγρή φάση του εδαφικού υλικού χάνει τη συνέχειά της και η κίνηση του νερού εντός των πόρων γίνεται με αυτό σε μορφή υδρατμών (Περιοχή III).

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού είναι κεντρικής σημασίας για την κατανόηση και περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών. Σήμερα έχουν αναπτυχθεί έμμεσες μέθοδοι προσδιορισμού της μεταβολής της διατμητικής αντοχής (βλ. Κεφ. 6) και του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό και τον αέρα (βλ. Κεφ. 7) με τη μύζηση από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού, ενώ η καμπύλη λόγου κενών ή ειδικού όγκου με τη μύζηση από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού (για διάφορες τιμές της τάσης) περιγράφει τις μεταβολές όγκου συναρτήσει της μύζησης (βλ. Κεφ. 5).

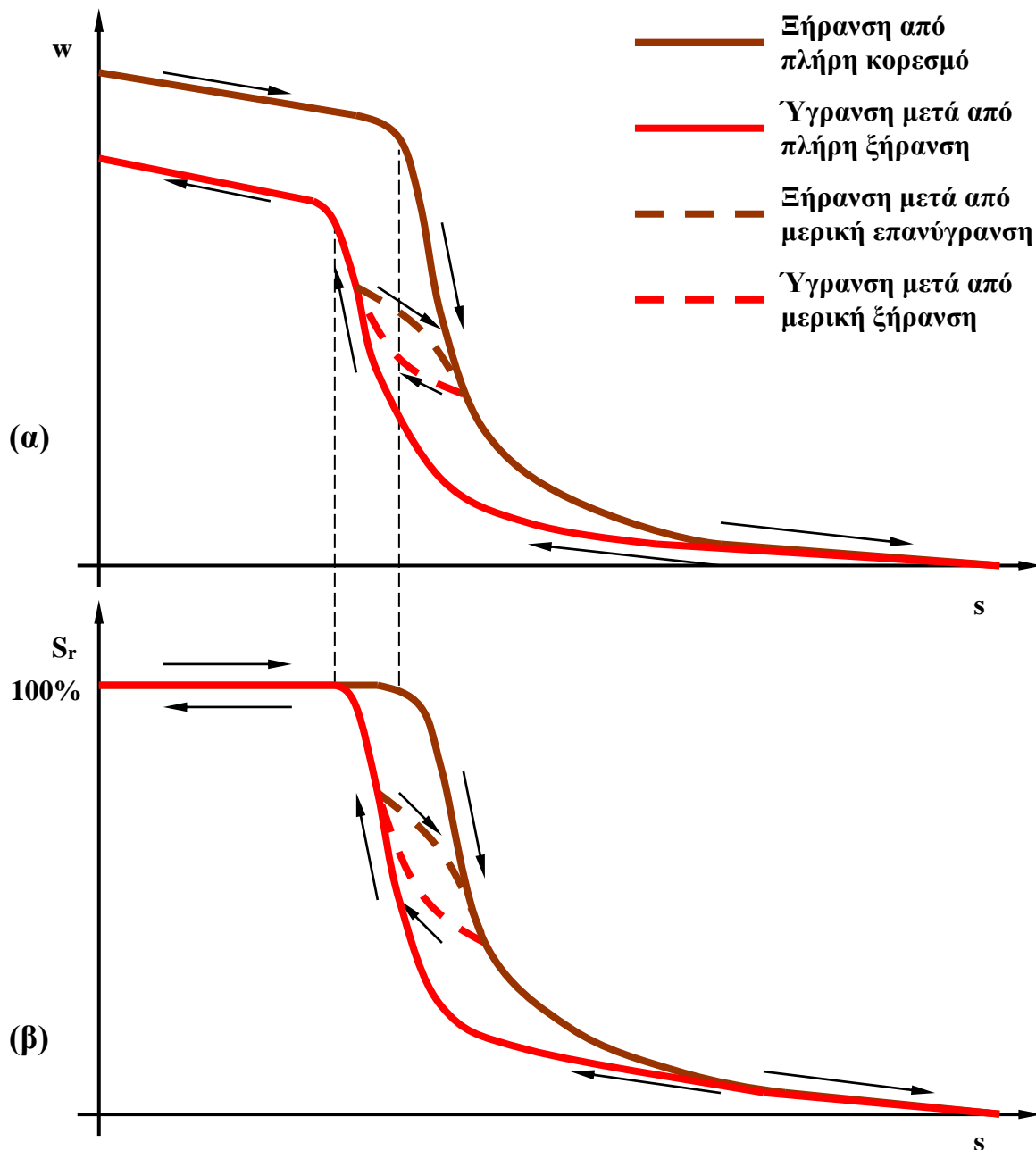
#### 4.2.2 Υστέρηση παραμέτρου συσχέτισης κατά την ύγρανση

Η τυπική μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, η οποία παρουσιάστηκε στο Σχήμα 4.1, είναι η μορφή της καμπύλης όταν αρχικώς πλήρως κορεσμένο εδαφικό υλικό αρχίζει να χάνει νερό μέχρι την πλήρη ξήρανσή του (καμπύλη ξήρανσης ή κλάδος ξήρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ή καμπύλη παρθένας ξήρανσης – virgin drying

curve). Εφόσον στο εδαφικό υλικό δεν έχει εμφανιστεί αέρια φάση (περιοχή μεταξύ μηδενικής μύζησης και πίεσης διείσδυσης αέρα), οποιαδήποτε αναστροφή της εξέλιξης της μύζησης (ύγρανση) ακολουθεί τον ίδιο κλάδο επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης). Αυτό δεν συμβαίνει αν η μύζηση γίνει μεγαλύτερη της πίεσης διείσδυσης αέρα. Στα Σχ. 4.2α και 4.2β παρουσιάζεται ποιοτικά η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης και βαθμού κορεσμού-μύζησης αντίστοιχα. Η συνεχής καφέ γραμμή απεικονίζει τον κλάδο ξήρανσης από πλήρη κορεσμό, η συνεχής κόκκινη γραμμή τον κλάδο ύγρανσης από πλήρη ξήρανση (ξήρανση πέρα και από το παραμένον ποσοστό υγρασίας), η διακεκομμένη καφέ γραμμή τον κλάδο ξήρανσης μετά από μερική επανύγρανση (δηλ. επανύγρανση μέχρι τιμές του βαθμού κορεσμού μικρότερες του 100%) και η διακεκομμένη κόκκινη γραμμή τον κλάδο ύγρανσης μετά από μερική ξήρανση (δηλ. ξήρανση μέχρι τιμές του ποσοστού υγρασίας μεγαλύτερες του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας). Οι κλάδοι ξήρανσης και ύγρανσης σε ενδιάμεσες καταστάσεις ονομάζονται στη αγγλική ορολογία scanning curves, όρος που επιλέχθηκε να αποδοθεί με τον όρο *ενδιάμεσοι κλάδοι*. Ο όρος ξήρανση αποδίδει τους αγγλικούς όρους drying ή desorption και ο όρος ύγρανση τους αγγλικούς όρους wetting, sorption ή imbibition. Παρατηρείται ότι μεταξύ ξήρανσης από πλήρη κορεσμό πέρα από την πίεση διείσδυσης αέρα και ύγρανσης εμφανίζεται *υστέρηση* (hysteresis) της παραμέτρου συσχέτισης με τη μύζηση, δηλ. *για κάθε τιμή της μύζησης η παράμετρος συσχέτισης έχει μεγαλύτερη τιμή κατά την ξήρανση από όση έχει κατά την ύγρανση*.

Σε ό,τι αφορά την παράμετρο συσχέτισης, παρατηρείται ότι ο βαθμός κορεσμού δεν παρουσιάζει συνήθως υστέρηση από μία τιμή της μύζησης και κάτω, δηλ. θα ξαναγίνει 100% κατά την ύγρανση ακόμα και από πλήρη ξήρανση<sup>1</sup>, ενώ το ποσοστό υγρασίας παρουσιάζει υστέρηση για οσοδήποτε χαμηλές τιμές της μύζησης, δηλ. κατά την ύγρανση μέχρι τον πλήρη κορεσμό (ακόμα και μετά από μερική ξήρανση), στον πλήρη κορεσμό θα έχει μικρότερη τιμή από εκείνη που είχε πριν την έναρξη της ξήρανσης από πλήρη κορεσμό. Η υστέρηση αυτή μπορεί να είναι από πολύ μεγάλη έως πολύ μικρή, ανάλογα με το βαθμό στον οποίο προχώρησε η ξήρανση και τη φύση του εδαφικού υλικού. Εάν η ξήρανση από πλήρη κορεσμό δεν έχει προχωρήσει πολύ πέρα από την πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού, τότε η υστέρηση θα είναι μικρότερη από όση θα ήταν εάν η ξήρανση είχε προχωρήσει περισσότερο. Η υστέρηση θα γίνει μέγιστη εάν η ξήρανση προχωρήσει μέχρι το παραμένον ποσοστό υγρασίας και θα παραμείνει σταθερή όσο και αν μειω-

<sup>1</sup> Ορισμένες φορές ακόμα και ο βαθμός κορεσμού μπορεί να μην ξαναγίνει 100% κατά την ύγρανση λόγω εγκλωβισμού μεμονωμένων φυσαλίδων αέρα στους πόρους των εδαφικών υλικών, οι οποίες δεν μπορούν να διαφύγουν. Είναι ο λόγος για τον οποίο οι πορόλιθοι των τενσιομέτρων (Κεφ. 3) πρέπει να υποβληθούν σε πολύ υψηλή θετική πίεση μετά από την ξήρανσή τους για να εξασφαλιστεί ο πλήρης κορεσμός τους.



**Σχήμα 4.2.** Ποιοτική απεικόνιση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης (α) και βαθμού κορεσμού-μύζησης (β), με τον κλάδο ξήρανσης από πλήρη κορεσμό, τον κλάδο ύγρυνσης από πλήρη ξήρανση, και ενδεικτική απεικόνιση κλάδου ξήρανσης μετά από μερική επανύγρυνση και κλάδου ύγρυνσης μετά από μερική ξήρανση (ενδιάμεσοι κλάδοι –scanning curves). Οι λεπτές διακεκομμένες γραμμές επιδεικνύουν την αντιστοιχία των σημείων καμπής στα δύο διαγράμματα.

θεί το ποσοστό υγρασίας πέρα από το παραμένον ποσοστό υγρασίας. Γι' αυτόν το λόγο οι κλάδοι ξήρανσης από πλήρη κορεσμό και ύγρυνσης μετά από πλήρη ξήρανση οριοθετούν

*ουσιαστικά τις δυνατές καταστάσεις μεταβολής των παραμέτρων συσχέτισης με τη μύζηση για δεδομένη αρχική εντατική κατάσταση πλήρους κορεσμού (συνδυασμό τανυστή των τάσεων και λόγου κενών) και μπορούν να ονομάζονται και *οριακοί κλάδοι της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού*.*

Σε ό,τι αφορά την επιρροή της φύσης του εδαφικού υλικού, γενικά όσο πιο χονδρόκοκκο είναι το εδαφικό υλικό, τόσο μικρότερη γίνεται αυτή η υστέρηση<sup>2</sup>, ενώ το αντίστροφο ισχύει για τα λεπτόκοκκα αργιλικά εδάφη: όσο μεγαλύτερο το ποσοστό αργίλου και όσο μεγαλύτερο το όριο υδαρότητας και ο δείκτης πλαστικότητας, τόσο μεγαλύτερη η υστέρηση. Η υστέρηση μπορεί να μελετηθεί ποσοτικά με την παρακολούθηση της μεταβολής των εξής μεγεθών: της πίεσης διείσδυσης αέρα, του παραμένου ποσοστού υγρασίας και της μύζησης επίτευξής του, αυτού καθαυτού του βαθμού κορεσμού για μηδενική μύζηση, του ποσοστού υγρασίας στον πλήρη κορεσμό και του αντίστοιχου λόγου κενών (ειδικά η μεταβολή του λόγου κενών εξετάζεται διεξοδικά στο Κεφ. 5).

Σε ό,τι αφορά την πίεση διείσδυσης αέρα, αυτή είναι μεγαλύτερη στον κλάδο ξήρανσης από πλήρη κορεσμό, από όση είναι στον κλάδο ύγρανσης από πλήρη ξήρανση. Για ενδιάμεσους κλάδους ύγρανσης από μερική ξήρανση και κλάδους ξήρανσης μετά από μερική επανύγρανση, είναι αμφίβολο ότι ακολουθείται μονοτονική μεταβολή μεταξύ των δύο ακραίων τιμών της για τους οριακούς κλάδους της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, αν και η έλλειψη σχετικών πειραματικών δεδομένων δεν μπορεί να το αποκλείσει. Σε κάθε περίπτωση είναι σκόπιμη η καταγραφή των τιμών αυτών για διάφορα υλικά και η μεταξύ τους συσχέτιση. Το παραμένον ποσοστό υγρασίας και ο λόγος κενών σε αυτό μεταβάλλονται αλλά η μύζηση επίτευξής τους ακόμα περισσότερο: κατά μήκος του κλάδου ύγρανσης από πλήρη ξήρανση γίνεται μικρότερη από όση ήταν κατά μήκος του κλάδου ξήρανσης από πλήρη κορεσμό (με την ίδια παρατήρηση να ισχύει για τους ενδιάμεσους κλάδους). Επίσης εκεί που καταγράφεται σαφής μεταβολή είναι στο ποσοστό υγρασίας στον πλήρη κορεσμό και στον λόγο κενών που αντιστοιχεί σε αυτό. Το ποσοστό υγρασίας είναι πάντοτε μικρότερο μετά από ξήρανση πέρα από την πίεση διείσδυσης αέρα ακόμα και αν αυτή δεν εκτείνεται μέχρι το παραμένον ποσοστό υγρασίας. Η συνακόλουθη μείωση του λόγου κενών εκφράζει την ογκομετρική μεταβολή που συμβαίνει μετά από κύκλους ξήρανσης-ύγρανσης και εξετάζεται διεξοδικά στο Κεφ. 5. Επισημαίνεται δε ότι ορισμένες φορές ακόμα και ο βαθμός κορεσμού μπορεί να μην ξαναγίνει

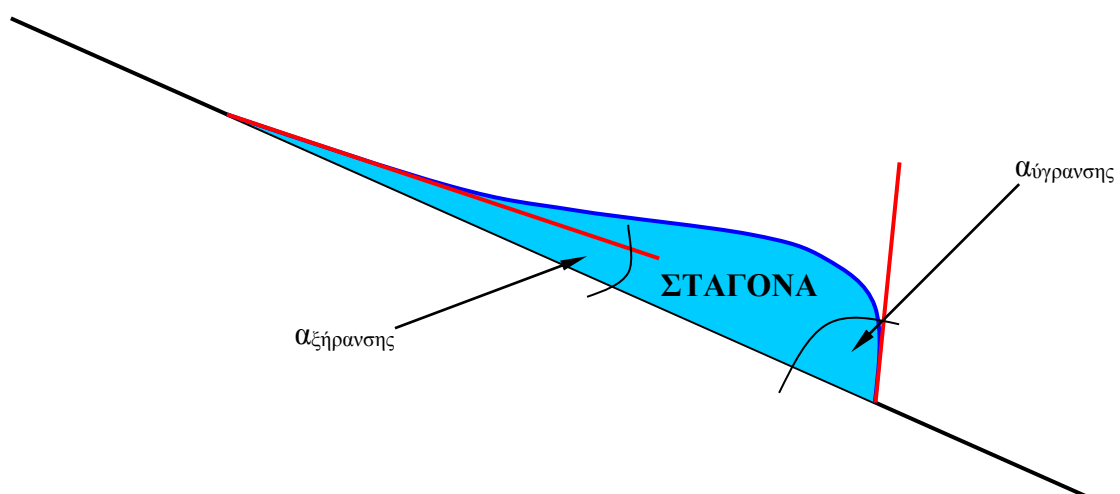
---

<sup>2</sup> Η παρατήρηση αυτή δεν ισχύει για την λιθορριπή (rockfill). Σχετικά με αυτήν και τη συμπεριφορά της μετά από κύκλους ξήρανσης-ύγρανσης, βλ. Κεφ. 5.

100% κατά την ύγρανση λόγω εγκλωβισμού μεμονωμένων φυσαλίδων αέρα στους πόρους των εδαφικών υλικών, καθιστώντας σκόπιμο τον προσδιορισμό της τιμής του βαθμού κορεσμού μετά από ύγρανση για μηδενική μύζηση.

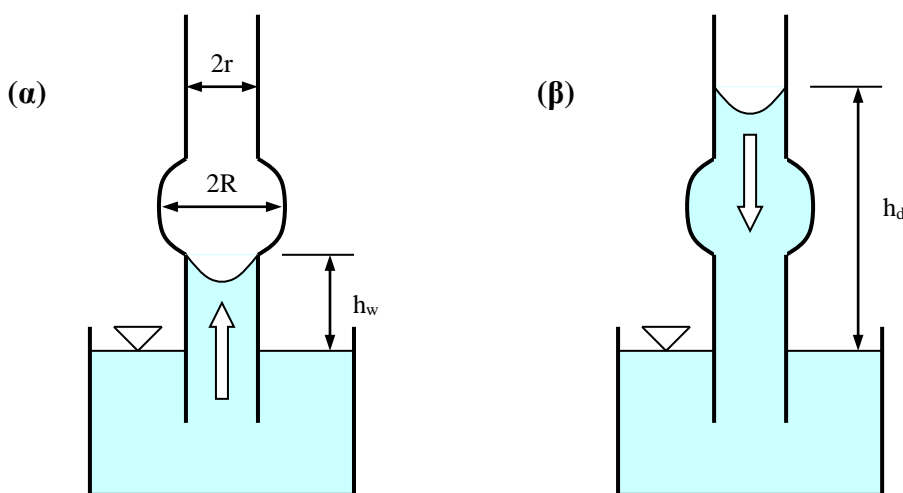
Σε ό,τι αφορά τη θεωρητική εξήγηση της εμφάνισης υστέρησης μετά από κύκλους ξήρανσης-ύγρανσης, υπενθυμίζεται η Εξ. 2.10 (Κεφ. 2) η οποία συσχετίζει το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης μεταξύ απειρομήκων πλακών με τη διαφορά πίεσης μεταξύ αέριας και υγρής φάσης, το ειδικό βάρος του υγρού μεταξύ των πλακών, την απόστασή τους και τη γωνία καμπύλωσης της διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης, η οποία εκφράζει την αλληλεπίδραση της στερεάς με την υγρή φάση (διαβροχή της στερεάς φάσης από την υγρή ή όχι).

Στο Σχ. 4.3 παρουσιάζεται ποιοτική απεικόνιση σταγόνας υγρού που διαβρέχει τη στερεά φάση καθώς κυλά υπό την επιρροή της βαρύτητας επί κεκλιμένης επιφάνειας. Όπως φαίνεται, η γωνία επαφής είναι μεγαλύτερη μπροστά (προχώρηση με διαβροχή της στερεάς φάσης -ύγρανση) από όση είναι πίσω (απομάκρυνση της υγρής φάσης -ξήρανση). Η τιμή λοιπόν του ύψους τριχοειδούς ανυψώσεως που υπολογίζεται από την γωνία επαφής κατά την ύγρανση είναι μικρότερη από την τιμή που υπολογίζεται για τη γωνία επαφής κατά την ξήρανση, δικαιολογώντας μέσα από αυτό το απλό εμπειρικό προσομοίωμα τη διαφορά μεταξύ πίεσης διεύθυνσης αέρα επί των κλάδων ξήρανσης και ύγρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (Lu & Likos, 2004).



**Σχήμα 4.3.** Σταγόνα υγρού επί στερεάς επιφάνειας την οποία διαβρέχει κατά την κύλιση της υπό την επίδραση της βαρύτητας.

Εναλλακτικά, ο μηχανισμός της υστέρησης έχει αποδοθεί στο «φαινόμενο του μελανοδοχείου» (ink-bottle effect). Το παράδειγμα της σταγόνας υγρού που διαβρέχει τη στερεά φάση καθώς κυλά υπό την επιρροή της βαρύτητας επί κεκλιμένης επιφάνειας αποδίδει καλύτερα την υστέρηση της πίεσης διείσδυσης αέρα κατά την ξήρανση και την ύγρανση αλλά το «φαινόμενο του μελανοδοχείου» αποδίδει καλύτερα την υστέρηση στο ποσοστό υγρασίας. Στο Σχ. 4.4 παρουσιάζεται ένας τριχοειδής σωλήνας μεταβλητής διαμέτρου («μελανοδοχείο») κατά την ύγρανση (Σχ. 4.4α) και την ξήρανση (Σχ. 4.4β). Στο στενότερο του τμήμα ο σωλήνας έχει ακτίνα  $r$  και στο φαρδύτερό του τμήμα ακτίνα  $R$ . Κατά την ύγρανση (Σχ. 4.4α) το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης θα έχει μέγιστη τιμή  $h_w$  καθοριζόμενη από τη θέση εμφάνισης της μεγαλύτερης διαμέτρου του τριχοειδούς σωλήνα, ακόμα και αν είναι μικρότερη από τη θεωρητική τιμή που αντιστοιχεί στην μικρή ακτίνα  $r$  (υπό την προϋπόθεση ότι η τιμή  $h_w$  είναι μεγαλύτερη από την θεωρητική τιμή που αντιστοιχεί στην μεγάλη ακτίνα  $R$ ). Αντίθετα κατά την ξήρανση (Σχ. 4.4β), το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης θα έχει μέγιστη τιμή  $h_d$  καθοριζόμενη μόνο από τη μικρή ακτίνα  $r$  (υπό την προϋπόθεση ότι η θέση εμφάνισης της μεγαλύτερης ακτίνας του σωλήνα βρίσκεται σε ύψος μικρότερο της τιμής  $h_d$ ). Στο παράδειγμα της γεωμετρίας του Σχ. 4.4 είναι  $h_d > h_w$  δικαιολογώντας την υστέρηση στην πίεση διείσδυσης αέρα, αλλά εάν εξεταστεί και η περιεχόμενη ποσότητα νερού στους τριχοειδείς σωλήνες στις δύο περιπτώσεις («ποσοστό υγρασίας») προκύπτει μεγαλύτερη κατά την ξήρανση παρά την ύγρανση, αποδίδοντας επιτυχώς το αντίστοιχο φαινόμενο στις πραγματικές καμπύλες εδάφους-νερού: *την ικανότητα δηλαδή των εδαφικών υλικών να διατηρούν περισσότερο νερό στους πόρους τους κατά την ξήρανση από όσο διατηρούν κατά την ύγρανση.*



**Σχήμα 4.4.** Τριχοειδής σωλήνας μεταβλητής διαμέτρου κατά την ύγρανση (α) και την ξήρανση (β).



Το παράδειγμα του τριχοειδούς σωλήνα μεταβλητής διαμέτρου επιδεικνύει απλά την επιρροή της παρουσίας πόρων διαφόρων μεγεθών στα πραγματικά εδαφικά υλικά. Κατά την ξήρανση, πόροι μεγαλύτερου μεγέθους στο εσωτερικό τεμαχών εδαφικών υλικών παραμένουν γεμάτοι με νερό υπό μύζηση μεγαλύτερη της πίεσης διείσδυσης αέρα που αντιστοιχεί στο μέγεθός τους, επειδή δεν έχει αδειάσει ακόμα το νερό από πόρους μικρότερου μεγέθους στις παρυφές των τεμαχών, οι οποίοι ενδεχομένως περιβάλλουν τους προηγούμενους πόρους, και η πίεση διείσδυσης αέρα που αντιστοιχεί στο δικό τους μέγεθος πόρων δεν έχει ακόμα ξεπεραστεί από την μύζηση του εδαφικού υλικού. Οι ίδιοι πόροι αντίθετα δεν θα ξαναγεμίσουν υπό την ίδια τιμή της μύζησης, αφού για να γεμίσουν θα πρέπει η μύζηση του εδαφικού υλικού να γίνει μικρότερη της πίεσης διείσδυσης αέρα που αντιστοιχεί στο δικό τους μέγεθος και όχι στο μέγεθος των στενότερων διόδων στις παρυφές τους. Στη βιβλιογραφία καταγράφονται αναλυτικές προσπάθειες περιγραφής αυτού του μηχανισμού για υποθετικές διατομές εδαφικών υλικών (Childs, 1969).

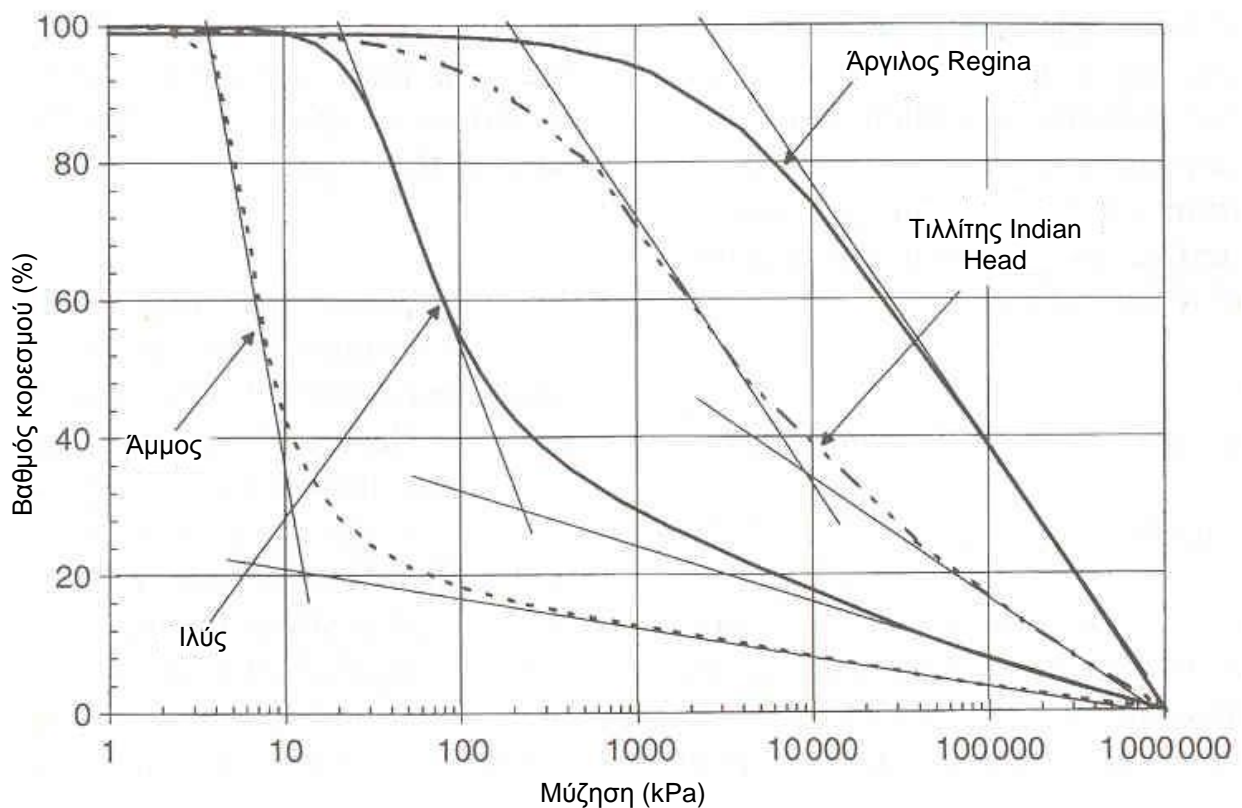
Τα προαναφερθέντα προσομοιώματα περιγράφουν επί της αρχής τι συμβαίνει σε χονδρόκοκκα εδάφη. Σε ό,τι αφορά αργιλικά εδαφικά υλικά, η υστέρηση εξηγείται από την παρουσία και άλλων μηχανισμών. Στο Κεφ. 2 αναφέρθηκε ο μηχανισμός που πρότεινε ο Bolt (1956) για να εξηγήσει την συρρίκνωση των αργίλων κατά την ξήρανση (§2.3.2.2). Τα πλακίδια της αργίλου βρίσκονται σε ισορροπία με το προσροφημένο, το απορροφημένο και το ελεύθερο νερό που τα περιβάλλει με το τελευταίο να βρίσκεται υπό δεδομένη συγκέντρωση ξένων ουσιών. Η συγκέντρωση αυτή καθορίζει την ισορροπία ηλεκτρικών δυνάμεων μεταξύ των πλακιδίων και του νερού στις διάφορες μορφές του. Όταν αρχίζει να απομακρύνεται ελεύθερο νερό<sup>3</sup> (μέσω εξάτμισης ή απομάκρυνσης λόγω βαρύτητας) αυξάνεται η συγκέντρωση ξένων ουσιών σε αυτό προκαλώντας μετακίνηση μορίων νερού για την επίτευξη χημικής ισορροπίας από τη στρώση του απορροφημένου νερού μειώνοντας το πάχος της. Έτσι τα πλακίδια της αργίλου πλησιάζουν μεταξύ τους, χωρίς να μπορούν να ξανααπομακρυνθούν κατά την ύγρανση, αφού δεν μπορούν να ξεπεραστούν οι ηλεκτρικές δυνάμεις που έχουν πλέον αναπτυχθεί μεταξύ τους.

---

<sup>3</sup> Το μόνο που μπορεί να κινηθεί μεταξύ των αργιλικών πλακιδίων.

### 4.2.3 Παραδείγματα χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού για διάφορα εδαφικά υλικά

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται μερικά παραδείγματα χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού για χαρακτηριστικά εδαφικά υλικά όπως άμμος, ιλύς και αργίλους χαμηλής και υψηλής πλαστικότητας. Στο Σχ. 4.5 παρουσιάζονται σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης οι κλάδοι ξήρανσης από πλήρη κορεσμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού τεσσάρων εδαφικών υλικών από τον Καναδά (Vanapalli, et al., 1999). Τα τέσσερα αυτά υλικά είναι μία άμμος, μία ιλύς, ένας τιλλίτης (Indian Head till) και μία άργιλος υψηλής πλαστικότητας (Regina clay).



**Σχήμα 4.5.** Κλάδοι ξήρανσης από πλήρη κορεσμό των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού τεσσάρων εδαφικών υλικών από τον Καναδά (από τους Vanapalli et al., 1999): άμμος, ιλύς, τιλλίτης (Indian Head till) και άργιλος (Regina clay).

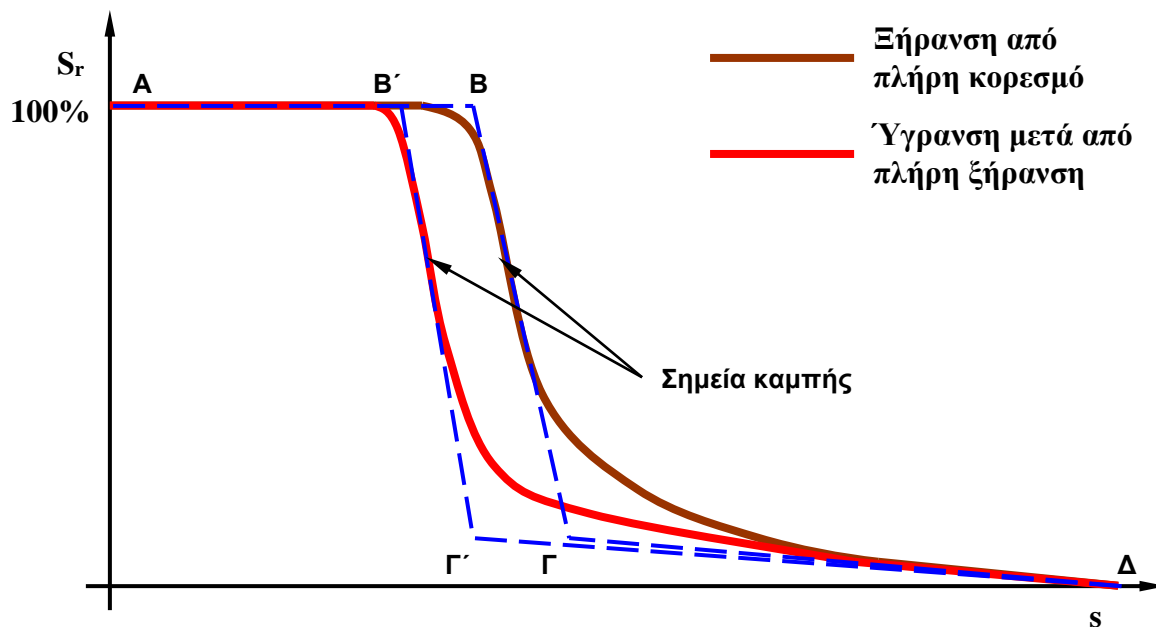
Η άμμος περιείχε μόλις 2% ιλύ και παρουσιάζει πίεση διείσδυσης αέρα περί τα 4 kPa, η ιλύς περιείχε 52.5% άμμο και 10% άργιλο με όριο υδαρότητας 22% και δείκτη πλαστικότητας 5.5 και

παρουσιάζει πίεση διείσδυσης αέρα περί τα 25 kPa, ο τιλλίτης περιείχε 28% άμμο και 30% άργιλο με όριο υδαρότητας 35.5% και δείκτη πλαστικότητας 18.5 και παρουσιάζει πίεση διείσδυσης αέρα περί τα 200 kPa, και η άργιλος περιείχε μόλις 8% άμμο και 51% άργιλο με όριο υδαρότητας 75.5% και δείκτη πλαστικότητας 50.5 και παρουσιάζει πίεση διείσδυσης αέρα περί τα 2500 kPa. Σε όλες τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού του Σχ. 4.5 είναι εμφανές το σχήμα της ανάστροφης σιγμοειδούς καμπύλης εκτός από την περίπτωση της αργίλου υψηλής πλαστικότητας, όπου πρακτικά δεν εντοπίζεται δεύτερο σημείο καμπής. Κατά τους Vanapalli, et al. (1999) αυτό είναι ενδεχόμενο για λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά πολύ υψηλής πλαστικότητας. Αντίστοιχα για πολύ χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά είναι δυνατόν να μην υπάρχει το πρώτο σημείο καμπής που αντιστοιχεί στην πίεση διείσδυσης αέρα<sup>4</sup>.

Στο Σχ. 4.5 επίσης φαίνονται οι ευθείες που προσομοιώνουν τα τμήματα κάθε καμπύλης. Κάθε ανάστροφη σιγμοειδής καμπύλη μπορεί απλοϊκά να προσομοιωθεί από τρία ευθύγραμμο τμήματα (Σχ. 4.6). Το πρώτο (AB, στο Σχ. 4.6), είναι οριζόντιο και εκτείνεται μέχρι το σημείο τομής του δεύτερου ευθύγραμμου τμήματος με την ευθεία  $S_r=100\%$ . Το δεύτερο (ΒΓ, στο Σχ. 4.6) διέρχεται από το σημείο καμπής του κλάδου της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στην Περιοχή II, παραμένοντας εφαπτόμενο σε αυτόν για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο τμήμα, αλλά πάντοτε με τέτοια κλίση ώστε να αφήνει το ίδιο μακριά τα αντίστοιχης κατακόρυφης απόστασης από το σημείο καμπής σημεία της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού πριν και μετά από αυτό το σημείο καμπής (πριν από αυτό το σημείο η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω και μετά προς τα πάνω). Το τρίτο και τελευταίο ευθύγραμμο τμήμα (ΓΔ, στο Σχ. 4.6) είναι εφαπτόμενο στο τμήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στην Περιοχή III και τέμνει το ευθύγραμμο τμήμα ΒΓ. Η πολυγωνική γραμμή ΑΒΓΔ είναι ο απλούστερος τρόπος προσομοίωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, για εδαφικά υλικά με ένα κυρίαρχο μέγεθος πόρων (όπως επεξηγείται στην §4.2.5), που με τη σειρά του αντιστοιχεί συνήθως σε ένα κυρίαρχο μέγεθος σωματιδίων, κόκκων ή πλακιδίων (όπως επεξηγείται στην §4.2.4). Στο Σχ. 4.6 παρουσιάζεται και η πολυγωνική γραμμή ΑΒ'Γ'Δ, η οποία προσομοιώνει τον κλάδο ύγρανσης από πλήρη ξήρανση. Οι κορυφές των πολυγωνικών αυτών γραμμών χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των ονομαστικών τιμών της πίεσης διείσδυσης αέρα (μύζηση στα σημεία Β και Β'), του παραμένουτος βαθμού κορεσμού (βαθμός κορεσμού στα σημεία Γ και Γ') και της μύζησης επίτευξής του (μύζηση στα σημεία Γ και Γ'). Η αντιστοίχιση των ονομαστικών αυτών τιμών σε διαγράμματα της χαρακτηριστικής

<sup>4</sup> Είναι σκόπιμη σε αυτό το σημείο η αναδρομή στην §3.4.3 όπου επεξηγείται η μορφή των καμπυλών βαθμονόμησης των χαρτιών φίλτρου.

καμπύλης εδάφους-νερού εκφρασμένα σε άλλους όρους (εκτός από τον βαθμό κορεσμού και τη μύζηση), δίνει τις ονομαστικές τιμές των χαρακτηριστικών τιμών και επί αυτών (παραμένον ποσοστό υγρασίας, παραμένων λόγος κενών κλπ).



**Σχήμα 4.6.** Ποιοτική απεικόνιση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, με τον κλάδο ξήρανσης από πλήρη κορεσμό και τον κλάδο ύγρανσης από πλήρη ξήρανση και την απλούστερη δυνατή προσομοίωσή τους με πολυγωνικές γραμμές.

Σε ό,τι αφορά την τιμή της μύζησης στο σημείο  $\Delta$ , πειραματικά δεδομένα υποδεικνύουν ότι αυτή είναι η ίδια για όλα τα εδαφικά υλικά (ανεξάρτητα από τη θέση των υπολοίπων κλάδων, δηλαδή πόσο λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα είναι) και ισούται με μία τιμή λίγο μικρότερη των 1000000 kPa (Croney & Coleman, 1961, Koorevaar, et al., 1983, Fredlund & Rahardjo, 1993). Η τιμή αυτή της μέγιστης μύζησης όλων των εδαφικών υλικών υποστηρίζεται και από θερμοδυναμικές θεωρήσεις (Richards, 1965), αφού μία μοναδική τιμή ολικής μύζησης αντιστοιχεί σε μηδενική σχετική υγρασία. Για λόγους ευκολίας στην μαθηματική προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού η τιμή αυτή λαμβάνεται για όλα τα εδαφικά υλικά 1000000 kPa, και συνήθως χρησιμοποιείται ως σταθερό σημείο σε κάθε εξίσωση προσομοίωσης. Στα Κεφ. 14 και 15 του Μέρους II παρουσιάζονται οι κλάδοι ξήρανσης από πλήρη κορεσμό χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού εδαφικών υλικών από τον ελλαδικό χώρο, οι οποίοι προσδιορίστηκαν εργαστηριακά στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

#### 4.2.4 Συσχέτιση με την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης και τα υπόλοιπα φυσικά χαρακτηριστικά

Παρά την κεντρική σημασία της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών, ο πειραματικός προσδιορισμός της αποτελεί μέχρι σήμερα ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία που απαιτεί μεγάλη προσοχή, επιβάλλει συχνά την επανάληψη της δοκιμής προσδιορισμού, ενώ ακόμα και όταν τηρούνται οι αυστηρότεροι όροι εκτέλεσης των απαιτούμενων εργαστηριακών δοκιμών εξακολουθούν να υπεισέρχονται αμφιλεγόμενες παραδοχές κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων (βλ. §4.3). Γι' αυτόν το λόγο από πολύ νωρίς είχε εκφραστεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την κατάστρωση έμμεσων μεθόδων προσδιορισμού της. Στην προσπάθεια αυτή ακολουθήθηκαν δύο πορείες. Η μία αφορούσε στην κατάστρωση μαθηματικών προσομοιωμάτων της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού με αριθμό παραμέτρων, οι οποίες προβλέπονται από εμπειρικές συσχετίσεις, οπότε εμμέσως προβλέπονται και οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού από εμπειρικές συσχετίσεις, και η άλλη αφορούσε στην απευθείας συσχέτισή της με τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών.

Η πρώτη προσέγγιση συνιστά περισσότερο μέθοδο προσομοίωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού παρά μέθοδο πρόβλεψής της (παρόλο που εξελίχθηκε ουσιαστικά σε τέτοια) και παρουσιάζεται εκτενώς στην §4.4. Συνήθως σε άλλες καμπύλες μεταβολής διαφορετικών παραμέτρων των εδαφικών υλικών (π.χ. στην καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης), τα πραγματικά πειραματικά σημεία, δηλαδή οι συνδυασμοί γνωστής, *υλοποιηθείσας* τιμής της κατακόρυφης τάσης και του λόγου κενών για την τάση αυτή, χρησιμοποιούνται ως έχουν και ενώνονται μεταξύ τους με ευθύγραμμα τμήματα. Στην περίπτωση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού αντίθετα, τα πειραματικά σημεία δεν ενώνονται αλλά χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό μίας καμπύλης βέλτιστης προσέγγισής τους (*best-fit curve*). Οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό είναι οι εξής:

- μπορεί να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι ελέγχου της μύζησης για τον προσδιορισμό της καμπύλης του ίδιου εδαφικού υλικού (συνήθως ανάλογα με το εύρος τιμών της μύζησης),
- συνήθως, ακόμα και για την ίδια τιμή της μύζησης, μπορεί να γίνουν περισσότερες μετρήσεις της μίας,
- συχνά υιοθετούνται μέθοδοι και πειραματικές διατάξεις που επιβάλλουν τη χρήση διαφορετικών δοκιμών για κάθε τιμή της μύζησης, και

- ακόμα και όταν χρησιμοποιείται μοναδικό δοκίμιο, οι παραδοχές που υπεισέρχονται συχνά μπορεί να είναι τέτοιες που να υπάρχει μία συστηματική στατιστική προκατάληψη (statistical bias) των αποτελεσμάτων προς μία κατεύθυνση, αλλά
- αυτή να υπάρχει μόνο σε ένα εύρος τιμών της μύζησης, λόγω της πειραματικής μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε εκεί, και να μην υπάρχει σε άλλο εύρος τιμών της μύζησης, όπου χρησιμοποιήθηκε άλλη πειραματική μέθοδος.

Για αυτούς τους λόγους η διασπορά των πειραματικών σημείων της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι συνήθως μεγάλη (τουλάχιστον μεγαλύτερη από όση είναι σε δοκιμές σε πλήρως κορεσμένα εδάφη) και προτιμάται η προσέγγιση των πειραματικών σημείων από μία καμπύλη προσομοίωσης, παρά η ένωση των σημείων με ευθύγραμμα τμήματα. Οι προαναφερθέντες λόγοι για αυτήν την πρακτική επεξηγούνται στην §4.3 για τον εργαστηριακό προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, και αυτή καθεαυτή η μεθοδολογία προσομοίωσης στην §4.4.

Σε ό,τι αφορά την δεύτερη προσέγγιση έμμεσου προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, οι πιο ενδιαφέρουσες συσχετίσεις που έχουν αναπτυχθεί τη συσχετίζουν με την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης, ενώ εναλλακτικά άλλες μέθοδοι τη συσχετίζουν με τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών. Το ιδιαίτερο ενδιαφέρον της συσχέτισης με την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης έγκειται στη θεωρητική συσχέτιση της ικανότητας συγκράτησης ύδατος με το μέγεθος των πόρων· με το μέγεθος των κόκκων να χρησιμοποιείται εμμέσως για να εκφράσει το μέγεθος των πόρων. Οι σχετικές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί από τους Gupta & Larson (1979), Arya & Paris (1981), Haverkamp & Parlange (1986) και Fredlund, et al. (1997α & 1997β).

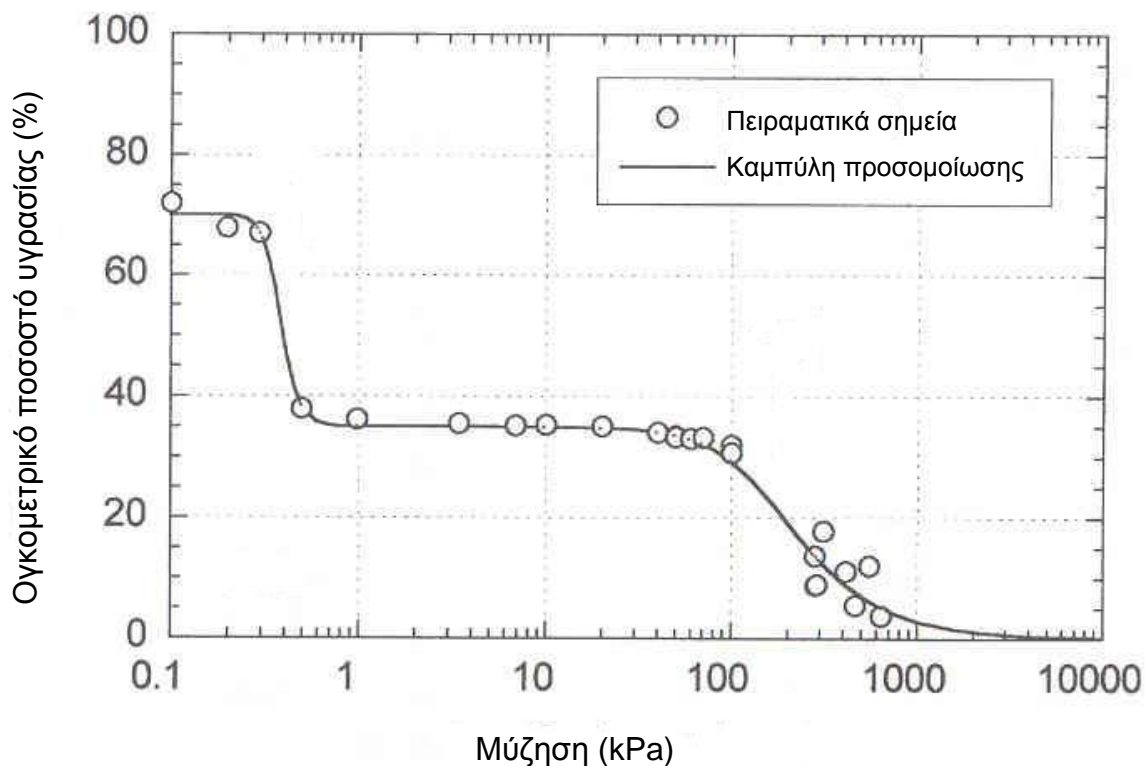
Βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή των μεθόδων αυτής της προσέγγισης είναι η ικανότητα μαθηματικής προσομοίωσης της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών, ώστε από τη μαθηματική εξίσωση που τις προσομοιώνει να μπορούν να προκύψουν δεδομένα για κάθε ονομαστική διάμετρο σωματιδίων, χωρίς να πρέπει να χρησιμοποιούνται παρεμβολές μεταξύ μετρηθέντων ποσοστών διερχομένου υλικού. Σήμερα υφίστανται τέτοιες μέθοδοι, όπως η μέθοδος του Gardner (1956) και των Fredlund, et al. (2000). Η πρώτη βασίζεται στη χρήση της λογαριθμικής κανονικής κατανομής (log-normal) δύο παραμέτρων για την προσομοίωση της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης, ενώ η δεύτερη στη χρήση της εξίσωσης που ανέπτυξαν οι Fredlund & Xing (1994) για την μαθηματική προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης

εδάφους-νερού. Η μέθοδος των Fredlund & Xing (1994) υπερτερεί ως προς τη δυνατότητά της να προσομοιώνει μη συμμετρικές καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης (η συμμετρία της προσομοιούμενης καμπύλης αποτελεί παραδοχή για τη χρήση της λογαριθμικής κανονικής κατανομής), αλλά και καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης με περισσότερα των δύο κυρίαρχα μεγέθη σωματιδίων. Απόπειρες επέκτασης της μεθόδου του Gardner (1956) με τη λογαριθμική κανονική κατανομή τριών ή και τεσσάρων παραμέτρων (Wagner & Ding, 1994) δεν βελτιώνουν τη σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων ως προς τα προαναφερθέντα, ενώ και ο ίδιος ο Gardner (1956), αλλά και οι Hagen, et al. (1987) αναγνωρίζουν ότι η χρήση της λογαριθμικής κανονικής κατανομής δεν επιτρέπει επαρκή προσέγγιση της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης προς τα άκρα της. Για την προσομοίωση της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διερεύνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των Fredlund, et al. (2000). Περισσότερα για αυτήν μπορούν να βρεθούν στο Παράρτημα Γ και για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Κεφ. 11.

Η βάση της πρόβλεψης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού από την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης βρίσκεται στον διαχωρισμό της τελευταίας σε τμήματα σωματιδίων της ίδιας ονομαστικής διαμέτρου. Από την ονομαστική αυτή διάμετρο μπορεί να υποτεθεί ένα εύλογα μικρό εύρος τιμών του πορώδους, το οποίο αθροίζεται στη συνέχεια για να αποδώσει την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού του εδαφικού υλικού. Κατ' αρχήν θεωρείται εύλογη η συσχέτιση μεγέθους σωματιδίων και μεγέθους πόρων που θα προέκυπταν αν ένα εδαφικό υλικό αποτελείτο μόνον από αυτό το μέγεθος σωματιδίων (βλ. σχετικά Lu & Likos, 2004, για σωματίδια εδαφικών υλικών θεωρούμενα ως σφαίρες ίδιας διαμέτρου). Ακόμα και τότε όμως χρειάζεται, ποιοτικά έστω, μία εκτίμηση της πυκνότητας (στους Lu & Likos, 2004, μπορούν να βρεθούν μαθηματικές εξισώσεις για τη χαλαρότερη δυνατή και την πυκνότερη δυνατή διάταξη). Σε κάθε περίπτωση η λογική αυτή έχει βάση προκειμένου για κοκκώδη σωματίδια χαλίκων και άμμων παρά για πλακίδια αργιλικών ορυκτών, όπου το πορώδες καθορίζεται από την αλληλεπίδραση των αργιλικών πλακιδίων με το νερό, παρουσία λοιπών άλλων παραγόντων (φόρτιση και ιστορία της, δομή κλπ). Οι μέθοδοι προβλέπουν επίσης ορθά το σχήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, αφού για εδαφικά υλικά με ένα κυρίαρχο μέγεθος σωματιδίων προκύπτει χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού με ένα κυρίαρχο μέγεθος πόρων, δηλαδή δύο σημεία καμπής, για δύο κυρίαρχα μεγέθη σωματιδίων καμπύλη με δύο κυρίαρχα μεγέθη πόρων, δηλ. τέσσερα σημεία καμπής κλπ, όπως παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

#### 4.2.5 Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με περισσότερα των δύο σημεία καμπής

Όπως αναφέρθηκε ήδη η τυπική μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι αυτή της ανάστροφης σιγμοειδούς καμπύλης υπό την προϋπόθεση, όπως έγινε σαφές και στην §4.2.4, ότι κυριαρχεί ένα μέγεθος πόρων στο εδαφικό υλικό γύρω από το οποίο ακολουθείται κάποια κατανομή από το μέγεθος των πόρων του εδαφικού υλικού. Εάν αυτό δεν συμβαίνει, δηλαδή εάν το μέγεθος των πόρων του εδαφικού υλικού κατανέμεται μεταξύ περισσότερων της μιας κυρίαρχες τιμές, τότε αλλάζει και η μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Στο Σχ. 4.7 παρουσιάζεται ο κλάδος ξήρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ενός διατομίτη σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης (Burger & Shackelford, 2001). Όπως παρατηρείται στο Σχ. 4.7, ο συγκεκριμένος κλάδος ξήρανσης έχει τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία που αντιστοιχούν σε δύο τιμές της πίεσης διείδυσης αέρα (μία μεταξύ 0.2 και 0.3 kPa και μία μεταξύ 70 και 100 kPa) και σε δύο τιμές σταθεροποίησης του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας.



**Σχήμα 4.7.** Κλάδος ξήρανσης χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ενός διατομίτη (από τους Burger & Shackelford, 2001).



Οι δύο διαφορετικές τιμές της πίεσης διείσδυσης αέρα αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικά κυρίαρχα μεγέθη πόρων, με την μικρότερη τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα να αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο από τα δύο και την μεγαλύτερη πίεση διείσδυσης αέρα να αντιστοιχεί στο μικρότερο. Στο υλικό των Burger & Shackelford (2001) η διαφορά μεταξύ των τιμών της πίεσης διείσδυσης αέρα είναι τάξεις μεγέθους αλλά θα μπορούσε να είναι και μεγαλύτερη ή μικρότερη. Επίσης στο υλικό αυτό η εμφάνιση τεσσάρων σημείων καμπής στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού οφείλεται στην ύπαρξη δύο ξεχωριστών κυρίαρχων μεγεθών πόρων στο εδαφικό αυτό υλικό (από τη φύση του, αφού πρόκειται για διατομίτη) που δεν οφείλονται σε δύο κυρίαρχα μεγέθη σωματιδίων στην καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης. Αντίστοιχη θα ήταν η εικόνα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και στην περίπτωση καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης με δύο κυρίαρχα μεγέθη σωματιδίων.

Σε ό,τι αφορά την εμφάνιση δύο κυρίαρχων μεγεθών πόρων με ένα μόνο κυρίαρχο μέγεθος σωματιδίων, όπως στο Σχ. 4.7, η μορφή αυτή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι αρκετά συνηθισμένη για συμπακνωμένα αργιλικά εδαφικά υλικά, τα οποία απαντώνται συνήθως ως μερικώς κορεσμένα παρά ως μη κορεσμένα. Η χαρακτηριστική αυτή εμφάνιση ενός μακροπορώδους (macroporosity) μεταξύ συσσωματωμάτων κόκκων και πλακιδίων και ενός μικροπορώδους (microporosity) εντός των συσσωματωμάτων κόκκων και πλακιδίων, συνιστά την κρίσιμη διαφορά μεταξύ μερικώς και μη κορεσμένων εδαφών, η οποία σε ό,τι αφορά την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού εκδηλώνεται με αυτόν τον τρόπο (χωρίς όμως αυτό να συμβαίνει πάντοτε).

## 4.2.6 Επιρροή της δομής επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού

### 4.2.6.1 *Εισαγωγή*

Μέχρι αυτό το σημείο επεξηγήθηκε μόνο η επιρροή των φυσικών χαρακτηριστικών επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και κυρίως της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφών. Στην παράγραφο αυτή επεξηγείται η επιρροή της δομής των εδαφικών υλικών στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Όπως προαναφέρθηκε, *δομή* (structure) καλείται στην παρούσα διατριβή ο συνδυασμός της διάταξης των μεμονωμένων σωματιδίων - κόκκων και πλακιδίων- των εδαφικών υλικών (fabric) και των δεσμών (bonding), δηλαδή όλων των δυνάμεων μεταξύ των σωματιδίων των εδαφικών υλικών που δεν οφείλονται στην ανάπτυξη

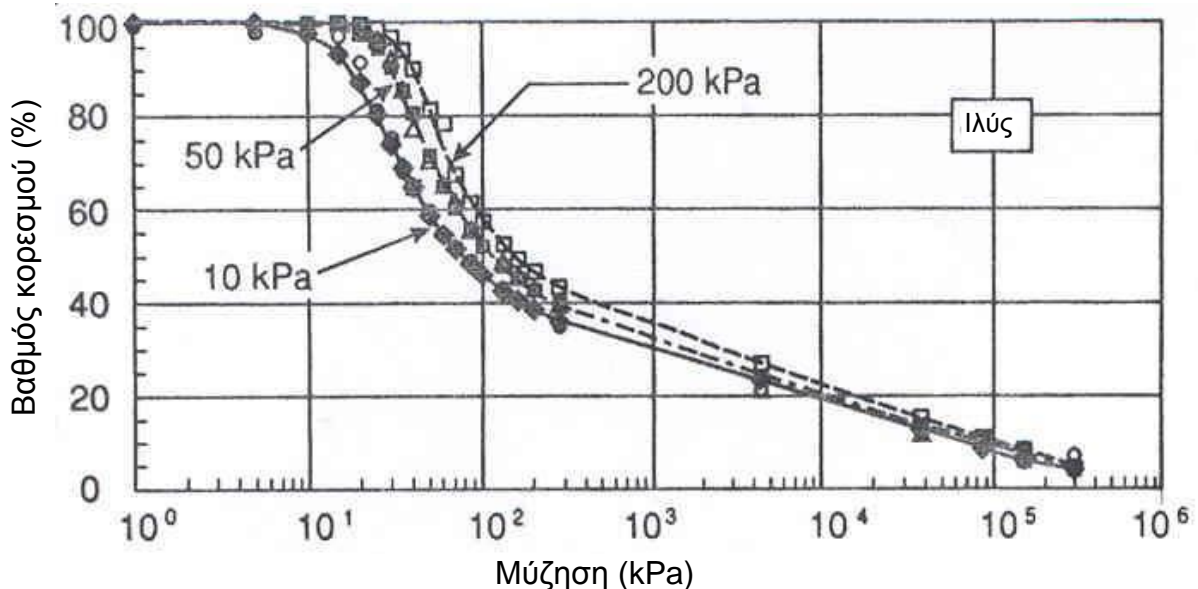
τριβής μεταξύ τους (Burland, 1990, και Chandler, 2000). Στις παραγράφους που ακολουθούν εξετάζεται η επιρροή της δομής που οφείλεται σε επιμέρους παράγοντες όπως η προστερεοποίηση, η συμπύκνωση και η δομή λόγω φυσικών διεργασιών (σε φυσικά υλικά).

#### 4.2.6.2 Επιρροή της τάσης προστερεοποίησης

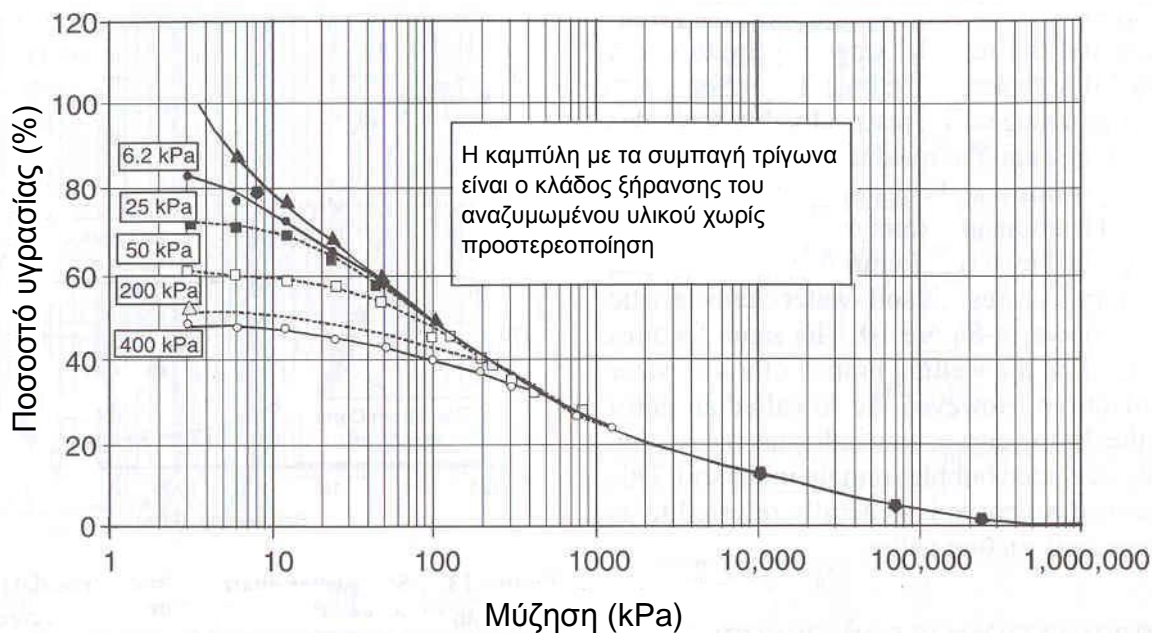
Η συμπίεση σε ένα επίπεδο τάσης και η αποφόρτιση από αυτό είναι ένας από τους πιο απλούς και κατανοητούς τρόπους δημιουργίας δομής σε ένα εδαφικό υλικό. Στα Σχ. 4.8 και 4.9 παρουσιάζονται αντίστοιχα οι κλάδοι ξήρανσης από πλήρη κορεσμό των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού μία ιλύος και μίας αργίλου από τον Καναδά (Regina clay), μετά από αναζύμωση, στερεοποίησή τους μέχρι τις αναγραφόμενες τιμές τάσης και αποφόρτισή τους.

Η ιλύς του Σχ. 4.8 (Huang, 1994) έχει  $w_L = 22.2\%$ ,  $I_p = 5.6$ ,  $G_s = 2.68$  και μόλις 10% περιεχόμενη άργιλο. Αφού αναζυμώθηκε, στη συνέχεια συμπίεστηκε στις αναφερόμενες τιμές τάσης (50, 100 και 200 kPa), αποφορτίστηκε και υποβλήθηκε σε δοκιμή προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Οι προσδιορισθείσες καμπύλες παρουσιάζονται σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης. Όπως προκύπτει, *όσο αυξάνεται η τάση προστερεοποίησης, τόσο αυξάνεται και η πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού* (περί τα 20 kPa για τάση προστερεοποίησης 50 kPa, περί τα 35 kPa για τάση προστερεοποίησης 100 kPa και περί τα 50 kPa για τάση προστερεοποίησης 200 kPa). Επίσης, όσο αυξάνεται η τάση προστερεοποίησης, τόσο αυξάνεται (αν και λίγο) η κλίση της εφαπτομένης στην Περιοχή II του κλάδου ξήρανσης των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού (κλίση θεωρητικού ευθύγραμμου τμήματος ΒΓ στο Σχ. 4.6) και αυξάνεται ο παραμένον βαθμός κορεσμού (τεταγμένη θεωρητικού σημείου Γ στο Σχ. 4.6). Σε ό,τι αφορά το τμήμα του κλάδου ξήρανσης στην Περιοχή III της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, αν και βρίσκεται πολύ κοντά και για τους τρεις κλάδους, παρατηρείται επίσης ότι αυξάνεται η κλίση του έστω και λίγο με την αύξηση της τάσης προστερεοποίησης. Κατά συνέπεια, *όσο αυξάνεται η τάση προστερεοποίησης των εδαφικών υλικών, τόσο αυξάνεται η ικανότητά τους να διατηρούν μεγαλύτερο βαθμό κορεσμού για την ίδια μύζηση*. Αυτό εκδηλώνεται μαθηματικά με την αύξηση της πίεσης διείσδυσης αέρα, την αύξηση της κλίσης της εφαπτομένης στον κλάδο ξήρανσης στην Περιοχή II, την αύξηση του παραμένοντος βαθμού κορεσμού και την αύξηση της κλίσης του κλάδου ξήρανσης στην Περιοχή III.

Βέβαια, η αύξηση του διατηρούμενου βαθμού κορεσμού για την ίδια τιμή της μύζησης, όσο αυξάνεται η τάση προστερεοποίησης, δεν συνεπάγεται και αυτή καθεαυτή την ικανότητα διατήρησης μεγαλύτερης ποσότητας ύδατος στους πόρους του εδαφικού υλικού. Η άργιλος του Σχ. 4.9 (Fredlund, 2004) έχει  $w_L = 75.5\%$  και  $I_p = 50.5$ , με περίπου 50% περιεχόμενη άργιλο. Οι τάσεις προστερεοποίησης των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των απεικονιζόμενων κλάδων ξήρανσης ήταν 6.2, 25, 50, 200 και 400 kPa, ενώ για σύγκριση παρατίθεται και ο κλάδος ξήρανσης του αναζυμωμένου υλικού χωρίς προηγούμενη επιβολή κάποιας τάσης (συμπαγή τρίγωνο). Αν και το σχήμα των κλάδων ξήρανσης είναι τέτοιο που ισχύουν τα ίδια συμπεράσματα που προέκυψαν και από το Σχ. 4.8 για την πίεση διείδυσης αέρα, όσο μικρότερη είναι η τιμή της τάσης προστερεοποίησης, τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό υγρασίας που μπορεί να διατηρηθεί για την ίδια τιμή της μύζησης. Κατά συνέπεια, παρόλο που αυξάνει η *σχετική ικανότητα διατήρησης ύδατος στους πόρους των εδαφικών υλικών* (αύξηση του διατηρούμενου βαθμού κορεσμού για την ίδια μύζηση), μειώνεται η *απόλυτη ικανότητα διατήρησης ύδατος* (μείωση του διατηρούμενου ποσοστού υγρασίας για την ίδια μύζηση). Το φαινόμενο αυτό επιδεικνύει την αλληλεπίδραση ιστορίας φόρτισης και ξήρανσης, τουλάχιστον για εδαφικά υλικά που επιδεικνύουν σημαντικές παραμορφώσεις κατά την συμπίεση όπως οι άργιλοι και οι ιλεις.



**Σχήμα 4.8.** Κλάδοι ξήρανσης χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού μίας ιλύος (από τον Huang, 1994).

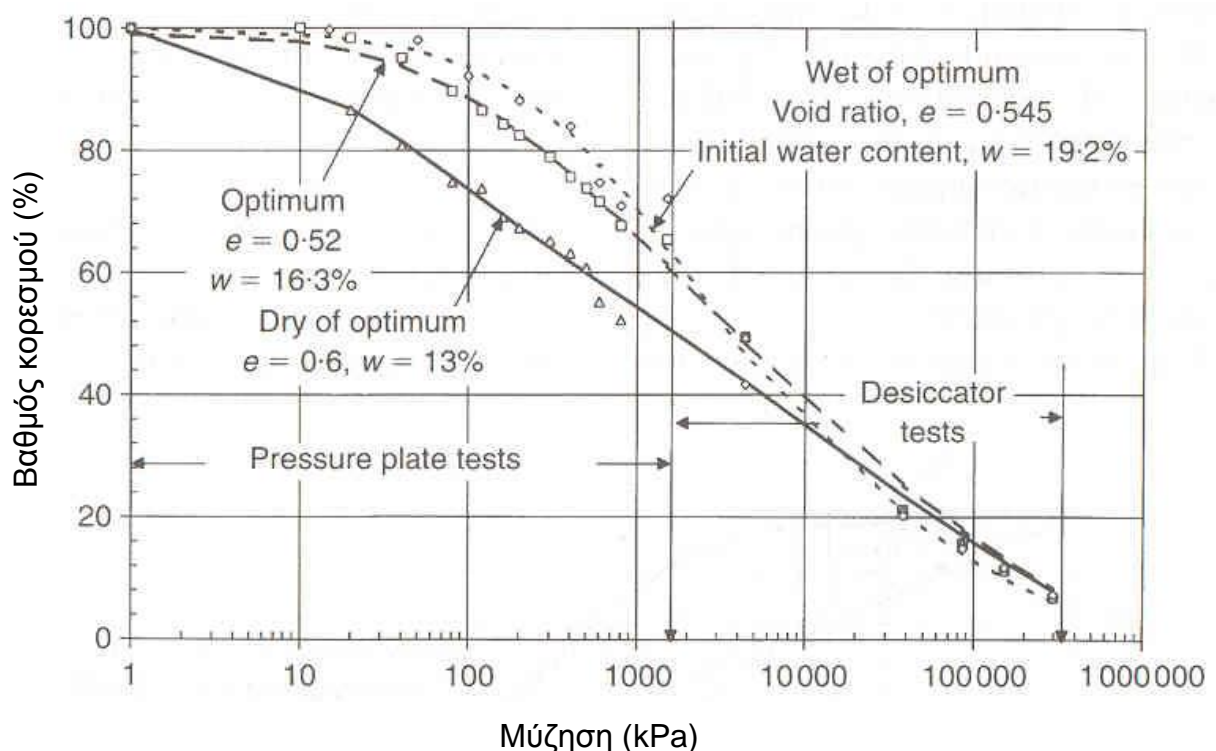


**Σχήμα 4.9.** Κλάδοι ξήρανσης χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού μίας αργίλου από τον Καναδά (από τον Fredlund, 2004).

Μέχρι αυτό το σημείο η επιρροή της προστεροποίησης επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού περιγράφηκε σε όρους μεγεθών που περιγράφουν την χαρακτηριστική καμπύλη και της τάσης προστεροποίησης. Η τάση προστεροποίησης αυτή καθεαυτή ωστόσο δεν συνιστά την πρωτογενή παράμετρο μεταβολής της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών, αλλά το μέσο ελέγχου της παραμέτρου που μεταβάλλει τη μηχανική συμπεριφορά: του αρχικού λόγου κενών πριν από την έναρξη της ξήρανσης. Για δεδομένο υλικό που συμπιέζεται από την ίδια αρχική κατάσταση (ποлтός αναζυμωμένου υλικού), όσο αυξάνεται η τάση προστεροποίησης, τόσο μειώνεται ο αρχικός λόγος κενών πριν από την έναρξη της ξήρανσης. Επαναδιατυπώνοντας λοιπόν τα προαναφερθέντα συμπεράσματα αλλά σε όρους αρχικού λόγου κενών-παραμέτρων περιγραφής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού έχουμε: *όσο μειώνεται ο αρχικός λόγος κενών των εδαφικών υλικών, τόσο αυξάνεται η ικανότητά τους να διατηρούν μεγαλύτερο βαθμό κορεσμού για την ίδια μύζηση.* Αυτό εκδηλώνεται μαθηματικά με την αύξηση της πίεσης διείδυσης αέρα, την αύξηση της κλίσης της εφαπτομένης στον κλάδο ξήρανσης στην Περιοχή II, την αύξηση του παραμένοντος βαθμού κορεσμού και την αύξηση της κλίσης του κλάδου ξήρανσης στην Περιοχή III. Σε ό,τι αφορά απόλυτα μεγέθη, *όσο μειώνεται ο αρχικός λόγος κενών των εδαφικών υλικών, τόσο μειώνεται το ποσοστό υγρασίας που μπορούν να διατηρήσουν υπό την ίδια τιμή της μύζησης.*

4.2.6.3 *Επιρροή της συμπίκνωσης*

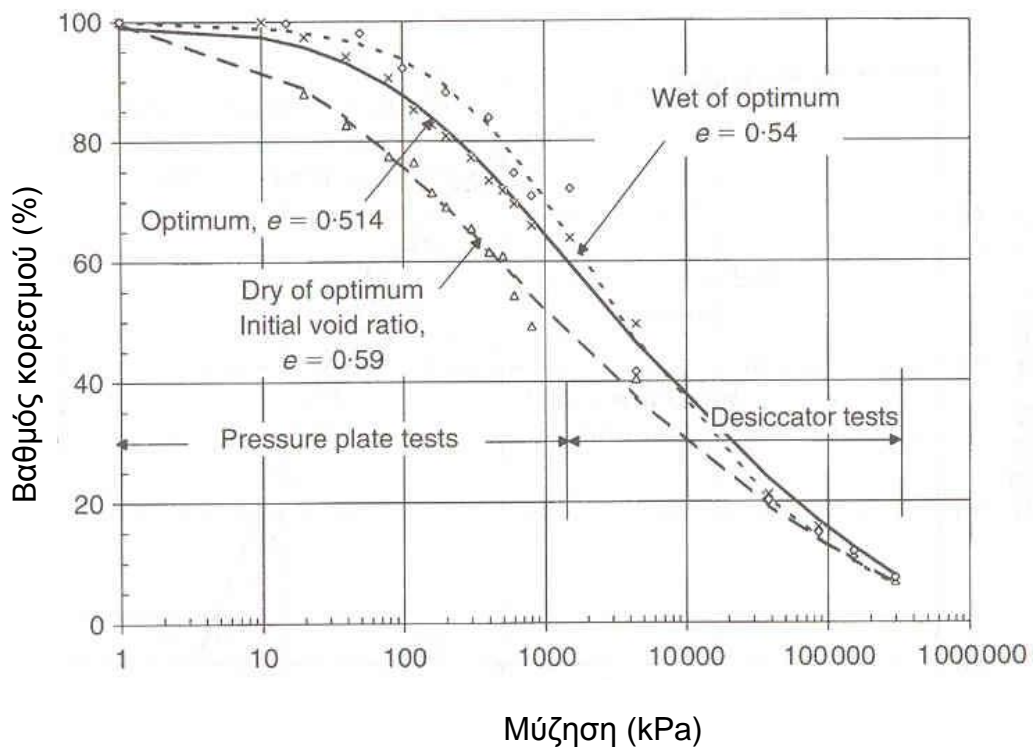
Ένας άλλος τρόπος δημιουργίας δομής στα εδαφικά υλικά είναι η συμπίκνωση. Στο Σχ. 4.10 παρουσιάζονται οι κλάδοι ξήρανσης των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού ενός εδαφικού υλικού συμπυκνωμένου στο ποσοστό βέλτιστης υγρασίας (optimum), σε ποσοστό υγρασίας μεγαλύτερο από της βέλτιστης (wet of optimum) και σε ποσοστό υγρασίας μικρότερο από της βέλτιστης (dry of optimum). Το υλικό είναι ένας τιλλίτης από τον Καναδά (Indian Head till, Vanapalli, et al., 1999) με 28% άμμο και 30% άργιλο, όριο υδαρότητας 35.5% και δείκτη πλαστικότητας 18.5. Κάθε δείγμα συμπυκνώθηκε με το ποσοστό υγρασίας που αναφέρεται στο Σχ. 4.10: 13%, 16.3% (ποσοστό βέλτιστης υγρασίας) και 19.2%, τοποθετήθηκε σε κυψέλη συμπίεσομέτρου και αφέθηκε να προσροφήσει νερό υπό μία πολύ μικρή κατακόρυφη τάση (3.5 kPa) μέχρι να κορεστεί πλήρως. Οι αντίστοιχες τιμές του λόγου κενών μετά το τέλος αυτής της διαδικασίας και πριν την έναρξη της ξήρανσης ήταν 0.60, 0.52 και 0.545. Για την ξήρανση χρησιμοποιήθηκε θάλαμος μύζησης και θάλαμος ξήρανσης με διαλύματα ελέγχου της ολικής μύζησης (βλ. §4.3).



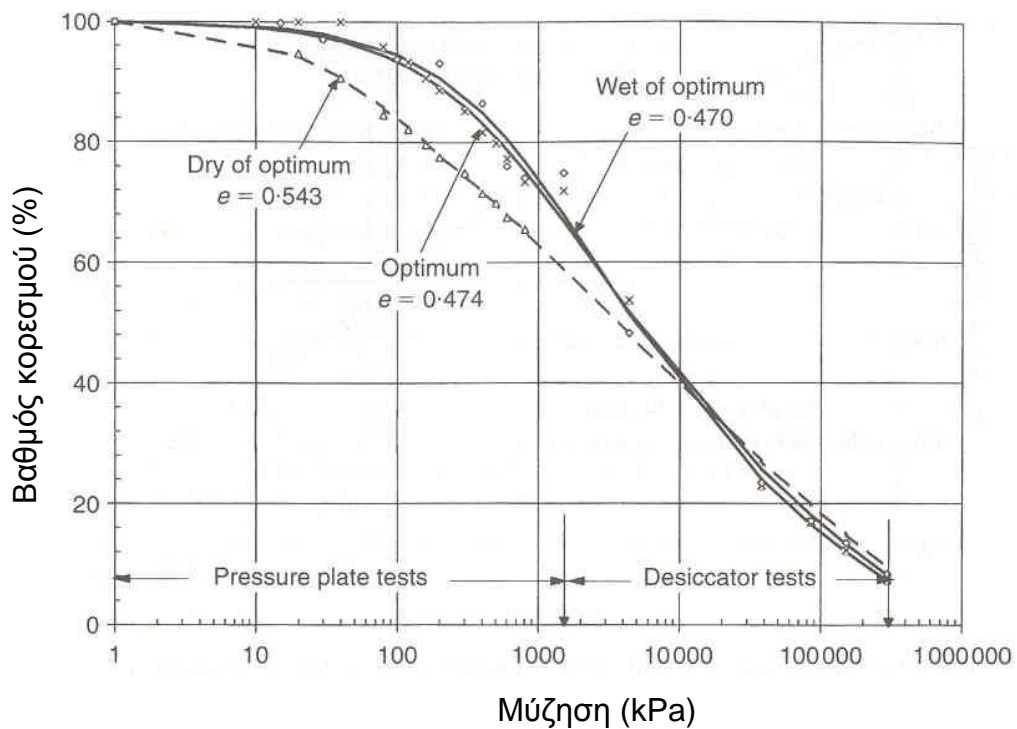
**Σχήμα 4.10.** Κλάδοι ξήρανσης χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ενός τιλλίτη από τον Καναδά (από τον Vanapalli, et al., 1999).

Όπως παρατηρείται, το εδαφικό υλικό που συμπυκνώθηκε σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης ύδατος διατηρώντας τον μεγαλύτερο βαθμό κορεσμού υπό την ίδια μύζηση, με την αμέσως μεγαλύτερη ικανότητα να επιδεικνύεται από το εδαφικό υλικό που συμπυκνώθηκε στην βέλτιστη υγρασία και την μικρότερη από το εδαφικό υλικό που συμπυκνώθηκε σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης. Αντίστοιχη είναι η εξέλιξη της πίεσης διείσδυσης αέρα και της κλίσης του τμήματος του κλάδου ξήρανσης στην Περιοχή II της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Αντίθετα τα τμήματα των κλάδων ξήρανσης στην Περιοχή III πρακτικά ταυτίζονται χωρίς να παρουσιάζουν σαφή τάση εξέλιξης –τουλάχιστον στην συγκεκριμένη περίπτωση. Επίσης είναι χαρακτηριστική η μορφή του κλάδου ξήρανσης για το εδαφικό υλικό που συμπυκνώθηκε σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης, αφού παρουσιάζει πρακτικά αδιόρατο πρώτο σημείο καμπής (που αντιστοιχεί στην πίεση διείσδυσης αέρα) και δεν παρουσιάζει δεύτερο σημείο καμπής. Ενδεχομένως η πειραματική διαδικασία και η κατανομή των σημείων μέτρησης της μύζησης κατά τον προσδιορισμό του κλάδου ξήρανσης να μην ήταν οι πλέον κατάλληλες για τον προσδιορισμό του δεύτερου σημείου καμπής, αλλά σε κάθε περίπτωση η διαφορά είναι τόσο μεγάλη από τους κλάδους ξήρανσης των δύο άλλων περιπτώσεων που δεν αλλοιώνεται η εικόνα που προκύπτει.

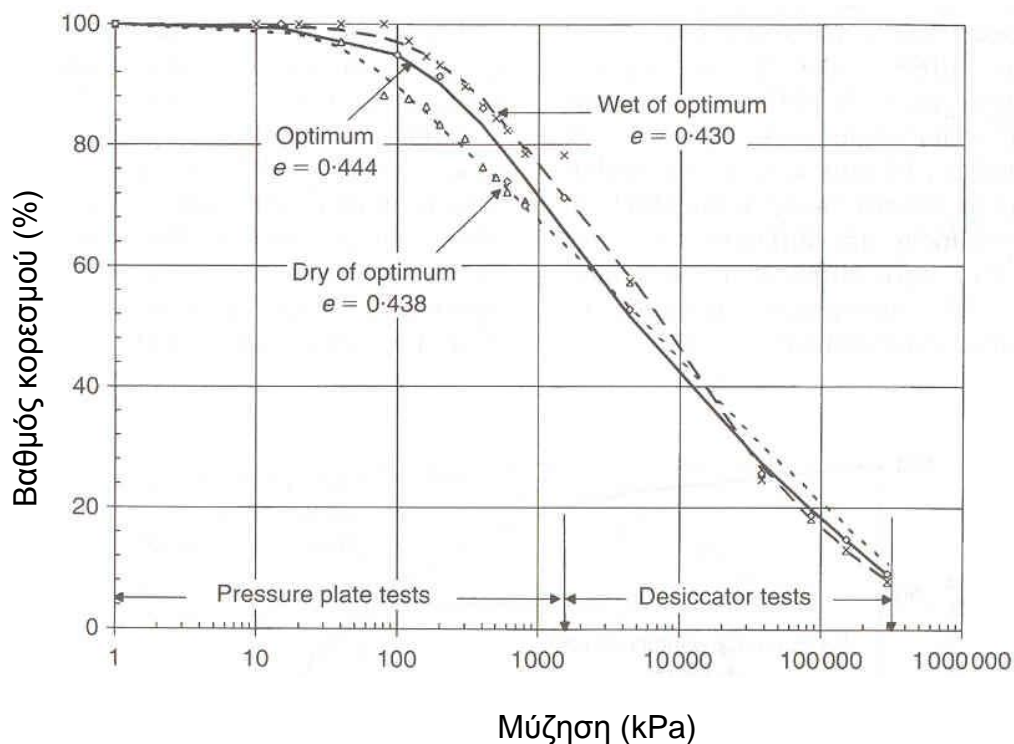
Η διαφορά μεταξύ δειγμάτων που έχουν συμπυκνωθεί σε ποσοστά υγρασίας μικρότερα, ίσα και μεγαλύτερα από το ποσοστό βέλτιστης υγρασίας διατηρείται και όταν η συμπίκνωση συνδυαστεί με φόρτιση σε μεγαλύτερες τάσεις. Στα Σχ. 4.11 έως 4.13 παρουσιάζονται οι κλάδοι ξήρανσης του ίδιου υλικού με αυτό του Σχ. 4.10, αλλά με κορεσμό των συμπυκνωμένων δοκιμίων σε κυψέλες συμπίεσομέτρου υπό διάφορες τιμές κατακόρυφης τάσης: 25 kPa στο Σχ. 4.11, 100 kPa στο Σχ. 4.12 και 200 kPa στο Σχ. 4.13 (Vanapalli et al., 1999). Οι διαφορές στους κλάδους ξήρανσης προκύπτουν οι ίδιες με εκείνες που εντοπίστηκαν στο Σχ. 4.10, δηλαδή πάντοτε την μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης ύδατος, πίεση διείσδυσης αέρα και κλίση του κλάδου ξήρανσης στην Περιοχή II της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού παρουσιάζει το δοκίμιο που έχει συμπυκνωθεί σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης, την αμέσως μικρότερη το δοκίμιο που έχει συμπυκνωθεί στη βέλτιστη και την μικρότερη το δοκίμιο που έχει συμπυκνωθεί σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης. Παρατηρείται επίσης ότι οι αποστάσεις μεταξύ των κλάδων ξήρανσης μειώνονται όσο αυξάνεται η τάση υπό την οποία πραγματοποιήθηκε ο κορεσμός των δοκιμίων, το οποίο είναι λογικό δεδομένης της μείωσης του λόγου κενών όλων των δοκιμίων και της συμπίεστότητάς τους, όσο αυξάνεται αυτή η τάση. Επίσης, η πίεση διείσδυσης αέρα των δοκιμίων που συμπυκνώθηκαν σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης παρατηρείται σαφώς, παρόλο που το δεύτερο σημείο καμπής παραμένει αδιόρατο.



**Σχήμα 4.11.** Κλάδοι ξήρανσης χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ενός τιλλίτη από τον Καναδά (από τον Vanapalli et al., 1999). Τα συμπυκνωμένα δοκίμια κορέστηκαν υπό κατακόρυφη τάση 25 kPa.



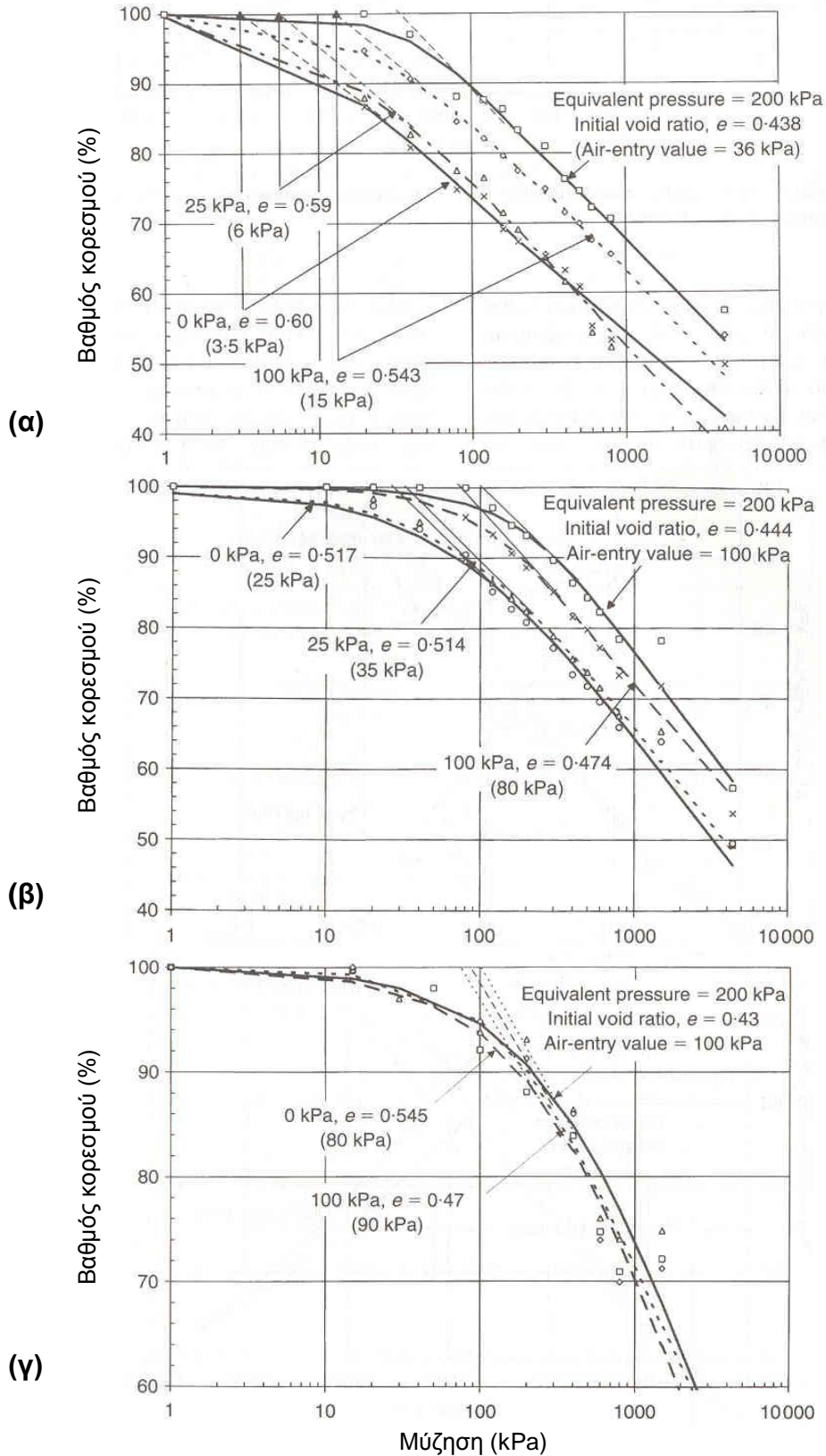
**Σχήμα 4.12.** Κλάδοι ξήρανσης χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ενός τιλλίτη από τον Καναδά (από τον Vanapalli et al., 1999). Τα συμπυκνωμένα δοκίμια κορέστηκαν υπό κατακόρυφη τάση 100 kPa.



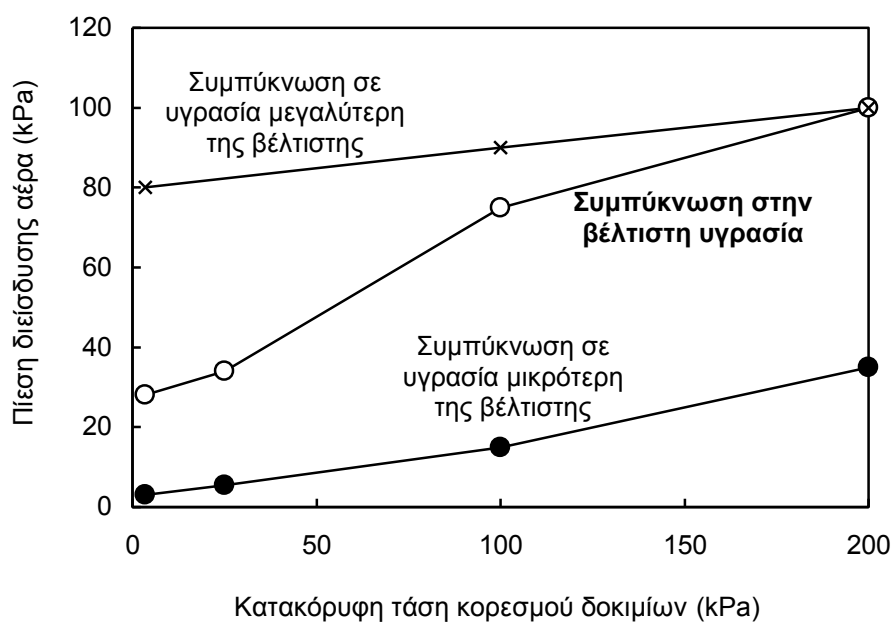
**Σχήμα 4.13.** Κλάδοι ξήρανσης χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ενός πηλίτη από τον Καναδά (από τον Vanapalli et al., 1999). Τα συμπυκνωμένα δοκίμια κορέστηκαν υπό κατακόρυφη τάση 200 kPa.

Στο Σχ. 4.14 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλα τα προαναφερθέντα αποτελέσματα αλλά αντί να ομαδοποιούνται ανά κατακόρυφη τάση υπό την οποία έγινε ο κορεσμός των δοκιμίων, ομαδοποιούνται ανά υγρασία συμπύκνωσης. Έτσι στο Σχ. 4.14α παρουσιάζονται οι κλάδοι ξήρανσης των δοκιμίων που συμπυκνώθηκαν σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης, στο Σχ. 4.14β οι κλάδοι ξήρανσης των δοκιμίων που συμπυκνώθηκαν στην βέλτιστη υγρασία και στο Σχ. 4.14γ οι κλάδοι ξήρανσης των δοκιμίων που συμπυκνώθηκαν σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης. Όσο αυξάνεται η τάση υπό την οποία έγινε ο κορεσμός των δοκιμίων, εντονότερες γίνονται οι παρατηρούμενες μεταβολές για συμπύκνωση σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης, με τις μικρότερες μεταβολές να παρατηρούνται για συμπύκνωση σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης. Αυτό επιδεικνύει την μεγαλύτερη σταθερότητα στη συμπεριφορά των εδαφών που συμπυκνώνονται σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης, και το οποίο διαπιστώνεται ότι ισχύει και για τις ιδιότητές τους ως προς τον μερικό κορεσμό. Παρατηρείται επίσης ότι οι μεταβολές εντοπίζονται κυρίως στην πίεση διείσδυσης αέρα και όχι τόσο στην κλίση του κλάδου ξήρανσης στην Περιοχή II. Η μεταβολή της πίεσης διείσδυσης αέρα με την τάση υπό την οποία έγινε ο πλήρης κορεσμός για το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζεται στο Σχ. 4.15.





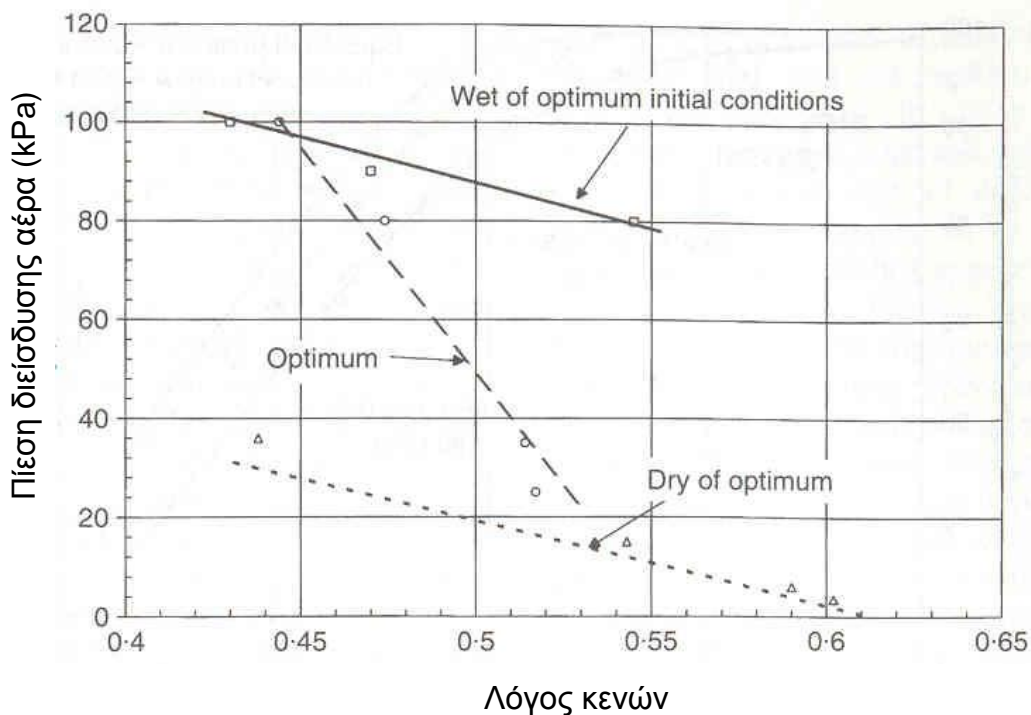
**Σχήμα 4.14.** Κλάδοι ξήρανσης χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ενός τιλλίτη από τον Καναδά (από τον Vanapalli et al., 1999): κλάδοι ξήρανσης δοκιμών που συμπυκνώθηκαν σε υγρασία α) μικρότερη της βέλτιστης, β) την βέλτιστη, και γ) μεγαλύτερη της βέλτιστης.



**Σχήμα 4.15.** Εξέλιξη της πίεσης διείδυσης αέρα ενός τιλλίτη από τον Καναδά με την κατακόρυφη τάση υπό την οποία έγινε ο πλήρης κορεσμός συμπυκνωμένων δοκιμίων, ανά υγρασία συμπύκνωσης ως προς την βέλτιστη (με βάση τα αποτελέσματα των Vanapalli et al., 1999).

Βέβαια όπως αναφέρθηκε και στην §4.2.6.2 για την επιρροή της τάσης προστερεοποίησης, η ορθή συσχέτιση βρίσκεται συγκρίνοντας τα μεγέθη που υπεισέρχονται με τον λόγο κενών. Πράγματι, στο Σχ. 4.16 παρατηρείται ότι όσο μειώνεται ο λόγος κενών των συμπυκνωμένων υλικών πριν την έναρξη της ξήρανσης, τόσο αυξάνεται η πίεση διείδυσης αέρα, πρακτικά με τον ίδιο ρυθμό για εδαφικά υλικά συμπυκνωμένα σε υγρασία μικρότερη και μεγαλύτερη της βέλτιστης, και με τον μέγιστο ρυθμό για εδαφικά υλικά συμπυκνωμένα στην βέλτιστη υγρασία. Επίσης, για δεδομένη τιμή του αρχικού λόγου κενών πριν την έναρξη της ξήρανσης, η πίεση διείδυσης αέρα είναι μέγιστη για δοκίμια συμπυκνωμένα σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης, μικρότερη για δοκίμια συμπυκνωμένα στην βέλτιστη υγρασία και η ελάχιστη για δοκίμια συμπυκνωμένα σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης.

Σε ό,τι αφορά την εξήγηση των παρατηρούμενων διαφορών μεταξύ δοκιμίων του ίδιου εδαφικού υλικού που έχουν συμπυκνωθεί σε διαφορετικές υγρασίες συμπύκνωσης, οι Vanapalli, et al. (1999) την αποδίδουν στο διαφορετικό είδος, κατανομή και μορφή των πόρων των υλικών στις τρεις δυνατές καταστάσεις: υγρασία συμπύκνωσης μικρότερη της βέλτιστης, βέλτιστη υγρασία και υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης.



**Σχήμα 4.16.** Εξέλιξη της πίεσης διείσδυσης αέρα ενός τιλλίτη από τον Καναδά με τον αρχικό λόγο κενών συμπυκνωμένων δοκιμίων πριν την έναρξη της ξήρανσης, ανά υγρασία συμπύκνωσης ως προς την βέλτιστη (από τους Vanapalli et al., 1999).

Στην πρώτη περίπτωση, τα συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά περιέχουν μεγάλους πόρους μεταξύ των συσσωματωμάτων αργιλικών πλακιδίων και κόκκων με μικρότερου μεγέθους πόρους στο εσωτερικό των συσσωματωμάτων. Η μικρή αντίσταση αυτών των υλικών στην απώλεια ύδατος λοιπόν οφείλεται στην κυριαρχία των μεγάλων πόρων μεταξύ των συσσωματωμάτων, όπου περιέχεται και η μεγαλύτερη ποσότητα νερού του εδαφικού υλικού. Αντίθετα, στα εδαφικά υλικά που έχουν συμπυκνωθεί σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης οι πόροι μεταξύ των συσσωματωμάτων είναι μικρότεροι, λιγότεροι και δεν επικοινωνούν μεταξύ τους με αποτέλεσμα η αντίσταση στην απώλεια ύδατος να είναι μεγαλύτερη, αφού καθορίζεται από το μέγεθος των πόρων στο εσωτερικό των συσσωματωμάτων. Κατά τον Marshall (1979), το όριο μεταξύ μεγάλων συγκοινωνούντων και απομονωμένων πόρων επιτυγχάνεται για συμπύκνωση περί το ποσοστό βέλτιστης υγρασίας, γεγονός το οποίο εξηγεί και την ενδιάμεση συμπεριφορά που επιδεικνύουν τα δοκίμια που έχουν συμπυκνωθεί στη βέλτιστη υγρασία. Υπενθυμίζοντας λοιπόν όσα αναφέρθηκαν για τη διάκριση μεταξύ μή και μερικώς κορεσμένων υλικών στο Κεφ. 2, πιο κοντά στο ιδεατό προσομοίωμα των μερικώς κορεσμένων εδαφικών υλικών βρίσκονται τα

εδαφικά υλικά που έχουν συμπυκνωθεί σε υγρασία μικρότερη της βέλτιστης λόγω της έντονης ανομοιογένειας των πόρων τους. Η ανομοιογένεια αυτή μάλιστα μπορεί να οδηγήσει και σε μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού παρόμοια με εκείνη της καμπύλης στο Σχ. 4.7 (Leong & Rahardjo, 1999), χωρίς όμως αυτό να είναι πάντοτε εφικτό, ειδικά αν δεν υιοθετηθεί η κατάλληλη κατανομή των σημείων μέτρησης της μύζησης κατά τον προσδιορισμό του κλάδου ξήρανσης (κάτι το οποίο απαιτεί και μεγάλη εμπειρία στη συμπεριφορά του συγκεκριμένου υλικού και εκτεταμένη εργαστηριακή διερεύνηση). Αντίθετα τα εδαφικά υλικά που έχουν συμπυκνωθεί σε υγρασία μεγαλύτερη της βέλτιστης πλησιάζουν περισσότερο το προσομοίωμα των μη κορεσμένων εδαφών λόγω της μεγαλύτερης ομοιογένειας των πόρων τους και η χαρακτηριστική τους καμπύλη έχει το συνηθισμένο ανάποδο σιγμοειδές σχήμα.

Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει επίσης από τους κλάδους ξήρανσης που παρουσιάζονται στα Σχ. 4.10 έως 4.14 είναι η αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών προσδιορισμού χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού που επιτρέπει μεγάλη υποκειμενικότητα στην ερμηνεία τους. Τα συμπεράσματα που προαναφέρθηκαν γενικά ισχύουν, αλλά καθίστανται σαφή από την εξέταση κυρίως των καμπυλών προσέγγισης που έχουν υπερθέσει οι Vanapalli et al. (1999) επί των πειραματικών τους σημείων. Εάν παρατηρηθεί προσεκτικά η θέση και η διασπορά των πραγματικών πειραματικών σημείων, πράγματι προκύπτουν τα προαναφερθέντα συμπεράσματα, αλλά είναι αμφίβολο αν θα προέκυπταν οι ίδιες καμπύλες προσέγγισης κατά την επεξεργασία των πρωτότυπων πειραματικών σημείων από κάποιον άλλο, με το προφανές ερώτημα να ανακύπτει αν θα προέκυπταν τόσο ξεκάθαρα και τα ίδια συμπεράσματα.

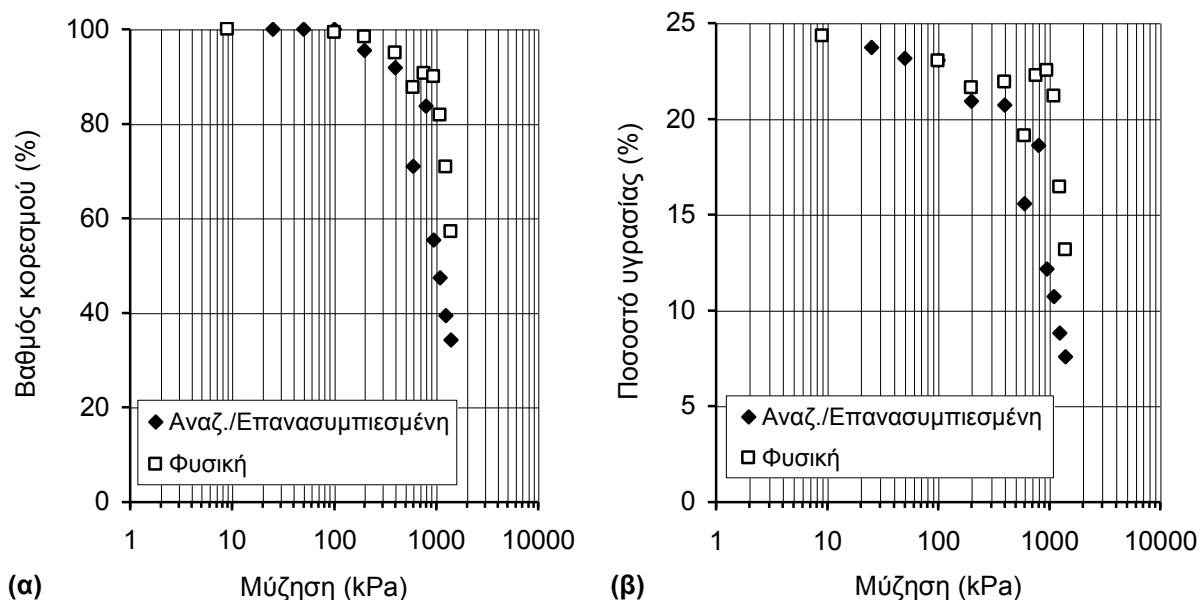
Η επίδειξη της επιρροής της δομής λόγω συμπύκνωσης επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού έγινε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα των Vanapalli, et al. (1999). Παρόμοια αποτελέσματα που επιδεικνύουν την ίδια επιρροή μπορούν να βρεθούν και στους Tinjum, et al. (1997), για 4 αργίλους με  $w_L$  27-67% και  $I_p$  14-46, στους Miller, et al. (2002), για 4 εδαφικά υλικά με  $w_L$  16-83% και  $I_p$  7-60, και στους Mendoza, et al. (2005).

#### 4.2.6.4 Επιρροή της δομής των φυσικών υλικών

Στις §4.2.6.2 και 4.2.6.3 εξετάστηκε η επιρροή της δομής που δημιουργείται στα εδαφικά υλικά με δύο σχετικά απλούς τρόπους, την δημιουργία προστερεοποίησης και την συμπύκνωση, καθώς και η επιρροή του συνδυασμού προστερεοποίησης και συμπύκνωσης στην χαρακτηριστική

καμπύλη εδάφους-νερού. Στην παρούσα παράγραφο εξετάζεται η επιρροή της δομής των φυσικών εδαφικών υλικών στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Η δομή στα φυσικά εδαφικά υλικά παρουσιάζει την ιδιομορφία ότι μπορεί να προέρχεται από συνδυασμό παραγόντων (ταχύτητα απόθεσης κατά την ιζηματογένεση, γεωλογική προστερεοποίηση, σιμέντωση, ερπυσμός/χαλάρωση, θιξοτροπία κλπ), για τους οποίους ακόμα και αν μπορεί να υποθεθεί κάποιος ως κυρίαρχος παράγοντας δημιουργίας δομής (π.χ. μέσω της γνώσης της γεωλογικής ιστορίας του υλικού), σχεδόν πάντοτε συνυπάρχουν και οι υπόλοιποι λόγοι.

Στο Σχ. 4.17α παρουσιάζονται οι κλάδοι ξήρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού της φυσικής και της αναζυμωμένης/επανασυμπιεσμένης Μάργας Κορίνθου σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, και στο Σχ. 4.17β οι ίδιοι κλάδοι ξήρανσης σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης. Ο κλάδος ξήρανσης του φυσικού υλικού προσδιορίστηκε σε δοκίμια από αδιατάρακτο δείγμα που αποσπάστηκε από τα πρανή της διώρυγας της Κορίνθου. Μέρος του δείγματος αυτού αναζυμώθηκε σε ποσοστό υγρασίας ίσο με 1,5 φορές το όριο υδαρότητας του υλικού και επανασυμπιέστηκε και αποφορτίστηκε καταλήγοντας σε λόγο κενών ίσο με τον αρχικό λόγο κενών του φυσικού υλικού (για περισσότερα για το συγκεκριμένο εδαφικό υλικό και τη δειγματοληψία του, βλ. Κεφ. 11, και για την πειραματική διαδικασία, βλ. Κεφ. 14).



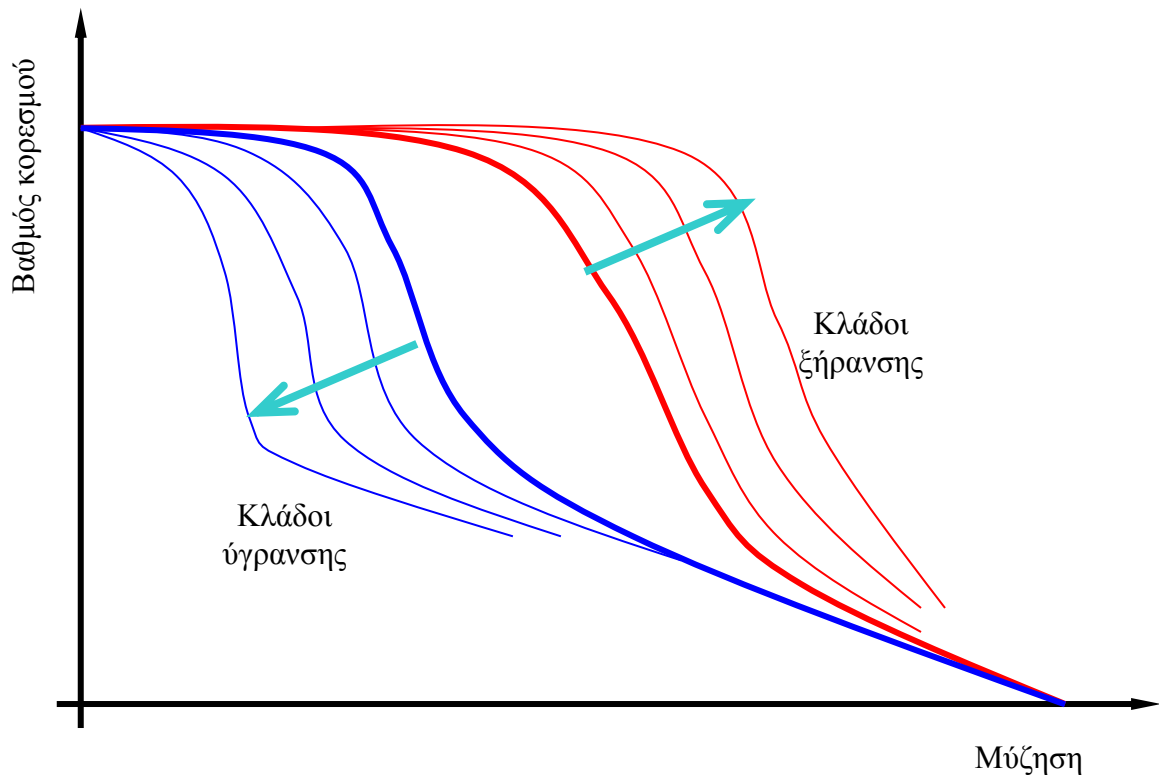
**Σχήμα 4.17.** Κλάδοι ξήρανσης από πλήρη κορεσμό της φυσικής και της αναζυμωμένης/επανασυμπιεσμένης Μάργας Κορίνθου σε όρους α) βαθμού κορεσμού-μύζησης, και β) ποσοστού υγρασίας-μύζησης.

Όπως προκύπτει από το Σχ. 4.17, παρά το γεγονός ότι ο αρχικός λόγος κενών είναι ο ίδιος για το υλικό στις δύο καταστάσεις (φυσικό και αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο), το φυσικό υλικό μπορεί να διατηρεί μεγαλύτερο βαθμό κορεσμού και ποσοστό υγρασίας υπό την ίδια μύζηση, με το φυσικό υλικό να δείχνει ότι έχει μάλλον μεγαλύτερη πίεση διείσδυσης αέρα από το αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο στον ίδιο αρχικό λόγο κενών. Το φυσικό υλικό δηλαδή επιδεικνύει μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης ύδατος στους πόρους του και σχετικά (μεγαλύτερος βαθμός κορεσμού υπό την ίδια μύζηση) και απόλυτα (μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας υπό την ίδια μύζηση). Ανεξάρτητα δηλαδή από την ίδια τιμή του λόγου κενών, η δομή του συγκεκριμένου φυσικού υλικού (σιμεντωμένο), του επιτρέπει να διατηρεί μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης ύδατος στους πόρους του. Τα αποτελέσματα της εργαστηριακής αυτής διερεύνησης έχουν παρουσιαστεί σε προκαταρκτικό στάδιο από τους Bardanis & Kavnadas (2003a) και από τους Μπαρδάνη & Καββαδά (2006δ). Η τελική τους επεξεργασία παρατίθεται αναλυτικά στο Κεφ. 14. Παρά την διεξοδική αναζήτηση που πραγματοποιήθηκε στη βιβλιογραφία για πειραματικά δεδομένα στα οποία να απομονώνεται η επιρροή της δομής των φυσικών υλικών μέσω της επίτευξης ίδιου αρχικού λόγου κενών στα ίδια εδαφικά υλικά όταν δεν έχουν δομή, δεν βρέθηκαν τέτοια δεδομένα.

#### 4.2.6.5 *Επιρροή της δομής στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού κατά την ύγρανση*

Η επιρροή της δομής των εδαφικών υλικών επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού παρουσιάστηκε μέχρι αυτό το σημείο για τους κλάδους ξήρανσης. Σε ό,τι αφορά την ύγρανση, παρά την διεξοδική αναζήτηση που πραγματοποιήθηκε στη βιβλιογραφία για πειραματικά δεδομένα που να επιδεικνύουν την επιρροή της δομής επί των κλάδων ύγρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, δεν βρέθηκαν τέτοια δεδομένα. Η εκτίμηση ωστόσο είναι ότι οι κλάδοι ύγρανσης ακολουθούν την αντίστροφη εξέλιξη των κλάδων ξήρανσης. Όπως δηλαδή οι κλάδοι ξήρανσης απομακρύνονται από μία αρχική θέση τόσο περισσότερο, όσο αυξάνεται η τάση προστερεοποίησης, ή η υγρασία συμπύκνωσης, ή η δομή του φυσικού υλικού, έτσι αναμένεται ότι θα απομακρύνονται οι κλάδοι ύγρανσης από μία αρχική θέση κατά την ύγρανση όσο αυξάνονται τα ίδια μεγέθη, αλλά από την αντίθετη πλευρά. Στο Σχ. 4.18 παρουσιάζεται αυτό γραφικά. Όπως εξηγήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, όσο αυξάνονται τα προαναφερθέντα μεγέθη των εδαφικών υλικών, τόσο αυξάνεται η ικανότητα συγκράτησης ύδατος που διατηρούν υπό την ίδια μύζηση, δηλ. τόσο αυξάνεται η αντίστασή τους στην απώλεια ύδατος. Αντίστοιχα λοιπόν εκτιμάται ότι όσο αυξάνονται τα μεγέθη που

προαναφέρθηκαν, τόσο θα αυξάνεται και η αντίστασή των εδαφικών υλικών στην προσρόφηση ύδατος, η οποία εκδηλώνεται γραφικά στους κλάδους ύγρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού με τη μετάθεσή τους προς μικρότερες τιμές της μύζησης (μείωση των τιμών της μύζησης που αντιστοιχούν στα δύο σημεία καμπής των κλάδων ύγρανσης).



**Σχήμα 4.18.** Κλάδοι ξήρανσης από πλήρη κορεσμό και κλάδοι ύγρανσης από παραμένον ποσοστό υγρασίας και η εκτίμηση για την εξέλιξή τους από μία αρχική κατάσταση (έντονη γραμμές) με την αύξηση της τάσης προστεροποίησης, της υγρασίας συμπύκνωσης και της δομής των φυσικών υλικών. Τα βέλη δηλώνουν την εξέλιξη των αντίστοιχων κλάδων με την αύξηση των προαναφερθέντων μεγεθών.

#### 4.2.6.6 Συνοψιση

Στις παραγράφους που προηγήθηκαν εξετάστηκε η επιρροή της δομής των εδαφών στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, με την εξέταση μεμονωμένων μορφών δομής όπως η δομή λόγω προστεροποίησης και η δομή λόγω συμπύκνωσης, αλλά και την εξέταση της επιρροής της δομής των φυσικών υλικών, η οποία μπορεί να προέρχεται από συνδυασμό διαφόρων φυσικών διεργασιών, η σχετική επίδραση της καθεμίας από τις οποίες μπορεί μεν να

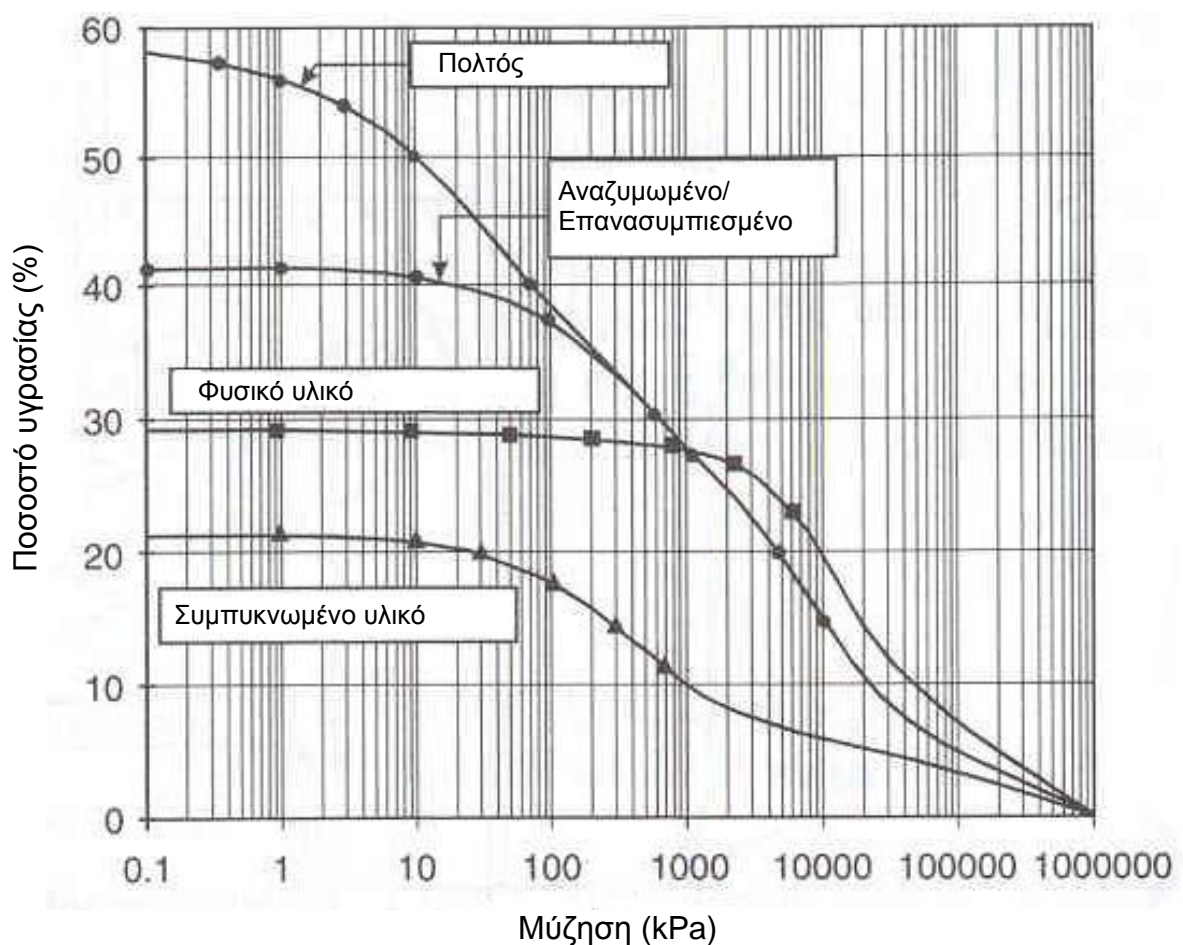
εκτιμηθεί, χωρίς όμως βεβαιότητα ή την δυνατότητα να αποκλειστούν άλλες φυσικές διεργασίες που ενδέχεται να έχουν επιδράσει. Στο Σχ. 4.19 παρουσιάζονται προς συνόψιση οι κλάδοι ξήρανσης των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού του ίδιου εδαφικού υλικού υπό διαφορετικές αρχικές συνθήκες (Fredlund, 2004): πολτός αναζυμωμένου υλικού, επανασυμπιεσμένο αναζυμωμένο υλικό, φυσικό υλικό και συμπτκνωμένο υλικό. Το εδαφικό υλικό είναι η άργιλος Regina που αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους.

Το κοινό χαρακτηριστικό που προκύπτει για την μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και των μεγεθών που την περιγράφουν είναι ότι όσο μειώνεται ο λόγος κενών του εδαφικού υλικού κατά την έναρξη της ξήρανσης, τόσο αυξάνεται η ικανότητα συγκράτησης ύδατος του εδαφικού υλικού, η οποία εκδηλώνεται με την ικανότητα διατήρησης μεγαλύτερης τιμής του βαθμού κορεσμού υπό την ίδια τιμή της μύζησης. Αυτό εκδηλώνεται σαφώς με την αύξηση της τάσης προστεροποίησης στο ίδιο υλικό, αλλά και την αύξηση της τάσης υπό την οποία γίνεται ο κορεσμός συμπτκνωμένων εδαφών, αφού και οι δύο αυτοί παράγοντες προκαλούν μείωση του αρχικού λόγου κενών. Ειδικά σε ό,τι αφορά τα συμπτκνωμένα εδάφη, η ικανότητα συγκράτησης ύδατος αυξάνεται με την αύξηση της υγρασίας συμτύκνωσης, ακόμα και για αύξηση πέραν της βέλτιστης, επειδή με την αύξηση της υγρασίας συμτύκνωσης οι πόροι των εδαφικών υλικών μεταξύ συσσωματωμάτων αργιλικών πλακιδίων και κόκκων μειώνονται σε μέγεθος, παύουν να συνδέονται, και κυριαρχεί πλέον το μέγεθος των πόρων εντός και όχι μεταξύ των συσσωματωμάτων στον καθορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του υλικού. Τέλος, σε ό,τι αφορά τα φυσικά εδαφικά υλικά, εκεί κυρίαρχη παράμετρος στον καθορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού καθίσταται αυτή καθαυτή η δομή τους παρά το μέγεθος των πόρων τους και τα συνολικά κενά τους όπως επιδείχθηκε στην περίπτωση της Μάργας Κορίνθου, για την οποία το φυσικό εδαφικό υλικό βρέθηκε να διατηρεί μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης ύδατος από το αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο υλικό στον ίδιο αρχικό λόγο κενών με το φυσικό υλικό πριν την έναρξη της ξήρανσης.

Σε ό,τι αφορά τους κλάδους ύγρυνσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, εκτιμάται ότι ακολουθούν την αντίστροφη εξέλιξη των κλάδων ξήρανσης. Όπως δηλαδή οι κλάδοι ξήρανσης απομακρύνονται από μία αρχική θέση τόσο περισσότερο, όσο αυξάνεται η τάση προστεροποίησης, ή η υγρασία συμτύκνωσης, ή η δομή του φυσικού υλικού, έτσι αναμένεται ότι οι κλάδοι ύγρυνσης απομακρύνονται από μία αρχική θέση κατά την ύγρυνση όσο αυξάνονται τα ίδια μεγέθη, αλλά από την αντίθετη πλευρά. Όπως εξηγήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, όσο αυξάνεται η τάση προστεροποίησης, ή η υγρασία συμτύκνωσης, ή η δομή



του φυσικού υλικού, τόσο αυξάνεται η ικανότητα συγκράτησης ύδατος που διατηρούν υπό την ίδια μύζηση, δηλ. τόσο αυξάνεται η αντίστασή τους στην απώλεια ύδατος. Αντίστοιχα λοιπόν εκτιμάται ότι όσο αυξάνονται τα μεγέθη που προαναφέρθηκαν, τόσο αυξάνεται η αντίστασή των εδαφικών υλικών στην προσρόφηση ύδατος, η οποία εκδηλώνεται με την μετάθεση των κλάδων ύγρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού προς μικρότερες τιμές της μύζησης (μείωση των τιμών της μύζησης που αντιστοιχούν στα δύο σημεία καμπής των κλάδων ύγρανσης).



**Σχήμα 4.19.** Κλάδοι ξήρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού για το ίδιο εδαφικό υλικό (άργιλος Regina) υπό διαφορετικές αρχικές καταστάσεις (Fredlund, 2004): πολτός αναζυμωμένου υλικού, επανασυμπιεσμένο αναζυμωμένο υλικό, φυσικό υλικό και συμπυκνωμένο υλικό.

### 4.3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ

#### 4.3.1 Γενικά

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού βασίζεται στον έλεγχο της μύζησης. Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος ελέγχου της μύζησης είναι αυτή που καθορίζει κυρίως το είδος της μεθόδου προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και δευτερευόντως η χρήση ενός και μοναδικού δοκιμίου ή περισσοτέρων για τον προσδιορισμό όλων των πειραματικών σημείων από τα οποία αποτελείται η καμπύλη. Οι υπάρχουσες μέθοδοι ελέγχου της μύζησης είναι οι εξής:

1. Η μέθοδος μετατόπισης άξονα (axis translation method).
2. Η ωσμωτική μέθοδος (osmotic method).
3. Η μέθοδος φυγοκέντρισης (centrifuge method).
4. Η μέθοδος ταπείνωσης της πίεσης του νερού των πόρων (hanging column method).
5. Η μέθοδος υδατικών διαλυμάτων ή ελέγχου σχετικής υγρασίας (water solutions ή relative humidity control method).

Από τις μεθόδους αυτές στις τέσσερις πρώτες ελέγχεται η μύζηση εδαφικού σκελετού και στην τελευταία η ολική μύζηση, αφού το μέγεθος που ρυθμίζεται άμεσα είναι η σχετική υγρασία.

Αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν τον *εργαστηριακό* προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού μπορεί να προσδιοριστεί και επιτόπου αν κατά την μέτρηση της μύζησης σε διάφορες θέσεις ή χρονικές στιγμές λαμβάνονται και μετρήσεις του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας ή ενδεχομένως αποσπώνται δοκίμια για τη μέτρηση όλων των ζητούμενων φυσικών χαρακτηριστικών (ποσοστό υγρασίας, βαθμός κορεσμού, λόγος κενών κλπ). Η μέθοδος συνήθως δεν αποδίδει το σύνολο της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (το εύρος δηλαδή εντός του οποίου εντοπίζονται και τα δύο σημεία καμπής των συνήθων χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού) αλλά επιτρέπει τον προσδιορισμό ενός μέρους έστω της καμπύλης για σύγκριση με εκείνη που θα προσδιοριστεί εργαστηριακά.

Σε ό,τι αφορά τη χρήση ενός ή περισσότερων δοκιμίων για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι, όπως και με τις μεθόδους μέτρησης της μύζησης, έτσι και με τις μεθόδους ελέγχου της μύζησης ενδέχεται να πρέπει να υιοθετηθούν περισσότερες της μίας για τον πλήρη προσδιορισμό της καμπύλης (τον προσδιορισμό δηλ. και των δύο σημείων καμπής), αφού κάθε μέθοδος επιτρέπει τον έλεγχο της μύζησης σε συγκεκριμένο εύρος τιμών της. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και όταν χρησιμοποιείται ένα μόνο δοκίμιο για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, αυτό ενδέχεται να πρέπει να μετακινηθεί από συσκευή σε συσκευή για την μετάβαση από την πειραματική διάταξη που υλοποιείται μία μέθοδος στην πειραματική διάταξη που υλοποιείται μία άλλη μέθοδος, εισάγοντας έτσι προβλήματα παρόμοια με εκείνα που ανακύπτουν από την φυσική ανομοιογένεια των φυσικών υλικών ή την ανομοιογένεια δοκιμίων αναζυμωμένου ή συμπυκνωμένου υλικού (ακόμα και αν υπάρχει έλεγχος της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της ορυκτολογίας όπως σε εδαφικά υλικά τεχνητών τέτοιων χαρακτηριστικών –τυποποιημένες άμμοι, ιλείς και άργιλοι όπως ο καολίνης ή ο μπεντονίτης- εξακολουθεί να υπάρχει ανομοιογένεια των παρασκευαζόμενων δοκιμίων). Επίσης η επιλογή ενός ή περισσότερων δοκιμίων μπορεί να καθοριστεί από το μέγεθος που ζητείται να μετρηθεί και την επιδιωκόμενη ακρίβεια στη μέτρησή του ανάλογα και με τη φύση του υλικού. Για παράδειγμα εάν ζητείται η μέτρηση μόνο του ποσοστού υγρασίας μπορεί απλώς να μετρηθεί το αρχικό ποσοστό υγρασίας και η αρχική ολική μάζα του δοκιμίου και στη συνέχεια απλώς να μετρείται η ποσότητα του νερού που διαφεύγει ή προσλαμβάνεται από το δοκίμιο κατά την μεταβολή της μύζησης. Εάν αντίθετα ζητείται η μέτρηση και του ποσοστού υγρασίας αλλά και κάποιου άλλου χαρακτηριστικού όπως του ολικού όγκου ή του λόγου κενών, τότε δεν αρκεί απλώς ή παρακολούθηση της ποσότητας του νερού που διαφεύγει ή προσλαμβάνεται από το δοκίμιο κατά την μεταβολή της μύζησης αλλά η μέτρηση των διαστάσεων του δοκιμίου ή του όγκου του (π.χ. με εμβάπτιση σε παραφίνη για μέτρηση του υπό άνωση βάρους του), οπότε το δοκίμιο πρέπει να εξαχθεί από τη συσκευή και ουσιαστικά να καταστραφεί (ή να αλλοιωθούν τόσο οι ιδιότητές του από την κατάσταση που βρισκόταν υπό την δεδομένη πίεση ώστε να μην έχει νόημα η επαναχρησιμοποίησή του).

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται και αξιολογούνται οι προαναφερθείσες μέθοδοι.

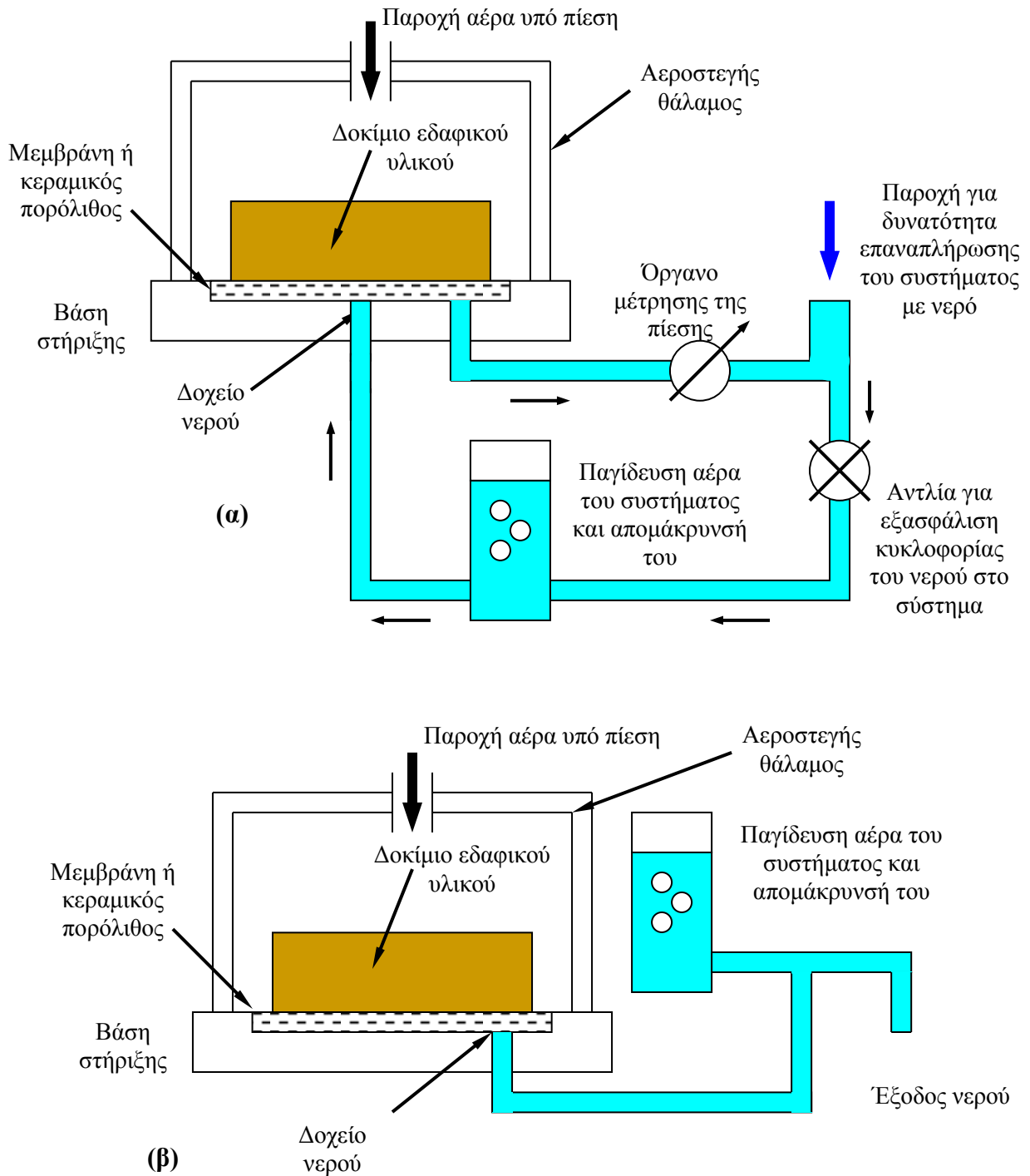
### 4.3.2 Μέθοδος μετατόπισης άξονα

Στην §3.3 περιγράφηκε η μέθοδος μετατόπισης άξονα ως μέθοδος μέτρησης της μύζησης. Δοκίμιο εδαφικού υλικού υπό μύζηση  $u_a - u_w$  τοποθετείται σε αεροστεγώς κλεισμένο θάλαμο επί μεμβράνης ή κεραμικού πορολίθου που υπέρκειται δοχείου νερού. Στον θάλαμο αυτό (θάλαμος μύζησης) μπορεί να εισέρχεται αέρας υπό πίεση και ταυτόχρονα στο δοχείο του νερού να μετρείται η πίεση αυτού. Ο αέρας υπό πίεση ασκείται σε όλες τις πλευρές του τοποθετημένου δοκιμίου πλην της βάσης του, η οποία βρίσκεται σε επαφή με τη μεμβράνη ή τον κεραμικό πορόλιθο. Ρυθμίζοντας την πίεση του αέρα εντός του θαλάμου μύζησης σε δεδομένη τιμή, εντός του δοκιμίου αυξάνεται ισόποσα η πίεση της αέρας και της υγρής φάσης. Μετρώντας τότε την πίεση στο δοχείο νερού που υπόκειται της μεμβράνης ή του πορολίθου και είναι ίση με την πίεση της υγρής φάσης μετά την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας μεταξύ τους προσδιορίζεται η μύζηση ως η διαφορά της πίεσης του αέρα που ρυθμίστηκε από την μετρηθείσα πίεση του νερού. Στο Σχήμα 4.20α φαίνεται σκαριφηματικά η διάταξη της μεθόδου μετατόπισης άξονα για την μέτρηση της μύζησης.

Αν αντί να εισαχθεί στο θάλαμο μύζησης δοκίμιο με κάποια μή μηδενική τιμή της μύζησης, εισαχθεί ένα πλήρως κορεσμένο δοκίμιο (οπότε η μύζησή του είναι 0), τότε εξ αρχής η πίεση της υγρής φάσης και άρα η πίεση του νερού στο δοχείο είναι 0 όπως και η πίεση της αέρας φάσης και του αέρα στο θάλαμο. Ρυθμίζοντας την πίεση του αέρα εντός του θαλάμου σε μία δεδομένη τιμή, αλλά με το κύκλωμα του νερού σε επικοινωνία με την ατμόσφαιρα, οπότε η τιμή της πίεσης του νερού του δοχείου και άρα της υγρής φάσης του δοκιμίου (μετά την εξισορρόπηση λόγω πρόσκαιρης ανύψωσης από την αύξηση της πίεσης του αέρα στο δοχείο) είναι ίση με το 0, το δοκίμιο βρίσκεται υπό μύζηση ίση με την πίεση του αέρα στον θάλαμο. Η διάταξη αυτή για την χρήση της μεθόδου μετατόπισης άξονα για τον έλεγχο της μύζησης φαίνεται στο Σχήμα 4.20β.

Στο Σχήμα 4.20β παρουσιάζεται η απλούστερη διάταξη χρήσης της μεθόδου μετατόπισης άξονα για τον έλεγχο της μύζησης. Στη μορφή αυτή (ακόμα και χωρίς το σύστημα παγίδευσης και απομάκρυνσης αέρα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Δοκίμια πλήρως κορεσμένου εδαφικού υλικού εισάγονται στον θάλαμο μύζησης. Εφαρμόζεται με τον τρόπο που προαναφέρθηκε η μύζηση που επιθυμείται και στην συνέχεια όταν έχει αποκατασταθεί η υδραυλική ισορροπία αφαιρείται η πίεση του αέρα (αφού δεν υπάρχει σύνδεση με παροχή νερού, δεν προσροφάται νερό από το δοκίμιο σε αυτό το

στάδιο) και αμέσως βγαίνει το δοκίμιο από τον θάλαμο, ζυγίζεται για προσδιορισμό του ποσοστού υγρασίας και μετά προσδιορίζεται ο ολικός του όγκος (μέθοδος προσδιορισμού φαινόμενου βάρους με παραφίνωση του δοκιμίου).



**Σχήμα 4.20.** Αρχή της μεθόδου μετατόπισης άξονα (α) για την μέτρηση της μύζησης και (β) για τον έλεγχο της μύζησης.

Είναι δυνατόν να επιλεγούν δύο τρόποι υπολογισμού του ποσοστού υγρασίας και του ολικού όγκου του δοκιμίου:

1. Ζύγιση του δοκιμίου υγρού, παραφίνωση, εμβάπτιση σε νερό για τη μέτρηση του υπό άνωση βάρους και αφαίρεση της παραφίνης για ξήρανση και υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας του δοκιμίου του εδαφικού υλικού.
2. Διαχωρισμός του δοκιμίου σε δύο ίσα τμήματα, χρησιμοποίηση του ενός για τον υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας και του άλλου για μέτρηση του υπό άνωση βάρους χωρίς αφαίρεση της παραφίνης από αυτό.

Ο πρώτος τρόπος επιτρέπει τον ακριβέστερο υπολογισμό του φαινόμενου βάρους με τίμημα τον λιγότερο ακριβή υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας (ελαφρά θέρμανση του δοκιμίου έστω και για πολύ μικρό χρονικό διάστημα κατά την παραφίνωση, απόξεση υλικού ή παραμονή παραφίνης επί του δοκιμίου μετά την αφαίρεση της παραφίνης). Ο δεύτερος τρόπος επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας με τίμημα τον λιγότερο ακριβή υπολογισμό του φαινόμενου βάρους σε περίπτωση που η τομή του δοκιμίου δεν είναι λεία (όπως συνήθως συμβαίνει σε πιο κοκκώδη υλικά), οπότε διεισδύει παραφίνη στο δοκίμιο με μεγαλύτερη ευκολία όταν είναι πολύ ξηρό (μεγαλύτερα κενά για ελεύθερη είσοδο της παραφίνης και μεγαλύτερη μύζηση που συμβάλει στην προσρόφηση της παραφίνης) ή στις εσοχές στην επιφάνεια της τομής συγκεντρώνεται αέρας που παραμένει εντός του παραφινωμένου δοκιμίου (ακόμα και όταν η μύζηση δεν είναι μεγάλη). Υπό την προϋπόθεση ωστόσο ότι η τομή του δοκιμίου είναι προσεκτική και η προκύπτουσα επιφάνεια λεία, ο δεύτερος τρόπος είναι ακριβέστερος και υιοθετήθηκε στις εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Επίσης δεδομένου ότι οι θάλαμοι μύζησης (με πορολίθους μεγάλης πίεσης διείσδυσης αέρα ) μπορούν να φιλοξενήσουν περισσότερα από ένα δοκίμια, η μέθοδος αυτή προσφέρεται ιδιαίτερα όταν υπάρχει σε εξέλιξη πρόγραμμα προσδιορισμού χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού για πολλά εδαφικά υλικά οπότε δοκίμια τους τοποθετούνται επί των μεμβρανών ή πορολίθων των θαλάμων μύζησης και υποβάλλονται στην ίδια τιμή της μύζησης. Μόλις επιτευχθεί υδραυλική ισορροπία η εφαρμοζόμενη μύζηση αφαιρείται και τα δοκίμια εξάγονται από τον θάλαμο μύζησης και μετρείται στο καθένα από αυτά ποσοστό υγρασίας και βάρος υπό άνωση μετά από την παραφίνωση. Όταν υιοθετείται η μέθοδος αυτή είναι κρίσιμης σημασίας η

ταχύτατη αφαίρεση της ασκούμενης μύζησης, η ταχύτατη εξαγωγή των δοκιμίων από το θάλαμο μύζησης και η ταχύτατη πραγματοποίηση των απαιτούμενων μετρήσεων. Ιδίως αν ο χειριστής είναι μόνο ένας κρίνεται σκόπιμο ο αριθμός των ταυτόχρονα εισαγομένων δοκιμίων στον θάλαμο μύζησης να περιορίζεται το πολύ στα πέντε (5). Για περισσότερα δοκίμια πρέπει να κάνουν τις σχετικές μετρήσεις τουλάχιστον δύο άτομα (υπό την προϋπόθεση ότι ο απαιτούμενος δευτερεύων εξοπλισμός όπως ζυγοί, εστίες θέρμανσης παραφίνης και δοχεία παραφίνωσης επαρκούν σε αριθμό, ώστε να μην υπάρχουν πάλι καθυστερήσεις).

Σε ό,τι αφορά τον απαιτούμενο χρόνο διατήρησης της εξωτερικά επιβαλλόμενης πίεσης αέρα στον θάλαμο μύζησης μέχρι την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας και άρα την εξίσωση της μύζησης του εδαφικού δοκιμίου με την πίεση του αέρα, οι περισσότεροι ερευνητές αναφέρουν ως επαρκή τον χρόνο των 48 ωρών ακόμα και για αργιλικά εδαφικά υλικά (ενδεικτικά Ridley, 1998, και Dineen, 1998), το οποίο επιβεβαιώθηκε και από την εμπειρία εφαρμογής της μεθόδου στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής, παρόλο που υπάρχουν αναφορές για απαιτούμενους χρόνους ακόμα και 10 ημερών (ενδεικτικά: Tinjum, et al., 1997, Vanapalli, et al., 1999, Gee, et al., 2002, και Oliveira & Fernando, 2006). Το πρότυπο D 6836 – 02 της A.S.T.M. αναφέρει ως ελάχιστο απαιτούμενο χρόνο εφαρμογής κάθε τιμής της μύζησης τις 48 ώρες για τιμές της μύζησης μέχρι 500 kPa και τις 96 ώρες για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες από 500 kPa, με πρόβλεψη περιορισμού ωστόσο ανάλογα με την εξέλιξη της ποσότητας του νερού που εξέρχεται. Όπως προαναφέρθηκε, κατά την αύξηση της πίεσης του αέρα στον θάλαμο μύζησης η πίεση της αέριας και της υγρής φάσης των πόρων του εδαφικού υλικού αυξάνονται κατά το ποσό που αυξήθηκε η πίεση του αέρα στον θάλαμο. Όταν η μέθοδος μετατόπισης άξονα χρησιμοποιείται για την μέτρηση της μύζησης, η αυξημένη πίεση της υγρής φάσης δεν αφήνεται να εκτονωθεί αλλά μετρείται η νέα της τιμή και αφαιρούμενη από την τιμή της πίεσης της αέριας φάσης των πόρων (η οποία είναι ίση με την πίεση του αέρα στον θάλαμο μύζησης εφόσον αρχικά ήταν ίση με την ατμοσφαιρική) μας δίνει την μύζηση του δοκιμίου. Όταν η μέθοδος μετατόπισης άξονα χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μύζησης, η έξοδος του νερού δεν περιορίζεται οπότε επιτρέπεται στην πίεση που αναπτύσσεται στην υγρή φάση να εκτονώνεται και άρα να υπάρχει έξοδος νερού από την αντίστοιχη έξοδο στην διάταξη του Σχ. 4.20β. Παρατηρώντας την εξερχόμενη ποσότητα νερού προσδιορίζεται ο χρόνος ολοκλήρωσης της εκτόνωσης της υπερπίεσης της υγρής φάσης και άρα ο χρόνος που έχει αποκατασταθεί η ζητούμενη τιμή της μύζησης στο δοκίμιο.

Μέχρι αυτό το σημείο περιγράφηκε η μέθοδος μετατόπισης άξονα για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού με διαφορετικά δοκίμια, κάθε σημείο δηλαδή της καμπύλης να έχει προκύψει από την ρύθμιση της μύζησης σε διαφορετικό δοκίμιο του εδαφικού υλικού και σε αυτό το διαφορετικό δοκίμιο να έχει μετρηθεί το ποσοστό υγρασίας και το φαινόμενο βάρος. Ακόμα όμως και κατά την παρασκευή δοκιμίων αναζυμωμένου εδαφικού υλικού που έχει προηγουμένως ομογενοποιηθεί<sup>5</sup> υπάρχει πάντοτε κάποια ανομοιογένεια, η οποία είναι προφανώς μεγαλύτερη στην περίπτωση δοκιμίων φυσικού υλικού ακόμα και αν το ένα βρίσκεται πολύ κοντά στο άλλο μέσα στο δείγμα από το οποίο αποκόπηκαν. Ταυτόχρονα η μέθοδος της εξαγωγής των δοκιμίων από τον θάλαμο μύζησης προϋποθέτει ότι το εδαφικό υλικό είναι τέτοιας φύσης που όταν ξηραίνεται διατηρεί την μηχανική του ακεραιότητα (όπως ένα αργιλικό υλικό) και δεν διαλύεται με ένα απλό άγγιγμα (όπως ένα κοκκώδες υλικό).

Έτσι μία παραλλαγή της μεθόδου μετατόπισης άξονα είναι εκείνη κατά την οποία εισάγεται ένα μόνο δοκίμιο στον θάλαμο μύζησης (ή τόσα δοκίμια, όσοι πορόλιθοι μπορούν να τοποθετηθούν στον θάλαμο μύζησης) και στο ίδιο αυτό δοκίμιο επιβάλλονται κατά σειρά οι διάφορες τιμές της μύζησης. Σε αυτή την περίπτωση μετρείται ο όγκος του νερού στην έξοδο που αντιστοιχεί στον πορόλιθο πάνω στον οποίο έχει τοποθετηθεί κάθε δοκίμιο (για κάθε τιμή της μύζησης που επιβάλλεται). Γνωρίζοντας το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών  $G_s$  του υλικού του δοκιμίου, το αρχικό βάρος του πλήρως κορεσμένου δοκιμίου και τον όγκο του όταν τοποθετήθηκε στο θάλαμο μύζησης, μετρώντας τον όγκο του εξερχόμενου νερού και το τελικό ποσοστό υγρασίας, βάρος και όγκο του δοκιμίου μετά την επιβολή όλων των διαδοχικών τιμών μύζησης, μπορούν να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού. Η καμπύλη ποσοστού υγρασίας – μύζησης υπολογίζεται άμεσα αφού με γνωστό το τελικό ποσοστό υγρασίας του δοκιμίου (και άρα την μάζα των στερεών) υπολογίζεται για κάθε τιμή της μύζησης το ποσοστό της υγρασίας προσθέτοντας την μάζα του νερού που έχει μετρηθεί στα αντίστοιχα στάδια. Στην καμπύλη αυτή, εφόσον η μέγιστη μύζηση που επιβλήθηκε στο δοκίμιο εντός του θαλάμου μύζησης επαρκούσε, αποτυπώνονται τα σημεία καμπής που αντιστοιχούν στην πίεση διείσδυσης αέρα και στο παραμένον ποσοστό υγρασίας. Από το στάδιο αυτό ωστόσο και στη συνέχεια πρέπει να γίνουν ορισμένες παραδοχές για τον υπολογισμό των υπολοίπων χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού. Το γεγονός αυτό οδηγεί αναπόφευκτα σε σφάλματα που πιθανότατα ισοσκελίζουν τα πιθανά σφάλματα στον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-

---

<sup>5</sup> Για περισσότερα στοιχεία σχετικά με τις τεχνικές παρασκευής και ομογενοποίησης αναζυμωμένων εδαφικών υλικών βλ. Μέρος II, Κεφ. 10 και 13.



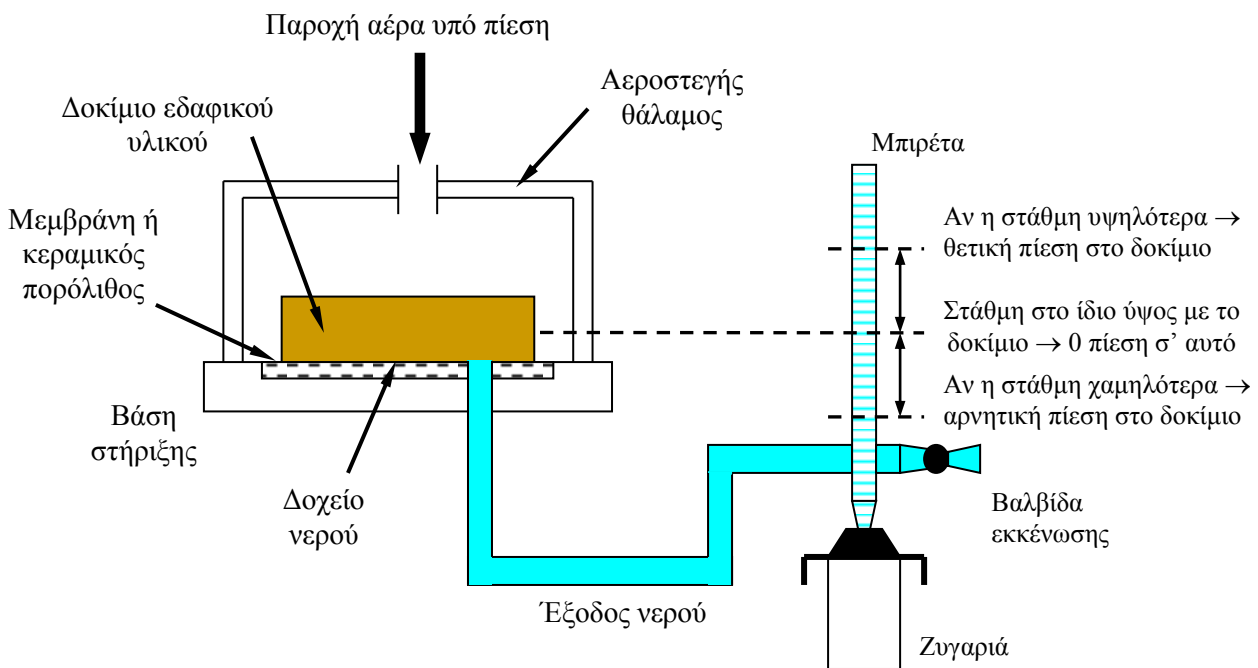
νερού με διαφορετικά δοκίμια που προκύπτουν από την αναπόφευκτη ανομοιογένεια ακόμα και των ομογενοποιημένων αναζυμωμένων εδαφικών υλικών.

Η πρώτη από αυτές τις παραδοχές σχετίζεται με τον τρόπο της μέτρησης της ποσότητας του εξερχόμενου νερού. Στο Σχ. 4.21 παρουσιάζεται εργαστηριακή διάταξη θαλάμου μύζησης για τη μέτρηση της ποσότητας του νερού που εξέρχεται από το δοκίμιο. Σε μια τέτοια διάταξη πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερη μέριμνα για δύο σημεία. Το πρώτο σημείο αφορά στην εξάτμιση του νερού από το δοχείο εντός του οποίου συλλέγεται το εξερχόμενο νερό μετά την έξοδό του από το θάλαμο μύζησης. Αυτό συνήθως γίνεται με τη χρήση μπιρέτας, εντός της οποίας η ελεύθερη επιφάνεια του νερού καλύπτεται από λάδι σιλικόνης ώστε να μην διαφεύγει καθόλου νερό μέσω εξάτμισης. Παρόλο που η χρήση της διάταξης αυτής λύνει το πρόβλημα της εξάτμισης και παρέχει και τη δυνατότητα ογκομέτρησης του νερού που εξέρχεται (και άρα έμμεσου υπολογισμού του βάρους του νερού που εξέρχεται για γνωστή θερμοκρασία) αντί για ζύγισή του<sup>6</sup>, δημιουργεί ένα άλλο πρόβλημα το οποίο δεν υπάρχει στην περίπτωση που θα ήταν δυνατόν να χρησιμοποιούνται σκεύη μεγαλύτερης διατομής από τις μπιρέτες για τη συλλογή του νερού που εξέρχεται. Το πρόβλημα είναι η ανάγκη διατήρησης της στάθμης εντός της μπιρέτας στο ίδιο ύψος με αυτό το οποίο βρίσκεται το δοκίμιο εντός της συσκευής. Αν η στάθμη του νερού εντός της μπιρέτας δεν βρίσκεται στο ίδιο ύψος με το δοκίμιο εντός του θαλάμου μύζησης, τότε το νερό στη μπιρέτα ασκεί μία θετική πίεση προς το δοκίμιο, αν η στάθμη βρίσκεται ψηλότερα από το δοκίμιο, ή μία επιπλέον αρνητική πίεση, αν η στάθμη βρίσκεται χαμηλότερα από το δοκίμιο<sup>7</sup>. Οι διαφορές αυτές είναι ομολογουμένως μικρές αλλά αν δεν ληφθεί μέριμνα εισάγουν συστηματικά λάθη, τα οποία μπορούν να γίνουν σημαντικά, ειδικά στις χαμηλές τιμές της μύζησης που έχουν ιδιαίτερη σημασία για κοκκώδη υλικά. Για να αποφευχθεί αυτό το πρόβλημα πρέπει οι μπιρέτες να διαθέτουν βαλβίδα εκκένωσής τους μέχρι την επιθυμητή στάθμη εντός αυτών αν απαιτείται ταπείνωση της στάθμης (Φωτ. 4.1 από έναν τροποποιημένο θάλαμο μύζησης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής –βλ. Κεφ. 14), ή ακόμα δυσκολότερα πρέπει να χρησιμοποιείται κάποιο σύστημα εισαγωγής νερού στην περίπτωση που απαιτείται ανύψωση της στάθμης (Σχ. 4.21). Εναλλακτικά της παρακολούθησης της ποσότητας του εξερχόμενου από το δοκίμιο νερού μπορεί να ζυγίζεται

<sup>6</sup> Η οποία προφανώς για αποφυγή μετακινήσεων της μπιρέτας θα σήμαινε συνεχή τοποθέτησή της επί ζυγαριάς ακριβείας καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος και άρα δέσμευση μιας ζυγαριάς για όσο διαρκεί το πείραμα (Σχ. 4.21).

<sup>7</sup> Προφανώς το ίδιο πρόβλημα ισχύει και στην περίπτωση ενός δοχείου συλλογής μεγαλύτερης διατομής. Τότε όμως οι μεταβολές στην στάθμη εντός αυτού (δεδομένου ότι η ποσότητα του νερού που εξέρχεται από ένα μόνο δοκίμιο είναι μικρή) είναι πολύ μικρότερες για να εισάγουν άξιες λόγου διαφορές πίεσης. Το πρόβλημα σε αυτή την περίπτωση είναι ότι αποκλείεται η ογκομέτρηση (λόγω της μεγάλης διατομής) και μπορεί να γίνει μόνο ζύγιση.

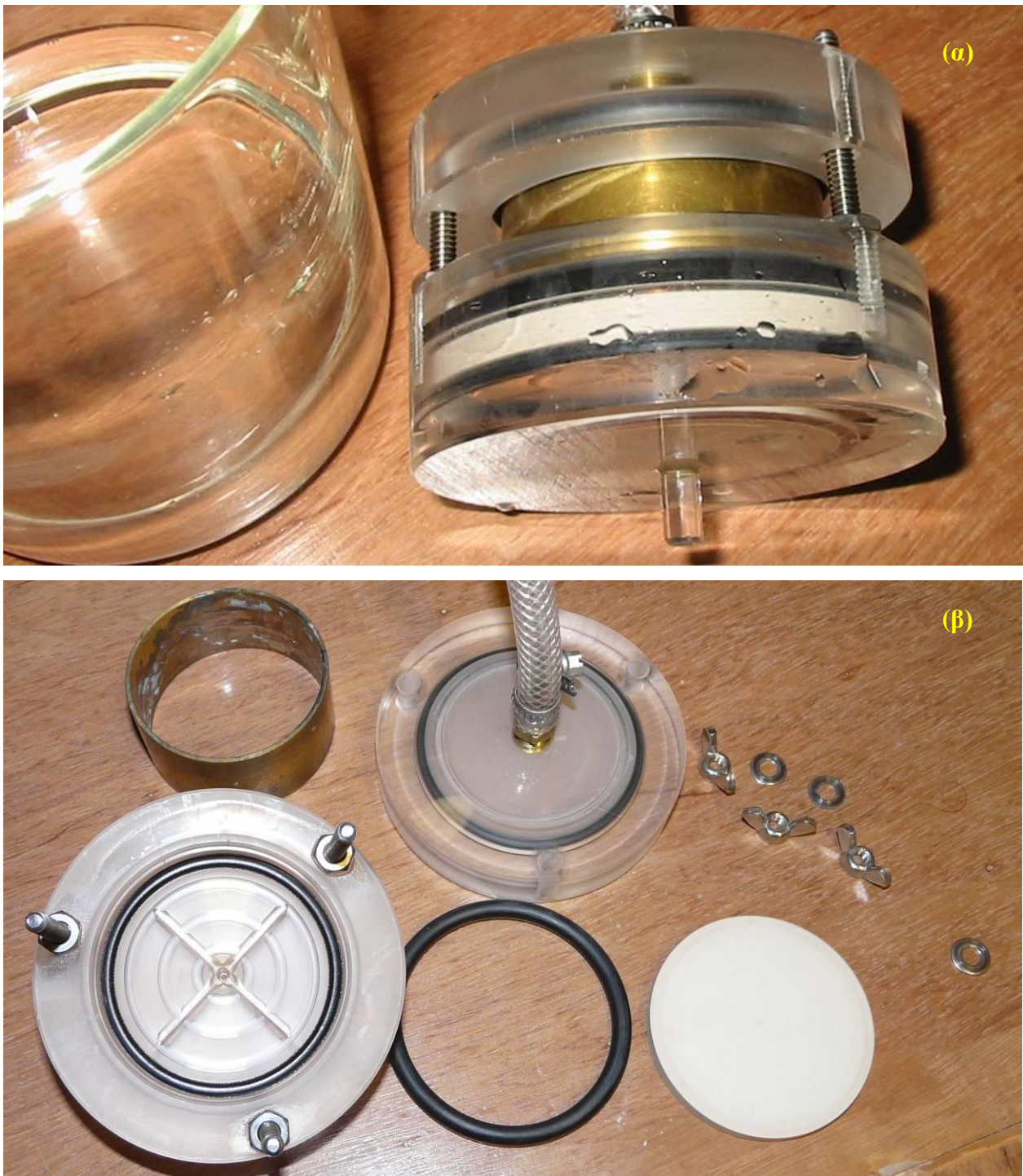
ολόκληρη η συσκευή με το δοκίμιο μέσα (εφόσον πρόκειται για τις αρκετά ελαφρές εκδόσεις των θαλάμων μύζησης που είναι κατασκευασμένες από πλαστικό και είναι γνωστές ως κελιά Tempe –Tempe cells- Φωτ. 4.2). Οι ελαφρές αυτές εκδόσεις ωστόσο δεν προσφέρονται για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού μέχρι υψηλές τιμές της μύζησης αφού τότε απαιτούνται θάλαμοι μύζησης που να αντέχουν στις αντίστοιχες πιέσεις, οι οποίοι είναι μεταλλικοί, μεγάλου βάρους (βλ. Φωτ. 3.1 και 3.2 στο Κεφ. 3), οπότε το ολικό τους βάρος δεν μπορεί να ζυγίζεται σε ζυγούς υψηλής ακρίβειας για την παρακολούθηση της μεταβολής του ποσοστού υγρασίας (0.01g) αφού αυτοί έχουν περιορισμένο μέγιστο βάρος ζύγισης. Μία άλλη εναλλακτική λύση είναι αυτή της χρήσης μπιρέτας τοποθετημένης οριζόντια και στο ίδιο ύψος με το δοκίμιο εντός του θαλάμου μύζησης, το οποίο όμως δημιουργεί προβλήματα απώλειας νερού από την μπιρέτα και απαιτεί ειδική διάταξη στη «στάθμη» εντός της μπιρέτας για να μη διαφεύγει το νερό. Είναι προφανής η απαίτηση για ιδιαίτερα προσεκτικούς χειρισμούς σε όλα τα στάδια αυτών των λεπτεπίλεπτων διαδικασιών.



**Σχήμα 4.21.** Σκαρίφημα εργαστηριακής διάταξης προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (θάλαμος μύζησης) στην περίπτωση χρησιμοποίησης μπιρέτας για την μέτρηση του νερού που εξέρχεται από τα δοκίμια.



**Φωτογραφία 4.1.** Τροποποιημένο κελί Tempre που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής (βλ. Κεφ. 14). Διακρίνεται η μπιρέτα στην οποία συλλέγεται το νερό που εξέρχεται από το δοκίμιο και η βαλβίδα εκκένωσης της πάνω από το ποτήρι ζέσεως.



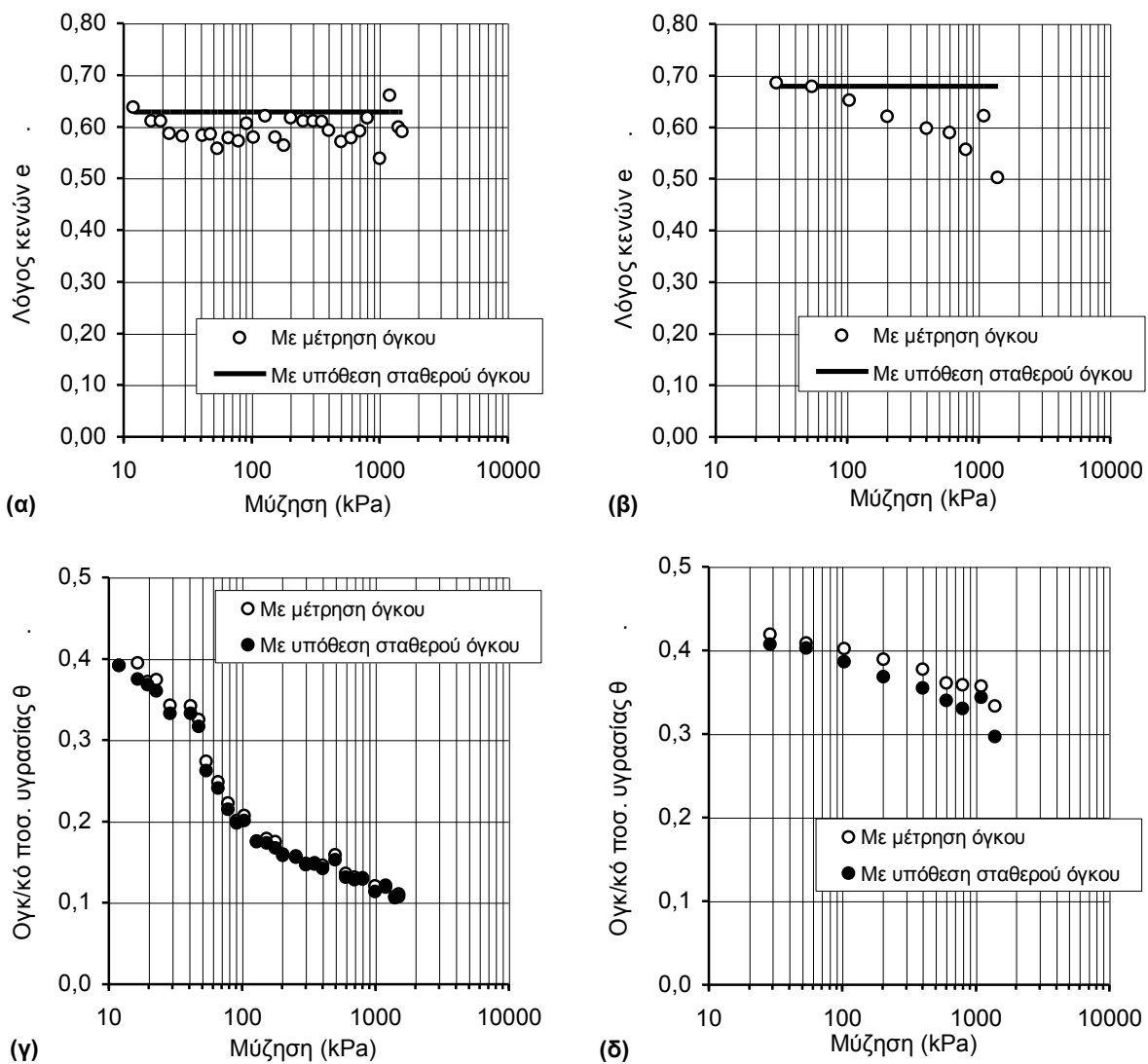
**Φωτογραφία 4.2.** Μικρός πλαστικός θάλαμος μύζησης γνωστός στην βιβλιογραφία ως κελί Tempre του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Soil Moisture Inc., α) συναρμολογημένος, και β) αποσυναρμολογημένος. Κάτω δεξιά διακρίνεται ο κεραμικός πορόλιθος πίεσης διείδυσης αέρα 100 kPa.

Η δεύτερη από τις προαναφερθείσες παραδοχές έχει να κάνει με τη συσχέτιση του όγκου του εξερχόμενου νερού με τον ολικό όγκο του δοκιμίου και την υπόθεση για την αρχική τιμή του

τελευταίου. Εφόσον η εφαρμοζόμενη τιμή της μύζησης είναι μικρότερη της πίεσης διείσδυσης αέρα, πράγματι ο όγκος του εξερχόμενου νερού ταυτίζεται με την μείωση του ολικού όγκου του δοκιμίου, οπότε μπορεί να υπολογιστεί ο ολικός όγκος και άρα το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας  $\theta_w$  ( $\theta_w = V_w/V_{ολ}$ ). Για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες της πίεσης διείσδυσης αέρα ωστόσο αυτό δεν ισχύει και η μείωση του ολικού όγκου είναι πάντοτε μικρότερη του όγκου του εξερχόμενου νερού. Προκειμένου για κοκκώδη και ιλυώδη εδάφη μπορεί να υποτεθεί χωρίς να υπεισέρχεται σημαντικό σφάλμα ότι ο συνολικός όγκος του δοκιμίου παραμένει σταθερός κατά τις μεταβολές της μύζησης (τουλάχιστον εντός του εύρους τιμών που παρατηρούνται τα δύο σημεία καμπής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού). Κατά την χρήση λοιπόν θαλάμων μύζησης γίνεται συχνά η «παραδοχή σταθερού όγκου», η παραδοχή δηλαδή ότι ο όγκος του δοκιμίου του εδάφους εντός της συσκευής παραμένει σταθερός παρά την αύξηση της μύζησης, οπότε αν μετρούμε την ποσότητα του νερού που εξέρχεται από το δοκίμιο κατά την αύξηση της μύζησης, μπορούμε να υπολογίσουμε το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας για κάθε τιμή της μύζησης. Η παραδοχή αυτή έχει δυστυχώς επεκταθεί συχνά και σε αργιλικά εδαφικά υλικά, στα οποία ο ολικός όγκος του δοκιμίου με την αύξηση της μύζησης δεν παραμένει σταθερός. Προκειμένου για τέτοια εδαφικά υλικά πρέπει να μετρείται ο ολικός όγκος του εδαφικού υλικού για κάθε τιμή της μύζησης, κάτι το οποίο συχνά απαιτεί ιδιαίτερες εργαστηριακές διατάξεις αν αυτές οι μετρήσεις γίνονται στο ίδιο δοκίμιο. Για να γίνει καλύτερα αντιληπτή η επιρροή της παραδοχής σταθερού όγκου παρατίθεται το Σχ. 4.22. Στο Σχ. 4.22 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού δύο από τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην εργαστηριακή διερεύνηση της παρούσας διατριβής: της αναζυμωμένης Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων επανασυμπιεσμένης σε κατακόρυφη τάση 100 kPa και της αναζυμωμένης Αργίλου Κηφισιάς επανασυμπιεσμένης σε τάση 600 kPa (παρουσιάζονται τα διαγράμματα λόγου κενών-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης για τα δύο υλικά). Η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων περιγράφεται κοκκομετρικά ως ιλυώδης λεπτή άμμος με λίγη άργιλο και αποτελούσε το πιο χονδρόκοκκο από τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης στα οποία έγιναν δοκιμές, ενώ η Άργιλος Κηφισιάς περιγράφεται ως αργιλώδης ιλύς με ίχνη άμμου και αποτελούσε ένα εδαφικό υλικό ενδιάμεσης κοκκομετρίας από αυτά στα οποία έγιναν δοκιμές<sup>8</sup>. Η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων είναι οριακά πλαστική με όριο υδαρότητας  $w_L$  24% και δείκτη πλαστικότητας  $I_p$  μόλις 1%, ενώ η Άργιλος Κηφισιάς είναι υλικό μέσης πλαστικότητας με  $w_L$  40.5% και  $I_p$  20.5%. Η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων παρουσιάζει μικρή συμπίεστικότητα σε σχέση με την Άργιλο Κηφισιάς, κύρια λόγω της διαφορετικής κοκκομετρικής

<sup>8</sup> Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων εδαφικών υλικών και οι πειραματικές διαδικασίες περιγράφονται στο Μέρος II της διατριβής.

διαβάθμισης αλλά και της διαφορετικής ορυκτολογίας των δύο υλικών. Προκειμένου για την πρώτη, όπως φαίνεται από τα Σχήματα 4.22α και 4.22γ όπου παρατίθενται αντίστοιχα καμπύλες λόγου κενών-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης με και άνευ παραδοχής σταθερού όγκου, η διαφορά στην καμπύλη ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης που προσδιορίζεται από τις δύο μεθόδους είναι πολύ μικρή. Αντίθετα παρουσιάζεται ιδιαίτερα μεγάλη διασπορά στα αποτελέσματα των μετρήσεων όγκου σε κάθε δοκίμιο (που μεταφράζεται στην παρατηρούμενη μεγάλη διασπορά των υπολογιζόμενων τιμών του λόγου κενών) με



**Σχήμα 4.22.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων και της Αργίλου Κηφισιάς. Καμπύλες λόγου κενών-μύζησης για την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων (α) και την Άργιλο Κηφισιάς (β) και καμπύλες ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης για την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων (γ) και την Άργιλο Κηφισιάς (δ).

υποεκτίμηση μάλλον της αρχικής τιμής του λόγου κενών. Η διασπορά αυτή οφείλεται σε προβλήματα κατά την εμβάπτιση στην υγροποιημένη παραφίνη δοκιμίων εδαφικών υλικών που είναι πιο χονδρόκοκκα. Στην περίπτωση της Αργίλου Κηφισιάς αντίθετα, η διασπορά στις τιμές είναι μικρότερη (με εξαίρεση το σημείο στη μύζηση των 1100 kPa) επιδεικνύοντας σαφώς την τάση μείωσης του λόγου κενών με την μύζηση (Σχήμα 4.22β) οδηγώντας σε σημαντικές αποκλίσεις από την σταθερή τιμή του λόγου κενών που επιβάλλει η παραδοχή σταθερού όγκου. Η απόκλιση αυτή μεταφράζεται και σε αντίστοιχη πολύ μεγάλη απομάκρυνση των καμπυλών ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης που προσδιορίζονται με και άνευ της παραδοχής σταθερού όγκου, με την παραδοχή σταθερού όγκου να οδηγεί σε σημαντική υποεκτίμηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας για την ίδια τιμή της μύζησης. Το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας φαίνεται μάλιστα να υποεκτιμάται τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερη γίνεται η μύζηση, πιθανόν λόγω της αρχικά μικρότερης συμπιεστότητας των δοκιμίων της Αργίλου Κηφισιάς (αφού είναι συμπιεσμένα στα 600 kPa). Η υποεκτίμηση αυτή παρατηρείται και στην Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, αλλά εκεί η διαφορά είναι πολύ μικρότερη λόγω της μικρής συμπιεστότητας του υλικού αυτού και άρα της μικρότερης απόκλισης από την πραγματικότητα της παραδοχής σταθερού όγκου. Για υλικά μεγαλύτερης συμπιεστότητας λοιπόν η παραδοχή σταθερού όγκου οδηγεί και σε υποεκτίμηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας εκτός από την προφανή υπερεκτίμηση του λόγου κενών. Τα πειραματικά αποτελέσματα του Σχ. 4.22 και η αξιολόγηση της παραδοχής σταθερού όγκου έχουν παρουσιαστεί σε προκαταρκτικό στάδιο από τους Μπαρδάνη & Καββαδά (2005).

Σήμερα έχουν αναπτυχθεί νεώτεροι θάλαμοι μύζησης εντός των οποίων είναι δυνατόν να γίνουν μετρήσεις που να επιτρέπουν τον προσδιορισμό της μεταβολής του συνολικού όγκου του δοκιμίου σε κάθε τιμή της μύζησης αλλά και πάλι υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες και σε κάθε περίπτωση απαιτούνται σημαντικές οικονομικές επενδύσεις σε εργαστηριακό εξοπλισμό. Γι' αυτόν το λόγο η μέθοδος των διαφορετικών δοκιμίων με μέτρηση του ολικού όγκου με τη μέθοδο της παραφίνωσης μετά από κάθε τιμή της μύζησης παραμένει η απλούστερη και φθηνότερη μέθοδος προσδιορισμού των πλήρων χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού σε συνδυασμό με την μέθοδο μετατόπισης άξονα.

Επίσης σήμερα έχουν αναπτυχθεί διατάξεις που επιτρέπουν τον προσδιορισμό των κλάδων της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού κατά την ύγρανση. Η απλούστερη από αυτές τις μεθόδους είναι εκείνη της διαβροχής του δοκιμίου εντός του θαλάμου μύζησης και της μέτρησης της μύζησης του δοκιμίου μετά την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας οπότε και με γνωστή την

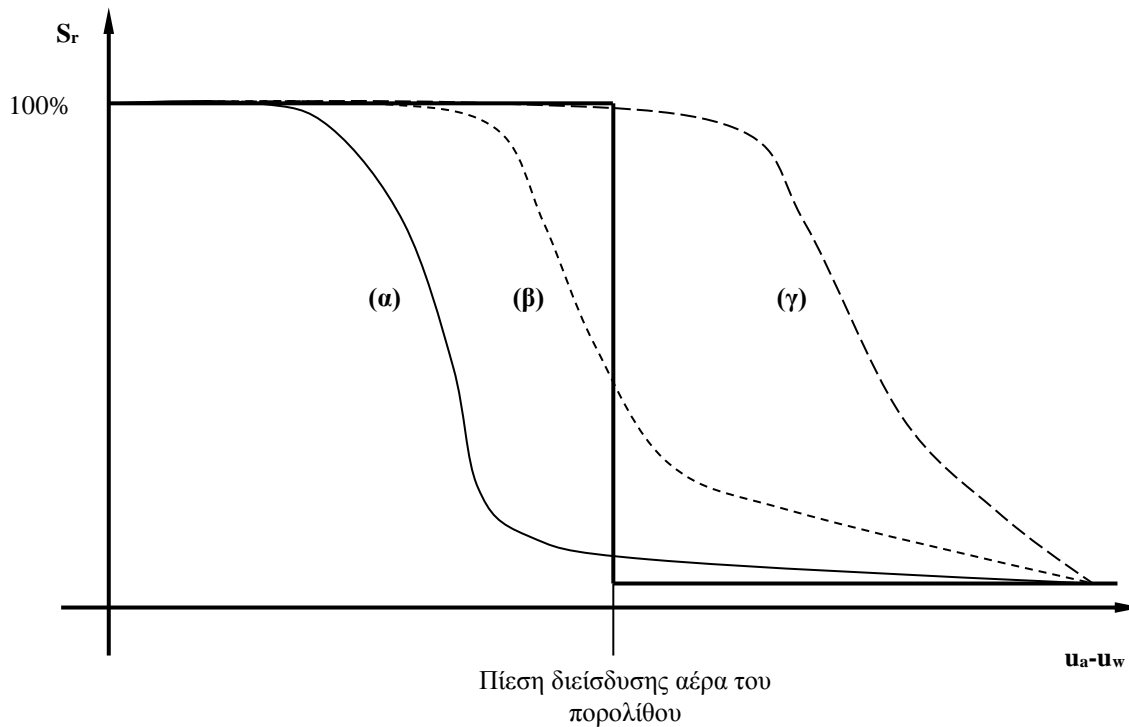
ποσότητα του νερού που προστέθηκε στο δοκίμιο είναι γνωστά τα απαιτούμενα μεγέθη για τον υπολογισμό και αυτού του κλάδου της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Πιο σύνθετα συστήματα βασίζονται στην προσρόφηση ύδατος μέσω της εξόδου ύδατος από τον θάλαμο μύζησης κατά την μείωση της πίεσης του αέρα εντός του θαλάμου μετά από προηγούμενη αύξηση μέχρι την επιθυμητή τιμή.

Σε ό,τι αφορά τους πορολίθους των θαλάμων μύζησης έχουν ήδη αναφερθεί τα βασικά χαρακτηριστικά τους στην §3.3 για την μέτρηση της μύζησης με την μέθοδο μετατόπισης άξονα. Στην παρούσα παράγραφο επισημαίνονται απλώς τα ζητούμενα από αυτούς χαρακτηριστικά για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Στο Σχ. 4.23 παρουσιάζεται τυπική χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού πορολίθου (με τον χαρακτηριστικό απότομο αποκορεσμό της) και τρεις τυπικές ως προς την ικανότητα προσδιορισμού χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού του πορολίθου καμπύλες εδαφικών υλικών. Η καμπύλη (α) είναι μία καμπύλη που πρακτικά προσδιορίζεται πλήρως με τον συγκεκριμένο πορόλιθο αφού προσδιορίζονται και τα δύο σημεία καμπής της. Αντίθετα στην καμπύλη (γ) δεν προσδιορίζεται κανένα σημείο καμπής, οπότε ο συγκεκριμένος πορόλιθος είναι ακατάλληλος για το εδαφικό υλικό με αυτή την καμπύλη και τέλος στην καμπύλη (β) προσδιορίζεται μόνο το σημείο καμπής που αντιστοιχεί στην πίεση διείσδυσης αέρα.

Με δεδομένο αυτό η ικανότητα προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού με την μέθοδο μετατόπισης άξονα περιορίζεται από την πίεση διείσδυσης αέρα του πορολίθου ή της μεμβράνης σελουλόζης του θαλάμου μύζησης, η μέγιστη τιμή της οποίας είναι αντίστοιχα 1500 kPa και 10000 kPa. Η δεύτερη τιμή είναι σαφώς πολύ υψηλή επιτρέποντας τον προσδιορισμό της πλήρους χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού των περισσότερων εδαφικών υλικών. Στην πράξη ωστόσο προβλήματα με την ευκολία χρήσης μεμβρανών σελουλόζης, την υψηλή απαιτούμενη πίεση αέρα και το ύψος της οικονομικής επένδυσης στον συγκεκριμένο εξοπλισμό δεν έχουν καταστήσει ιδιαίτερα διαδεδομένο το συνδυασμό θαλάμων μύζησης με μεμβράνες σελουλόζης τόσο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα. Αντίθετα, αρκετά διαδεδομένος είναι ο συνδυασμός θαλάμων μύζησης με κεραμικούς πορολίθους πίεσης διείσδυσης αέρα 1500 kPa (όπως ο θάλαμος μύζησης του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής), που επιτρέπει όμως τον προσδιορισμό της πλήρους χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού εδαφικών υλικών το πολύ χαμηλής πλαστικότητας. Για εδαφικά υλικά μέσης πλαστικότητας προσδιορίζεται το πολύ η πίεση διείσδυσης αέρα και για αργιλικά υλικά υψηλής



πλαστικότητας δεν προσδιορίζεται κανένα σημείο καμπής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.



**Σχήμα 4.23.** Καμπύλη συγκράτησης ύδατος πορολίθου σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης με χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (α) εδαφικού υλικού στην οποία προσδιορίζονται και τα δύο σημεία καμπής, (β) το πρώτο μόνο (πίεση διείσδυσης αέρα), και (γ) κανένα.

Δύο ακόμα σημαντικά σημεία που αφορούν τους πορολίθους και τις μεμβράνες είναι πρώτον η απαίτηση για επιμελή πλήρη κορεσμό τους πριν την έναρξη της δοκιμής και δεύτερον η απαίτηση για πολύ καλή επαφή δοκιμίου και μεμβράνης κατά την δοκιμή. Ο κορεσμός των πορολίθων και των μεμβρανών απαιτεί την παραμονή τους σε απαερωμένο, απεσταγμένο νερό υπό πίεση. Πριν την δοκιμή επίσης και σε διάφορα στάδια από τον τελευταίο κορεσμό είναι σκόπιμο να παρακολουθείται τυχόν έξοδος φυσαλίδων αέρα για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από λίγα λεπτά από την εφαρμογή της πίεσης αέρα στον θάλαμο μύζησης, αφού κάτι τέτοιο συνιστά ένδειξη μερικού κορεσμού του πορολίθου. Τέλος, πέραν του επιμελούς επιφανειακού καθαρισμού των πορολίθων είναι σκόπιμος και ο καθαρισμός τους σε βάθος από σωματίδια λεπτόκοκκων υλικών που μπορεί να έχουν διεισδύσει με εμβάπτισή τους σε λουτρό υπερήχων.

Σε ό,τι αφορά το δεύτερο σημείο, μετά την τοποθέτηση του δοκιμίου είναι σκόπιμο το δοκίμιο να περιστρέφεται τουλάχιστον κατά  $45^\circ$  για την εξασφάλιση της καλής επαφής ή ακόμα και να τοποθετείται ένα βάρος πάνω στο δοκίμιο και να διατηρείται όσο κρατάει η δοκιμή. Μεταξύ βάρους και δοκιμίου πρέπει να παρεμβάλλεται κάποιου είδους μέσο για την εξασφάλιση της επαφής αυτής της πλευράς του δοκιμίου με τον αέρα στο θάλαμο μύζησης. Σήμερα υπάρχουν και θάλαμοι μύζησης με ελατήρια που εφαρμόζουν στην πάνω πλευρά των δοκιμίων. Για εδαφικά υλικά που συρρικνώνονται σημαντικά ωστόσο αυτό σημαίνει προοδευτική μείωση της πίεσης του ελατηρίου όσο αυξάνεται η μύζηση. Για μαλακά εδαφικά υλικά αυτό μπορεί να αλλοιώσει την μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, αφού όπως περιγράφηκε ήδη αυτή εξαρτάται από το εντατικό πεδίο υπό το οποίο προσδιορίζεται (§4.2.6.2). Επίσης για μαλακά εδαφικά υλικά είναι σκόπιμο να αφήνεται επαρκής χρόνος για την ολοκλήρωση της στερεοποίησης υπό το συγκεκριμένο βάρος, ώστε να μην έχει απομείνει τυχόν υπερπίεση στην υγρή φάση των πόρων κατά την εφαρμογή της πίεσης αέρα.

Λόγω της εξάρτησης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού από το εντατικό πεδίο υπό το οποίο αυτή προσδιορίζεται έχουν αναπτυχθεί και θάλαμοι μύζησης που επιτρέπουν την εξωτερική επιβολή της επιθυμητής τάσης στο δοκίμιο. Οι συσκευές αυτές χρησιμεύουν για τον προσδιορισμό και των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού υπό σταθερή τάση αλλά και των καμπυλών συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση και γι' αυτό εξετάζονται αναλυτικά στο Κεφ. 5.

Σήμερα η μέθοδος μετατόπισης άξονα έχει ενσωματωθεί ως μέθοδος μέτρησης της μύζησης και στα πρότυπα της A.S.T.M. Το πρότυπο D 2325-68 (2000) περιγράφει τις διαδικασίες προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού χονδρόκοκκων εδαφών με θάλαμο μύζησης με πορόλιθο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα, το πρότυπο D 3152-72 (2000) περιγράφει τις διαδικασίες προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού λεπτόκοκκων εδαφών με θάλαμο μύζησης με μεμβράνη και το πρότυπο D 6836-02 περιγράφει τις διαδικασίες προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού κάθε είδους εδαφών με διάφορες μεθόδους, μεταξύ αυτών και την μέθοδο μετατόπισης άξονα χρησιμοποιούμενη ως μέθοδο ελέγχου της μύζησης.

### 4.3.3 Μέθοδος ωσμωτικού ελέγχου μύζησης

Μία άλλη μέθοδος ελέγχου της μύζησης είναι εκείνη που βασίζεται στο φαινόμενο της ώσμωσης. Ώσμωση είναι το φαινόμενο της διάχυσης μορίων διαλύτη διά μέσω ημιδιαπερατής μεμβράνης από διάλυμα μικρότερης συγκεντρώσεως (υποτονικό) προς διάλυμα μεγαλύτερης συγκεντρώσεως (υπερτονικό). Η ώσμωση μεταξύ δύο διαλυμάτων συνεχίζεται μέχρι να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις και από τις δύο πλευρές της μεμβράνης, ή η δημιουργηθείσα διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο διαλυμάτων να σταματήσει την εισροή διαλύτη. Όταν ένα διάλυμα έρχεται σε επαφή μέσω ημιδιαπερατής μεμβράνης με τον καθαρό διαλύτη, μόρια διαλύτη εισέρχονται στο διάλυμα μέχρι η δημιουργηθείσα διαφορά δυναμικού να σταματήσει την εισροή διαλύτη (αφού ο διαλύτης είναι καθαρός δεν πρόκειται ποτέ να εξισωθούν οι συγκεντρώσεις). Η διαφορά αυτή δυναμικού αντιστοιχεί σε μία τιμή της πίεσης η οποία ονομάζεται *ωσμωτική πίεση του διαλύματος* και είναι χαρακτηριστική ιδιότητα του διαλύτη, της διαλυμένης ουσίας και της συγκέντρωσής της στον συγκεκριμένο διαλύτη.

Όταν το φαινόμενο της ώσμωσης εφαρμόζεται για τον έλεγχο της μύζησης, ένα δείγμα εδάφους περιβάλλεται από ημιδιαπερατή μεμβράνη και εμβαπτίζεται σε ένα υδατικό διάλυμα κάποιας ουσίας τα μόρια της οποίας είναι αρκετά μεγάλα για να μην μπορούν να διέρχονται από την ημιδιαπερατή μεμβράνη. Υπό την προϋπόθεση ότι το νερό των πόρων του εδαφικού υλικού του δείγματος έχει συγκέντρωση σε ξένες ουσίες τέτοια που να αντιστοιχεί σε μικρότερη ωσμωτική πίεση υδατικού διαλύματος από εκείνη στην οποία αντιστοιχεί το υδατικό διάλυμα εντός του οποίου βρίσκεται ολόκληρο το δείγμα, *νερό των πόρων του εδάφους αρχίζει να διέρχεται διά μέσω της μεμβράνης προς το περιβάλλον διάλυμα μέχρι η πίεση του νερού των πόρων να γίνει ίση με τη διαφορά της ωσμωτικής πίεσης του περιβάλλοντος διαλύματος και του νερού των πόρων με τις τυχόν ξένες ουσίες που περιέχει.* Όταν το νερό των πόρων του εδάφους είναι απεσταγμένο, απιονισμένο και εφόσον θεωρηθεί ότι δεν συμβαίνει ανταλλαγή ιόντων με τα αργιλικά πλακίδια του εδαφικού υλικού ή αυτή είναι τόσο μικρή που μπορεί πράγματι να αγνοηθεί, η αρνητική πίεση του νερού των πόρων του εδάφους στην κατάσταση υδραυλικής ισορροπίας θα είναι ίση με την ωσμωτική πίεση του περιβάλλοντος διαλύματος. Παρά τη χρήση του φαινομένου της ώσμωσης (το οποίο εξηγεί την ύπαρξη της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης στα μη κορεσμένα εδάφη), *στην συγκεκριμένη μέθοδο ελέγχου της μύζησης ελέγχεται η μύζηση εδαφικού σκελετού,* αφού η ημιδιαπερατή μεμβράνη αποτρέπει την κίνηση των μορίων της διαλυμένης ουσίας στο περιβάλλον το δείγμα διάλυμα και *όχι την κίνηση των κατά πολύ μικρότερων μορίων των διαλυμένων ουσιών στο νερό των πόρων* του εδαφικού υλικού του δείγματος. Η ανάγκη τα

μόρια της διαλυμένης ουσίας στο περιβάλλον το δείγμα διάλυμα να είναι μεγαλύτερα από τα μόρια των διαλυμένων ουσιών στο νερό των πόρων του εδαφικού υλικού του δείγματος έχει επιβάλλει μέχρι σήμερα την χρήση μόνο ενός είδους υδατικών διαλυμάτων για τον έλεγχο της μύζησης με αυτή τη μέθοδο, των διαλυμάτων πολυαιθυλικής γλυκόλης (polyethylene glycol, PEG). Για την επίτευξη της ζητούμενης μύζησης χρησιμοποιούνται υδατικά διαλύματα διαφορετικής συγκέντρωσης στη συγκεκριμένη ουσία. Προφανώς όσο μεγαλώνει η συγκέντρωση, τόσο μεγαλώνει η ωσμωτική πίεση του διαλύματος και άρα η μύζηση εδαφικού σκελετού που μπορεί να δημιουργηθεί στο εδαφικό υλικό.

Η συσχέτιση μεταξύ ωσμωτικής πίεσης διαλυμάτων PEG και της συγκέντρωσής τους σε PEG είναι γνωστή για διάφορα μοριακά βάρη πολυαιθυλικής γλυκόλης. Συστηματικά και συνεπή μεταξύ τους αποτελέσματα έχουν προκύψει από διαφορετικούς ερευνητές, όπως επιδεικνύουν οι Williams & Shaykewich (1969) για PEG με μοριακό βάρος 6000 και 20000, οι Tarantino & Mongioni (2000β) για PEG με μοριακό βάρος 20000, οι Slatter, et al. (2000) για PEG με μοριακό βάρος 20000 και 35000 και οι Taibi, et al. (2005) για διάφορα μοριακά βάρη και αποτελέσματα διαφόρων ερευνητών. Η μέθοδος αναπτύχθηκε αρχικά από βιολόγους (Lagerwerff, et al., 1961) και στη συνέχεια υιοθετήθηκε στο χώρο της εδαφολογίας (Zur, 1966), με την πρώτη εφαρμογή στη γεωτεχνική μηχανική να καταγράφεται από τους Kassif & Ben Shalom (1971). Αυτοί ενσωμάτωσαν την μέθοδο σε ένα συμπιεσόμετρο με έλεγχο της μύζησης για να μελετήσουν διογκούμενα εδαφικά υλικά. Οι Komornik, et al. (1980) ενσωμάτωσαν τη μέθοδο σε συσκευή τριαξονικής δοκιμής κούλου δοκιμίου (hollow cylinder triaxial apparatus) και οι Delage, et al. (1987) την ενσωμάτωσαν στην συμβατική συσκευή της τριαξονικής δοκιμής. Βελτιώσεις στο σχετικό σχέδιο της συσκευής έχουν γίνει από τους Delage, et al. (1992) σε ό,τι αφορά την κυκλοφορία του διαλύματος επιβολής της μύζησης και τον έλεγχο της κίνησης νερού των πόρων προς το διάλυμα που περιβάλλει το δείγμα, όπως και από τους Cui & Delage (1996). Οι Dineen & Burland (1995) παρουσίασαν το δικό τους συμπιεσόμετρο με ωσμωτικό έλεγχο της μύζησης, επιδεικνύοντας μάλιστα πρώτοι την σημασία της απευθείας μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού στο δοκίμιο του εδαφικού υλικού που η μύζηση ελέγχεται ωσμωτικά, *αφού αυτή μπορεί να μην ταυτίζεται με την ωσμωτική πίεση του χρησιμοποιούμενου διαλύματος*. Οι Tarantino & Mongioni (2000β) παρουσίασαν ένα τροποποιημένο σχέδιο του συμπιεσομέτρου των Dineen & Burland (1995) και μελέτησαν και τις ιδιότητες των ημιδιαπερατών μεμβρανών, ενώ οι Slatter et al. (2000) έδωσαν μεγαλύτερη βαρύτητα στη μελέτη της συσχέτισης μεταξύ συγκέντρωσης PEG και ωσμωτικής πίεσης των διαλυμάτων.

Ο απλούστερος τρόπος εφαρμογής της μεθόδου, όταν ο έλεγχος της μύζησης γίνεται υπό μηδενική τάση, είναι η εμφύσηση του δοκιμίου εντός ημιδιαπερατής μεμβράνης στο διάλυμα επιβολής της επιθυμητής μύζησης. Όταν αντίθετα ο έλεγχος της μύζησης γίνεται υπό εντατική κατάσταση ( $K_0$  συνθήκες ή συνθήκες τριαξονικής φόρτισης) το διάλυμα επιβολής της μύζησης διοχετεύεται στα όρια του δοκιμίου του εδαφικού υλικού μέσω του κατάλληλου συστήματος κυκλοφορίας. Για κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 38mm και ύψους 76mm ο Suraj de Silva (1987) επέδειξε ότι ο χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας ολοκληρώθηκε μετά από μία εβδομάδα εμφύσησης των δοκιμίων μέσα στο διάλυμα επιβολής της μύζησης.

Βασικό χαρακτηριστικό των διαλυμάτων πολυαιθυλικής γλυκόλης είναι η σημαντική μεταβολή του όγκου τους με την μεταβολή της θερμοκρασίας. Γι' αυτό η θερμοκρασία των διαλυμάτων πρέπει να διατηρείται σταθερή στους  $20 \pm 0.5$  °C, όταν μετρούνται οι μεταβολές του όγκου τους κατά την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου ελέγχου της μύζησης. Το πρόβλημα της διατήρησης της θερμοκρασίας επιλύεται πολύ απλά με την μέτρηση των μεταβολών του βάρους του διαλύματος της πολυαιθυλικής αλκοόλης αντί του όγκου του. Η ποσότητα του διαλύματος PEG που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μύζησης πρέπει να είναι τόσο μεγάλη σε σχέση με το μέγεθος του δοκιμίου ώστε η ποσότητα νερού που διαφεύγει από το δοκίμιο να μην αλλοιώνει την τιμή της συγκέντρωσης PEG, οπότε η επιβαλλόμενη μύζηση να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

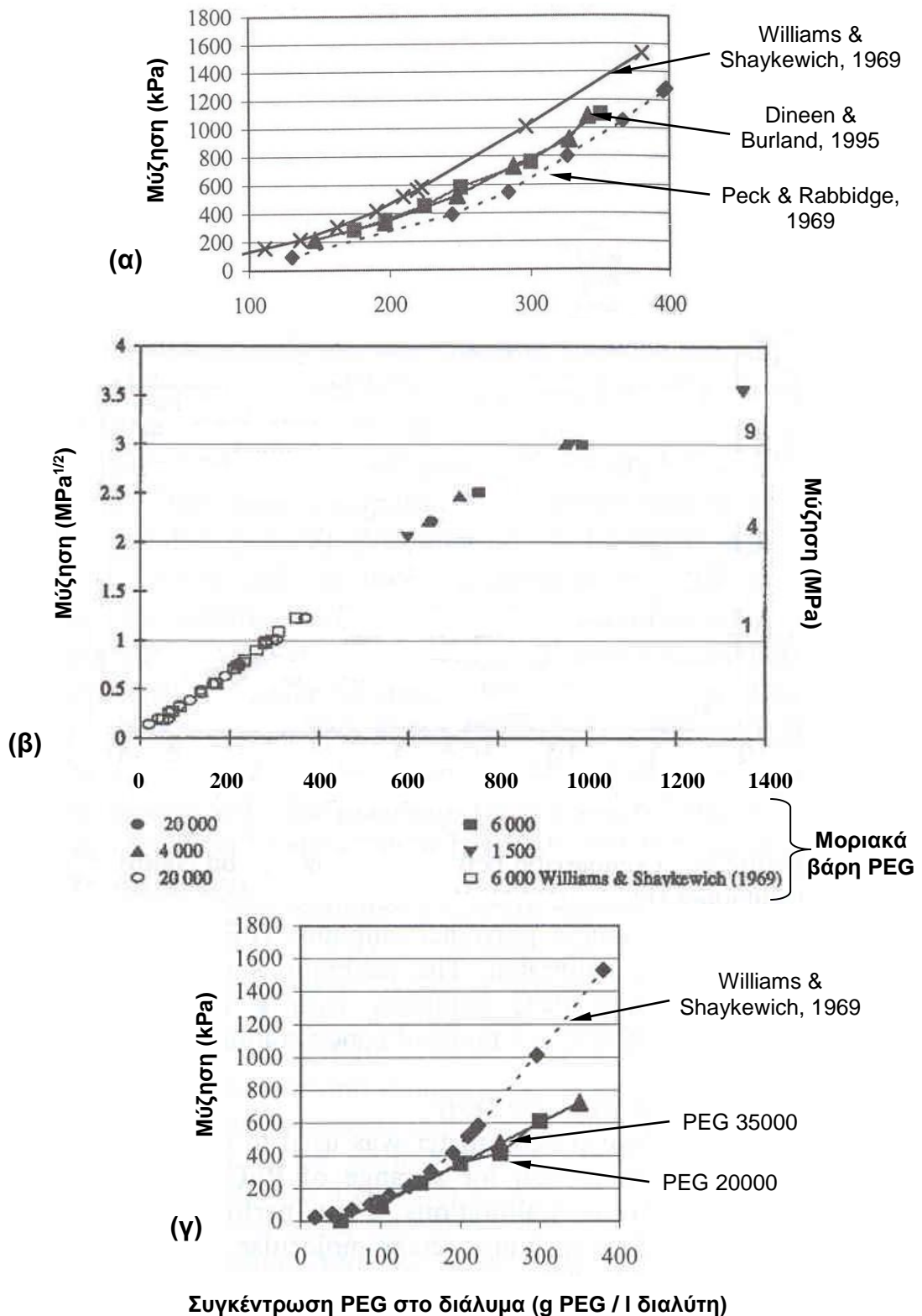
Σε ό,τι αφορά αυτή καθεαυτή την πολυαιθυλική γλυκόλη, το πραγματικό μοριακό της βάρος δεν ταυτίζεται με το ονομαστικό. Για παράδειγμα, όπως αναφέρουν οι Dineen & Burland (1995) για την PEG 20000, η αναφορά του παρασκευαστή είναι μοριακό βάρος μεγαλύτερο του 17000 κατά μέσο όρο.

Οι ημιδιαπερατές μεμβράνες χαρακτηρίζονται από το μοριακό βάρος των ουσιών των οποίων σταματούν την κίνηση διαμέσω τους. Για παράδειγμα οι Cui & Delage (1996) χρησιμοποίησαν ημιδιαπερατές μεμβράνες με ικανότητα αποτροπής της διέλευσης ουσιών μοριακού βάρους 14000-16000, η οποία ήταν επαρκής για το διάλυμα PEG 20000 που χρησιμοποίησαν. Εκτός αυτού, οι κατασκευαστές των μεμβρανών αναφέρουν ότι η ονομαστική τιμή του μοριακού βάρους ουσιών που οι μεμβράνες μπορούν να αποτρέπουν την διέλευσή τους διαμέσω τους αφορά σε ικανότητα αποτροπής μεγαλύτερη του 90% και όχι 100% αποτροπή, ενώ οι τιμές αυτές για τις μεμβράνες υπολογίζονται από τους κατασκευαστές τους για διαφορετικές ουσίες από την πολυαιθυλική γλυκόλη. Εκτός αυτού οι συνήθεις ημιδιαπερατές μεμβράνες από

σελουλόζη αποσυντίθενται από βακτηρίδια τα οποία μπορεί να αναπτυχθούν στα υδατικά διαλύματα, ειδικά κατά τα μεγάλα χρονικά διαστήματα που πρέπει να επιβάλλεται η ωσμωτική πίεση ώστε να επιτευχθεί η ίδια μύζηση στα δοκίμια. Γι' αυτό το λόγο κατά την εφαρμογή της μεθόδου προστίθεται κάποια αντιβακτηριδιακή ουσία στα διαλύματα. Νεώτερες ημιδιαπερατές μεμβράνες που έχουν αναπτυχθεί δεν παρουσιάζουν αυτό το πρόβλημα σε τόσο μεγάλο βαθμό.

Πρέπει επίσης να γίνει αντιληπτό ότι η μύζηση που δημιουργείται στο δοκίμιο είναι εκείνη που καθορίζεται από την ωσμωτική πίεση του διαλύματος στα όρια της μεμβράνης και όχι εκείνη που αντιστοιχεί στο περιβάλλον διάλυμα κατά μέσο όρο. Κατά συνέπεια, στην άμεση περιοχή της μεμβράνης και πίσω από αυτήν όπου γίνεται μεγαλύτερη η συγκέντρωση του νερού λόγω της εισροής από το δοκίμιο, είναι επόμενο να μειώνεται η συγκέντρωση σε PEG και άρα η ωσμωτική πίεση του διαλύματος να μειώνεται και να εφαρμόζεται μικρότερη μύζηση στο δοκίμιο του εδαφικού υλικού (Dineen & Burland, 1995). Για αυτόν τον λόγο θεωρείται σκόπιμη η εισαγωγή ενός συστήματος κυκλοφορίας του ωσμωτικού διαλύματος πίσω από την ημιδιαπερατή μεμβράνη στις συσκευές που η μύζηση ελέγχεται ωσμωτικά και ενός συστήματος ανάδευσης ή ανακίνησης του ωσμωτικού διαλύματος στις διατάξεις που δοκίμια εδαφικού υλικού απλώς εμβαπτίζονται μέσα σε διάλυμα για την επιβολή της μύζησης.

Όλα τα προαναφερθέντα σημεία επηρεάζουν σημαντικά τις βαθμονομήσεις των διαλυμάτων PEG. Καμπύλη βαθμονόμησης στην προκειμένη περίπτωση είναι *η συσχέτιση μεταξύ της δημιουργούμενης μύζησης και της συγκέντρωσης του διαλύματος σε πολυαιθυλική γλυκόλη*. Οι Williams & Shaykewich (1969) χρησιμοποίησαν ψυχρόμετρα για να μετρήσουν την μύζηση που δημιουργούν τα διαλύματα πολυαιθυλικής γλυκόλης (τοποθετούσαν ψυχρόμετρα πάνω από διαλύματα PEG σε κλειστά δοχεία μέχρι να ισορροπήσουν οι ενδείξεις των ψυχρομέτρων). Στη συγκεκριμένη περίπτωση λοιπόν τον ρόλο της ημιδιαπερατής μεμβράνης έπαιζε ο αέρας μεταξύ ψυχρομέτρων και διαλυμάτων, αποτελώντας (παρόλο που δείχνει οξύμωρο) *την τέλεια μεμβράνη σε ό,τι αφορά την ικανότητα διακοπής της κίνησης της πολυαιθυλικής γλυκόλης*, αφού αυτή δεν εξατμίζεται. Οι Peck & Rabbage (1969) αντίθετα μετρούσαν την δημιουργούμενη μύζηση στο ωσμωτικό τενσιόμετρο (βλ. Κεφ. 3) από την διαφορά στην πίεση στη μία και στην άλλη άκρη της ημιδιαπερατής μεμβράνης (μέσω της υψομετρικής διαφοράς στις στάθμες καθαρού νερού και διαλύματος) χωρίς την παρουσία συστήματος κυκλοφορίας ή έστω ανάδευσης του διαλύματος. Εναλλακτικά αυτών των μεθόδων οι Dineen & Burland (1995) μέτρησαν την μύζηση που καταγραφόταν σε τενσιόμετρο πορολίθου υψηλής πίεσης διεύδυσης αέρα τοποθετημένου αμέσως πίσω από ημιδιαπερατή μεμβράνη αλλά και σε δοκίμια καολίνη στα



**Σχήμα 4.24.** Καμπύλες βαθμονόμησης α) των Williams & Shaykewich (1969), Peck & Rabbidge (1969) και Dineen & Burland (1995) από τους Slatter et al. (2000), β) των Delage et al. (1998) από τον Delage (2004), και γ) των Williams & Shaykewich (1969) σε σύγκριση με τις καμπύλες βαθμονόμησης των Slatter et al. (2000) για διαλύματα PEG 20000 και 35000 από τους Slatter et al. (2000).

οποία η μύζηση ελεγχόταν με την μέθοδο των ωσμωτικών διαλυμάτων. Στο Σχ. 4.24α παρουσιάζεται η σύγκριση στις καμπύλες βαθμονόμησης με τις τέσσερις μεθόδους για διάλυμα πολυαιθυλικής αλκοόλης με μοριακό βάρος 20000 (PEG 20000). Οι Williams & Shaykewich (1969) προβλέπουν γενικά την μέγιστη μύζηση για την ίδια τιμή της συγκέντρωσης PEG, ενώ αντίθετα οι Peck & Rabbage (1969) την ελάχιστη. Καμμία όμως από τις δύο δεν είναι η σωστή αφού η μεν βαθμονόμηση των Williams & Shaykewich (1969) αφορά σε μία ιδανική κατάσταση από πλευράς αποτροπής διείσδυσης PEG, *ανέφικτη στις πραγματικές μεμβράνες*, η δε βαθμονόμηση των Peck & Rabbage (1969) αφορά σε μία πολύ δυσμενή κατάσταση και καταγράφει την επιρροή της τοπικά μικρότερης συγκέντρωσης PEG πίσω από την μεμβράνη λόγω της ύπαρξης τοπικά περισσότερου νερού που έχει διεισδύσει και της έλλειψης ενός συστήματος κυκλοφορίας ή ανάδευσης του διαλύματος, ώστε να μην εμφανίζεται αυτή η τοπική αλλοίωση της συγκέντρωσης του διαλύματος αμέσως πίσω από τη μεμβράνη. Η βαθμονόμηση των Dineen & Burland (1995) από την άλλη πλευρά βρίσκεται μεταξύ των δύο ακραίων καμπυλών βαθμονόμησης αντικατοπτρίζοντας τους περιορισμούς των πραγματικών μεμβρανών σε ό,τι αφορά την ικανότητα αποτροπής της κίνησης PEG αλλά και τα πλεονεκτήματα της παρουσίας ενός συστήματος κυκλοφορίας του διαλύματος (ενώ οι καμπύλες βαθμονόμησης πρακτικά ταυτίζονται, είτε μετρήθηκε απευθείας στο τενσιόμετρο η δημιουργούμενη από τα διαλύματα μύζηση, είτε μετρήθηκε από τα τενσιόμετρα η μύζηση που δημιουργήθηκε από τα διαλύματα στα δοκίμια).

Όπως φαίνεται από το Σχ. 4.24α η μέγιστη μύζηση που μπορεί να δημιουργηθεί με την μέθοδο αυτή είναι περί τα 1500 kPa, παρόλο που οι Delage et al. (1998) επέκτειναν την βαθμονόμηση για τιμές της μύζησης μέχρι και 10 MPa. Για να επιβληθεί τόσο μεγάλη μύζηση με την μέθοδο αυτή η συγκέντρωση πολυαιθυλικής γλυκόλης πρέπει να υπερβεί τα 1000 g PEG / l νερού (φτάνοντας μάλιστα τα 1400 g PEG / l νερού), γεγονός το οποίο εγείρει κάποιες ενστάσεις για τη φύση του μηχανισμού της μύζησης αφού η διαλυμένη ουσία έχει γίνει περισσότερη από τον διαλύτη. Εκτός αυτού σε τόσο μεγάλη συγκέντρωση PEG το ιζώδες του διαλύματος αυξάνεται τόσο πολύ που είναι πρακτικά αδύνατη η κυκλοφορία ή έστω η ανάδυσή του. Αυτό έχει ως συνέπεια διαλύματα με τόσο μεγάλες συγκεντρώσεις PEG να χρησιμοποιούνται για εμφύσηση των δοκιμίων μόνο και όχι έλεγχο της μύζησης σε συσκευές δοκιμών προσδιορισμού και άλλων μηχανικών χαρακτηριστικών και επίσης να επιβάλλεται η μέτρηση της μύζησης στα δοκίμια αφού είναι πολύ πιθανό λόγω της δυσκολίας ανάδευσης να μην επιβάλλεται στα δοκίμια η ονομαστική ωσμωτική πίεση των διαλυμάτων για τους λόγους που εξηγήθηκαν προηγουμένως.



Επακόλουθο πρόβλημα είναι η ανεύρεση ενός οργάνου μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού με μικρό χρόνο απόκρισης και ικανότητα μέτρησης της μύζησης μέχρι τα 10 MPa.

Ένα ακόμη ενδιαφέρον σημείο προέρχεται από τους Slatter, et al. (2000), οι οποίοι προσδιόρισαν καμπύλες βαθμονόμησης για PEG 20000 και PEG 35000 βρίσκοντας ότι αυτές πρακτικά ταυτίζονται (Σχ. 4.24γ), δηλ. ότι ανεξαρτήτως μοριακού βάρους της πολυαιθυλικής γλυκόλης και υπό την προϋπόθεση ότι η χρησιμοποιούμενη ημιδιαπερατή μεμβράνη αποτρέπει την κίνηση και της πολυαιθυλικής γλυκόλης του μικρότερου μοριακού βάρους, *η ωσμωτική πίεση του διαλύματος είναι η ίδια για την ίδια συγκέντρωση σε πολυαιθυλική γλυκόλη.*

Ένα άλλο σημείο το οποίο δεν αναφέρθηκε μέχρι στιγμής αφορά στο ρυθμό επιβολής διατμητικής ή διεκτροπικής τάσης σε δοκιμές υπό ελεγχόμενη μύζηση. Οι Cui & Delage (1996) αναφέρουν ρυθμό επιβολής κατακόρυφης παραμόρφωσης 2μm/min στην τριαξονική δοκιμή για συμπυκνωμένα κυλινδρικά δοκίμια ύψους διαμέτρου 38mm και ύψους 76mm, ως αποτέλεσμα συμβιβασμού μεταξύ καλού ελέγχου της μύζησης και εύλογης διάρκειας της δοκιμής κατά το στάδιο της διάτμησης, με την παρατήρηση εκ μέρους τους ότι δεν είναι γνωστή η εξέλιξη της μεταβολής της μύζησης κατά την επιβολή της διεκτροπικής τάσης.

Βασικό πλεονέκτημα της ωσμωτικής μεθόδου ελέγχου της μύζησης εδαφικού σκελετού είναι ότι αντίθετα από την μέθοδο μετατόπισης άξονα, στην οποία διατηρείται μηδενική η πίεση του νερού των πόρων και αυξάνεται η πίεση του αέρα των πόρων, εδώ διατηρείται μηδενική η πίεση του αέρα των πόρων και μειώνεται η πίεση του νερού των πόρων *δημιουργώντας πραγματικά αρνητική πίεση στην υγρή φάση των πόρων.* Κατά συνέπεια οι δημιουργούμενες συνθήκες εντός των δοκιμίων προσεγγίζουν πολύ περισσότερο την εντατική κατάσταση στις ρευστές φάσεις των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών που απαντώνται στη φύση, ειδικά στην ιδιαίτερη περιοχή της μετάβασης από τον πλήρη κορεσμό στη συνύπαρξη συνεχούς υγρής και αέριας φάσης.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η ανάγκη για μέτρηση της δημιουργούμενης μύζησης, η δυσκολία ακριβούς μέτρησης των κατακόρυφων μετακινήσεων σε συσκευές ωσμωτικού ελέγχου της μύζησης και η μεταβολή της ικανότητας των ημιδιαπερατών μεμβρανών να συγκρατούν τα μόρια της διαλυμένης ουσίας όταν η συγκέντρωσή της υπερβεί μία τιμή.

Σε ό,τι αφορά το πρώτο σημείο, υπό την προϋπόθεση ότι έχει υιοθετηθεί ορθή καμπύλη βαθμονόμησης (να έχει προκύψει από διάταξη όπου παρεμβάλλεται ημιδιαπερατή μεμβράνη

όμοια με αυτήν που θα χρησιμοποιηθεί στη δοκιμή και υπάρχει και σύστημα κυκλοφορίας του διαλύματος ή έστω ανάδευσής του), μπορεί να παρακαμφθεί η ανάγκη υιοθέτησης κάποιου οργάνου μέτρησης της μύζησης στο δοκίμιο (βλ. καμπύλες βαθμονόμησης των Dineen & Burland, 1995, Σχ. 4.24α). Σε διαφορετική περίπτωση πρέπει να υιοθετείται κάποια διάταξη μέτρησης της δημιουργούμενης μύζησης στο δοκίμιο, με μοναδικό όργανο που να προσφέρεται σήμερα, λόγω μικρότερου χρόνου απόκρισης και του ίδιου εύρους τιμών μέτρησης με το εύρος στο οποίο ελέγχεται συνήθως η μύζηση από διαλύματα PEG, το тенσιόμετρο πορολίθου υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα (1500 kPa).

Το σύστημα κυκλοφορίας του διαλύματος επιβολής της μύζησης στη βάση δοκιμίων που υποβάλλονται και σε μεταβολή της ολικής τάσης εκτός από μεταβολές της μύζησης, περιλαμβάνει συνήθως κάποιου είδους πλέγμα σε επαφή με την ημιδιαπερατή μεμβράνη από την αντίθετη πλευρά της από αυτή του δοκιμίου. Το εδαφικό υλικό του δοκιμίου τότε διεισδύει μαζί με την ημιδιαπερατή μεμβράνη στους βρόχους του πλέγματος αλλοιώνοντας ουσιαστικά τις μετρήσεις των κατακόρυφων μετακινήσεων, *χωρίς δυνατότητα διόρθωσης των μετρήσεων μέσω της εκτέλεσης δοκιμής συμμόρφωσης* όπως αυτές που εκτελούνται στα συνήθη συμπιεσόμετρα με χρήση πρακτικά άκαμπτων για το εφαρμοζόμενο επίπεδο τάσεων μεταλλικών δοκιμίων, αφού αυτά δεν διεισδύουν στους βρόχους του πλέγματος αλλά απλά το πιέζουν. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού, οι Tarantino & Mongioni (2000β) τοποθέτησαν μεταξύ ημιδιαπερατής μεμβράνης και πλέγματος κυκλοφορίας διαλύματος έναν χάλκινο πορώδη δίσκο (όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται σε συμβατικές κυψέλες της συσκευής τριαξονικής φόρτισης) με αποτέλεσμα εδαφικό υλικό και μεμβράνη να μην διεισδύουν πλέον στους βρόχους του πλέγματος. Δοκιμές από τους Tarantino & Mongioni (2000β) με και χωρίς τον πορώδη δίσκο κάτω από την ημιδιαπερατή μεμβράνη έδειξαν ότι η παρουσία του δεν δυσχεραίνει την μετακίνηση ύδατος από το διάλυμα στο δοκίμιο αλλά αντίθετα βελτιώνει τις μετρήσεις των κατακόρυφων μετακινήσεων. Για να μην καταγράφεται και η παραμόρφωση του πλέγματος εξασφάλισης κυκλοφορίας του διαλύματος επιβολής της μύζησης κατά την μέτρηση των κατακόρυφων μετακινήσεων, ο δίσκος δεν στηρίζεται επί του πλέγματος αλλά επί ειδικής υποδοχής στην κυψέλη. Αυτό δεν είναι απαραίτητο *αφού οι μετρήσεις μπορούν να διορθωθούν ως προς αυτό το σημείο με εκτέλεση δοκιμής συμμόρφωσης*. Η μέτρηση της ποσότητας του νερού που διαφεύγει από το δοκίμιο γίνεται και στη συγκεκριμένη διάταξη ζυγίζοντας το δοχείο του διαλύματος.

Οι Tarantino & Mongioni (2000β) παραθέτουν τις παρατηρήσεις τους σε ό,τι αφορά την μεταβολή της ικανότητας των ημιδιαπερατών μεμβρανών να συγκρατούν τα μόρια της διαλυμένης ουσίας όταν η συγκέντρωσή της υπερβεί μία τιμή. Αρχικά παρατήρησαν ότι αυξανόμενη της συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας (αυξανόμενη δηλαδή της μύζησης που επιβάλλεται στο δοκίμιο), σε δεδομένη τιμή, χαρακτηριστική της κάθε μεμβράνης, προέκυπτε μία απότομη μείωση της μετρούμενης μύζησης στο δοκίμιο. Τον λόγο για αυτήν την μείωση τον απέδωσαν στην διαφορά συγκέντρωσης στις δύο πλευρές της μεμβράνης, η οποία προκαλεί την είσοδο μορίων διαλυμένης ουσίας στο δοκίμιο με αποτέλεσμα να μειώνεται η τελική τιμή της μύζησης που μπορεί να επιβληθεί από μία τιμή της συγκέντρωσης και πάνω. Η κατάσταση βελτιώνεται με χρήση δύο επάλληλων ημιδιαπερατών μεμβρανών χωρίς όμως να μπορεί να αποφευχθεί εντελώς. Σε ό,τι αφορά τους χρόνους επίτευξης της επιβαλλόμενης από το διάλυμα μύζησης, με βάση τα αποτελέσματα των Tarantino & Mongioni (2000β) αυτοί κυμαίνονται από 3 έως 10 ημέρες σε δοκιμές ελέγχου της μύζησης στη συσκευή συμπίεσομέτρου (δηλ. για δοκίμια μικρού ύψους).

#### 4.3.4 Μέθοδος ελέγχου της μύζησης μέσω φυγοκέντρισης

Στη μέθοδο φυγοκέντρισης δοκίμια εδαφικού υλικού τοποθετούνται στο περιστρεφόμενο δοχείο φυγοκεντρητή και η μύζηση επιβάλλεται κατά την περιστροφή του δοχείου λόγω αύξησης της ασκούμενης φυγόκεντρης δύναμης στο δοκίμιο. Η μύζηση που ελέγχεται στην μέθοδο αυτή είναι η μύζηση εδαφικού σκελετού. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί από διάφορους ερευνητές για τη μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων υλικών και μάλιστα από πολύ νωρίς (Briggs & McLane, 1907, Gardner, 1937, Russell & Richards, 1938, Hassler & Brunner, 1945, Cronney et al., 1952, Skibinsky, 1996). Πιο πρόσφατα οι Khanzode, et al. (2002) χρησιμοποίησαν μικρού μεγέθους, εμπορικά διαθέσιμο φυγοκεντρητή ιατρικών εφαρμογών<sup>9</sup> για να προσδιορίσουν την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού λεπτόκοκκων εδαφών στο εύρος τιμών 0-750 kPa. Πρέπει βέβαια να τονιστεί ότι στις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που προσδιόρισαν οι Khanzode, et al. (2002) με τη μέθοδο φυγοκέντρισης και την μέθοδο μετατόπισης άξονα, το ποσοστό υγρασίας που υπολογιζόταν για κάθε τιμή της μύζησης με την πρώτη μέθοδο ήταν συνήθως μεγαλύτερο.

<sup>9</sup> Φυγοκεντρητής J6-HC της Beckman.

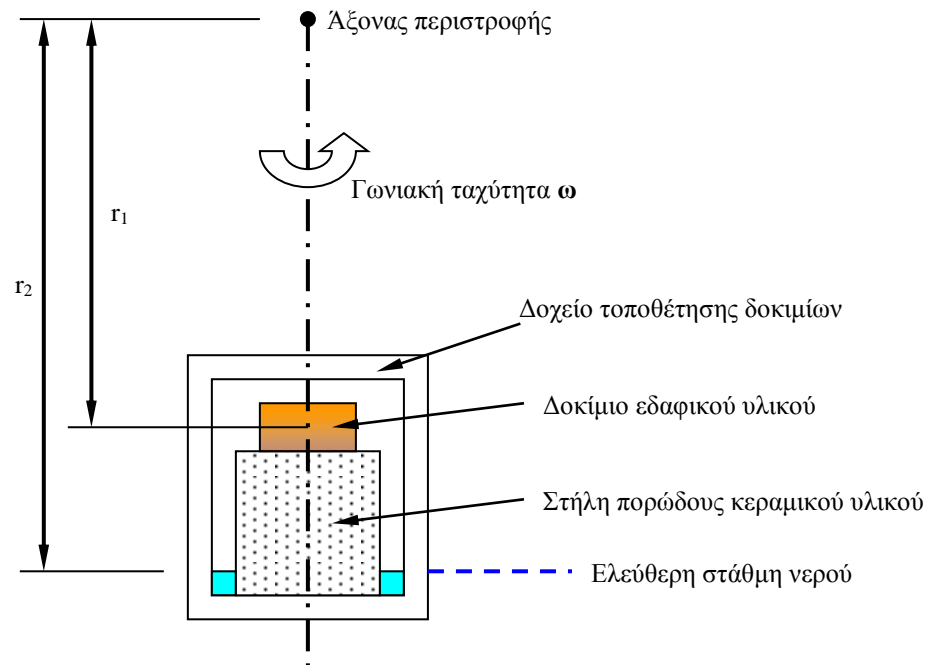
Κατά την εφαρμογή της μεθόδου δημιουργείται ένα πεδίο υψηλής «βαρύτητας» (high gravity field) μέσα στον φυγοκεντρική σε αρχικά πλήρως κορεσμένα δοκίμια εδαφικού υλικού. Τα δοκίμια βρίσκονται πάνω σε στήλες πορώδους κεραμικού υλικού η άλλη άκρη των οποίων βρίσκεται μέσα σε δοχείο νερού υπό ατμοσφαιρική πίεση. Η δημιουργούμενη κατανομή πίεσης πόρων που αντιστοιχεί σε συνθήκες μόνιμης ροής σε αυτήν την διάταξη είναι όμοια με εκείνη σε φυσικό έδαφος που έχουν αποκατασταθεί συνθήκες στράγγισης προς γενικό και ενιαίο υπόγειο ορίζοντα για τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας ωστόσο κατά πολύ αυξημένη. Στο Σχ. 4.25 παρουσιάζεται η αρχή της εφαρμογής της μεθόδου με τα βασικά μεγέθη που υπεισέρχονται για τον προσδιορισμό της δημιουργούμενης μύζησης. Ο Gardner (1937) πρότεινε την Εξ. 4.1 για τον υπολογισμό της δημιουργούμενης μύζησης  $s$ .

$$s = \frac{\rho\omega^2}{2}(r_2^2 - r_1^2) \quad (4.1)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υγρού των πόρων,  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δείγματος στον φυγοκεντρική, και  $r_1$  και  $r_2$  οι ακτινικές αποστάσεις προς το μέσον του δοκιμίου και την ελεύθερη επιφάνεια του νερού.

Όπως προκύπτει από την Εξ. 4.1 διαφορετικές τιμές της μύζησης μπορούν να επιβληθούν για την ίδια γωνιακή ταχύτητα, απλώς με μεταβολή της ακτινικής απόστασης δοκιμίου και στάθμης ελεύθερου νερού με χρήση στηλών κεραμικού υλικού με διαφορετικό ύψος. Κατ' αυτόν τον τρόπο, εφόσον στον φυγοκεντρική υπάρχουν θέσεις για περισσότερα δοκίμια, μπορούν με μία μόνο δοκιμή (χρήση του φυγοκεντρική με την ίδια γωνιακή ταχύτητα) να δημιουργηθούν (σε ξεχωριστά δοκίμια που έχουν τοποθετηθεί στον φυγοκεντρική) διαφορετικές τιμές της μύζησης εάν το καθένα έχει τοποθετηθεί πάνω σε στήλες κεραμικού υλικού διαφορετικού ύψους. Στη συνέχεια μπορούν να δημιουργηθούν μεγαλύτερες τιμές της μύζησης με αύξηση της γωνιακής ταχύτητας. Με χρήση μικρού μεγέθους φυγοκεντρικών ιατρικών εφαρμογών στους οποίους υιοθετούνται διαφορετικού ύψους στήλες κεραμικού υλικού μπορούν να δημιουργηθούν τιμές της μύζησης από 0 έως 2800 kPa. Ο φυγοκεντρικής που χρησιμοποίησαν οι Khanzode, et al. (2002) για 3 διαφορετικά λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά διαθέτει 6 θέσεις τοποθέτησης δοκιμίων επιτρέποντας την ταυτόχρονη υλοποίηση 6 διαφορετικών τιμών της μύζησης σε μία μόνο δοκιμή, με αποτέλεσμα ο συνολικός χρόνος προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ακόμα και του πιο αδιαπέρατου από αυτά να μειωθεί στις 2 ημέρες μόλις αντί για τις 16 εβδομάδες που θα απαιτούντο αν είχε χρησιμοποιηθεί συνήθης θάλαμος μύζησης (με

την παρατήρηση πάντοτε ότι υπερτιμήθηκε το ποσοστό υγρασίας στη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε σχέση με την μέθοδο μετατόπισης άξονα).



**Σχήμα 4.25.** Ενδεικτική απεικόνιση διάταξης εφαρμογής της μεθόδου φυγοκέντρισης για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και επεξήγηση μεγεθών που υπεισέρχονται στην Εξ. 4.1.

Η μέθοδος φυγοκέντρισης για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού περιγράφεται σήμερα και σε πρότυπο της A.S.T.M. (D 6836 – 02, Μέθοδος E). Το πρότυπο προτείνει τη χρήση της για χονδρόκοκκα εδάφη στο εύρος τιμών της μύζησης από 0 έως 120 kPa. Προβλέπει επίσης τη συλλογή του νερού που διαφεύγει από το δοκίμιο λόγω της εφαρμογής της μύζησης σε βαθμονομημένο δοχείο κάτω από το δοκίμιο. Κατ' αυτόν τον τρόπο προβλέπει τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στο ίδιο δοκίμιο με την υποβολή αυτού διαδοχικά σε διαφορετικές γωνιακές ταχύτητες, δηλ. διαφορετικές τιμές της μύζησης. Η ελάχιστη εφαρμογή κάθε γωνιακής ταχύτητας για την δημιουργία της επιθυμητής τιμής της μύζησης ορίζεται στις 2 ώρες. Το πρότυπο απαιτεί ο φυγοκεντρητής να είναι ελεγχόμενης θερμοκρασίας με ικανότητα διατήρησης της θερμοκρασίας στους  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  σε ολόκληρο το εύρος γωνιακών ταχυτήτων 0 – 10000 στροφές ανά λεπτό.

Οι Khanzode, et al. (2002) χρησιμοποίησαν φυγοκεντρική για την μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού λεπτοκόκκων εδαφικών υλικών (μίας ίλως, ενός τιλλίτη και μίας αργίλου υψηλής πλαστικότητας). Λόγω της αυξημένης επιτάχυνσης της βαρύτητας στη δοκιμή ωστόσο, υπάρχει μεγάλη ανισοκατανομή της τιμής του ποσοστού υγρασίας μέσα στο δοκίμιο, ακόμα και εάν αυτό έχει πολύ μικρό ύψος. Κατά συνέπεια, η μέθοδος είναι αρκετά αξιόπιστη σε ό,τι αφορά τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης, λαμβάνοντας το ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί σε κάθε μύζηση ως τον μέσο όρο της τιμής του σε όλο το δοκίμιο (ο οποίος προκύπτει πολύ απλά με την τοποθέτηση ολόκληρου του δοκιμίου στον εργαστηριακό φούρνο για ξήρανση). Από την άλλη πλευρά για το εύρος τιμών της μύζησης και του ποσοστού υγρασίας κοντά στην παραμένουσα τιμή του, η χρήση του μέσου όρου μπορεί να μην είναι αντιπροσωπευτική της μέσης εφαρμοζόμενης τιμής της μύζησης στο δοκίμιο, ενώ αν το υλικό είναι τέτοιο που υπόκειται σε σημαντικές μεταβολές του όγκου του κατά την ξήρανση ή ακόμα και σε εμφάνιση ρωγμών συρρίκνωσης, τότε είναι πρακτικά αδύνατη η εκτίμηση της μέσης μεταβολής του όγκου που αντιστοιχεί στην μέση εφαρμοζόμενη τιμή της μύζησης στο δοκίμιο. Πράγματι, το ποσοστό υγρασίας θα είναι μικρότερο στην κάτω πλευρά του δοκιμίου από όσο είναι στην επάνω. Η μεταβολή του ολικού όγκου λοιπόν θα είναι μικρότερη στην κάτω πλευρά από όση θα είναι στην επάνω. Αυτό δημιουργεί κατ' αρχήν προβλήματα στην εκτίμηση της μέσης μεταβολής του όγκου (ακόμα και στην περίπτωση που το υλικό δεν εμφανίζει ρωγμές συρρίκνωσης) λόγω της μεταβολής του γεωμετρικού σχήματος του δοκιμίου από κυλινδρικό που ήταν αρχικά σε σχήμα κόλουρου κώνου στο τέλος της εφαρμογής τη μύζησης. Από την άλλη πλευρά, εάν χρησιμοποιείται η μέθοδος της παραφίνωσης του δοκιμίου, η εμφάνιση σε νερό θα έπρεπε να γίνει αμέσως μετά την παραφίνωση (με ό,τι προβλήματα μπορεί να σημαίνει αυτό λόγω της σχετικά μαλακής ακόμα παραφίνης), αλλιώς εντός του δοκιμίου θα δημιουργηθούν συνθήκες αποκατάστασης ενός ενιαίου ποσοστού υγρασίας. Τότε υγρασία θα αρχίσει να κινείται από την κάτω πλευρά προς την πάνω, ξηραίνοντας την κάτω και υγραίνοντας την πάνω, με αποτέλεσμα να προκαλείται δευτερογενής συρρίκνωση της κάτω πλευράς και διόγκωση της πάνω προκαλώντας την διάρρηξη της στρώσης της παραφίνης στην πάνω πλευρά του δοκιμίου και την εμφάνιση κενού με αέρα μεταξύ παραφίνης και δοκιμίου στην κάτω πλευρά. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, η συγκεκριμένη μέθοδος προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού πρέπει να περιορίζεται σε χονδρόκοκκα εδάφη, όπως προβλέπει το πρότυπο D 6836 – 02, Μέθοδος E, της A.S.T.M. (οπότε αφού οι μεταβολές όγκου λόγω ξήρανσης σε αυτά είναι πολύ μικρές, αρκεί απλώς ο προσδιορισμός της μέσης τιμής του ποσοστού υγρασίας σε κάθε δοκίμιο και η υπόθεση σταθερού όγκου του δοκιμίου). Εάν η

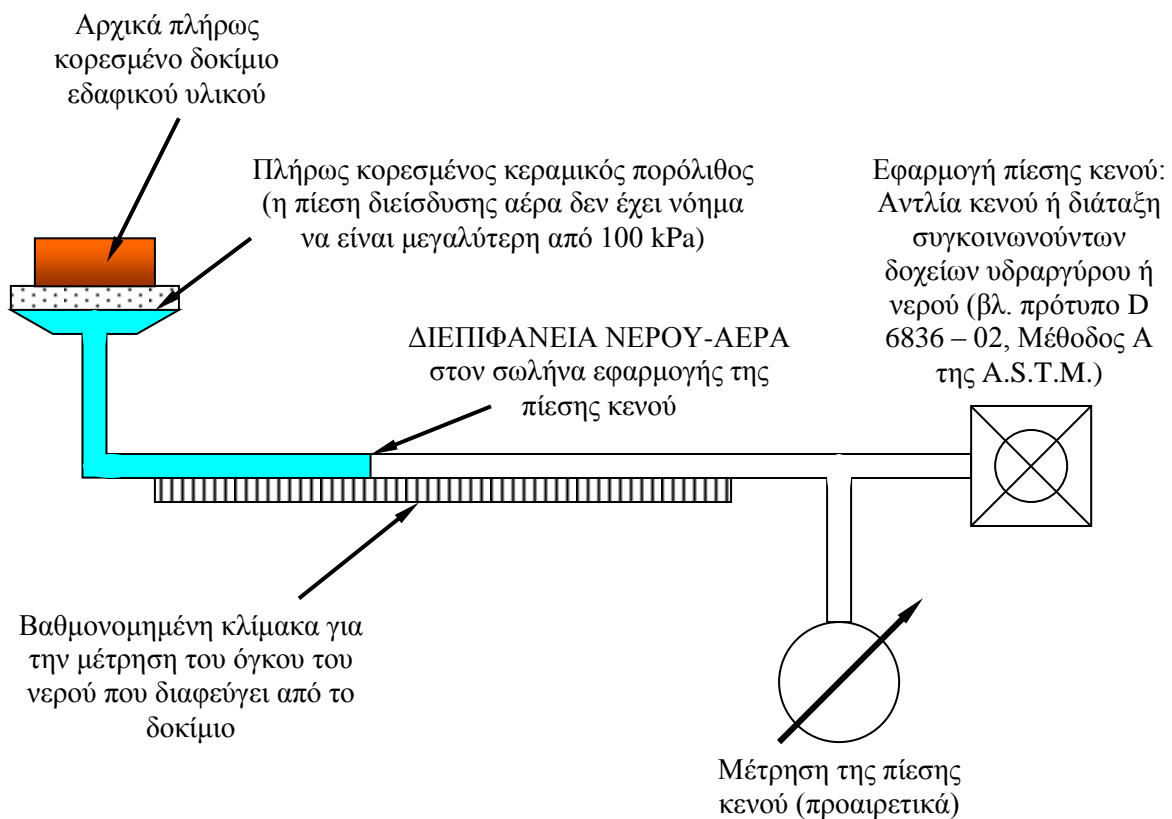
μέθοδος πρόκειται να εφαρμοστεί σε λεπτόκοκκα εδάφη, η χρήση της πρέπει να περιορίζεται μόνο στον προσδιορισμό του μέσου ποσοστού υγρασίας στο δοκίμιο (με την παρατήρηση της υπερεκτίμησής του -αποτελέσματα των Khanzode, et al., 2002- και τα προβλήματα με την μέση τιμή του ποσοστού υγρασίας κοντά στην παραμένουσα τιμή του), σε πολύ λεπτά δοκίμια (το πολύ μέχρι 5mm πάχος) με τα πρακτικά προβλήματα που δημιουργεί αυτό και στην παρασκευή τους, προκειμένου για αναζυμωμένα και επανασυμπιεσμένα σε κάποια τάση δοκίμια, και στην απότμησή τους από μεγαλύτερα δείγματα, προκειμένου για δοκίμια φυσικού υλικού.

#### **4.3.5 Μέθοδος ταπείνωσης της πίεσης του νερού των πόρων (hanging column method)**

Μία άλλη μέθοδος προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που προβλέπεται από το πρότυπο D 6836 – 02 (Μέθοδος A) της A.S.T.M. είναι η μέθοδος ταπείνωσης της πίεσης του νερού των πόρων (hanging column method). Η μέθοδος επιτρέπει τον έλεγχο της μύζησης εδαφικού σκελετού στο εύρος τιμών 0 – 80 kPa. Το δοκίμιο εδαφικού υλικού επικάθεται πλήρως κορεσμένου κεραμικού πορολίθου στην κάτω πλευρά του οποίου εφαρμόζονται διαδοχικά διαφορετικές τιμές πίεσης κενού μέχρι την μέγιστη τιμή που μπορεί να δημιουργηθεί στο νερό στους σωλήνες που συνδέονται με τον πορόλιθο στην κάτω του πλευρά χωρίς να συμβεί σε αυτό φαινόμενη σπηλαίωση<sup>10</sup>. Η πίεση κενού εφαρμόζεται στην κάτω πλευρά του πορολίθου μέσω σωλήνα μερικώς γεμάτου με νερό με το πλήρες άκρο του να βρίσκεται σε επαφή με τον πορόλιθο και το άδειο άκρο του να είναι συνδεδεμένο με την παροχή πίεσης κενού. Η διεπιφάνεια νερού-αέρα στον σωλήνα παρακολουθείται με την τοποθέτηση του σωλήνα επί βαθμονομημένης κλίμακας, ώστε να μετρείται ο όγκος του νερού που διαφεύγει από το δοκίμιο, ενώ μεταξύ διεπιφάνειας νερού-αέρα στον σωλήνα και παροχής πίεσης κενού μπορεί να τοποθετηθεί κάποιου είδους διάταξη μέτρησης της πίεσης κενού αν δεν επαρκεί η γνώση της δημιουργηθείσας τιμής. Η παροχή της πίεσης κενού μπορεί να γίνει με αντλία κενού ή κάποια διάταξη συγκοινωνούντων δοχείων με νερό ή υδράργυρο το ένα εκ των οποίων έχει πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού αέρα που επικοινωνεί με τον σωλήνα εφαρμογής πίεσης κενού στο δοκίμιο (βλ. πρότυπο D 6836 – 02, Μέθοδος A, της A.S.T.M.). Ενδεικτική απεικόνιση της διάταξης ταπείνωσης της πίεσης του νερού των πόρων παρουσιάζεται στο Σχ. 4.26.

<sup>10</sup> Έτσι προκύπτει η μέγιστη τιμή της μύζησης που είναι δυνατόν να εφαρμοστεί και είναι περί τα 80-85 kPa.

Η μέθοδος είναι ιδιαίτερα απλή στην εφαρμογή της με μόνα μειονεκτήματα το μικρό εύρος τιμών της μύζησης που μπορούν να δημιουργηθούν με αυτήν και την ανάγκη προφύλαξης του δοκιμίου και του πορόλιθου από την εξάτμιση του νερού των πόρων τους υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες. Για την αντιμετώπιση της εξάτμισης του νερού των πόρων, το δοκίμιο αλλά και ο πορόλιθος (ώστε να μην αποκορεστεί και αυτός) πρέπει να καλύπτονται επιμελώς με μεμβράνη, αλλιώς ούτε η μύζηση στο δοκίμιο θα είναι αυτή που εφαρμόζεται με την πίεση κενού, ούτε και οι μετρήσεις του όγκου του νερού που διαφεύγει από το δοκίμιο θα ανταποκρίνονται στην πραγματική ποσότητα νερού που διαφεύγει από το δοκίμιο. Και στην μέθοδο αυτή ελέγχεται η μύζηση εδαφικού σκελετού. Δεδομένου του εύρους ελέγχου της μύζησης με αυτήν την μέθοδο, οι χρησιμοποιούμενοι κεραμικοί πορόλιθοι δεν έχει νόημα να έχουν πίεση διείδυσης αέρα μεγαλύτερη των 100 kPa.



**Σχήμα 4.26.** Ενδεικτική απεικόνιση διάταξης εφαρμογής της μεθόδου ταπείνωσης της πίεσης του νερού των πόρων του δοκιμίου για τον έλεγχο της μύζησης εδαφικού σκελετού.



#### 4.3.6 Μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω ελέγχου της σχετικής υγρασίας

Σε όλες τις μεθόδους προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που προαναφέρθηκαν στις §4.3.2 έως 4.3.5 ελέγχεται η μύζηση εδαφικού σκελετού. Για να ελεγχθεί η *ολική μύζηση* πρέπει να ελεγχθεί η σχετική υγρασία στον αέρα πάνω από τα δοκίμια του εδαφικού υλικού. Στο Κεφ. 2 επεξηγήθηκε η θεωρητική συσχέτιση μεταξύ σχετικής υγρασίας και ολικής μύζησης (εξίσωση Kelvin) και στο Κεφ. 3 επεξηγήθηκε η εφαρμογή της συσχέτισης αυτής για την μέτρηση της ολικής μύζησης με ψυχρόμετρα και χαρτιά φίλτρου σε απόσταση από το δοκίμιο του εδαφικού υλικού. Στην παράγραφο αυτή επεξηγείται η εφαρμογή της συσχέτισης αυτής για τον έλεγχο της ολικής μύζησης. Στα Κεφ. 14 και 15 γίνεται εκτενής αναφορά στο πως εφαρμόστηκε η συγκεκριμένη μέθοδος στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Ο έλεγχος της σχετικής υγρασίας υλοποιείται με δύο τρόπους. Ο πρώτος και πιο συνηθισμένος αφορά στον έλεγχο της σχετικής υγρασίας μέσω της χρήσης υδατικών διαλυμάτων αλάτων ή οξέων και ο δεύτερος και πιο σπάνιος στον ενεργό έλεγχο των επιμέρους πιέσεων που καθορίζουν την τιμή της σχετικής υγρασίας. Η πρώτη μέθοδος ελέγχου της σχετικής υγρασίας περιγράφεται στην αγγλική βιβλιογραφία από τον όρο *isopiestic humidity control method* και η δεύτερη από τον όρο *two-pressure humidity control method* (Lu & Likos, 2004).

Κατά την χρήση ψυχρομέτρων για την μέτρηση της ολικής μύζησης μετρείται η σχετική υγρασία στον αέρα πάνω από μικρού μεγέθους δοκίμια εδαφικών υλικών εγκλωβισμένων σε μικρά δοχεία. Η μέθοδος βασίζεται στην επίτευξη ισορροπίας μεταξύ των υδρατμών που εξατμίζονται από το νερό των πόρων και του ατμοσφαιρικού αέρα που περιβάλλει το δοκίμιο. Γι' αυτόν τον λόγο πρέπει να είναι μικρό και το δοκίμιο του εδαφικού υλικού, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα του περιεχόμενου νερού, αλλά και η ποσότητα του περιβάλλοντος το δοκίμιο αέρα. Όταν σταθεροποιηθεί η τιμή της σχετικής υγρασίας στον περιβάλλοντα το δοκίμιο αέρα, αυτή μετρείται και προκύπτει από αυτήν η τιμή της ολικής μύζησης μέσω της εξίσωσης Kelvin.

Αντίστροφα, αυτή είναι η πρώτη μέθοδος με την οποία μπορεί να καθοριστεί η σχετική υγρασία στον περιβάλλοντα το δείγμα αέρα και από αυτήν να καθοριστεί η ποσότητα του νερού στο δοκίμιο που περιβάλλει ο αέρας αυτός. Ο έλεγχος της σχετικής υγρασίας με αυτόν τον τρόπο γίνεται εγκλωβίζοντας μικρού μεγέθους δοκίμιο εδαφικού υλικού σε δοχείο με μικρή ποσότητα αέρα να περιβάλλει το δοκίμιο και σημαντική ποσότητα κάποιου υδατικού διαλύματος αλάτων ή

οξέων γνωστής σχετικής υγρασίας. Αφήνοντας το διάλυμα να ισορροπήσει με τον αέρα που περιβάλλει το δοκίμιο και την υγρασία του δοκιμίου, η ολική μύζηση του δοκιμίου του εδαφικού υλικού γίνεται τόση, όση αυτή που αντιστοιχεί στην σχετική υγρασία που καθόρισε το διάλυμα.

Η σχετική υγρασία μπορεί να ρυθμιστεί και με ακόρεστα και με κορεσμένα σε διαλυμένη ουσία υδατικά διαλύματα. Προτιμότερα είναι όμως γενικά τα κορεσμένα υδατικά διαλύματα γιατί μπορούν να προσροφήσουν ή να απωλέσουν σημαντικές ποσότητες διαλύτη (νερού) χωρίς να αλλοιωθούν οι ιδιότητές τους. Αντίθετα, στα ακόρεστα υδατικά διαλύματα μικρές μόνο μεταβολές της συγκέντρωσής τους λόγω προσρόφησης ή απώλειας διαλύτη (η οποία είναι δεδομένη λόγω της ανταλλαγής νερού που απαιτείται με το δοκίμιο προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπία) μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στις ιδιότητές τους. Στους Πίν. 4.1α και 4.1β παρουσιάζονται βασικές ιδιότητες υδατικών διαλυμάτων κορεσμένων με διάφορες διαλυμένες ουσίες για διάφορες θερμοκρασίες, ενώ στους Πίν. 4.2α και 4.2β παρουσιάζονται βασικές ιδιότητες ακόρεστων διαλυμάτων χλωριούχου νατρίου και χλωριούχου καλίου αντίστοιχα για διάφορες συγκεντρώσεις και θερμοκρασίες. Όπως φαίνεται στους προαναφερθέντες πίνακες, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και η συγκέντρωση, τόσο μειώνεται η σχετική υγρασία και άρα αυξάνει η ολική μύζηση, ενώ διαλύματα με διαφορετικές διαλυμένες ουσίες έχουν διαφορετικούς ρυθμούς μείωσης της σχετικής υγρασίας με την αύξηση της θερμοκρασίας, με κάποια μάλιστα μεταξύ τους να έχουν μηδενικούς τέτοιους ρυθμούς. Γενικά προτιμώνται διαλύματα με μικρούς τέτοιους ρυθμούς, ώστε να μειώνεται η επιρροή μεταβολών που μπορεί να προκαλέσουν τυχαίες ή μη ελεγχόμενες μεταβολές της θερμοκρασίας.

Τονίστηκε ήδη η σημασία του περιορισμού του μεγέθους του δοκιμίου και της ποσότητας του περιβάλλοντος αυτό αέρα (και ως αποτέλεσμα του χώρου μέσα στον οποίο εγκλωβίζεται το δοκίμιο με το διάλυμα –ή αντίστοιχα το όργανο μέτρησης της ολικής μύζησης, όταν η αρχή της μεθόδου χρησιμοποιείται για αυτό τον σκοπό). Τα δοκίμια έχουν βάρος συνήθως μερικά γραμμάρια (2-6) και τοποθετούνται σε μικρού μεγέθους δοχεία που κλείνουν αεροστεγώς (π.χ. μικρά βαζάκια). Η μέθοδος προσφέρεται για τον έλεγχο της μύζησης ταυτόχρονα σε περισσότερα του ενός δοκίμια, με τίμημα συνήθως την αύξηση του όγκου του αέρα που περιβάλλει τα δοκίμια και κατά συνέπεια την αύξηση του χρόνου επίτευξης ισορροπίας, κάτι όμως το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί με την αύξηση της ποσότητας του υδατικού διαλύματος μέσα στο μεγαλύτερο αυτό δοχείο. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημά της είναι η ευκολία υλοποίησής της, τόσο σε διαδρομές ξήρανσης όσο και σε διαδρομές ύγρυνσης. Αν το ποσοστό υγρασίας του δοκιμίου του εδαφικού υλικού είναι μεγαλύτερο εκείνου που αντιστοιχεί στην

θερμοδυναμική ισορροπία με το διάλυμα που χρησιμοποιείται, νερό των πόρων θα εξατμιστεί για την επίτευξή της. Αν πάλι το ποσοστό υγρασίας του δοκιμίου είναι μικρότερο, τότε νερό του περιβάλλοντος το δοκίμιο αέρα θα υγροποιηθεί επί του δοκιμίου και θα προσροφηθεί από αυτό για την επίτευξη ισορροπίας. Ο χρόνος επίτευξης ισορροπίας εξαρτάται από το μέγεθος του δοκιμίου, τον όγκο του δοχείου υλοποίησης της μεθόδου και την διαφορά μεταξύ αρχικού ποσοστού υγρασίας και ποσοστού υγρασίας κατά την ισορροπία. Οι Lu & Likos (2004) αναφέρουν χρόνους επίτευξης για δοκίμια μοντμοριλλόνιτη ( $\text{Na}^+$ ) μεταξύ μερικών ωρών και αρκετών ημερών (όταν η ποσότητα του νερού που πρέπει να ανταλλαχθεί είναι αρκετά μεγάλη), οι οποίοι λόγω της φύσης του υλικού των δοκιμίων πρέπει να θεωρηθούν ως άνω όριο των αναμενόμενων τιμών χρόνου επίτευξης ισορροπίας.

**Πίνακας 4.1α.** Περίληψη ιδιοτήτων κορεσμένων διαλυμάτων αλάτων για τον έλεγχο της σχετικής υγρασίας (από τον Young, 1967).

Διαλυμένη ουσία	% RH στους 25 °C	Ολική μύζηση (kPa)	d(RH)/dT (% ανά °C από τους 25 °C)	Εύρος θερμοκρασίας ισχύος ρυθμού μεταβολής (°C)
NaOH · H <sub>2</sub> O	7.0	365183	0	15 - 25
LiCl · H <sub>2</sub> O	11.3	299419	-0.01	20 - 70
MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	32.7	153501	-0.06	10 - 50
NaI · 2H <sub>2</sub> O	39.2	128604	-0.32	5 - 35
KNO <sub>2</sub>	48.2	100221	-0.18	20 - 40
Mg(NO <sub>3</sub> ) · 6H <sub>2</sub> O	52.8	87704	-0.29	0 - 50
Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> · 2H <sub>2</sub> O	53.7	85383	-0.27	0 - 50
NaBr · 2H <sub>2</sub> O	58.2	74332	-0.28	-10 - 35
NaNO <sub>2</sub>	64.4	60431	-0.19	20 - 40
CuCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	68.4	52156	0	10 - 30
NaCl	75.1	39323	-0.02	5 - 60
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	80.2	30300	-0.07	25 - 50
KCl	84.2	23617	-0.16	5 - 40
K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	86.5	19916	-0.06	20 - 40
BaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	90.3	14012	-0.08	5 - 60
(NH <sub>4</sub> )H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	92.7	10409	-0.12	20 - 45
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97.0	4183	-0.05	15 - 60
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	97.2	3900	-0.05	25 - 40

**Πίνακας 4.1β.** Περίληψη ιδιοτήτων κορεσμένων διαλυμάτων αλάτων για τον έλεγχο της σχετικής υγρασίας (από τους Abou-Bekr et al., 2005).

Διαλυμένη ουσία	% RH στους 20 °C	Ολική μύζηση (kPa)
CH <sub>3</sub> COOH	48.0	102020
CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	32.5	156220
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	8.5	342640

**Πίνακας 4.2α.** Ωσμωτική πίεση διαλυμάτων NaCl διαφόρων συγκεντρώσεων σε kPa (από τον Lang, 1967).

Mol	Θερμοκρασία διαλύματος				
	0 °C	7.5 °C	15 °C	25 °C	35 °C
0	0	0	0	0	0
0.2	836	860	884	915	946
0.5	2070	2136	2200	2281	2362
0.7	2901	2998	3091	3210	3328
1.0	4169	4318	4459	4640	4815
1.5	6359	6606	6837	7134	7411
1.7	7260	7550	7820	8170	8490
1.8	7730	8035	8330	8700	9040
1.9	8190	8530	8840	9240	9600
2.0	8670	9025	9360	9780	10160

**Πίνακας 4.2β.** Ωσμωτική πίεση διαλυμάτων KCl διαφόρων συγκεντρώσεων σε kPa (από τους Campbell & Gardner, 1971).

Mol	Θερμοκρασία διαλύματος						
	0 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C
0	0	0	0	0	0	0	0
0.1	421	436	444	452	459	467	474
0.2	827	859	874	890	905	920	935
0.3	1229	1277	1300	1324	1347	1370	1392
0.4	1628	1693	1724	1757	1788	1819	1849
0.5	2025	2108	2148	2190	2230	2268	2306
0.6	2420	2523	2572	2623	2672	2719	2765
0.7	2814	2938	2996	3057	3116	3171	3226
0.8	3208	3353	3421	3492	3561	3625	3688
0.9	3601	3769	3846	3928	4007	4080	4153
1.0	3993	4185	4272	4366	4455	4538	4620

Η μέθοδος ελέγχου της μύζησης μέσω υδατικών διαλυμάτων που καθορίζουν την σχετική υγρασία έχει εφαρμοστεί και σε συσκευές εκτέλεσης δοκιμών μηχανικών χαρακτηριστικών. Ο Esteban (1990) υπήρξε ο πρώτος που υιοθέτησε την μέθοδο για την κατασκευή ενός συμπιεσομέτρου με έλεγχο της μύζησης, τη χρήση του οποίου παρουσίασαν οι Oteo Mazo, et al. (1996). Οι Hoffmann, et al. (2005) παρουσίασαν πρώτοι ένα συμπιεσόμετρο στο οποίο ο έλεγχος της μύζησης μπορεί να γίνει και με την μέθοδο μετατόπισης άξονα και με την μέθοδο υδατικών διαλυμάτων. Οι Blatz & Graham (2000) παρουσίασαν πρώτοι μία συσκευή τριαξονικής φόρτισης στην οποία ελέγχεται η ολική μύζηση με την χρήση υδατικών διαλυμάτων για τον έλεγχο της σχετικής υγρασίας. Το σύστημα έχει και δυνατότητα μέτρησης της ρυθμιζόμενης μύζησης μέσω ψυχομέτρων τοποθετημένων στα όρια και στο κέντρο του δοκιμίου, και χρησιμοποιείται κυρίως για την έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς συμπυκνωμένων μειγμάτων άμμου-μπεντονίτη για τον εγκιβωτισμό δοχείων με ραδιενεργά απόβλητα σε υπόγειους χώρους ταφής τους. Σε όλες τις εφαρμογές της μεθόδου σε συσκευές εκτέλεσης δοκιμών μηχανικών χαρακτηριστικών ο αέρας με σχετική υγρασίας που καθορίζεται από το διάλυμα δεν παραμένει στατικός αλλά βρίσκεται σε κυκλοφορία διερχόμενος υπό πίεση μέσα από το διάλυμα. Η μέθοδος αυτή έχει βρεθεί ότι μειώνει τον χρόνο επίτευξης ισορροπίας, ο οποίος μάλιστα σε τέτοιες συσκευές είναι ακόμα μεγαλύτερος, αφού είναι πολύ μεγαλύτερο το δοκίμιο, και άρα είναι ιδιαίτερα σημαντικό να καταβάλλεται κάθε προσπάθεια για την μείωσή του.

Η εναλλακτική μέθοδος ελέγχου της σχετικής υγρασίας του αέρα πάνω από εδαφικά δοκίμια με ενεργό έλεγχο των επιμέρους πιέσεων που καθορίζουν την τιμή της σχετικής υγρασίας βασίζεται είτε στον έλεγχο των ιδιοτήτων αδρανούς αερίου (συνήθως αζώτου) κορεσμένου σε υδρατμούς με έλεγχο της θερμοκρασίας και της πίεσής του (π.χ. Hardy, 1992), είτε στην ανάμειξη υπό ελεγχόμενες αναλογίες αδρανούς αερίου κορεσμένου σε υδρατμούς και ξηρού αδρανούς αερίου (Kühnel & van der Gaast, 1993, Hashizume, et al., 1996, Chipera, et al., 1997, Likos & Lu, 2001, 2003). Ο κορεσμός αδρανών αερίων επιτυγχάνεται μέσω της διέλευσής τους υπό πίεση από απεσταγμένο νερό, ενώ η ξήρανσή τους μέσω της διέλευσής τους από δοχεία με κάποιου είδους αποξηραντικό μέσο. Μέθοδοι όπως αυτές επιτρέπουν τον έλεγχο της σχετικής υγρασίας (ανεξάρτητα από την διαθεσιμότητα των κατάλληλων χημικών ουσιών, όπως στην μέθοδο υδατικών διαλυμάτων) στο εύρος από 0.3 % έως 95 % που αντιστοιχεί σε ένα εύρος τιμών της ολικής μύζησης από 7 έως 800 MPa. Έτσι οι μέθοδοι αυτές είναι οι μοναδικές (είτε όταν η σχετική υγρασία ελέγχεται με υδατικά διαλύματα, είτε όταν ελέγχεται μέσω των επιμέρους τιμών της πίεσης) που επιτρέπουν την έλεγχο της μύζησης –έστω και της ολικής- μέχρι τόσο

υψηλές τιμές. Βέβαια, ακριβώς επειδή ελέγχεται η ολική μύζηση, πρέπει να μετρείται πάντοτε και η τιμή της οσμωτικής συνιστώσας της μύζησης για όλο το εύρος των καθοριζόμενων τιμών της ολικής μύζησης.

Η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω του ελέγχου της σχετικής υγρασίας αποτελεί την μοναδική πρακτικά εφαρμόσιμη μέθοδο ελέγχου της μύζησης σε μια ιδιαίτερη κατηγορία γεωυλικών, την λιθορριπή. Η έρευνα της μηχανικής συμπεριφοράς της λιθορριπής έχει ενταθεί τα τελευταία χρόνια και έχει επικεντρωθεί κυρίως στην μελέτη των άμεσων και μακροπρόθεσμων μεταβολών όγκου κατά την διαβροχή ή και πλήρη κορεσμό (ο οποίος αντιστοιχεί στην κατάκλυση του ταμιευτήρα ενός φράγματος για το ανάντη σώμα στήριξης από λιθορριπή) και μετά από αυτόν αντίστοιχα (Alonso & Oldecop, 2000, Oldecop & Alonso, 2001, Oldecop & Alonso, 2003, Alonso, 2003). Για την εργαστηριακή διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς της λιθορριπής κατά το στάδιο μέχρι τον πλήρη κορεσμό χρησιμοποιείται η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω ελέγχου της σχετικής υγρασίας, υλοποιούμενη σε συσκευές μονοδιάστατης συμπίεσης με κυψέλες πολύ μεγάλου μεγέθους για την τοποθέτηση δοκιμίων, πραγματικά αντιπροσωπευτικών της κοκκομετρικής διαβάθμισης της λιθορριπής. Λόγω του μεγέθους των δοκιμίων αυτών οποιαδήποτε άλλη μέθοδος ελέγχου της μύζησης θα ήταν αδύνατον να εφαρμοστεί για τον έλεγχο της μύζησης σε αυτά.

#### **4.3.6 Μέθοδος μέτρησης της μύζησης επιτόπου και στο εργαστήριο**

Οι μέθοδοι που προαναφέρθηκαν αποτελούν αυτόνομες μεθόδους μέτρησης της μύζησης που αναπτύχθηκαν επί τούτου. Δεδομένου ωστόσο ότι ένα εδαφικό υλικό χάνει υγρασία απλώς και μόνο με την παραμονή του στην ατμόσφαιρα (βλ. ειδικές δοκιμές αυτού του είδους στο Κεφ. 16 του Μέρους II), οπότε αυξάνει η μύζησή του, κάθε μέθοδος μέτρησης της μύζησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Δείγματα του εδαφικού υλικού που ενδιαφέρει μορφώνονται σε δοκίμια καταλλήλου σχήματος και αφήνονται να απωλέσουν υγρασία υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες<sup>11</sup>. Όταν περιέλθουν στην επιθυμητή κατάσταση προσαρμόζεται σε αυτά ένα όργανο μέτρησης της μύζησης, ή εφαρμόζεται σε αυτά μία μέθοδος μέτρησης της μύζησης. Επειδή κατά την ξήρανση στην

---

<sup>11</sup> Η απώλεια υγρασίας πρέπει να επέρχεται με παραμονή των δοκιμίων υπό ατμοσφαιρικές συνθήκες και όχι με εισαγωγή στον φούρνο, γιατί τότε αφενός μπορεί να υπάρξει μεταβολή των ιδιοτήτων των περιεχόμενων αργιλικών ορυκτών, προκειμένου για αργιλικά εδάφη, και αφετέρου η αυξημένη θερμοκρασία του δοκιμίου κατά την εφαρμογή οποιασδήποτε μεθόδου μέτρησης της μύζησης θα επηρέαζε το αποτέλεσμα της.

ατμόσφαιρα, το ποσοστό υγρασίας δεν είναι ομοιογενές μέσα στα δοκίμια (μικρότερο στο εξωτερικό και μεγαλύτερο στο εσωτερικό), μετά την παρέλευση του επιθυμητού χρόνου ξήρανσης, τα δοκίμια πρέπει να τυλίγονται σε πλαστικές μεμβράνες, να τοποθετούνται σε πλαστικές σακούλες και μετά από εύλογο χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο εκτιμάται ότι έχει ομογενοποιηθεί το ποσοστό υγρασίας τους, να ξετυλίγονται και να γίνεται η μέτρηση της μύζησης (πάλι με αποτροπή περαιτέρω απώλειας υγρασίας, πλην της απαιτούμενης για την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας μεταξύ δοκιμίου και αισθητήρα).

Ακριβώς αντίστοιχα μπορεί να προσδιοριστεί και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού επιτόπου. Δείγματα εδαφικού υλικού διαφορετικής μύζησης μπορούν να αποσπαστούν από την θέση που βρίσκονται επιτόπου και να μετρηθεί η τιμή της μύζησης τους με κάποια από τις μεθόδους μέτρησης της μύζησης στο εργαστήριο, ή –και καλύτερα για την ποιότητα μέτρησης της μύζησης- να μετρηθεί η μύζηση επιτόπου και στη συνέχεια να αποσπαστεί το δείγμα του εδάφους στο οποίο έγινε η μέτρηση. Πριν ή μετά λοιπόν από την εφαρμογή της μεθόδου μέτρησης της μύζησης γίνονται οι κατάλληλες μετρήσεις για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών του εδαφικού υλικού και αυτά συσχετίζονται με την μύζηση. Για παράδειγμα ένας από τους απλούστερους τρόπους είναι η χρήση του απλού τενσιομέτρου με πορόλιθο χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα. Όπως εισέρχεται ο σωλήνας διάνοιξης της οπής εισαγωγής του τενσιομέτρου αποσπά διαταραγμένα, αλλά με το πραγματικό ποσοστό υγρασίας, δοκίμια του εδάφους ακριβώς από την θέση που θα γίνει η μέτρηση της μύζησης. Κατά συνέπεια αν τα δοκίμια αυτά συλλεχθούν, προφυλαχθούν, και μετρηθεί το ποσοστό υγρασίας τους στο εργαστήριο, τότε προκύπτουν οι τιμές του ποσοστού υγρασίας στην κάθε θέση μέτρησης της μύζησης, οι οποίες εφόσον είναι μέσα στον ίδιο σχηματισμό, δίνουν την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης για τον σχηματισμό αυτόν.

Λόγω του περιορισμένου εύρους διαφορετικών τιμών της μύζησης στις οποίες μπορεί να βρίσκεται ο ίδιος εδαφικός σχηματισμός κατά την χρονική στιγμή της εκτέλεσης των μετρήσεων, ο συνδυασμός ποσοστού υγρασίας-μετρηθείσας επιτόπου μύζησης αντιστοιχεί σε μικρό μόνο τμήμα της πλήρους χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο ενδιαφέρει η σύγκριση του τμήματος αυτού με την εργαστηριακά προσδιοριζόμενη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού.

Κατά τον προσδιορισμό της επιτόπου χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι μεταβολές της ολικής τάσης κατά την απόσπαση των δειγμάτων

ενδέχεται να αλλοιώνουν την τιμή των υπόλοιπων φυσικών χαρακτηριστικών εκτός από το ποσοστό φυσικής υγρασίας. Ακόμα και αυτό δε, μπορεί να αλλοιωθεί κατά την δειγματοληψία και πιθανότερα κατά την συντήρηση μέχρι την πραγματοποίηση των μετρήσεων στο εργαστήριο. Γι' αυτόν τον λόγο η συσχέτιση επιτόπου προσδιορισθεισών χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού με εργαστηριακά προσδιορισθείσες σε όρους άλλους από ποσοστό υγρασίας και μύζηση πρέπει να γίνονται με ιδιαίτερη επιφύλαξη και πάντοτε έχοντας λάβει υπόψη το είδος της δειγματοληψίας και τις συνθήκες συντήρησης των δειγμάτων μέχρι τις μετρήσεις στο εργαστήριο. Ενδεχόμενος συνδυασμός επιτόπου μετρήσεων της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας<sup>12</sup> λύνει το συγκεκριμένο πρόβλημα.

#### 4.3.7 Συμπεράσματα

Όπως φάνηκε από τις περιγραφείσες μεθόδους προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, η διαδικασία προσδιορισμού της είναι ακόμα πιο λεπτεπίλεπτη και από την μέτρηση της μύζησης. Αναζητώντας κριτήρια κατηγοριοποίησης των μεθόδων προσδιορισμού της μύζησης το πρώτο κριτήριο είναι το είδος της μύζησης που ελέγχεται (ολική ή μύζηση εδαφικού σκελετού) και το δεύτερο αν η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού προσδιορίζεται σε ένα και μόνο δοκίμιο ή σε διαφορετικά δοκίμια του εδαφικού υλικού.

Η μέθοδος μετατόπισης άξονα, η ωσμωτική μέθοδος ελέγχου της μύζησης, η μέθοδος ελέγχου της σχετικής υγρασίας και η μέθοδος ταπείνωσης της πίεσης του νερού των πόρων επιτρέπουν τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε ένα και μόνο δοκίμιο με χρήση των κατάλληλων διατάξεων μέτρησης των μεταβολών στον όγκο του νερού και στον όγκο του αέρα του δοκιμίου. Οι τρεις πρώτες από αυτές τις μεθόδους ωστόσο, όπως και η μέθοδος φυγοκέντρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ενός εδαφικού υλικού με χρήση πολλών δοκιμίων.

Η χρήση πολλών δοκιμίων εισάγει σημαντικές αβεβαιότητες στον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (λόγω κάποιας ανομοιογένειας ακόμα και σε εργαστηριακά παρασκευαζόμενα δοκίμια, πολλώ δε μάλλον σε δοκίμια φυσικού υλικού, ακόμα και αν προέρχονται από το ίδιο δείγμα) *αλλά απλοποιεί θεαματικά τις διαδικασίες προσδιορισμού*

---

<sup>12</sup> Περιορισμένη αναφορά σε αυτές τις μεθόδους έχει ήδη γίνει στο Κεφάλαιο 3. Μία πλήρης αναφορά σε αυτές ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διατριβής.



της μάζας και του όγκου των επιμέρους φάσεων του κάθε δοκιμίου. Αρκεί απλώς ο προσδιορισμός του ποσοστού υγρασίας και του ολικού όγκου του δοκιμίου με γνωστό το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών  $G_s$  για τον προσδιορισμό της τιμής όλων των φυσικών χαρακτηριστικών του εδαφικού υλικού στην δεδομένη μύζηση:  $w$ ,  $\theta$ ,  $S_r$  και  $e$ . Προκειμένου να εξαφανιστούν οι αβεβαιότητες στον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού από την χρήση διαφορετικών δοκιμίων, όλες οι μέθοδοι πλην της μεθόδου φυγοκέντρισης μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα μοναδικό δοκίμιο αλλά τότε αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος προσδιορισμού της καμπύλης για κάποιες από αυτές (π.χ. στην μέθοδο ελέγχου της σχετικής υγρασίας) και υπεισέρχονται αβεβαιότητες στις μετρηθείσες τιμές των φυσικών χαρακτηριστικών λόγω των εφαρμοζόμενων μεθόδων μέτρησης των μεταβολών του όγκου του νερού που διαφεύγει ή προσροφάται και του ολικού όγκου του δοκιμίου. Πρέπει επίσης να τονιστεί το πολλαπλάσιο κόστος των διατάξεων προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού από μετρήσεις στο ίδιο δοκίμιο και μετρήσεις σε διαφορετικά δοκίμια.

Σε ό,τι αφορά την σύγκριση των μεθόδων ελέγχου της μύζησης, η μέθοδος μετατόπισης άξονα υπερτερεί του ωσμωτικού ελέγχου της μύζησης ως προς τον μικρότερο χρόνο επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας αλλά υστερεί ως προς τα δευτερογενή φαινόμενα που προκαλεί η μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής πίεση της αέριας φάσης. Ο ωσμωτικός έλεγχος της μύζησης επιτρέπει την ταυτόχρονη διατήρηση των πραγματικών τιμών της πίεσης στην κάθε μία από τις ρευστές φάσεις αλλά ο χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας για κάθε τιμή της μύζησης μπορεί να γίνει πολύ μεγάλος, ιδίως για μεγάλες τιμές της μύζησης. Η μοναδική μέθοδος που επιτρέπει τον ταχύ προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι η μέθοδος φυγοκέντρισης, αλλά με τίμημα την πιθανά μικρότερη ακρίβειά της (όπως υποδεικνύει η σύγκριση αποτελεσμάτων από αυτή την μέθοδο με τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων) και τον περιορισμό της προσδιοριζόμενης χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης, αφού η μέτρηση των μεταβολών του ολικού όγκου εμπεριέχει υπερβολικά μεγάλες αβεβαιότητες. Η μέθοδος ταπείνωσης της πίεσης του νερού των πόρων έχει πολύ περιορισμένο εύρος ελέγχου της μύζησης. Η μέθοδος ελέγχου της μύζησης μέσω του ελέγχου της σχετικής υγρασίας είναι η μοναδική που επιτρέπει τον έλεγχο της ολικής μύζησης αλλά με βασικό πλεονέκτημα ότι αποτελεί την μοναδική μέθοδο που επιτρέπει τον έλεγχο της μύζησης πρακτικά σε ολόκληρο το εύρος των τιμών που αυτή είναι δυνατόν να λάβει.

Ένα τελευταίο σχόλιο με ιδιαίτερη σημασία αφορά στον συνδυασμό των μεθόδων ελέγχου της μύζησης για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όλο το εύρος

της. Συχνά χρησιμοποιείται κάποια από τις μεθόδους ελέγχου της μύζησης εδαφικού σκελετού για τον έλεγχο της μύζησης στο εύρος μικρών τιμών της μύζησης και συνδυάζεται με την μέθοδο ελέγχου της μύζησης μέσω του ελέγχου της σχετικής υγρασίας για το εύρος μεγάλων τιμών της μύζησης. Στη συνέχεια δε η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σχεδιάζεται με συνδυασμό των τιμών της μύζησης από τις δύο μεθόδους, χωρίς προηγούμενα να γίνει μία προσπάθεια εκτίμησης της τιμής της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης. Αυτό γενικά, παρόλο που παραγνωρίζεται σε πολυάριθμες δημοσιεύσεις, αναμένεται ότι εισάγει σημαντικά και μη μελετημένα επαρκώς λάθη στην προσδιοριζόμενη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Για την αποφυγή τους, είτε η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού πρέπει να προσδιορίζεται σε όλο της το εύρος (προσδιορισμός και των δύο σημείων καμπής) με την ίδια μέθοδο, είτε να προσδιορίζεται η μεταβολή της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης κατά την μεταβολή του βαθμού κορεσμού. Η ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης είναι γενικά σταθερή στις Περιοχές I (μέγιστη) και III (ελάχιστη, πρακτικά μηδενική) της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και μεταβλητή μεταξύ των ακραίων τιμών της στην Περιοχή II. Εφόσον η μέθοδος ελέγχου της μύζησης μέσω του ελέγχου της σχετικής υγρασίας χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του τμήματος της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού περί το παραμένον ποσοστό υγρασίας και πέρα από αυτό, οι καθοριζόμενες τιμές της ολικής μύζησης αναμένεται ότι πρακτικά ταυτίζονται με τις τιμές της μύζησης εδαφικού σκελετού στον ίδιο βαθμό κορεσμού.

Στον Πίν. 4.3 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των μεθόδων ελέγχου της μύζησης που περιγράφηκαν προηγουμένως.

**Πίνακας 4.3.** Συνόψιση χαρακτηριστικών των μεθόδων ελέγχου της μύζησης.

Μέθοδος	Είδος μύζησης που ελέγχεται	Πίεση της αέριας φάσης	Πίεση της υγρής φάσης	Εύρος ελέγχου της μύζησης (kPa)	Ικανότητα προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού με διαφορετικά δοκίμια
Μετατόπισης άξονα	Μύζηση εδαφικού σκελετού	Θετική, υψηλότερη της ατμοσφαιρικής	Ατμοσφαιρική	0-1500 (κεραμικοί πορόλιθοι) 0-10000 (μεμβράνες σελουλόζης)	ΝΑΙ
Ωσμωτική	»	Ατμοσφαιρική	Πραγματικά αρνητική	0-10000	ΝΑΙ
Φυγοκέντρισης	»	»	Πραγματικά αρνητική	0-2800	ΝΑΙ
Ταπείνωσης της πίεσης του νερού των πόρων	»	»	Μικρότερη της ατμοσφαιρικής	0-80	ΟΧΙ
Ελέγχου σχετικής υγρασίας	Ολική μύζηση	»	Πραγματικά αρνητική	500-350000 (με υδατικά διαλύματα) 7000-800000 (με ανεξάρτητο έλεγχο πίεσης ξηρών και κορεσμένων σε υδρατμούς αερίων)	ΝΑΙ

## 4.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ

### 4.4.1 Γενικά

Όπως κατέστη σαφές μέχρι αυτό το σημείο, ο προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι δύσκολος, χρονοβόρος και έχει μεγάλο κόστος. Συχνά δε πρέπει να υιοθετηθούν περισσότερες της μίας μέθοδοι ελέγχου της μύζησης για τον προσδιορισμό της πλήρους καμπύλης. Οι ίδιες οι μετρήσεις, με οποιαδήποτε από τις υπάρχουσες μεθόδους ελέγχου της μύζησης, εμπεριέχουν παραδοχές ή υπόκεινται στους περιορισμούς της πειραματικής διάταξης. Γι' αυτούς τους λόγους ο αριθμός των σημείων (συνδυασμοί βαθμού κορεσμού, ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας ή ποσοστού υγρασίας με την μύζηση) που προσδιορίζονται είναι περιορισμένος, ενώ αυτές καθεαυτές οι τιμές μεγεθών που ορίζουν τα σημεία έχουν σημαντική αβεβαιότητα. Τις περισσότερες φορές επίσης είναι πιο πρακτικό να υφίσταται μία συνεχής μαθηματική καμπύλη που να περιγράφει την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού παρά μία καμπύλη που περιγράφεται από πειραματικά προσδιορισθέντα σημεία. Η πρακτική λοιπόν είναι οι πειραματικά προσδιορισθείσες καμπύλες να προσομοιώνονται από διάφορες εξισώσεις που έχουν προταθεί για την περιγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Οι περισσότερες από αυτές επιτρέπουν απλώς την πρόβλεψή της κατάλληλου σχήματος καμπύλης, ώστε με γνωστά τα –ακόμα και περιορισμένα- πειραματικά προσδιορισθέντα σημεία της καμπύλης για ένα εδαφικό υλικό, να προσδιοριστεί η καμπύλη για αυτό σε μεγαλύτερο εύρος τιμών της μύζησης, ως η γραμμή βέλτιστης προσέγγισης που διέρχεται από τα σημεία αυτά, ενώ κάποιες έχουν εξελιχθεί σε μέσα πρόβλεψης της χαρακτηριστικής καμπύλης από τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών, μέσω της συσχέτισης των παραμέτρων συσχέτισης (curve-fitting parameters) με αυτά.

Μία άλλη χρησιμότητα των μαθηματικών προσομοιωμάτων είναι ότι αποτελούν μία έτοιμη «βιβλιοθήκη» εξισώσεων περιγραφής ανάστροφων σιγμοειδών καμπυλών με γνωστά μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα. Όπως παρουσιάζεται στο Κεφ. 5, το ίδιο σχήμα έχει η καμπύλη λόγου κενών-μύζησης, η οποία άρα μπορεί εύκολα να προσομοιωθεί με κάποια από αυτές τις εξισώσεις, αλλάζοντας την τεταγμένη της θεωρητικής μέγιστης μύζησης των 1000000 kPa από 0 στην τιμή του παραμένοντος λόγου κενών, γεγονός το οποίο προσφέρεται για τον εμπλουτισμό των εξισώσεων περιγραφής ογκομετρικών μεταβολών σε καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη (βλ. Μέρος III).

#### 4.4.2 Κατατάξεις μαθηματικών προσομοιωμάτων

Τα μαθηματικά προσομοιώματα που έχουν διατυπωθεί μέχρι σήμερα για την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού μπορούν να ομαδοποιηθούν με διάφορους τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι με βάση τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων από το προσομοίωμα παραμέτρων. Ο δεύτερος τρόπος είναι με βάση το εάν οι χρησιμοποιούμενες στο προσομοίωμα παράμετροι έχουν φυσικό νόημα ή όχι. Τέλος ένας άλλος τρόπος είναι ως προς το εύρος τιμών μύζησης στο οποίο επιτρέπουν την προσομοίωση. Ενώ δηλαδή όλα τα προσομοιώματα επιτυγχάνουν πολύ καλή συμφωνία με πειραματικά δεδομένα για μικρό εύρος τιμών της μύζησης, τα περισσότερα αδυνατούν να επιτύχουν καλή συμφωνία με πειραματικά δεδομένα για όλο το εύρος της καμπύλης. Η ιδιαιτερότητα εκείνων των μαθηματικών προσομοιωμάτων που επιτυγχάνουν καλή προσέγγιση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όλο το εύρος τιμών μύζησης είναι ότι έχουν έναν διορθωτικό παράγοντα που εξασφαλίζει ότι το ποσοστό υγρασίας ή ο βαθμός κορεσμού γίνονται 0 για τιμή της μύζησης ίση με 1000000 kPa (τιμή της μύζησης που αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στην πλήρη ξήρανση των εδαφικών υλικών όπως αυτή επιτυγχάνεται στον φούρνο ξήρανσης και αντιστοιχεί στην μηδενική σχετική υγρασία κατά τους Croney & Coleman, 1961 –βλ. αναλυτικότερα §4.2.4).

Η παρούσα αναφορά στις κατατάξεις των μαθηματικών προσομοιωμάτων γίνεται αφενός προς παρουσίαση των ειδών των μαθηματικών προσομοιωμάτων πριν την εκτενή αναφορά σε αυτά στην §4.4.3, αλλά και για να οριστούν οι απαιτήσεις που καθιστούν ένα τέτοιο μαθηματικό προσομοίωμα ικανοποιητικό ή όχι (ιδιαίτερα εν όψει της χρησιμότητάς τους ως έτοιμη «βιβλιοθήκη» εξισώσεων για την προσομοίωση της καμπύλης λόγου κενών-μύζησης): *ο μικρότερος αριθμός παραμέτρων που εξασφαλίζει από το προσομοίωμα ικανοποιητική προσέγγιση στο μεγαλύτερο δυνατό εύρος τιμών της μύζησης και διέλευση από θεωρητικά καθοριζόμενα σταθερά σημεία* ( $w=0\%-s=1000000$  kPa και  $s=0-S_r=100\%$ ). Μία πρόσθετη απαίτηση με ιδιαίτερη αξία για την πρακτικότητα της χρησιμοποίησης των μαθηματικών αυτών προσομοιωμάτων (κατά την ενσωμάτωση σε κώδικες αριθμητικών επιλύσεων ή πεπερασμένων στοιχείων) είναι *εκείνη της συνέχειας και της παραγωγισιμότητάς τους*.

Γεωμετρικά (βλ. Σχ. 4.6) η απλούστερη δυνατή καμπύλη προσομοίωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ορίζεται από 4 σημεία. Τα δύο από αυτά είναι δεδομένα ( $w=0\%-s=1000000$  kPa και  $s=0-S_r=100\%$ ), ενώ τα άλλα δύο είναι οι συνδυασμοί: πίεση διείσδυσης αέρα- $S_r=100\%$  και παραμένον ποσοστό υγρασίας-μύζηση επίτευξής του. Με δεδομένο ότι η

τεταγμένη του ενός είναι δεδομένη ( $S_r=100\%$  για την πίεση διείσδυσης αέρα), προκύπτει ο ελάχιστος αριθμός απαιτούμενων παραμέτρων για την απλούστερη δυνατή προσομοίωση που είναι 3. Προφανώς, μαθηματικά προσομοιώματα με λιγότερες παραμέτρους προσέγγισης, εμπεριέχουν επιπλέον παραδοχές για να επιτύχουν την προσομοίωση όπως θα επιδειχθεί αναλυτικά στη συνέχεια, ενώ για την προσομοίωση πιο πολύπλοκων καμπυλών (π.χ. χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με περισσότερα των δύο σημεία καμπής), ή την προσομοίωση καμπυλών με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, ενδέχεται να απαιτούνται περισσότερες από 3 παραμέτρους.

### 4.4.3 Μαθηματικά προσομοιώματα

#### 4.4.3.1 *Εισαγωγή*

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα σπουδαιότερα μαθηματικά προσομοιώματα για την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού με σχολιασμό της αποτελεσματικότητάς τους ως προς την προσομοίωση, πρακτικά προβλήματα της χρησιμοποίησής τους και παραμετρικές αναλύσεις ως προς τις παραμέτρους τους. Τα προσομοιώματα αυτά είναι των Burdine (1953), Gardner (1956), Brooks & Corey (1964), Brutsaert (1966), Mualem (1976β), van Genuchten (1980), Boltzman (1984), Fermi (1987) και Fredlund & Xing (1994).

Οι εξισώσεις που περιγράφουν τα προσομοιώματα αυτά σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης και σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης παρουσιάζονται στον Πιν. 4.4. Η αρίθμηση των εξισώσεων αυτών γίνεται εντός του Πιν. 4.4, παρόλο που στη συνέχεια ορισμένα προσομοιώματα περιγράφονται στην ίδια παράγραφο.

Το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας  $\theta$  ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του νερού των πόρων προς τον ολικό όγκο. Το κανονικοποιημένο ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας  $\Theta$  ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας  $\theta$  από το παραμένον ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας  $\theta_r$  προς την διαφορά του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας στον πλήρη κορεσμό  $\theta_s$  από το παραμένον ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας  $\theta_r$  (Εξ. 4.2).

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4.2)$$

Στον Πιν. 4.4 οι εξισώσεις εκφράστηκαν αρχικά σε όρους κανονικοποιημένου ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης (ίδια εξίσωση με την εξίσωση διατυπωμένη σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης), αλλά επιλύθηκαν ως προς  $\theta$  και παρατίθενται τελικά σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης, με το παραμένον ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας  $\theta_r$  και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας στον πλήρη κορεσμό  $\theta_s$  να υπεισέρχονται πλέον ως παράμετροι των εξισώσεων προσομοίωσης.

**Πίνακας 4.4.** Εξισώσεις των πιο διαδεδομένων μαθηματικών προσομοιωμάτων της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, διατυπωμένες σε όρους βαθμού κορεσμού  $S_r$ -μύζησης  $s$  και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας  $\theta$ -μύζησης  $s$ .

Πηγή	Εξίσωση καμπύλης προσομοίωσης ( $S_r$ - $s$ )	Εξίσωση καμπύλης προσομοίωσης ( $\theta$ - $s$ )
Burdine (1953)	$S_r = \frac{1}{[1 + (as)^n]^{(1-2/n)}}, (4.3)$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{(1 + as^n)^{1-2/n}}, (4.4)$
Gardner (1956)	$S_r = \frac{1}{1 + as^n}, (4.5)$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + as^n}, (4.6)$
Brooks & Corey (1964)	$\begin{cases} S_r = 100\% & s < a \\ S_r = \left(\frac{s}{a}\right)^{-n} & s > a \end{cases} (4.7)$	$\begin{cases} \theta = 1 & s < a \\ \theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{s}{a}\right)^{-n} & s > a \end{cases} (4.8)$
Brutsaert (1966)	$S_r = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{a}\right)^n}, (4.9)$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{a}\right)^n}, (4.10)$
Mualem (1976β)	$S_r = \frac{1}{[1 + (as)^n]^{(1-1/n)}}, (4.11)$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{(1 + as^n)^{1-1/n}}, (4.12)$
van Genuchten (1980)	$S_r = \frac{1}{[1 + (as)^n]^m}, (4.13)$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{[1 + (as)^n]^m}, (4.14)$
Boltzman (1984)	$\begin{cases} S_r = 100\% & s < a \\ S_r = \exp\left(\frac{a-s}{n}\right) & s > a \end{cases} (4.15)$	$\begin{cases} \theta = 1 & s < a \\ \theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp\left(\frac{a-s}{n}\right) & s > a \end{cases} (4.16)$
Fermi (1987)	$S_r = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{s-a}{n}\right)}, (4.17)$	$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{s-a}{n}\right)}, (4.18)$
Fredlund & Xing (1994)	$S_r = \frac{1}{\left(\ln\left(e + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right)\right)^m}, (4.19)$	$\theta = \theta_s \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{s}{s_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{s_r}\right)}\right] \frac{1}{\left[\ln\left(e + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right)\right]^m}, (4.20)$

Όλα τα προσομοιώματα περιγράφονται από συνεχείς συναρτήσεις αλλά τα προσομοιώματα των Brooks & Corey (1964) και των Boltzman (1984) δεν είναι συνεχώς παραγωγίσιμα και επίσης το πρώτο δεν έχει σημείο καμπής μεταξύ πίεσης διείσδυσης αέρα και παραμένουτος ποσοστού υγρασίας (ελάχιστο της πρώτης παραγώγου). Τα προσομοιώματα των van Genuchten (1980) και Fredlund & Xing (1994) έχουν τρεις ανεξάρτητες μεταξύ τους παραμέτρους, τα προσομοιώματα των Burdine (1953) και Mualem (1976β) μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν μία τρίτη παράμετρο, η οποία όμως είναι συνάρτηση της μίας εκ των δύο άλλων, και όλα τα υπόλοιπα προσομοιώματα έχουν δύο παραμέτρους.

Στην παρουσίαση των προσομοιωμάτων υιοθετήθηκε η πρακτική που ακολουθήθηκε και από τους Sillers, et al. (2001), οι οποίοι χρησιμοποίησαν τα ίδια σύμβολα για τις παραμέτρους προσέγγισης όλων των προσομοιωμάτων, παρόλο που αυτά δεν έχουν παντού τις ίδιες μονάδες και δεν συσχετίζονται με τον ίδιο τρόπο με φυσικά μεγέθη. Θεωρήθηκε ωστόσο πλεονέκτημα η χρήση των τριών ίδιων συμβόλων:  $a$ ,  $n$  και  $m$ , αφού καθορίζουν τον ίδιο γενικό ρόλο το καθένα: η παράμετρος με το σύμβολο  $a$  την τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα, η παράμετρος  $n$  την κλίση της καμπύλης προσομοίωσης μεταξύ πίεσης διείσδυσης αέρα και παραμένουτος ποσοστού υγρασίας και η παράμετρος  $m$  την μορφή της καμπύλης προσομοίωσης περί την μύζηση επίτευξης του παραμένουτος ποσοστού υγρασίας.

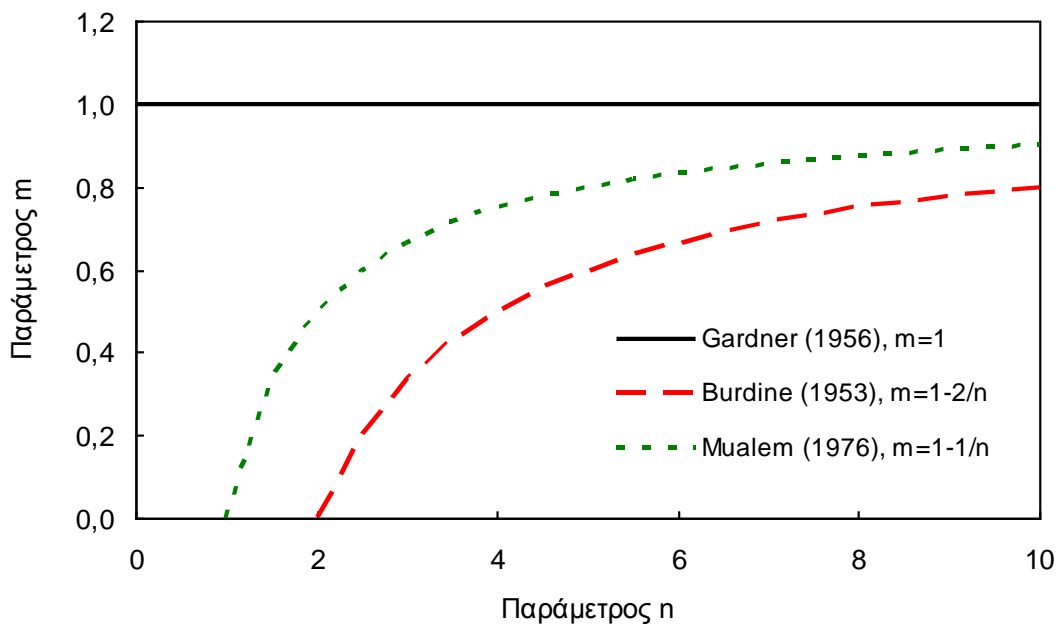
Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται ιδιαίτερη αναφορά σε καθένα από τα προαναφερθέντα μαθηματικά προσομοιώματα.

#### 4.4.3.2 Προσομοιώματα των Burdine (1953), Gardner (1956), Mualem (1976β) και van Genuchten (1980)

Όπως προκύπτει από τις Εξ. 4.3, 4.5, 4.11 και 4.13 πρόκειται ουσιαστικά για την ίδια εξίσωση σε ό,τι αφορά τις παραμέτρους  $a$  και  $n$ , και ως προς τη θέση τους στην εξίσωση, και ως προς την επιρροή τους, και ως προς την μαθηματική μορφή της εξίσωσης, με την διαφορά της παραμέτρου  $m$ . Η γενική μορφή των εξισώσεων είναι αυτή της εξίσωσης του van Genuchten (1980), όπου η παράμετρος  $m$  είναι ανεξάρτητη, με τις υπόλοιπες εξισώσεις να αποτελούν ειδικές μορφές της: στην εξίσωση του Gardner (1956), η παράμετρος  $m$  έχει την τιμή 1, στην εξίσωση του Burdine (1953), έχει την τιμή  $1-2/n$ , και τέλος στην εξίσωση του Mualem (1976β), έχει την τιμή  $1-1/n$ . Στο Σχ. 4.27 παρουσιάζεται η συσχέτιση της παραμέτρου  $m$  με την



παράμετρο  $n$  για όλες τις εξισώσεις πλην αυτής του van Genuchten (1980). Ο βαθμός κορεσμού πρέπει να έχει τιμές μικρότερες ή ίσες της μονάδας. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό για αυτή την οικογένεια εξισώσεων πρέπει οι παράμετροι  $a$  και  $m$  να είναι μεγαλύτερες ή ίσες του 0. Αυτό αποτελεί τον περιορισμό στις τιμές της παραμέτρου  $m$  στην εξίσωση του van Genuchten (1980), όπου είναι ανεξάρτητη, τηρείται στην εξίσωση του Gardner (1956), αφού  $m=1$ , και για να τηρείται στις εξισώσεις των Burdine (1953) και Mualem (1976β), η τιμή της παραμέτρου  $n$  πρέπει να είναι αντίστοιχα μεγαλύτερη ή ίση των τιμών 2 και 1.



**Σχήμα 4.27.** Συσχέτιση της παραμέτρου  $m$  με την παράμετρο  $n$  στις εξισώσεις των Burdine (1953), Gardner (1956) και Mualem (1976β).

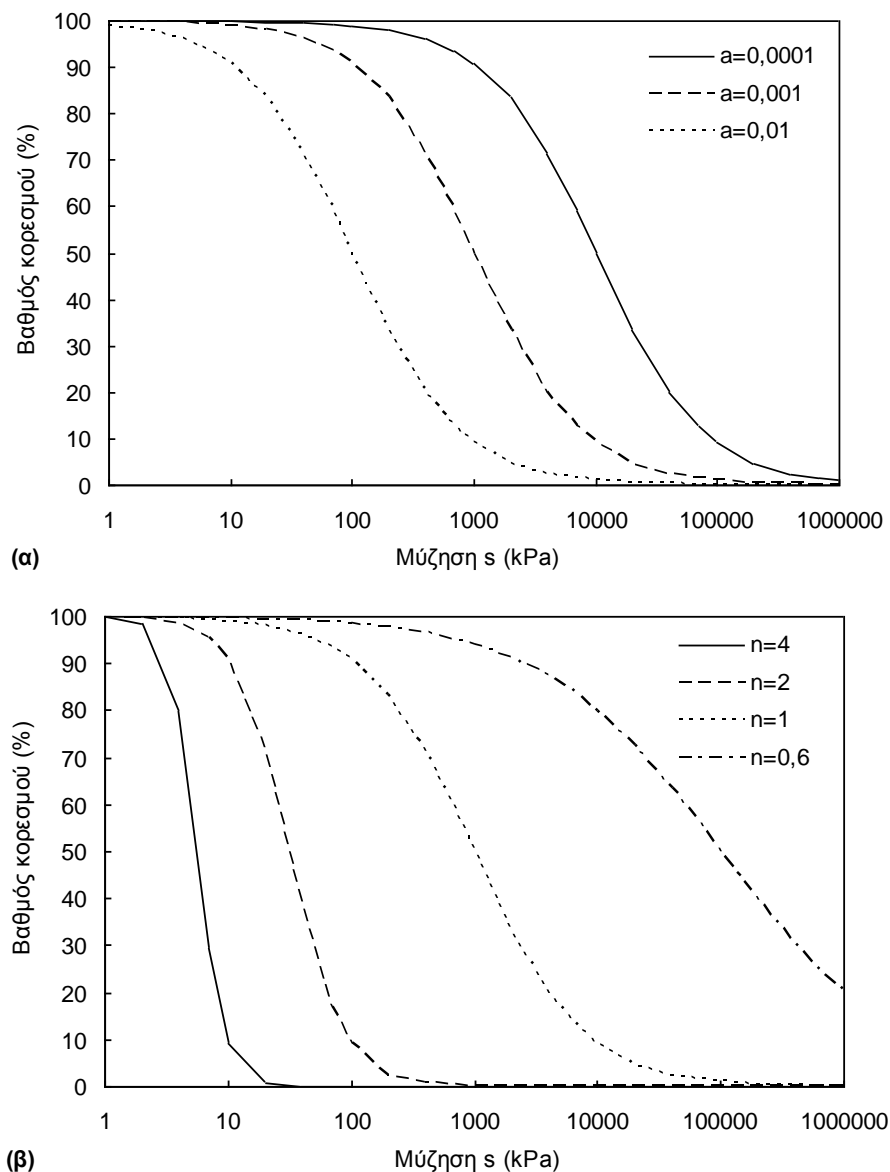
Οι τέσσερις αυτές εξισώσεις είναι συνεχείς και συνεχώς παραγωγίσιμες. Η παράμετρος  $a$  εκφράζει πρακτικά το αντίστροφο της πίεσης διείσδυσης αέρα (έχοντας μονάδες πίεσης εις την  $-1$ ) και αν και δεν μεταβάλλει την γεωμετρική μορφή της καμπύλης, την μεταθέτει κατά μήκος του άξονα της μύζησης. Η παράμετρος  $n$  συσχετίζεται με την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού, ρυθμίζοντας την κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στο τμήμα μεταξύ πίεσης διείσδυσης αέρα και παραμένουτος ποσοστού υγρασίας (Περιοχή II). Τέλος η παράμετρος  $m$ , εκεί που είναι ανεξάρτητη (van Genuchten, 1980) ρυθμίζει ανεξάρτητα την μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στην περιοχή του παραμένουτος ποσοστού υγρασίας. Αντίθετα στην εξίσωση του Gardner (1956) η μορφή της χαρακτηριστικής

καμπύλης εδάφους-νερού στην περιοχή του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας καθορίζεται αποκλειστικά από τις παραμέτρους  $a$  και  $n$ , δηλ. την πίεση διείσδυσης αέρα και την κλίση της καμπύλης στην Περιοχή II, έχοντας έτσι την μικρότερη δυνατή ευελιξία στην προσομοίωση των καμπυλών μεγάλης ποικιλίας εδαφών. Στις εξισώσεις των Burdine (1953) και Mualem (1976), η ευελιξία είναι μεν μεγαλύτερη λόγω της πεπλεγμένης συσχέτισης  $m$  και  $n$ , αλλά παραμένει μικρότερη της πλήρως ανεξάρτητης ρύθμισης που υπάρχει στην εξίσωση του van Genuchten (1980). Σε κάθε περίπτωση, οι δύο αυτές εξισώσεις συνιστούν εναλλακτικές επιλογές της εξίσωσης του Gardner (1956) για διαφοροποίηση της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στην περιοχή του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας.

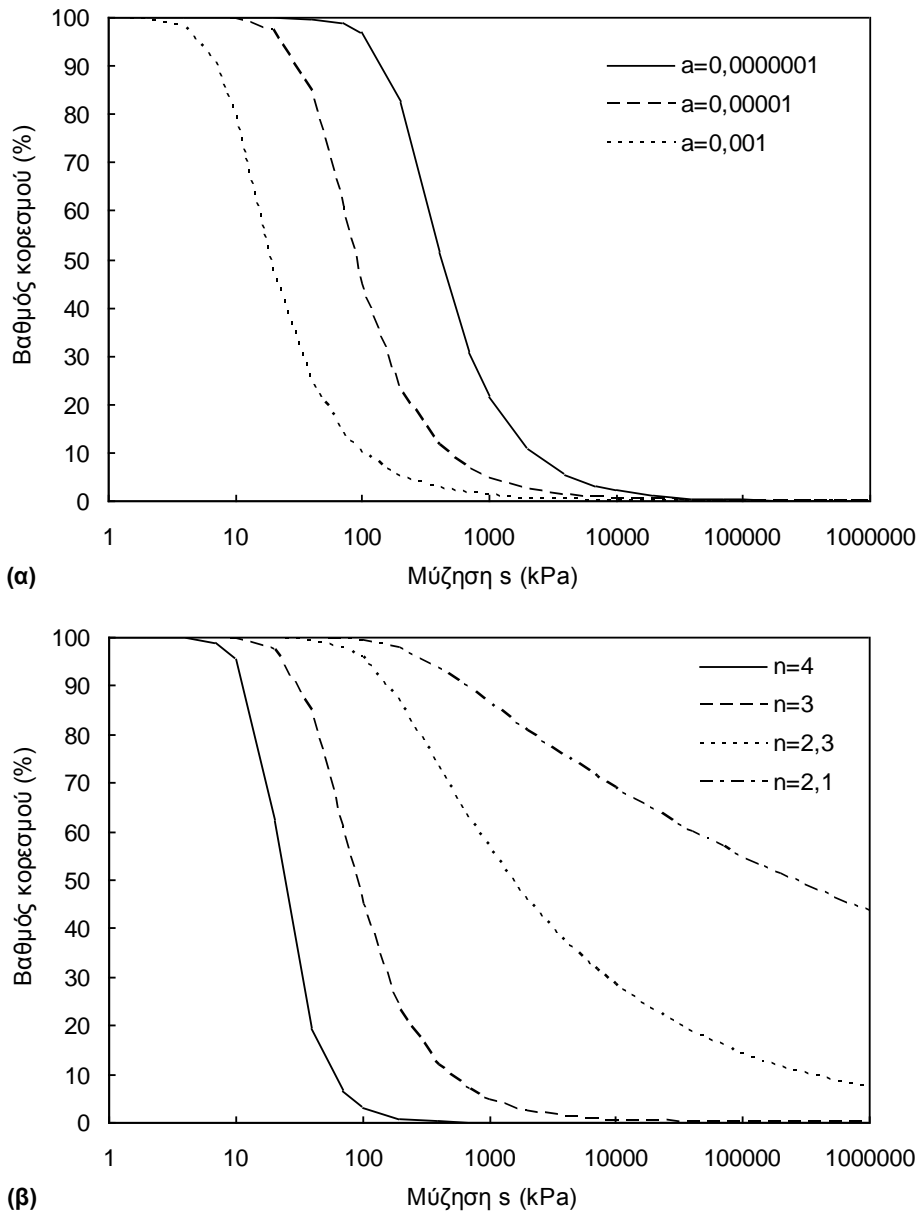
Στο Σχ. 4.28 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της εξίσωσης του Gardner (1956) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  (Σχ. 4.28α) και της παραμέτρου  $n$  (Σχ. 4.28β). Πράγματι, όσο αυξάνεται η παράμετρος  $a$  (Σχ. 4.28α), για σταθερή τιμή της παραμέτρου  $n$ , αυξάνεται η πίεση διείσδυσης αέρα της προσομοιούμενης καμπύλης, το οποίο ταιριάζει με την συσχέτιση του αντιστρόφου της παραμέτρου αυτής με την πίεση διείσδυσης αέρα. Επίσης, όσο αυξάνεται η παράμετρος  $a$ , τόσο αυξάνεται και η μύζηση επίτευξης του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας. Όσο αυξάνεται η παράμετρος  $n$  (Σχ. 4.28β), για σταθερή τιμή της παραμέτρου  $a$ , αφενός μειώνεται η πίεση διείσδυσης αέρα της προσομοιούμενης καμπύλης καθώς και η μύζηση επίτευξης του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας, και αφετέρου αυξάνεται η κλίση της καμπύλης στην Περιοχή II. Για τιμές της παραμέτρου  $n$  επίσης μικρότερες της μονάδας, ο βαθμός κορεσμού λαμβάνει μη μηδενικές τιμές για μύζηση 1000000 kPa. Η παρατήρηση αυτή συζητείται αναλυτικά στη συνέχεια. Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 4.4.2, αριθμός παραμέτρων προσέγγισης μικρότερος του 3 σημαίνει ότι η μέθοδος προσομοίωσης εμπεριέχει παραδοχές για την κάλυψη των ελάχιστων απαιτήσεων προσομοίωσης. Πράγματι, μεταβολή της παραμέτρου  $a$  προκαλεί μεταβολή όχι μόνο της πίεσης διείσδυσης αέρα αλλά και της μύζησης επίτευξης του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας, μαρτυρώντας σύζευξη μεταξύ τους.

Στο Σχ. 4.29 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της εξίσωσης του Burdine (1953) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  (Σχ. 4.29α) και της παραμέτρου  $n$  (Σχ. 4.29β). Κατά την μεταβολή των παραμέτρων, η προσομοιούμενη καμπύλη μεταβάλλεται όπως μεταβαλλόταν και η εξίσωση του Gardner (1956). Όσο προσεγγίζουν οι τιμές της παραμέτρου  $n$  την τιμή 2, τόσο μεγαλύτερες, μη μηδενικές τιμές, λαμβάνει ο βαθμός κορεσμού για μύζηση 1000000 kPa. Και στην εξίσωση του Burdine (1953), μεταβολή της παραμέτρου  $a$  προκαλεί μεταβολή και της πίεσης διείσδυσης αέρα και της μύζησης επίτευξης του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας.

Στο Σχ. 4.30 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της εξίσωσης του Mualem (1976β) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  (Σχ. 4.30α) και της παραμέτρου  $n$  (Σχ. 4.30β). Κατά την μεταβολή των παραμέτρων, η προσομοιούμενη καμπύλη μεταβάλλεται όπως μεταβάλλονταν και οι εξισώσεις των Gardner (1956) και Burdine (1953). Όσο προσεγγίζουν οι τιμές της παραμέτρου  $n$  την τιμή 1, τόσο μεγαλύτερες, μη μηδενικές τιμές, λαμβάνει ο βαθμός κορεσμού για μύζηση 1000000 kPa. Και στην εξίσωση του Mualem (1976β), μεταβολή της παραμέτρου  $a$  προκαλεί μεταβολή και της πίεσης διείσδυσης αέρα και της μύζησης επίτευξης του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας.



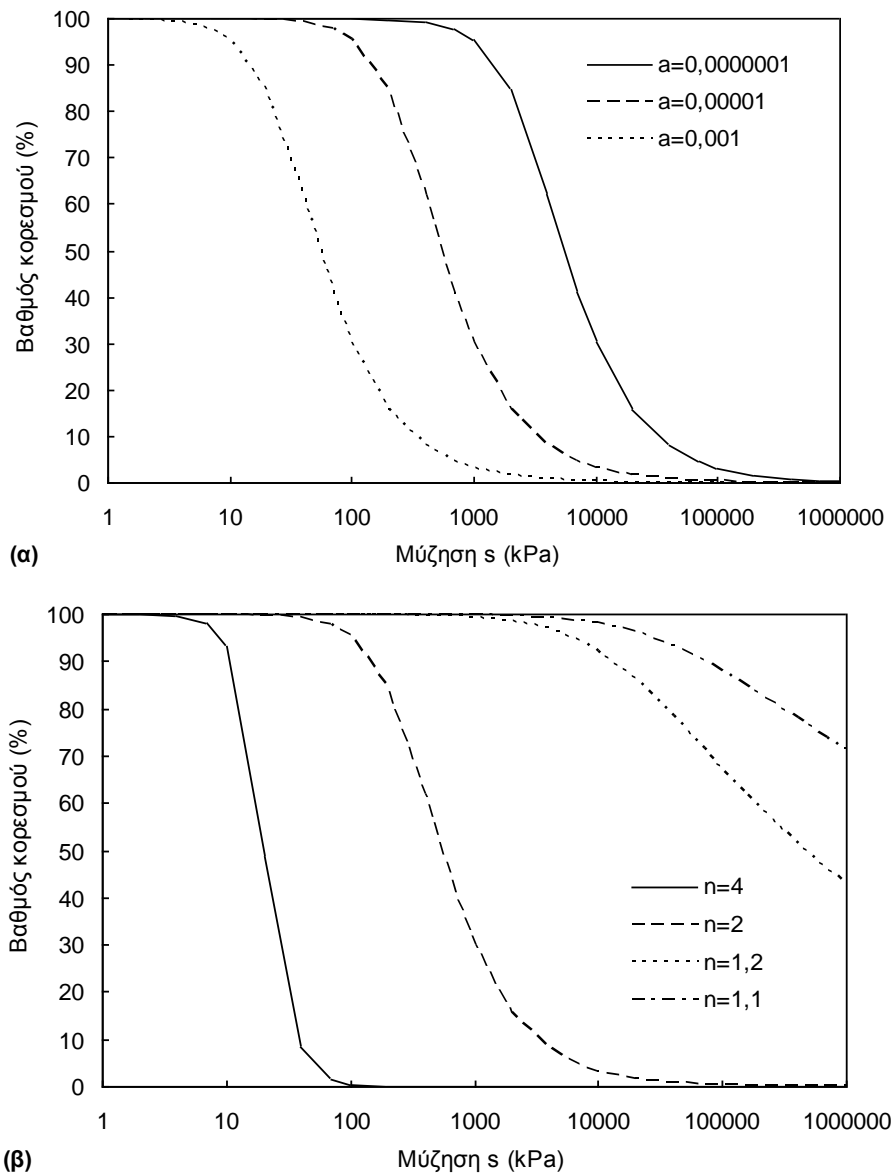
**Σχήμα 4.28.** Γραφική παράσταση της εξίσωσης του Gardner (1956) σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, α) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $n$  ( $n=1$ ), και β) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $n$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $a$  ( $a=0.001$ ).



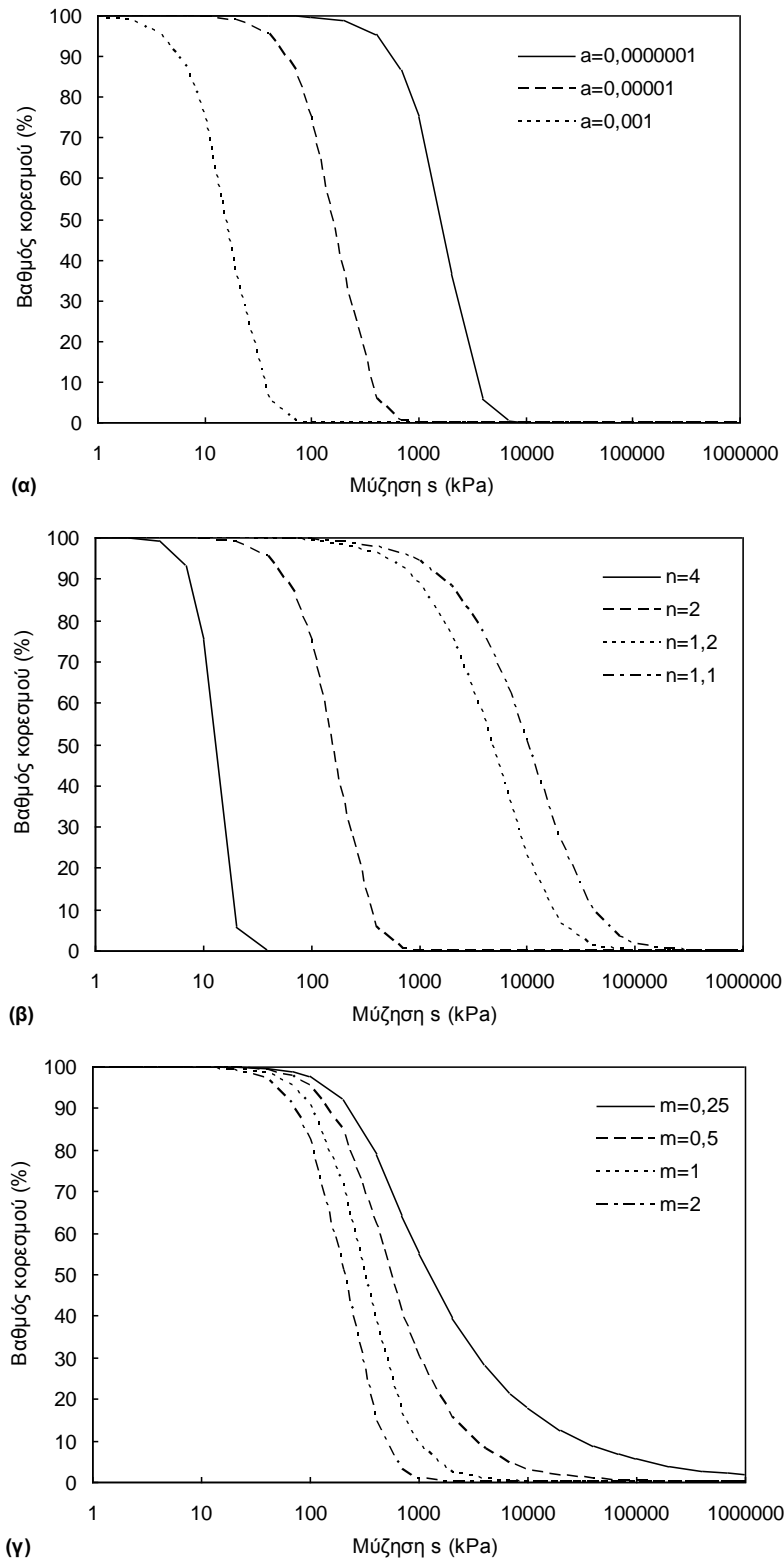
**Σχήμα 4.29.** Γραφική παράσταση της εξίσωσης του Burdine (1953) σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, α) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $n$  ( $n=3$ ), και β) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $n$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $a$  ( $a=0.00001$ ).

Στο Σχ. 4.31 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της εξίσωσης του van Genuchten (1980) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  (Σχ. 4.31α), της παραμέτρου  $n$  (Σχ. 4.31β) και της παραμέτρου  $m$  (Σχ. 4.31γ). Όσο αυξάνεται η παράμετρος  $a$  (Σχ. 4.31α), για σταθερή τιμή των παραμέτρων  $n$  και  $m$ , μειώνεται η πίεση διείσδυσης αέρα της προσομοιούμενης καμπύλης, το οποίο ταιριάζει με την συσχέτιση του αντιστρόφου της παραμέτρου αυτής με την πίεση διείσδυσης αέρα. Επίσης, όσο αυξάνεται η παράμετρος  $a$ , τόσο μειώνεται και η μύζηση επίτευξης του

παραμένοντος ποσοστού υγρασίας. Όσο αυξάνεται η παράμετρος  $n$  (Σχ. 4.31β), για σταθερή τιμή των παραμέτρων  $a$  και  $m$ , αφενός μειώνεται η πίεση διείσδυσης αέρα της προσομοιούμενης καμπύλης καθώς και η μύζηση επίτευξης του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας, και αφετέρου αυξάνεται η κλίση της καμπύλης στην Περιοχή II. Τέλος όσο μειώνεται η παράμετρος  $m$  (Σχ. 4.31γ), για σταθερή τιμή των παραμέτρων  $a$  και  $n$ , τόσο λιγότερο κοίλη γίνεται η προσομοιούμενη καμπύλη στην περιοχή του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας, με την πίεση διείσδυσης αέρα να διατηρείται πρακτικά σταθερή. Αυτό είναι το κρίσιμο πλεονέκτημα της ανεξαρτησίας της παραμέτρου  $m$  που υπάρχει στην εξίσωση του van Genuchten (1980).



**Σχήμα 4.30.** Γραφική παράσταση της εξίσωσης του Mualem (1976β) σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, α) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $n$  ( $n=2$ ), και β) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $n$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $a$  ( $a=0.00001$ ).



**Σχήμα 4.31.** Γραφική παράσταση της εξίσωσης του van Genuchten (1980) σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, α) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  υπό σταθερές τιμές των παραμέτρων  $n$  και  $m$  ( $n=2$ ,  $m=3$ ), β) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $n$  υπό σταθερές τιμές των παραμέτρων  $a$  και  $m$  ( $a=0,00001$ ,  $m=3$ ), και για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $m$  υπό σταθερές τιμές των παραμέτρων  $a$  και  $n$  ( $a=0,00001$ ,  $n=2$ ).

Παρατηρήθηκε στα προηγούμενα σχήματα ότι για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $n$  η τιμή του βαθμού κορεσμού για μύζηση 1000000 kPa γίνεται μή μηδενική, και μάλιστα μπορεί να λάβει και σημαντικές τιμές. Πράγματι όσο αυξάνεται η παράμετρος  $a$  που βρίσκεται στον παρανομαστή, τόσο προσεγγίζεται η οριακή αυτή κατάσταση ( $S_r=0$  για  $s=1000000$  kPa). Για σταθερή τιμή της παραμέτρου  $a$ , όσο μειώνεται η παράμετρος  $n$ , τόσο αυξάνονται οι τιμές του βαθμού κορεσμού για μύζηση 1000000 kPa αποκλίνοντας από την απαιτούμενη συνθήκη. Γενικά για να επιτυγχάνεται προσέγγιση της απαιτούμενης συνθήκης, πρέπει το γινόμενο των εκθετών  $n$  και  $m$  να είναι μεγαλύτερο ή ίσο της μονάδας. Αυτό μεταφράζεται στην απαίτηση για  $n \geq 1$  για την εξίσωση του Gardner (1956),  $n \geq 3$  για την εξίσωση του Burdine (1953),  $n \geq 2$  για την εξίσωση του Mualem (1976β) και  $n \cdot m \geq 1$  για την εξίσωση του van Genuchten (1980).

#### 4.4.3.3 Προσομοιώματα των Brooks & Corey (1964) και του Boltzman (1984)

Όπως προκύπτει από τις Εξ. 4.7 και 4.15, των Brooks & Corey (1964) και Boltzman (1984) αντίστοιχα, είναι οι μόνες εξισώσεις οι οποίες αν και συνεχείς, δεν είναι συνεχώς παραγωγίσιμες, αφού ο βαθμός κορεσμού τίθεται ίσος με 100%, όσο η μύζηση είναι μικρότερη της παραμέτρου  $a$ , και ακολουθεί μία εξίσωση μείωσής του όταν η μύζηση γίνει μεγαλύτερη της παραμέτρου  $a$ . Το βασικό πλεονέκτημά των δύο αυτών εξισώσεων είναι ότι η παράμετρος  $a$  έχει φυσικό νόημα –ταυτίζεται με την πίεση διείδυσης αέρα του εδαφικού υλικού- αλλά ταυτόχρονα έχουν το βασικό μειονέκτημα ότι δεν είναι συνεχώς παραγωγίσιμες, γεγονός το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε αριθμητική αστάθεια στους κώδικες που ενσωματώνονται για τιμές της μύζησης περί την πίεση διείδυσης αέρα.

Στην εξίσωση των Brooks & Corey (1964) όσο αυξάνεται η παράμετρος  $a$  η καμπύλη μετατίθεται παράλληλα κατά μήκος του άξονα της μύζησης (Σχ. 4.32α). Για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες της παραμέτρου  $a$ , ο βαθμός κορεσμού μειώνεται εκθετικά με βάση την τιμή της παραμέτρου  $n$ , τόσο πιο απότομα μάλιστα, όσο περισσότερο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου  $n$  (Σχ. 4.32β). Η παράμετρος  $n$  ονομάζεται δείκτης μεγέθους πόρων (pore size index) και συσχετίζεται με την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών. Όσο πιο ομοιογενές το μέγεθος των πόρων (άρα και το μέγεθος των κόκκων) ενός εδαφικού υλικού, τόσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου  $n$ , οπότε και γίνεται πιο απότομος ο κλάδος ξήρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στην Περιοχή II.

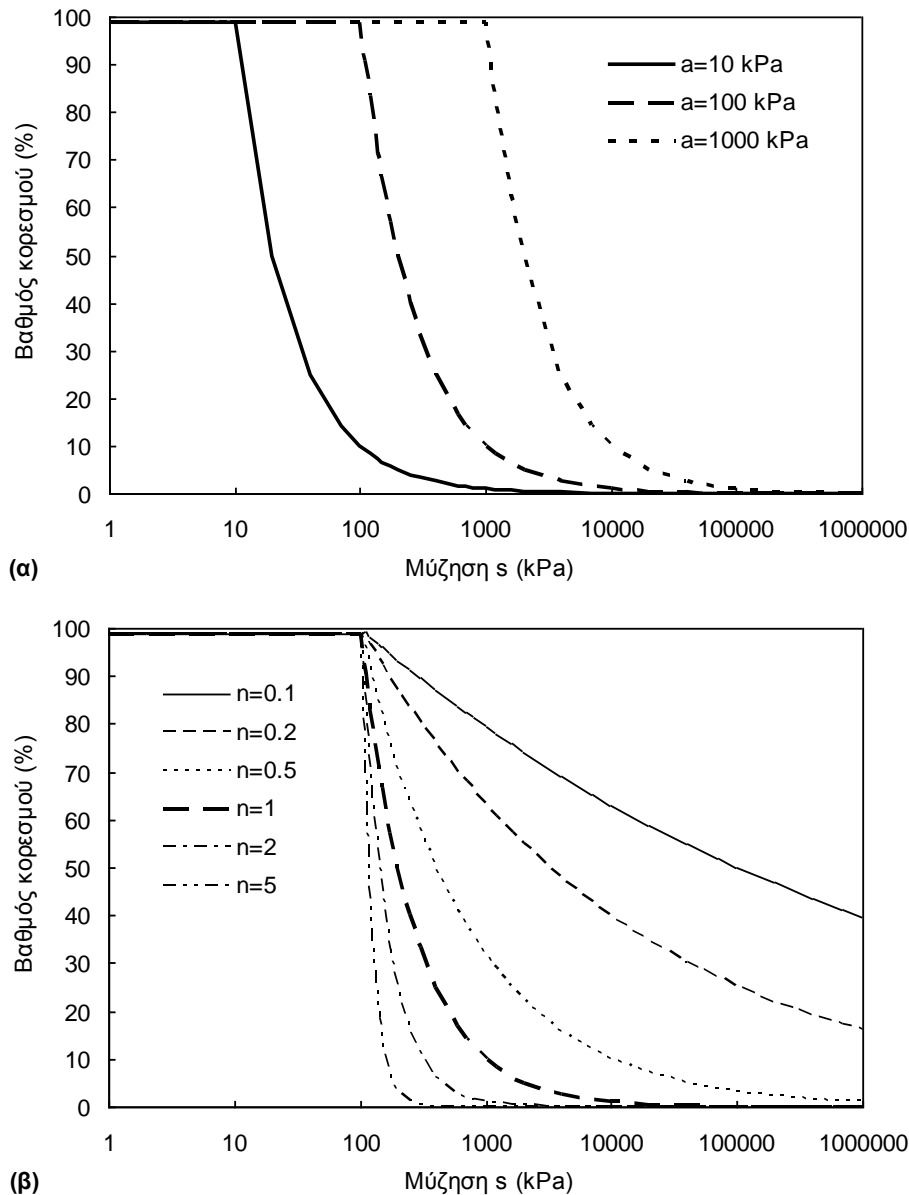
Οι McKee & Bumb (1984) πρότειναν την δική τους εξίσωση προσομοίωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, η οποία είναι γνωστή ως εξίσωση του Boltzman (1984). Και σε αυτή την εξίσωση η παράμετρος  $a$  ταυτίζεται με την πίεση διείσδυσης αέρα, αλλά εδώ και η παράμετρος  $n$  έχει τιμές μύζησης. Όσο αυξάνεται η παράμετρος  $a$  αυξάνεται η πίεση διείσδυσης αέρα της προσομοιούμενης καμπύλης αλλά και η κλίση της καμπύλης στην Περιοχή II γίνεται πιο απότομη (Σχ. 4.33α). Αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η παράμετρος  $n$ , τόσο αυξάνεται η πίεση διείσδυσης αέρα της προσομοιούμενης καμπύλης αλλά και τόσο πιο ήπια γίνεται η κλίση της (Σχ. 4.33β). Η παράμετρος  $n$  γενικά μειώνεται όσο πιο ομοιόμορφη γίνεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του εδαφικού υλικού. Όσο αυξάνεται η τιμή της τόσο μειώνεται η καμπυλότητα της προσομοιούμενης καμπύλης στην περιοχή της πίεσης διείσδυσης αέρα αλλά και του παραμένουτος ποσοστού υγρασίας (Σχ. 4.33β), επιτρέποντας έτσι πιο ομαλή μετάβαση από την Περιοχή I στην Περιοχή II και από την Περιοχή II στην Περιοχή III της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης εξίσωσης είναι ότι και οι δύο παράμετροι μεταβάλλουν όμοια χαρακτηριστικά της καμπύλης, σε αντίθεση με την εξίσωση των Brooks & Corey (1964), στην οποία είναι σαφώς διακριτή η επιρροή της μεταβολής καθενιάς από τις δύο παραμέτρους. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να επιβάλλει περισσότερες επαναλήψεις από όσες σε άλλες εξισώσεις μέχρι την επίτευξη της βέλτιστης προσέγγισης. Από την άλλη πλευρά βέβαια, η παράμετρος  $n$  έχει μονάδες μύζησης και η χρησιμοποιούμενη εξίσωση είναι από τις απλούστερες. Για να υπάρξει παράλληλη μετάθεση των καμπυλών πρέπει ο λόγος  $n/a$  να είναι σταθερός (π.χ. στο Σχ. 4.33γ έχει την τιμή 10).

Εάν αναζητηθούν οι τιμές του βαθμού κορεσμού που προβλέπονται από την Εξ. 4.15 για τιμές της μύζησης που αποτελούν το ίδιο πολλαπλάσιο της παραμέτρου  $a$  (δηλ. για τιμές  $s = \beta \cdot a$ ), τότε εάν η παράμετρος  $n$  είναι σταθερό πολλαπλάσιο της παραμέτρου  $a$  (δηλ.  $n = \gamma \cdot a$ ), προκύπτει:

$$S_r = \exp\left(\frac{a-s}{n}\right) = \exp\left(\frac{a-\beta \cdot a}{\gamma \cdot a}\right) = \exp\left(\frac{1-\beta}{\gamma}\right) = \text{σταθερό} \quad (4.21)$$

δηλαδή, για κάθε τιμή της παραμέτρου  $a$ , εφόσον ο λόγος  $n/a$  είναι σταθερός (ίσος με  $\gamma$ ) προκύπτει η ίδια τιμή του βαθμού κορεσμού για κάθε τιμή της μύζησης που αποτελεί το ίδιο πολλαπλάσιο της παραμέτρου  $a$ ,  $\beta$ , ίση με την αναφερόμενη τιμή στην Εξ. 4.21, το οποίο συνιστά και τις συνθήκες παράλληλης μετάθεσης των καμπυλών που προσομοιώνονται με την εξίσωση του Boltzman (1984).

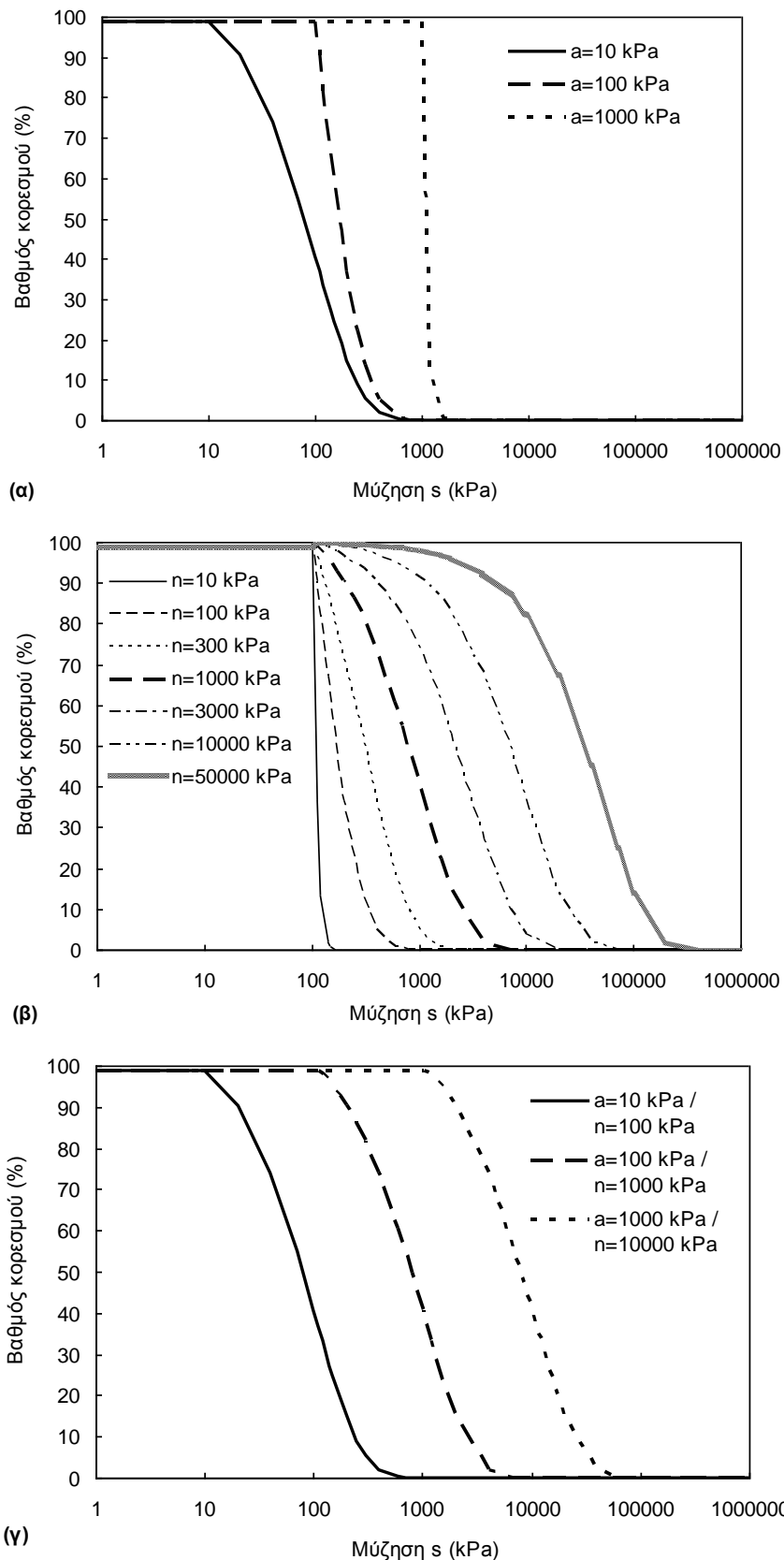




**Σχήμα 4.32.** Γραφική παράσταση της εξίσωσης των Brooks & Corey (1964) σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, α) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $n$  ( $n=1$ ), και β) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $n$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $a$  ( $a=100$  kPa).

#### 4.4.3.4 Προσομοίωμα του Fermi (1987)

Οι McKee & Bumb (1987) πρότειναν μία εναλλακτική εκθετική εξίσωση, γνωστή ως εξίσωση του Fermi (1987), η οποία αποτελεί ουσιαστικά παραλλαγή της εξίσωσης του Boltzman (1984). Η εξίσωση αυτή (Εξ. 4.17) έχει το πλεονέκτημα ότι είναι συνεχώς παραγωγίσιμη αποφεύγοντας έτσι ένα βασικό μειονέκτημα της εξίσωσης του Boltzman (1984). Και αυτή η εξίσωση έχει δύο



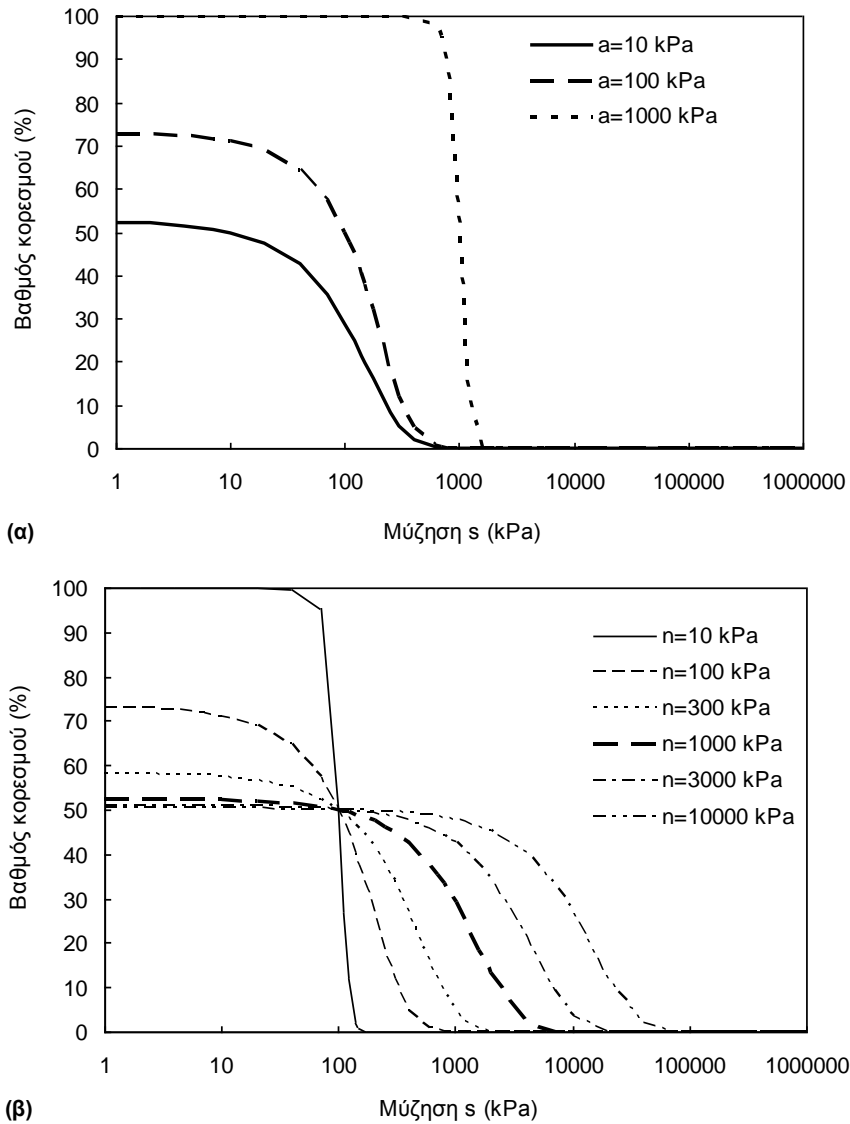
**Σχήμα 4.33.** Γραφική παράσταση της εξίσωσης του Boltzman (1984) σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, α) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $n$  ( $n=100$  kPa), β) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $n$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $a$  ( $a=100$  kPa), και για σταθερό λόγο  $n/a=10$ .

παραμέτρους, με την παράμετρο  $a$  να συσχετίζεται με την πίεση διείσδυσης αέρα και να έχει μονάδες μύζησης, όπως επίσης και η παράμετρος  $n$ , η οποία σχετίζεται με την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών.

Όσο αυξάνεται η παράμετρος  $a$  αυξάνεται η πίεση διείσδυσης αέρα της προσομοιούμενης καμπύλης αλλά και η κλίση της καμπύλης στην Περιοχή II γίνεται πιο απότομη (Σχ. 4.34α). Αντίστοιχα, όσο αυξάνεται η παράμετρος  $n$ , τόσο αυξάνεται η πίεση διείσδυσης αέρα της προσομοιούμενης καμπύλης αλλά και τόσο πιο ήπια γίνεται η κλίση της (Σχ. 4.34β). Η παράμετρος  $n$  γενικά μειώνεται όσο πιο ομοιόμορφη γίνεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του εδαφικού υλικού. Όσο αυξάνεται η τιμή της, τόσο μειώνεται η καμπυλότητα της προσομοιούμενης καμπύλης στην περιοχή της πίεσης διείσδυσης αέρα αλλά και του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας (Σχ. 4.34β), επιτρέποντας έτσι πιο ομαλή μετάβαση από την Περιοχή I στην Περιοχή II και από την Περιοχή II στην Περιοχή III της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Σημαντικό μειονέκτημα και της συγκεκριμένης εξίσωσης είναι ότι και οι δύο παράμετροι μεταβάλλουν όμοια χαρακτηριστικά της καμπύλης, σε αντίθεση με την εξίσωση των Brooks & Corey (1964), στην οποία είναι σαφώς διακριτή η επιρροή της μεταβολής καθεμιάς από τις δύο παραμέτρους. Το μειονέκτημα αυτό μπορεί να επιβάλλει περισσότερες επαναλήψεις από όσες σε άλλες εξισώσεις μέχρι την επίτευξη της βέλτιστης προσέγγισης. Μία άλλη παρατήρηση είναι ότι κατά την χρήση αυτής της εξίσωσης πρέπει οι παράμετροι  $a$  και  $n$  να σχετίζονται κατά συγκεκριμένο τρόπο προκειμένου ο βαθμός κορεσμού να μπορεί να λάβει την τιμή 100%, και συγκεκριμένα να είναι η τιμή της παραμέτρου  $n$  πολύ μικρότερη της παραμέτρου  $a$ .

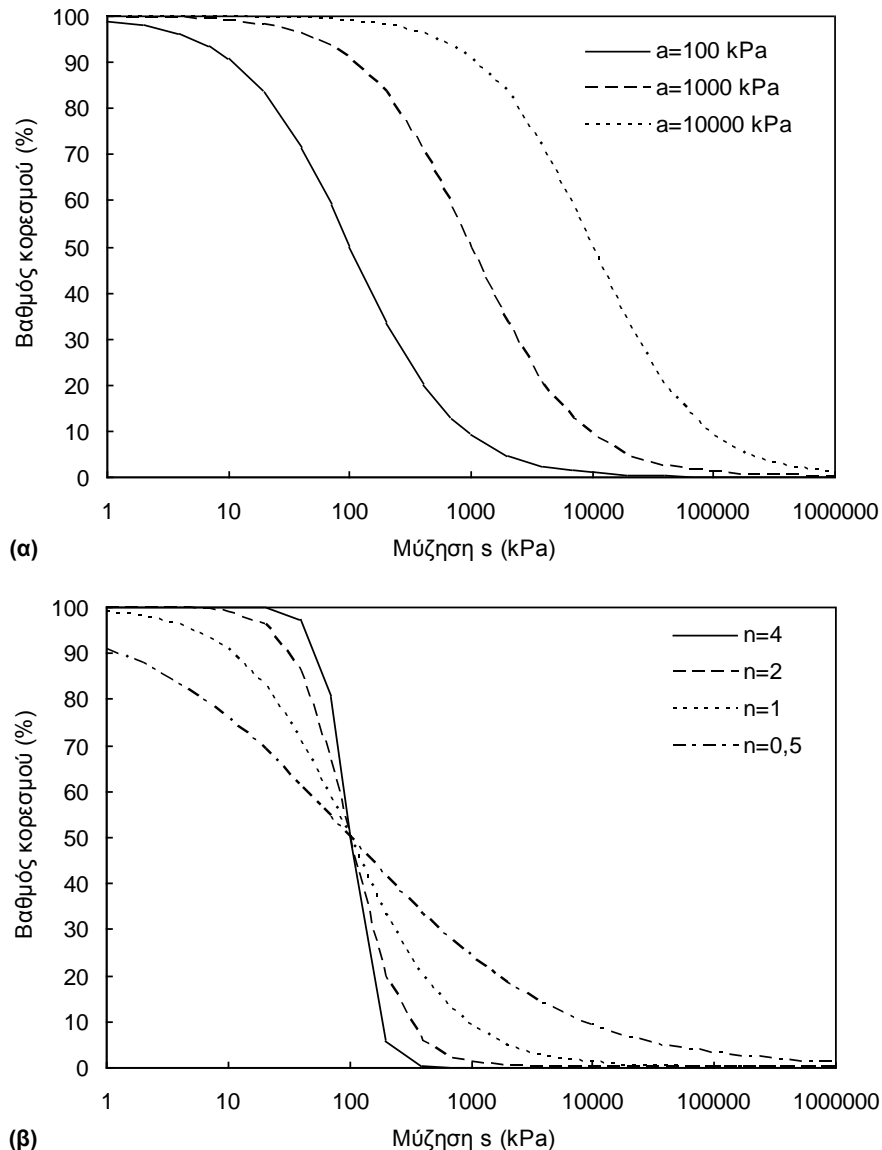
#### 4.4.3.5 Προσομοίωμα του Brutsaert (1966)

Ο Brutsaert (1966) πρότεινε μία εξίσωση προσομοίωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού βασισμένη στην εξίσωση του Gardner (1956) αλλά με παραμέτρους που έχουν φυσικό νόημα. Όπως προκύπτει από τη Εξ. 4.9, στην εξίσωση του Brutsaert (1966) η παράμετρος  $a$  διαιρεί την μύζηση  $s$  στον παρανομαστή του δεξιού μέρους (έχοντας έτσι τιμές μύζησης) και ο λόγος τους υψώνεται στην τιμή της παραμέτρου  $n$ . Η συγκεκριμένη εξίσωση μπορεί να προσομοιώσει την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όλο το εύρος τιμών της μύζησης, παρόλο που τυχόν μείωση της παραμέτρου  $a$  ή αύξηση της παραμέτρου  $n$  μπορεί να οδηγήσει την τιμή του βαθμού κορεσμού σε τιμές μικρότερες του 100% ακόμα και για πολύ



**Σχήμα 4.34.** Γραφική παράσταση της εξίσωσης του Fermi (1987) σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, α) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $n$  ( $n=100$  kPa), και β) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $n$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $a$  ( $a=100$  kPa).

μικρές τιμές της μύζησης. Το προσομοίωμα του Brutsaert (1966) έχει το πλεονέκτημα ότι η επιρροή κάθε παραμέτρου είναι ξεχωριστή, με την παράμετρο  $a$  να ρυθμίζει την τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα (Σχ. 4.35α) και την παράμετρο  $n$  να ρυθμίζει την κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (Σχ. 4.35β). Η παράμετρος  $n$  σχετίζεται με την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών και αυξάνεται όσο πιο ομοιόμορφη γίνεται η κοκκομετρική διαβάθμιση. Όσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου  $a$ , τόσο αυξάνεται η τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα στην προσομοιούμενη καμπύλη, ενώ όσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου  $n$ , τόσο πιο απότομη γίνεται η προσομοιούμενη καμπύλη στην Περιοχή II.



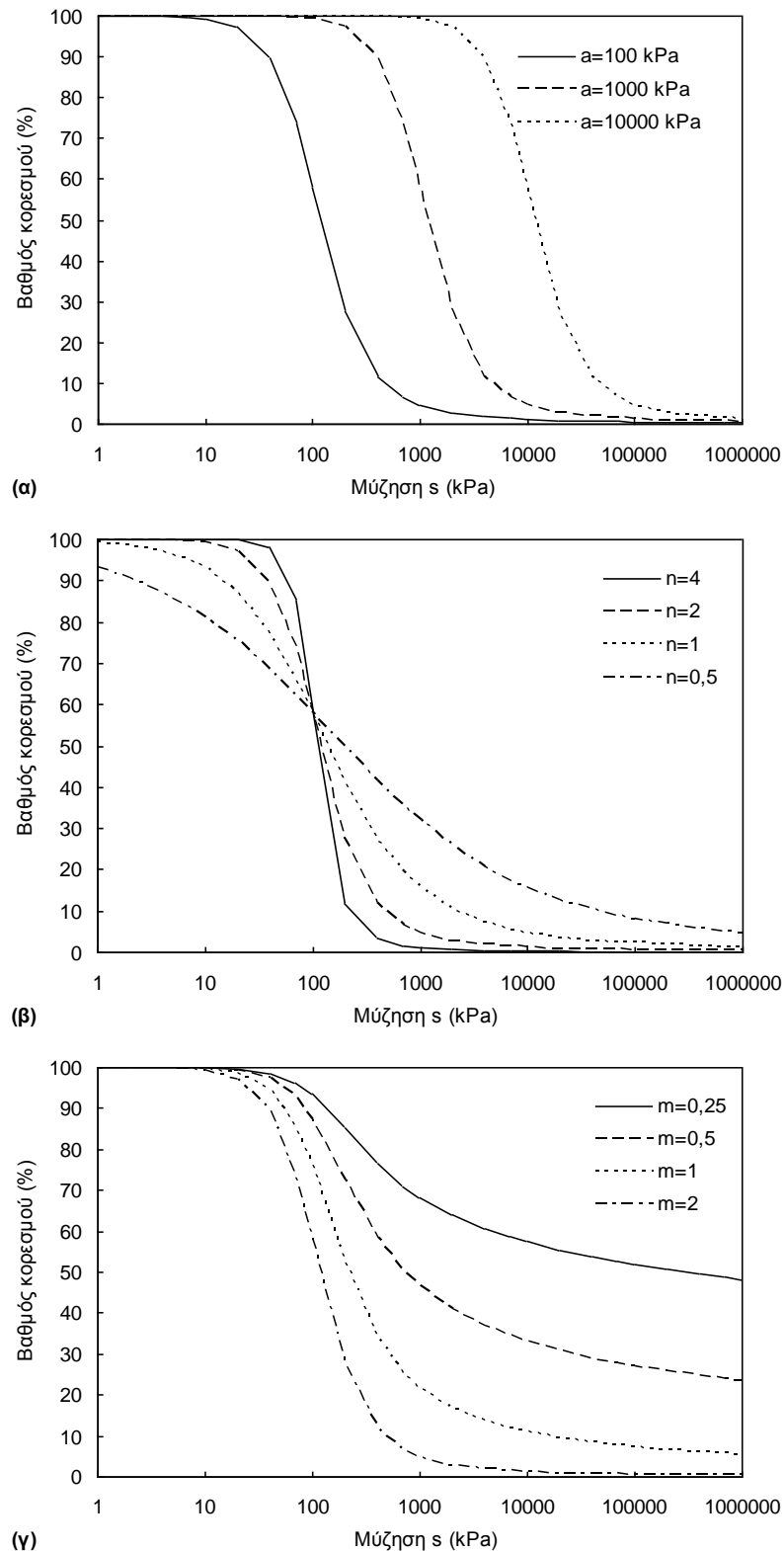
**Σχήμα 4.35.** Γραφική παράσταση της εξίσωσης του Brutsaert (1966) σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, α) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $n$  ( $n=1$ ), και β) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $n$  υπό σταθερή τιμή της παραμέτρου  $a$  ( $a=100$  kPa).

#### 4.4.3.6 Προσομοίωμα των Fredlund & Xing (1994)

Οι Fredlund & Xing (1994) πρότειναν μία συνεχώς παραγωγίσιμη εξίσωση σε όλο το εύρος των τιμών της μύζησης στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (Εξ. 4.19) με τρεις παραμέτρους προσέγγισης. Η παράμετρος  $a$  συσχετίζεται με την πίεση διείδυσης αέρα, η παράμετρος  $n$  με την καμπύλη κατανομής των πόρων του εδάφους (έμμεσα με την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης) και η παράμετρος  $m$  με την ασυμμετρία στην καμπύλη κατανομής

των πόρων του εδαφικού υλικού. Η παράμετρος  $a$  έχει μονάδες μύζησης και συσχετίζεται με την πίεση διείσδυσης αέρα των εδαφικών υλικών (έχοντας πάντα μεγαλύτερη τιμή από αυτήν), η παράμετρος  $n$  αυξάνεται τόσο περισσότερο, όσο περισσότερο ομοιόμορφοι είναι οι πόροι των εδαφικών υλικών (και κατ' επέκταση οι κόκκοι τους) και η παράμετρος  $m$  ουσιαστικά καθορίζει την τιμή του παραμένοντος βαθμού κορεσμού και την κλίση της καμπύλης στις Περιοχές II και III. Υπάρχει αλληλεμπλοκή μεταξύ της επιρροής των τριών παραμέτρων στη μορφή της προσομοιούμενης καμπύλης, αλλά είναι μάλλον ευδιάκριτη η κύρια επιρροή της κάθε μίας από τις τρεις, ενώ συνολικά η συγκεκριμένη εξίσωση είναι από τις πιο ευέλικτες στην προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (μαζί με την εξίσωση του van Genuchten). Αύξηση της παραμέτρου  $a$  προκαλεί πρακτικά παράλληλη μετάθεση της καμπύλης προς μεγαλύτερες τιμές της μύζησης (Σχ. 4.36α). Αύξηση της παραμέτρου  $n$  οδηγεί σε αύξηση της κλίσης της προσομοιούμενης καμπύλης στην Περιοχή II της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και δευτερευόντως μικρή αύξηση της πίεσης διείσδυσης αέρα και σημαντική μείωση του παραμένοντος βαθμού κορεσμού (Σχ. 4.36β). Αύξηση τέλος της παραμέτρου  $m$  οδηγεί σε μείωση του παραμένοντος βαθμού κορεσμού και δευτερευόντως σε αύξηση της κλίσης της προσομοιούμενης καμπύλης στην Περιοχή II και μείωση της κλίσης της προσομοιούμενης καμπύλης στην Περιοχή III της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.

Το προσομοίωμα των Fredlund & Xing (1994) χαίρει ιδιαίτερης αποδοχής από την γεωτεχνική κοινότητα λόγω της μεγάλης ευελιξίας του, αλλά και του διορθωτικού παράγοντα που έχει στη μορφή του που προσομοιώνει την καμπύλη κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας-μύζησης, ώστε να προκύπτει μηδενική τιμή του κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας για τιμή της μύζησης ίση με 1000000 kPa. Λόγω της εκτεταμένης χρήσης του λοιπόν και του μεγάλου αριθμού πραγματικών χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού που έχουν προσομοιωθεί με αυτό το προσομοίωμα, στην διεθνή βιβλιογραφία απαντώνται μέχρι και εμπειρικές συσχετίσεις των παραμέτρων του προσομοιώματος με φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών. Μεταξύ των πιο διαδεδομένων συσχετίσεων αυτού του είδους είναι εκείνες που προτάθηκαν από τους Zapata, et al. (2000) και παρατίθενται στον Πίν. 4.5. Προκειμένου για αργιλικά εδαφικά υλικά ( $I_p > 0$ ), η παράμετρος συσχέτισης είναι το γινόμενο του ποσοστού διερχομένων από το κόσκινο Νο. 200 με τον δείκτη πλαστικότητας,  $wPI$ , ενώ προκειμένου για κοκκώδη εδαφικά υλικά ( $I_p = 0$ ), η παράμετρος συσχέτισης είναι η διάμετρος  $D_{60}$  των εδαφικών υλικών. Το σύμβολο  $\bar{n}$  συμβολίζει τον μέσο όρο της παραμέτρου  $n$ , αφού ουσιαστικά δεν προσδιορίστηκε εμπειρική συσχέτιση για αυτή την παράμετρο από τους Zapata, et al. (2000).



**Σχήμα 4.36.** Γραφική παράσταση της εξίσωσης των Fredlund & Xing (1994) σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, α) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $a$  υπό σταθερή τιμή των παραμέτρων  $n$  και  $m$  ( $n=2$  και  $m=2$ ), β) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $n$  υπό σταθερή τιμή των παραμέτρων  $a$  και  $m$  ( $a=100$  kPa και  $m=2$ ), και γ) για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $m$  υπό σταθερή τιμή των παραμέτρων  $a$  και  $n$  ( $a=100$  kPa και  $n=2$ ).

**Πίνακας 4.5.** Εξισώσεις εμπειρικών συσχετίσεων των Zapata, et al. (2000) μεταξύ των παραμέτρων προσομοίωσης του προσομοιώματος των Fredlund & Xing (1994) και των φυσικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών.

Παράμετρος προσομοίωσης του προσομοιώματος των Fredlund & Xing (1994)	Αργιλικά εδαφικά υλικά ( $I_p > 0$ )		Κοκκώδη εδαφικά υλικά ( $I_p = 0$ )	
	a	$a = 0.00364 \cdot wPI^{3.35} + 4 \cdot wPI + 11$	(4.22)	$a = 0.8627 \cdot D_{60}^{-0.751}$
n	$n/m = -2.313 \cdot wPI^{0.14} + 5$	(4.23)	$\bar{n} = 7.5$	(4.27)
m	$m = 0.0514 \cdot wPI^{0.465} + 0.5$	(4.24)	$m = 0.1772 \cdot \ln(D_{60}) + 0.7734$	(4.28)
$s_r$	$s_r/a = 32.44 \cdot \exp(0.0186 \cdot wPI)$	(4.25)	$s_r/a = 1/(D_{60} + 9.7 \cdot \exp(-4))$	(4.29)

Οι Εξισώσεις 4.22 έως 4.29 επιτρέπουν την πρόβλεψη των παραμέτρων προσομοίωσης του προσομοιώματος των Fredlund & Xing (1994) παρέχοντας έτσι, αφενός μία πρώτη εκτίμηση για τις τιμές των παραμέτρων a, n, m και  $s_r$  από τις οποίες θα πρέπει να ξεκινήσει η επαναληπτική διαδικασία προσομοίωσης, όταν ο σκοπός είναι η προσέγγιση πειραματικών δεδομένων, και αφετέρου αυτές καθεαυτές τις τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης από τις οποίες μπορεί να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού μόνο από τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού.

Εκτός των πλεονεκτημάτων της μεγάλης ευελιξίας και της ύπαρξης εμπειρικών συσχετίσεων για την πρόβλεψη των παραμέτρων συσχέτισης από τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών, το προσομοίωμα των Fredlund & Xing (1994) έχει και ένα ακόμα κρίσιμο πλεονέκτημα. Όπως έχει γίνει φανερό μέχρι αυτό το σημείο από την μορφή των καμπυλών προσομοίωσης στα Σχ. 4.28 έως 4.36, τα μαθηματικά προσομοιώματα που παρουσιάστηκαν αντιστοιχούν σε γεωμετρικές μορφές της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού με δύο μόνο σημεία καμπής. Η εξίσωση που περιγράφει το προσομοίωμα των Fredlund & Xing (1994) έχει χρησιμοποιηθεί σήμερα για να περιγράψει και την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών και μάλιστα έχει επεκταθεί έτσι ώστε να μπορεί να προσομοιώνει καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης που αντιστοιχούν σε δύο κυρίαρχα μεγέθη κόκκων (Fredlund, et al., 2000). Κατά συνέπεια, η τροποποιημένη αυτή εξίσωση για καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης που αντιστοιχούν σε δύο κυρίαρχα μεγέθη κόκκων (βλ. Παράρτημα Α) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού με δύο κυρίαρχα μεγέθη πόρων, δηλαδή τέσσερα σημεία καμπής (βλ. §4.2.5).



## 4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού αποτελεί κεντρική έννοια στην εδαφομηχανική μη κορεσμένων εδαφών. Αποτελεί την κύρια παράμετρο που πρέπει να προσδιοριστεί εργαστηριακά ή έστω να εκτιμηθεί προκειμένου να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών. Η σημασία της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού έγκειται στο ότι επιτρέπει οι διάφορες τιμές του βαθμού κορεσμού από 0 έως 100% να συσχετιστούν με συγκεκριμένες φυσικές καταστάσεις συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης εντός των εδαφικών υλικών, οπότε να αναζητηθεί η αντίστοιχη μηχανική συμπεριφορά για την περιγραφή των μη κορεσμένων εδαφών, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια του πρώτου μέρους. Έτσι, η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού αποτελεί τη βασική έννοια για την ποιοτική περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και της κατάταξής τους ως προς το βαθμό κορεσμού. Απαντά δηλαδή στο ερώτημα που συχνά διατυπώνεται «πως κατατάσσεται ένα έδαφος ως προς ένα μέγεθος (μή κορεσμένο), όταν το μέγεθος που χρησιμοποιείται για την κατάταξη λαμβάνει τόσο εκτεταμένο εύρος τιμών;». Μή κορεσμένο δηλαδή είναι και το έδαφος εκείνο με βαθμό κορεσμού 99.99% και εκείνο με βαθμό κορεσμού 50% και εκείνο με βαθμό κορεσμού 0.001%. Μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού λοιπόν γίνεται αντιληπτή η κατάσταση συνύπαρξης της στερεάς, της υγρής και της αέριας φάσης στην οποία αντιστοιχεί κάθε μία από αυτές τις τιμές, και άρα η αντίστοιχη μηχανική συμπεριφορά, με διαφορετικό τρόπο μάλιστα για κάθε εδαφικό υλικό ανάλογα με τη δική του χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, η οποία συνιστά χαρακτηριστική ιδιότητα κάθε εδαφικού υλικού και καθορίζεται από τις φυσικές του ιδιότητες και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται.

Τα σημεία καμψής επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού περιγράφουν τα σημεία κατά τα οποία έχουμε ραγδαίες αλλαγές της συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης των πόρων και συνακόλουθα της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών. Το συνηθισμένο σχήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι αυτό της ανάστροφης «σιγμοειδούς» καμπύλης με τα δύο σημεία καμψής της να αντιστοιχούν σε δύο χαρακτηριστικά φυσικά μεγέθη και να οριοθετούν τρεις περιοχές μεταξύ των ακραίων καταστάσεων που αντιστοιχούν στα πλήρως κορεσμένα και στα απολύτως ξηρά εδάφη. Το πρώτο σημείο καμψής αντιστοιχεί στην πίεση διείδυσης αέρα και το δεύτερο στο παραμένον ποσοστό υγρασίας (residual water content). Στην περιοχή που ορίζεται μεταξύ πλήρους κορεσμού ( $u_a - u_w = 0$ ) και πίεσης διείδυσης αέρα (Περιοχή I), το έδαφος είναι πρακτικά πλήρως κορεσμένο, έχουμε αρνητική πίεση πόρων ασκούμενη ολόπλευρα στο στερεό σκελετό και ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων. Στην

περιοχή περί την πίεση διείσδυσης αέρα, ο αέρας των πόρων βρίσκεται υπό τη μορφή διακριτών φυσαλίδων, ενώ αμέσως μετά από αυτό το στάδιο η αέρια φάση των πόρων γίνεται συνεχής, συνυπάρχοντας με τη συνεχή υγρή φάση των πόρων ως τη μύζηση που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας (Περιοχή II). Από την τιμή αυτή της μύζησης και μετά η υγρή φάση του εδαφικού υλικού χάνει τη συνέχειά της και η κίνηση του νερού εντός των πόρων γίνεται με αυτό σε μορφή υδρατμών (Περιοχή III). Εκτός από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με το συνηθισμένο σχήμα της ανάστροφης σιγμοειδούς καμπύλης υπάρχουν και χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με περισσότερα των δύο σημεία καμπής, οι οποίες αντιστοιχούν σε εδαφικά υλικά με δύο κυρίαρχα μεγέθη πόρων.

Το κοινό χαρακτηριστικό που προκύπτει για την μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και των μεγεθών που την περιγράφουν είναι ότι όσο μειώνεται ο λόγος κενών του εδαφικού υλικού κατά την έναρξη της ξήρανσης, τόσο αυξάνεται η ικανότητα συγκράτησης ύδατος του εδαφικού υλικού, η οποία εκδηλώνεται με την ικανότητα διατήρησης μεγαλύτερης τιμής του βαθμού κορεσμού υπό την ίδια τιμή της μύζησης. Αυτό εκδηλώνεται σαφώς με την αύξηση της τάσης προστεροποίησης στο ίδιο υλικό, αλλά και την αύξηση της τάσης υπό την οποία γίνεται ο κορεσμός συμπυκνωμένων εδαφών, αφού και οι δύο αυτοί παράγοντες προκαλούν μείωση του αρχικού λόγου κενών. Ειδικά σε ό,τι αφορά τα συμπυκνωμένα εδάφη, η ικανότητα συγκράτησης ύδατος αυξάνεται με την αύξηση της υγρασίας συμπύκνωσης, ακόμα και για αύξηση πέραν της βέλτιστης, επειδή με την αύξηση της υγρασίας συμπύκνωσης οι πόροι των εδαφικών υλικών μεταξύ συσσωματωμάτων αργιλικών πλακιδίων και κόκκων μειώνονται σε μέγεθος, παύουν να συνδέονται, και κυριαρχεί πλέον το μέγεθος των πόρων εντός και όχι μεταξύ των συσσωματωμάτων στον καθορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του υλικού. Τέλος, σε ό,τι αφορά τα φυσικά εδαφικά υλικά, εκεί κυρίαρχη παράμετρος στον καθορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού καθίσταται αυτή καθεαυτή η δομή τους παρά το μέγεθος των πόρων τους και τα συνολικά κενά τους όπως επιδείχθηκε στην περίπτωση της Μάργας Κορίνθου, για την οποία το φυσικό εδαφικό υλικό βρέθηκε να διατηρεί μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης ύδατος από το αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο υλικό στον ίδιο αρχικό λόγο κενών με το φυσικό υλικό πριν την έναρξη της ξήρανσης. Σε ό,τι αφορά τους κλάδους ύγρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, εκτιμάται ότι ακολουθούν την αντίστροφη εξέλιξη των κλάδων ξήρανσης. Όπως δηλαδή οι κλάδοι ξήρανσης απομακρύνονται από μία αρχική θέση τόσο περισσότερο, όσο αυξάνεται η τάση προστεροποίησης, ή η υγρασία συμπύκνωσης, ή η δομή του φυσικού υλικού, έτσι αναμένεται

ότι οι κλάδοι ύγρανσης απομακρύνονται από μία αρχική θέση κατά την ύγρανση όσο αυξάνονται τα ίδια μεγέθη, αλλά από την αντίθετη πλευρά.

Η κατάστρωση της κατάλληλης εργαστηριακής διάταξης για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι ιδιαίτερης σημασίας αφού πρακτικά όλες οι μέθοδοι προσδιορισμού είναι αρκετά πολύπλοκες και οδηγούν σε σημαντική διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων. Η προσπάθεια ελαχιστοποίησης αυτής είναι ιδιαίτερης σημασίας αφού όπως επισημάνθηκε υπάρχουν εδαφικά υλικά με χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με περισσότερα από δύο σημεία καμπής. Τυχόν μεγάλες αποκλίσεις λοιπόν στα πειραματικά αποτελέσματα κατά τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού μπορεί να οδηγήσουν στη λανθασμένη αναγνώριση της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Προκειμένου να αποφευχθούν τέτοιου είδους σφάλματα είναι σκόπιμη η συνεκτίμηση όλων των διαθέσιμων στοιχείων για το εδαφικό υλικό (για παράδειγμα της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισής του) και η επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων, είτε μέσω της επανάληψης του προσδιορισμού διαφόρων σημείων της καμπύλης, είτε μέσω της πύκνωσης των σημείων της καμπύλης, ώστε να διαφανούν τυχόν σημεία αυτής που αποκλίνουν σημαντικά της γενικότερης μορφής της καμπύλης.

Η επιλογή του κατάλληλου μαθηματικού προσομοιώματος για την καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι επίσης ιδιαίτερης σημασίας. Εφόσον τα πειραματικά αποτελέσματα περιορίζονται σε μικρό εύρος τιμών μύζησης, συνήθως μικρές τιμές που μόλις ξεπερνούν την πίεση διείσδυσης αέρα του εδαφικού υλικού, τα περισσότερα μαθηματικά προσομοιώματα επαρκούν για την επίτευξη καλής προσέγγισης. Αν αντίθετα τα πειραματικά αποτελέσματα εκτείνονται σε μεγαλύτερο εύρος τιμών μύζησης (ως προς τα χαρακτηριστικά σημεία της καμπύλης), τότε πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή του μαθηματικού προσομοιώματος που θα χρησιμοποιηθεί. Προτείνεται γενικά η χρήση μαθηματικών προσομοιωμάτων με τρεις παραμέτρους και κατά προτίμηση με διορθωτικό παράγοντα ως προς την τιμή της μύζησης για μηδενικό ποσοστό υγρασίας. Στην περίπτωση χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού με περισσότερα των δύο σημεία καμπής μόνο το μαθηματικό προσομοίωμα των Fredlund & Xing (1994), επεκτεταμένο όπως επέδειξαν οι Fredlund, et al. (2000) μπορεί να εξασφαλίσει ικανοποιητική προσέγγιση για όλο το εύρος τιμών μύζησης. Τέλος, γενικά προτιμάται η χρήση προσομοιωμάτων με παραμέτρους που έχουν φυσικό νόημα. Μεταξύ παραμέτρων με δύο και τρεις παραμέτρους δεν συμβαίνει πάντα να προσδιορίζονται ευκολότερα οι τιμές των παραμέτρων των προσομοιωμάτων με δύο παραμέτρους, αφού αυτά

είναι λιγότερο ευέλικτα στην προσομοίωση χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού με μή συμμετρική καμπύλη κατανομής κενών των εδαφικών υλικών, ενώ υφίσταται ακόμα και το ενδεχόμενο δυσκολίας ανεύρεσης μοναδικού ζεύγους τιμών προσομοίωσης. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για την αποφυγή επιλογής τιμών παραμέτρων που οδηγούν σε μη ρεαλιστικές τιμές του βαθμού κορεσμού (μικρότερες του 100% για πολύ μικρές τιμές της μύζησης και σημαντικά μεγαλύτερες του 0 για πολύ μεγάλες τιμές της μύζησης, ακόμα και 1000000 kPa).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΟΓΚΟΥ ΣΤΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα προηγούμενα κεφάλαια επεξηγήθηκε η φύση των μή κορεσμένων εδαφών, η μύζηση και ο τρόπος ορισμού των παραμέτρων τάσης σε αυτά. Παρουσιάστηκε και επεξηγήθηκε επίσης η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού καθώς και οι τρόποι μέτρησης και ελέγχου της μύζησης. Από το παρόν κεφάλαιο και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της *μηχανικής συμπεριφοράς* των μή κορεσμένων εδαφών και πιο συγκεκριμένα οι μεταβολές όγκου στα μή κορεσμένα εδάφη (στο παρόν κεφάλαιο), η διατμητική αντοχή των μή κορεσμένων εδαφών (στο Κεφ. 6) και η διαπερατότητά τους ως προς το νερό και τον αέρα (στο Κεφ. 7) και η επιρροή της στην υπόγεια ροή στα μή κορεσμένα εδάφη.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται πρώτα, εν συντομία και για λόγους πληρότητας, τα βασικά χαρακτηριστικά των μεταβολών όγκου των πλήρως κορεσμένων εδαφών και στη συνέχεια τα χαρακτηριστικά των μεταβολών όγκου των μή κορεσμένων εδαφών. Η μελέτη των μεταβολών όγκου των μή κορεσμένων αλλά και των μερικώς κορεσμένων εδαφών είχε «εγκλωβιστεί» για μεγάλο χρονικό διάστημα στον διαχωρισμό των εδαφών σε *καταρρεύσιμα* (collapsible) και *διογκώσιμα* (expansive), που μεταφραζόταν στη συνέχεια στην αντίστοιχη διαχείριση του προβλήματος των μεταβολών όγκου. Σήμερα πλέον έχει γίνει κατανοητό ότι αυτός ο διαχωρισμός αφορά όχι στα εδαφικά υλικά αλλά στη *μηχανική συμπεριφορά τους υπό δεδομένες συνθήκες*, και γι' αυτό οφείλουμε να διαχωρίζουμε σε *καταρρεύσιμη και διογκώσιμη συμπεριφορά*, η οποία είναι δυνατόν να εμφανιστεί στο ίδιο εδαφικό υλικό ανάλογα με την εντατική κατάσταση στην οποία βρίσκεται, τη δομή του και την ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρυνσης. Η πρόοδος αυτή στην κατανόηση του μηχανισμού των μεταβολών όγκου στα μή κορεσμένα και στα μερικώς κορεσμένα εδάφη έχει φτάσει στη διατύπωση

ολοκληρωμένων καταστατικών προσομοιωμάτων που περιγράφουν και προβλέπουν τη μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη συναρτήσει της εντατικής κατάστασης και των υπολοίπων παραγόντων που επηρεάζουν και προαναφέρθηκαν.

Έτσι μετά από τη σύντομη περιγραφή των μεταβολών όγκου στα πλήρως κορεσμένα εδάφη, επεξηγείται αρχικά η έννοια των χαρακτηρισμών «καταρρεύσιμα» και «διογκώσιμα» εδάφη και ακολουθεί η παρουσίαση των μεταβολών όγκου σε μη κορεσμένα εδάφη συναρτήσει μεταβολών της μύζησης υπό μηδενική τάση και η παρουσίαση των μεταβολών όγκου υπό ταυτόχρονες μεταβολές της τάσης και της μύζησης, ή υπό σταθερές μη μηδενικές τιμές του ενός μεγέθους για μεταβολές του άλλου. Παρουσιάζονται επίσης οι εργαστηριακές μέθοδοι προσδιορισμού των παραμέτρων συμπιεστότητας υπό ελεγχόμενη μύζηση.

Τα Κεφάλαια 5, 6 και 7, στα οποία περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών, ολοκληρώνονται το καθένα με μία πρακτική εφαρμογή της αναγκαιότητας κατανόησης της επιρροής του μερικού κορεσμού στο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό της μηχανικής συμπεριφοράς. Έτσι, το παρόν κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση της αξιολόγησης δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης σε αρχικά πλήρως και μη κορεσμένα εδάφη και της μελέτης της επιρροής του μερικού κορεσμού στην παρατηρούμενη συμπεριφορά και στην εξέλιξη των παραμέτρων συμπιεστότητας με τον αρχικό βαθμό κορεσμού. Η συγκεκριμένη εφαρμογή συμβάλει επίσης και στην επίδειξη της ύπαρξης καταρρεύσιμης και διογκώσιμης συμπεριφοράς αντί για καταρρεύσιμα και διογκώσιμα εδάφη.

Όπως έγινε και στο Κεφ. 4, σε ορισμένα σημεία του Κεφ. 5 παρουσιάζονται αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, προς επίδειξη των γενικών αρχών που παρουσιάζονται και επεξηγούνται στο Κεφ. 5. Η αναλυτική παρουσίαση των φυσικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές αυτές, της προετοιμασίας των δοκιμών και αυτών καθεαυτών των αποτελεσμάτων των δοκιμών γίνεται στα αντίστοιχα κεφάλαια του δεύτερου μέρους της διατριβής.

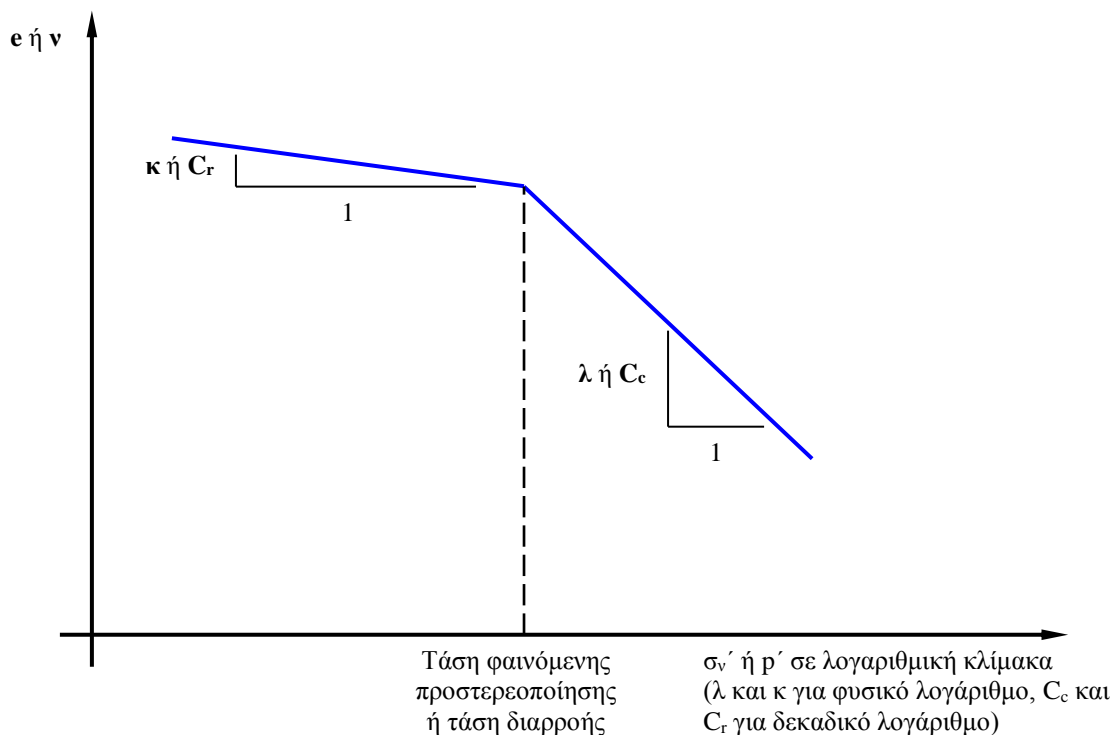
## 5.2 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΟΓΚΟΥ ΠΛΗΡΩΣ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Αναλυτική παρουσίαση των μεταβολών όγκου των πλήρως κορεσμένων εδαφών υπό διάφορες εντατικές καταστάσεις και συνθήκες φορτίσεως υπερβαίνει το σκοπό του παρόντος κεφαλαίου και το αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Μία σύντομη αναφορά ωστόσο στις μεταβολές όγκου των πλήρως κορεσμένων εδαφών κρίνεται σκόπιμη προς υπενθύμιση βασικών εννοιών και αναγνώριση κοινών σημείων με τις μεταβολές όγκου για μεταβολές της μύζησης στη συνέχεια.

Προκειμένου για αργιλικά εδαφικά υλικά, η χρήση των παραμέτρων ογκομετρικών μεταβολών προ και μετά της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης (ή τάσης διαρροής)  $\lambda$  και  $\kappa$  αντίστοιχα, ή  $C_c$  και  $C_r$  αντίστοιχα, ανάλογα με την λογαριθμική κλίμακα του άξονα της τάσης (φυσική ή δεκαδική αντίστοιχα), επιτρέπει τον προσδιορισμό των μεταβολών του λόγου κενών  $e$  ή του ειδικού όγκου  $v$ , και από αυτές τον προσδιορισμό των μεταβολών όγκου ανάλογα με τις συνθήκες φορτίσεως. Το γενικό πλαίσιο της εξέλιξης των ογκομετρικών μεταβολών των αργιλικών εδαφικών υλικών παρουσιάζεται στο Σχ. 5.1. Η καμπύλη εξέλιξης του λόγου κενών ή του ειδικού όγκου με την αύξηση της τάσης (σε λογαριθμική κλίμακα) των φυσικών αργιλικών εδαφών παρουσιάζει αρχικά έναν γραμμικό κλάδο μικρότερης κλίσης (δείκτης επαναφόρτισης ή αποφόρτισης  $C_r$  ή  $\kappa^1$ ) μέχρι την τάση διαρροής, από την τιμή της οποίας και μετά, η κλίση της καμπύλης γίνεται μεγαλύτερη (δείκτης συμπίεσης  $C_c$  ή  $\lambda$ ). Οι μεταβολές όγκου πριν από την τάση διαρροής είναι ελαστικές, ενώ μετά από αυτήν πλαστικές.

Η τάση διαρροής μπορεί να οφείλεται στην προστερεοποίηση των αργιλικών εδαφών, οπότε ονομάζεται τάση προστερεοποίησης ή προφόρτισης και ταυτίζεται με τη μέγιστη τάση υπό την οποία βρέθηκαν ποτέ τα εδαφικά υλικά, στη φυσική σιμέντωσή τους, σε φαινόμενα ερπυσμού, θιξοτροπίας κ.λπ. ή –όπως είναι και το πιο συνηθισμένο προκειμένου για φυσικά εδάφη– σε συνδυασμούς όλων αυτών των παραγόντων, οι οποίοι δημιουργούν τη *δομή* των εδαφικών υλικών. Από την άλλη πλευρά, οι αναζυμωμένες άργιλοι δεν έχουν δομή και δεν παρουσιάζουν τάση διαρροής κατά τη συμπίεσή τους. Αυτές παρασκευάζονται στο εργαστήριο με την ανάμιξη αργίλου φυσικής ή τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης με νερό και τη μηχανική διάσπαση των συσσωματωμάτων των κόκκων και των πλακιδίων αυτής κατά τη διαδικασία της

<sup>1</sup> Ο δείκτης αποφόρτισης προκύπτει κατά την αποφόρτιση ενός εδαφικού υλικού και ο δείκτης επαναφόρτισης κατά την επαναφόρτισή του μετά από αποφόρτιση. Συνήθως καταγράφεται μικρή υστέρηση μεταξύ κλάδου αποφόρτισης



**Σχήμα 5.1.** Μεταβολές λόγου κενών αργλικού εδαφικού υλικού συναρτήσει της κατακόρυφης ή της μέσης τάσης (με αυτό το μέγεθος σε λογαριθμική κλίμακα).

ανάμειξης. Αυτή η ανάμειξη καταλήγει στη δημιουργία ενός πολτού (slurry) υψηλού ποσοστού υγρασίας σε σχέση με το όριο υδαρότητας του υλικού, στον οποίο έχουν διασπαστεί εντελώς τα συσσωματώματα των κόκκων και των πλακιδίων. Ο πολτός αυτός προσομοιάζει στο ίζημα από το οποίο προήλθαν φυσικές ιζηματογενείς άργιλοι και οι ιδιότητές του είναι αυτές που εξαρτώνται μόνο από τα εγγενή (intrinsic) χαρακτηριστικά των αργίλων αυτών, δηλ. την κοκκομετρική διαβάθμιση και την ορυκτολογική σύσταση, και όχι την κάθε είδους δομή που αυτές αποκτούν κατά τη γεωλογική τους ιστορία από τη δημιουργία του ιζήματος και μετά (Burland, 1990). Οι ιδιότητες των αναζυμωμένων αργίλων και το θεωρητικό πλαίσιο της μελέτης τους επεξηγούνται αναλυτικά στο Κεφ. 10 του δεύτερου μέρους της διατριβής, ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης που πραγματοποιήθηκαν σε αναζυμωμένες αργίλους στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσιάζονται στο Κεφ. 13.

Ακριβώς επειδή στα φυσικά εδαφικά υλικά η τάση διαρροής στην οποία παρατηρείται η μετάβαση από μία παράμετρο μικρών (και αναστρέψιμων) μεταβολών λόγου κενών (δείκτης

και κλάδου επαναφόρτισης οδηγώντας σε διαφορετικές τιμές των δύο δεικτών (κυμαινόμενες μάλιστα με την τάση). Συνήθως όμως για υπολογισμούς και προσομοιώματα οι τιμές των δύο δεικτών λαμβάνονται ίσες.

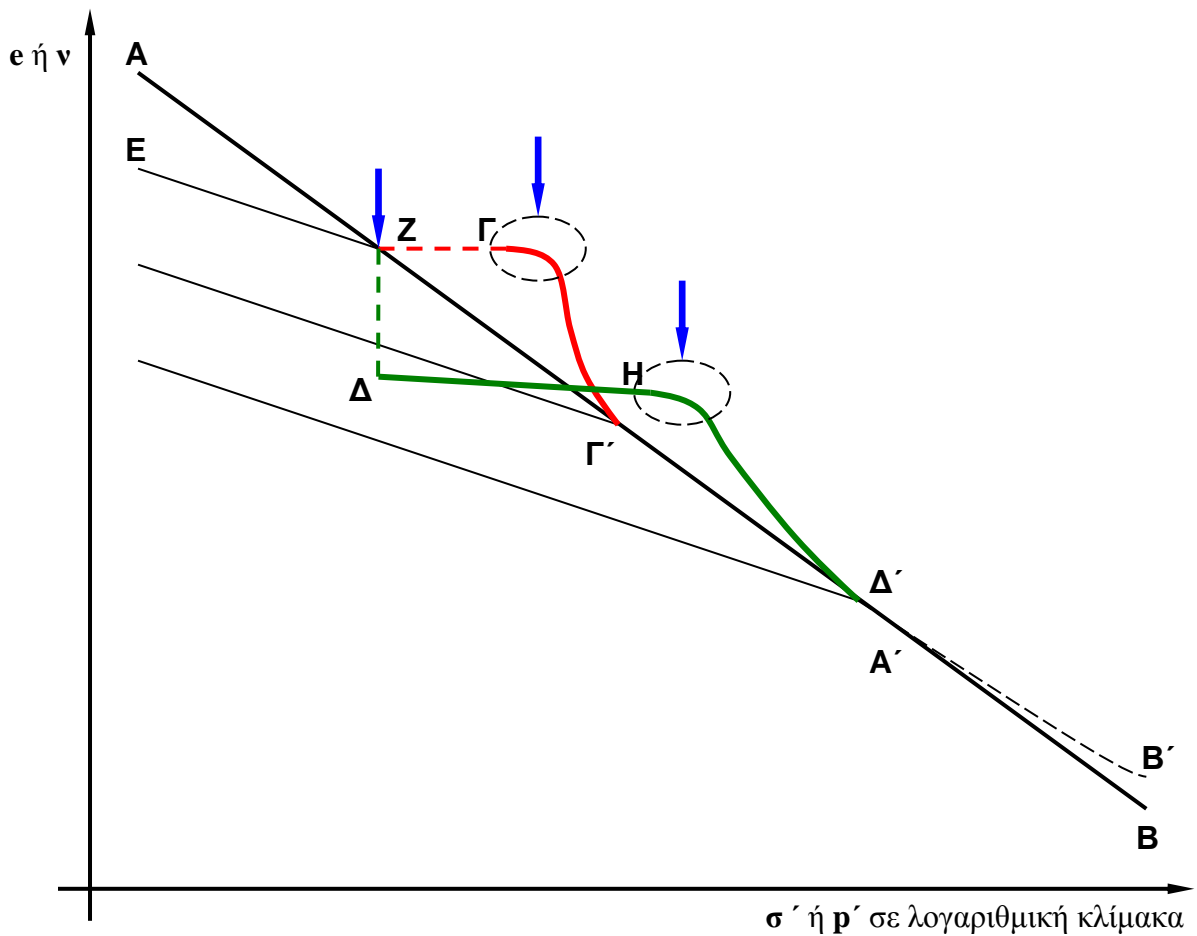


επαναφόρτισης) σε μία παράμετρο μεγάλων (και μή αναστρέψιμων) μεταβολών του λόγου κενών (δείκτης συμπίεσης) οφείλεται συνήθως σε περισσότερους από έναν παράγοντες από αυτούς που προαναφέρθηκαν, οι Bardanis & Kanvadas (2003b) πρότειναν να ονομαστεί η τάση αυτή *τάση φαινόμενης προστεροποίησης*, όρος που θα χρησιμοποιείται εφεξής στο κείμενο της διατριβής. Η σκοπιμότητα χρήσης του όρου αυτού για πλήρως κορεσμένα εδάφη και γενίκευσής του και για μη κορεσμένα εδάφη επεξηγείται αναλυτικά στη συνέχεια του Κεφ. 5.

Για πολύ υψηλές τιμές της τάσης ο κλάδος *παρθένας συμπίεσης* (virgin compression), δηλ. ο κλάδος συμπίεσης μετά την τάση φαινόμενης προστεροποίησης, μπορεί να πάψει να είναι γραμμικός σε διαγράμματα λόγου κενών ή ειδικού όγκου-τάσης, με την τάση σε λογαριθμική κλίμακα (και ενδεχομένως να είναι γραμμικός σε διαγράμματα που βρίσκονται και οι δύο παράμετροι σε λογαριθμική κλίμακα). Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει και σε αναζυμωμένες αργίλους όταν συμπιέζονται μέχρι πολύ υψηλές τιμές της τάσης, ή συνηθέστερα σε σιμεντωμένα εδαφικά υλικά ακόμα και σε μικρότερες τιμές της τάσης, όταν ο κλάδος συμπίεσης που ακολουθεί την τάση διαρροής συναντά τον κλάδο συμπίεσης που αντιστοιχεί στο ίδιο υλικό αναζυμωμένο. Η παρατήρηση αυτή επεξηγείται στο Σχ. 5.2, όπως άλλωστε και η συσχέτιση μεταξύ της συμπίεσότητας των αναζυμωμένων αργιλικών εδαφών και των αργιλικών εδαφών με δομή που οφείλεται σε προστεροποίηση, σιμέντωση και ερπυσμό.

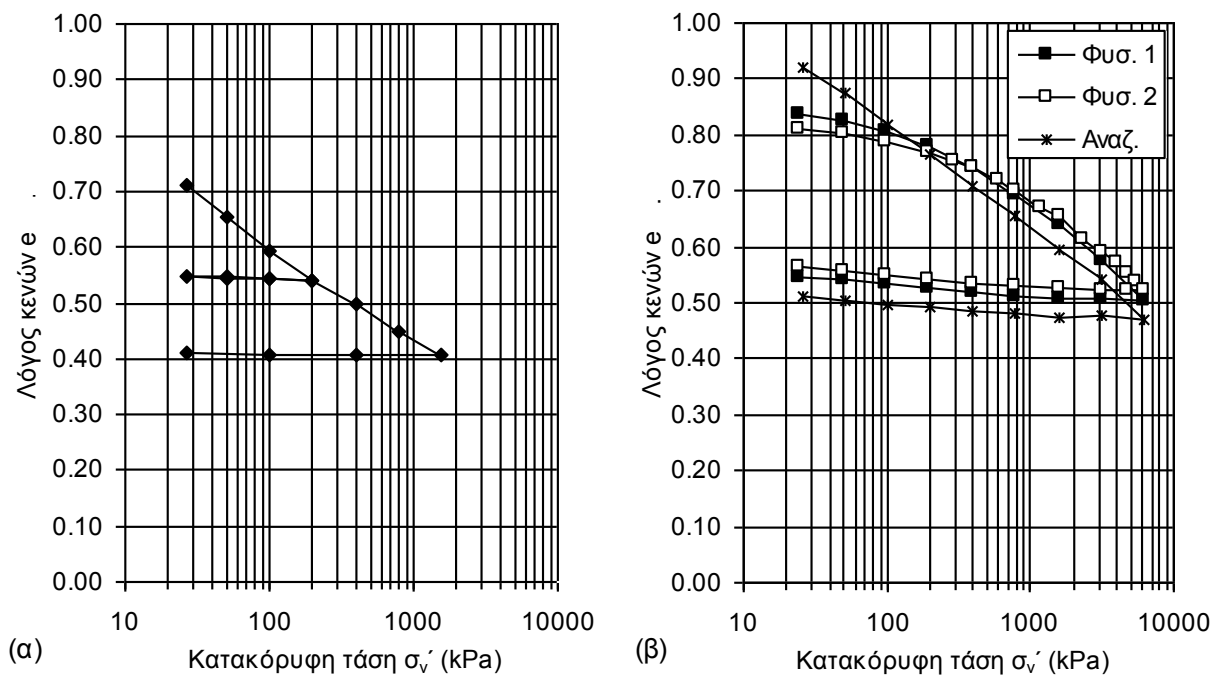
Στο Σχ. 5.2 παρουσιάζεται η καμπύλη λόγου κενών-τάσης ενός αναζυμωμένου αργιλικού εδάφους (καμπύλη AA'B) θεωρούμενη χάριν απλούστευσης γραμμική<sup>2</sup> στο μεγαλύτερο εύρος των τιμών της τάσης, και δείχνεται και ενδεχόμενος μη γραμμικός κλάδος στο εύρος υψηλών τάσεων (καμπύλη AA'B'). Εδαφικό υλικό που έχει υποστεί *μόνο* προστεροποίηση με μέγιστη τάση αυτή που αντιστοιχεί στο σημείο Z και σήμερα βρίσκεται σε τάση που αντιστοιχεί στο σημείο E, θα ακολουθήσει την καμπύλη EZA'B (ή A'B') κατά τη νέα φόρτισή του με τάση διαρροής ίση με την τάση προστεροποίησης στο σημείο Z. Εδαφικό υλικό το οποίο έχει υποστεί σιμέντωση ευρισκόμενο στην τάση που αντιστοιχεί στο σημείο Z θα ακολουθήσει την καμπύλη ZΓΓ'A'B (ή A'B') κατά τη φόρτισή του με τάση διαρροής που αντιστοιχεί στην περιοχή του σημείου Γ και την ακολουθεί κλάδος πολύ απότομης κλίσης μέχρι η καμπύλη να συναντήσει και πάλι την καμπύλη συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού. Τέλος, εδαφικό υλικό το οποίο έχει υποστεί ερπυσμό ευρισκόμενο στην τάση που αντιστοιχεί στο σημείο Z θα ακολουθήσει την καμπύλη ΔΗΔ'A'B (ή A'B') κατά τη φόρτισή του με τάση διαρροής που

<sup>2</sup> Το αντικείμενο της γραμμικότητας των καμπυλών συμπίεσης των αναζυμωμένων αργιλικών εδαφών αναπτύσσεται και διερευνάται διεξοδικά στα Κεφ. 10 (αναλυτική διερεύνηση) και 13 (πειραματική διερεύνηση).



**Σχήμα 5.2.** Συσχέτιση μεταβολών λόγου κενών αναζυμωμένων αργιλικών εδαφών και αργιλικών εδαφών που έχουν υποστεί προστερεοποίηση, σιμέντωση ή ερπυσμό συναρτήσει της κατακόρυφης ή της μέσης τάσης.

αντιστοιχεί στο σημείο Η και την ακολουθεί κλάδος πολύ απότομης κλίσης μέχρι η καμπύλη να συναντήσει και πάλι την καμπύλη συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού. Κοινό σημείο των περιπτώσεων που τα εδαφικά υλικά έχουν υποστεί ερπυσμό ή σιμέντωση είναι η ύπαρξη κλάδου απότομης κλίσης μετά την τάση διαρροής των καμπυλών συμπίεσής τους και η εμφάνιση τμήματος της καμπύλης συμπίεσης στην περιοχή που ο απότομος αυτός κλάδος συναντά τον κλάδο της καμπύλης συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού με έντονη καμπυλότητα. Αυτή η μη γραμμικότητα εντοπίζεται λοιπόν και σε μικρότερες τιμές τάσης από τη μη γραμμικότητα που παρουσιάζεται ακόμα και σε αναζυμώμενα εδαφικά υλικά στην περιοχή πολύ υψηλών τάσεων. Παραδείγματα για ορισμένα από τα προαναφερθέντα παρουσιάζονται στο Σχ. 5.3. Στο Σχ. 5.3α παρουσιάζεται η καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμιο Αργίλου Χανίων μετά από αναζύμωση, συμπίεση ως τα 200 kPa, αποφόρτιση ως τα 25 kPa και επαναφόρτιση ως τα 1600



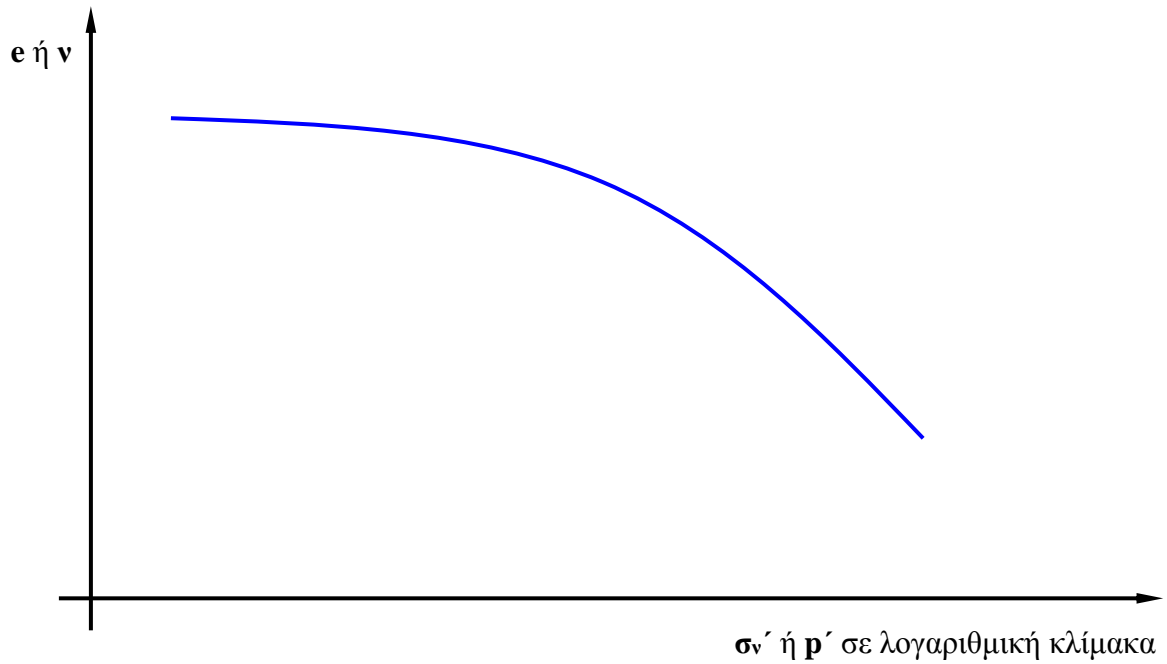
**Σχήμα 5.3.** Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης α) σε δοκίμια Αργίλου Χανίων μετά από αναζύμωση, συμπίεση ως τα 200 kPa, αποφόρτιση ως τα 25 kPa και επαναφόρτιση ως τα 1600 kPa, και β) σε δοκίμια αναζυμωμένης Μάργας Κορίνθου (Αναζ.) και φυσικής από αδιατάρακτα δείγματα υψηλής ποιότητας (Φυσ. 1 και Φυσ. 2) με μέγιστη φόρτιση ως τα 6400 kPa.

kPa, και στο Σχ. 5.3β παρουσιάζονται καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια αναζυμωμένης Μάργας Κορίνθου (δοκιμή «Αναζ.») και φυσικής από αδιατάρακτα δείγματα υψηλής ποιότητας (δοκιμές «Φυσ. 1» και «Φυσ. 2») με φόρτιση ως τα 6400 kPa. Το δοκίμιο της Αργίλου Χανίων στον κλάδο της επαναφόρτισης από τα 25 kPa είναι προστερεοποιημένο με τάση προστερεοποίησης 200 kPa, η οποία συνιστά και την τάση διαρροής του κατά την επαναφόρτιση. Τα δοκίμια της φυσικής Μάργας Κορίνθου από την άλλη πλευρά είναι σιμεντωμένα με αποτέλεσμα οι κλάδοι μονοδιάστατης συμπίεσης των δοκιμίων αυτών να ξεκινούν από θέση κάτω από την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού αρχικά και στη συνέχεια, κατά τη φόρτιση να μπορούν να αντέξουν τόσο υψηλή τιμή της τάσης για ίδιες τιμές του λόγου κενών με αυτές του αναζυμωμένου υλικού που οι καμπύλες τους να βρίσκονται πάνω από την καμπύλη συμπίεσης του αναζυμωμένου με τάσεις προσέγγισης της όσο αυξάνεται η κατακόρυφη τάση. Παρά την υψηλή επιβληθείσα τάση (6400 kPa), αυτή δεν ήταν αρκετή για την κατάρρευση της δομής της συγκεκριμένης μάργας. Τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών προέρχονται από την εργαστηριακή διερεύνηση που

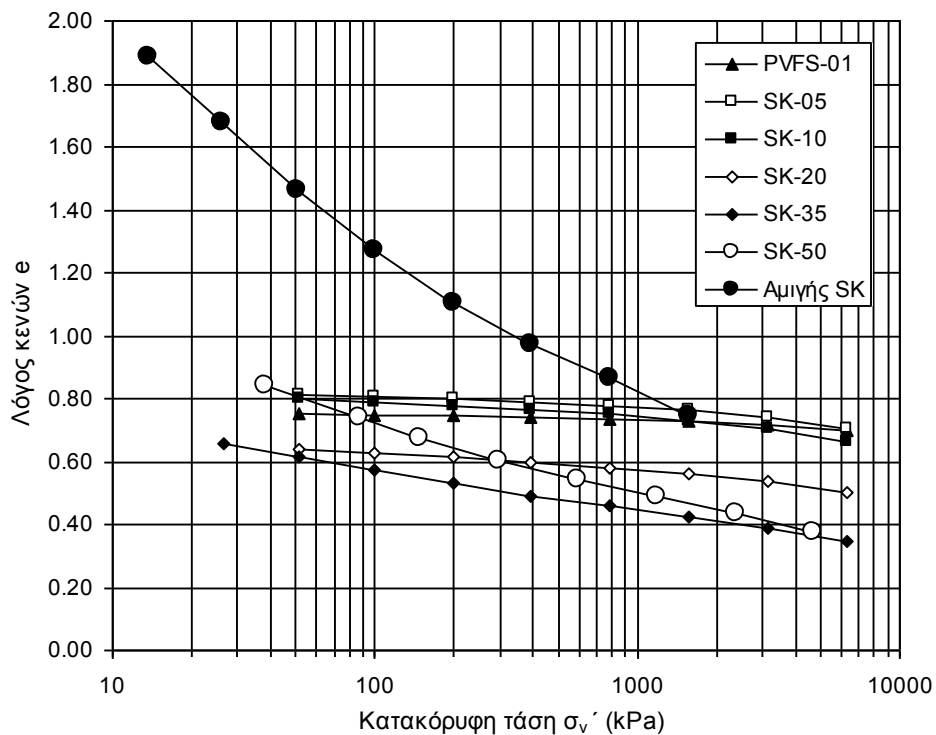
πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων εδαφικών υλικών παρουσιάζονται στο Κεφ. 11 και τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων δοκιμών στο Κεφ. 13 του Μέρους II.

Προκειμένου για κοκκώδη εδαφικά υλικά, η εξέλιξη του λόγου κενών ή του ειδικού όγκου με την τάση είναι εντόνως μη γραμμική, ακόμα και αν αυτή προβληθεί σε λογαριθμική κλίμακα, όπως παρουσιάζεται ενδεικτικά στο Σχ. 5.4. Η θέση της καμπύλης και η καμπυλότητά της εξαρτώνται από τη σχετική πυκνότητα των κοκκωδών υλικών, την περιεκτικότητά τους σε λεπτόκοκκα και τη γωνιότητα αυτών καθεαυτών των κόκκων τους, αφού κοκκώδη εδάφη με γωνιώδεις κόκκους υπό υψηλές τάσεις υπόκεινται σε μεταβολή όγκου μεγαλύτερη από την αναμενόμενη για τη σχετική τους πυκνότητα και την περιεκτικότητά τους σε λεπτόκοκκα λόγω της θραύσης των γωνιών των κόκκων τους. Στο Σχ. 5.5 παρουσιάζονται οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης καθαρής πολύ λεπτής άμμου (διερχόμενο από το κόσκινο Νο 100 και συγκρατούμενο στο κόσκινο Νο 200 μετά από πολύ καλό πλύσιμο) από κοσκίνισμα της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων, αμιγούς καολίνη Speswhite και μιγμάτων των δύο υλικών για διάφορα ποσοστά. Τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών προέρχονται από την εργαστηριακή διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων εδαφικών υλικών παρουσιάζονται στο Κεφ. 11 και τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων δοκιμών στο Κεφ. 13 του Μέρους II.

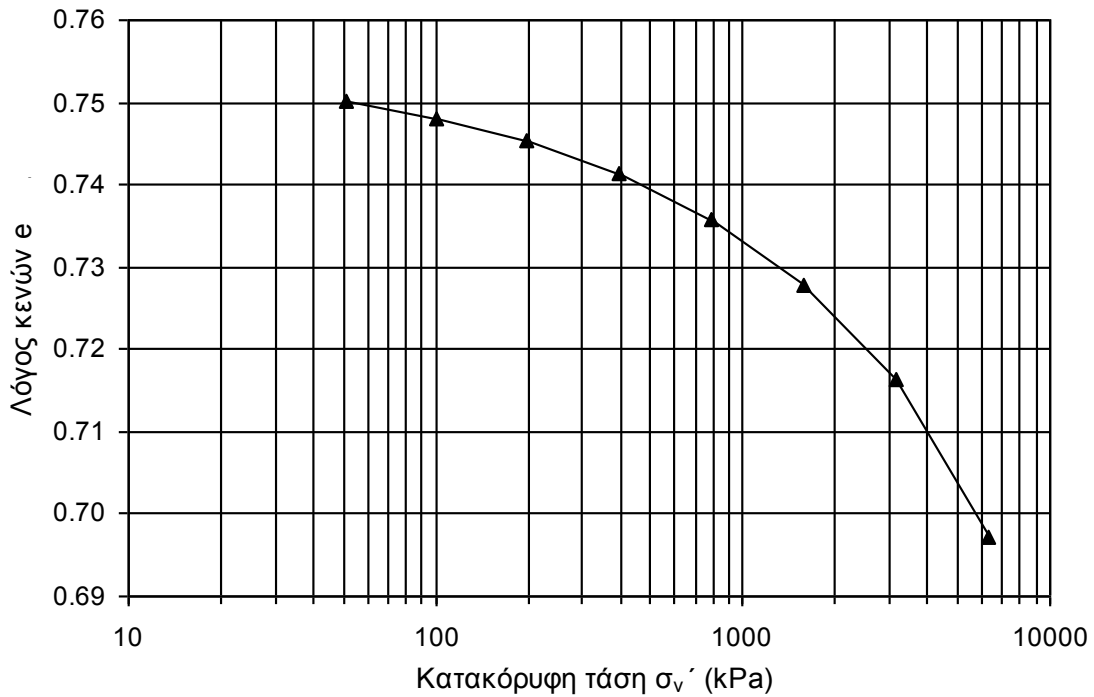
Όπως προκύπτει από τις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης του Σχ. 5.5 καθώς αυξάνεται το ποσοστό λεπτοκόκκων (αμιγής καολίνης στην προκειμένη περίπτωση), αρχικά ο λόγος κενών αυξάνεται λίγο για δεδομένη τάση πριν αρχίσει να μειώνεται και στη συνέχεια αυξάνεται και πάλι ραγδαία. Προκειμένου να διαφανεί καλύτερα η αντιστοιχία των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης των πιο κοκκωδών εδαφών του Σχ. 5.5, στο Σχ. 5.6 παρουσιάζεται μόνο η καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης της πολύ λεπτόκοκκης άμμου (δοκιμή PVFS-01 του Σχ. 5.5), η οποία έχει το ίδιο γεωμετρικό σχήμα με την θεωρητική καμπύλη του Σχ. 5.4 αλλά για μεταβολή του λόγου κενών από 0.750 σε 0.697 για μεταβολή της κατακόρυφης τάσης από τα 50 στα 6400 kPa. Η εξέλιξη του λόγου κενών με το ποσοστό των λεπτοκόκκων υπό την ίδια κατακόρυφη τάση παρουσιάζεται καλύτερα στο Σχ. 5.7 όπου στον κατακόρυφο άξονα βρίσκεται ο λόγος κενών και στον οριζόντιο το ποσοστό καολίνης του κάθε μίγματος. Το τοπικό μέγιστο του λόγου κενών για κάθε τάση εντοπίζεται μεταξύ 5 και 10% ποσοστό καολίνης, τείνοντας προς το 5% όσο αυξάνεται η κατακόρυφη τάση, με ενδείξεις πιθανής εξαφάνισης του τοπικού αυτού μεγίστου για ακόμα μεγαλύτερες τιμές της τάσης. Το τοπικό ελάχιστο του λόγου κενών εντοπίζεται στο



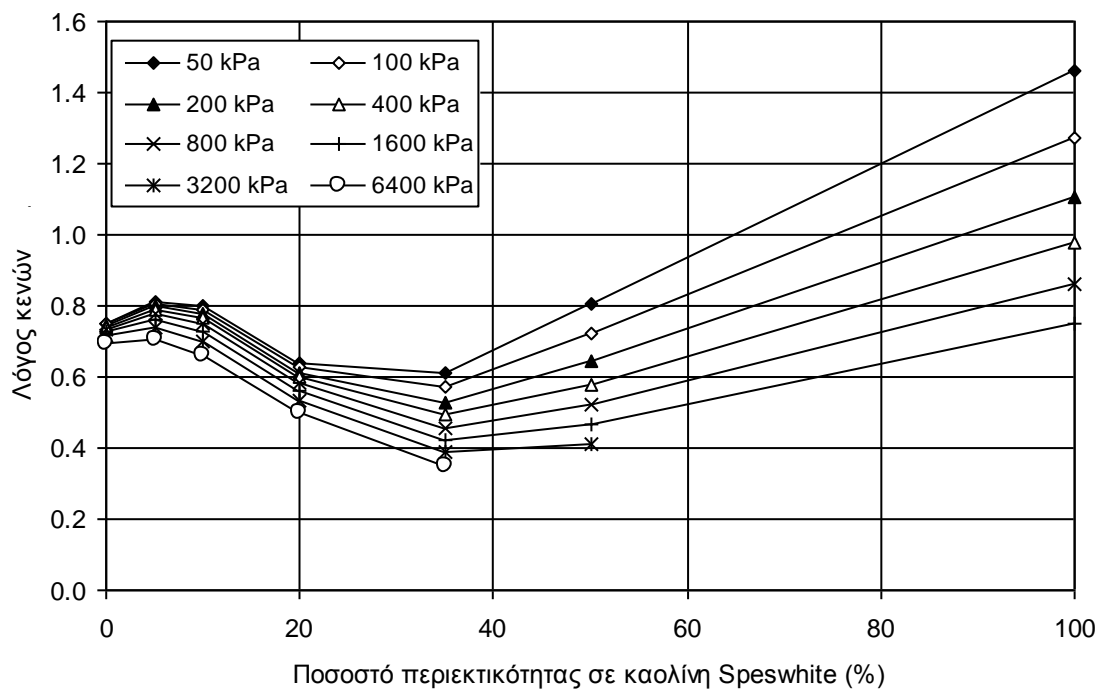
**Σχήμα 5.4.** Μεταβολές λόγου κενών κοκκώδους εδαφικού υλικού συναρτήσει της κατακόρυφης ή της μέσης τάσης.



**Σχήμα 5.5.** Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε καθαρή πολύ λεπτή άμμο (PVFS-01), αμιγή καολίνη Speswhite (Αμιγής SK) και μίγματα αυτών (5% καολίνης στο μίγμα της δοκιμής SK-05, 10% στο μίγμα της δοκιμής SK-10, κ.ο.κ.).



**Σχήμα 5.6.** Καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης καθαρής πολύ λεπτής άμμου (PVFS-01 στο Σχ. 5.5).



**Σχήμα 5.7.** Εξέλιξη του λόγου κενών καθαρής πολύ λεπτής άμμου (ποσοστό περιεκτικότητας σε καολίνη 0%), αμιγούς καολίνη Speswhite (ποσοστό περιεκτικότητας σε καολίνη 100%) και μιγμάτων αυτών με το ποσοστό της περιεκτικότητας σε καολίνη για διάφορες τιμές της κατακόρυφης τάσης στις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης που υποβλήθηκε κάθε υλικό.

35% ποσοστό καολίνη με ενδείξεις πιθανής αύξησης του ποσοστού αυτού για πολύ μεγάλες τιμές της κατακόρυφης τάσης. Παρόμοια αποτελέσματα με αυτά που παρουσιάζονται στο Σχ. 5.7 έχουν παρουσιαστεί από τους Lade, et al. (1998) και τους Yang, et al. (2006) για μίγματα άμμων με διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκου υλικού, στα οποία εμφανίζεται το τοπικό ελάχιστο του λόγου κενών για διάφορες τιμές της τάσης αλλά δεν εμφανίζεται καθόλου περιοχή τοπικού μεγίστου του λόγου κενών για μικρές τιμές του ποσοστού λεπτόκοκκου υλικού. Ο πιθανότερος λόγος για αυτό είναι ότι στα μίγματα άμμων-λεπτοκόκκων των Lade, et al. (1998) και Yang, et al. (2006) το λεπτόκοκκο υλικό είναι μη πλαστικό, ενώ αντίθετα στα μίγματα που έγιναν δοκιμές στα πλαίσια της παρούσας διατριβής το λεπτόκοκκο υλικό είναι πλαστικό (καολίνης τύπου Speswhite, ο οποίος μάλιστα είναι υψηλής πλαστικότητας με  $w_L=64\%$  -ιδέ για περισσότερες πληροφορίες το Κεφ. 11 του Μέρους II). Σε κάθε περίπτωση η παρατηρηθείσα διαφορά στην εξέλιξη του λόγου κενών ανάλογα με το είδος του λεπτόκοκκου υλικού αξίζει περαιτέρω εργαστηριακή διερεύνηση.

Εκτός από αυτές τις διαφορές στην εξέλιξη του λόγου κενών, οι οποίες καθορίζουν τη θέση των συγκεκριμένων καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης στο επίπεδο λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης (σε λογαριθμική κλίμακα), η αύξηση του ποσοστού λεπτοκόκκων καθιστά τις καμπύλες λιγότερο κυρτές και επιφέρει και αύξηση της κλίσης τους, υποδεικνύοντας ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό των λεπτοκόκκων, τόσο πιο συμπιεστό γίνεται το εδαφικό υλικό. Αναλυτικότερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων των συγκεκριμένων εργαστηριακών δοκιμών γίνεται στο Κεφ. 13 του Μέρους II της διατριβής, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και των υπολοίπων δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης που πραγματοποιήθηκαν.

Ως αυτό το σημείο οι μεταβολές όγκου των πλήρως κορεσμένων εδαφών περιγράφησαν σε όρους λόγου κενών-τάσης με την τάση σε λογαριθμική κλίμακα. Εναλλακτικά οι μεταβολές όγκου των πλήρως κορεσμένων εδαφών μπορούν να περιγραφούν σε όρους λόγου κενών-τάσης και σε όρους παραμόρφωσης-τάσης με την τάση σε γραμμική κλίμακα και στις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση της περιγραφής των μεταβολών όγκου σε όρους λόγου κενών-τάσης με την τάση σε γραμμική κλίμακα, η παράμετρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των προκυπτουσών καμπυλών είναι ο *συντελεστής συμπιεστότητας* (coefficient of compressibility)  $\alpha_v$ , ο οποίος εκφράζει την εφαπτομενική κλίση των καμπυλών λόγου κενών-τάσης (Εξ. 5.1) με την τάση σε γραμμική κλίμακα.

$$\alpha_v = \frac{\delta e}{\delta p} \quad \text{ή} \quad \alpha_v = \frac{\delta e}{\delta \sigma_v}, \text{ ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης} \quad (5.1)$$

Στην περίπτωση της περιγραφής των μεταβολών όγκου σε όρους παραμόρφωσης-τάσης, η παράμετρος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των προκυπτουσών καμπυλών είναι το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης  $E_s$  (ή  $D$ ), το οποίο εκφράζει την τέμνουσα κλίση των καμπυλών παραμόρφωσης-τάσης υπό συνθήκες μονοδιάστατης φόρτισης (Εξ. 5.2) ή το μέτρο ελαστικότητας  $E^3$ , όπως προκύπτει κατά τον απλούστερο τρόπο από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης (Εξ. 5.3).

$$E_s = \frac{\Delta \sigma_v}{\Delta \epsilon_v} \quad (5.2)$$

$$E = \frac{\Delta \sigma_y}{\Delta \epsilon_y} \quad (5.3)$$

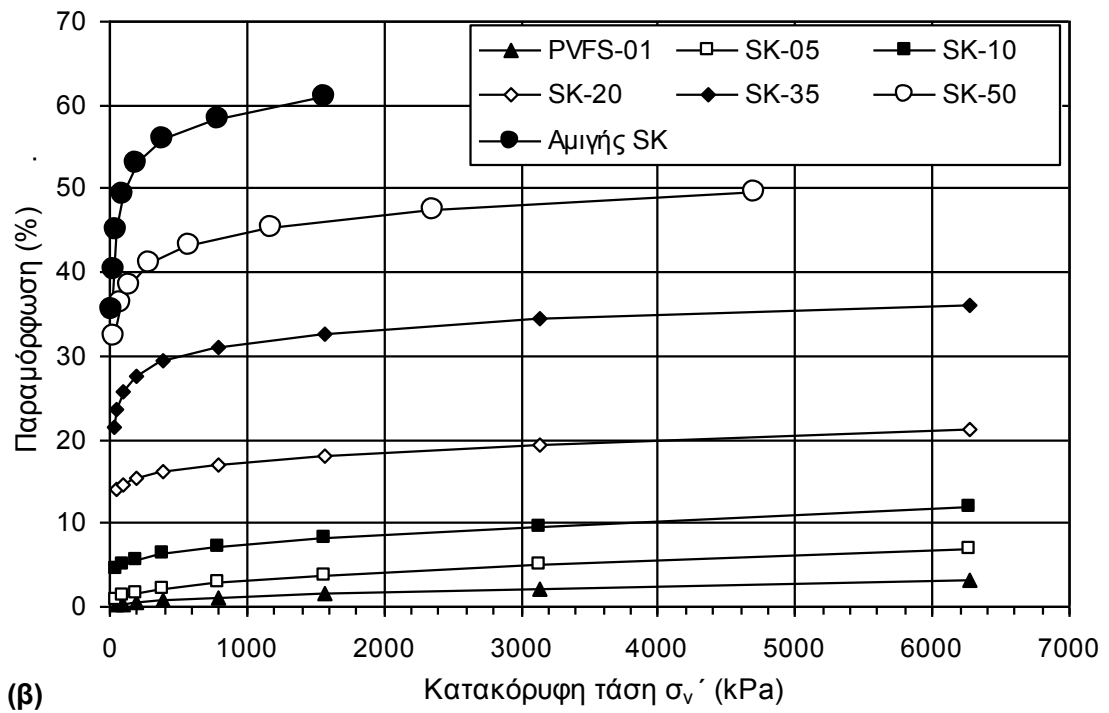
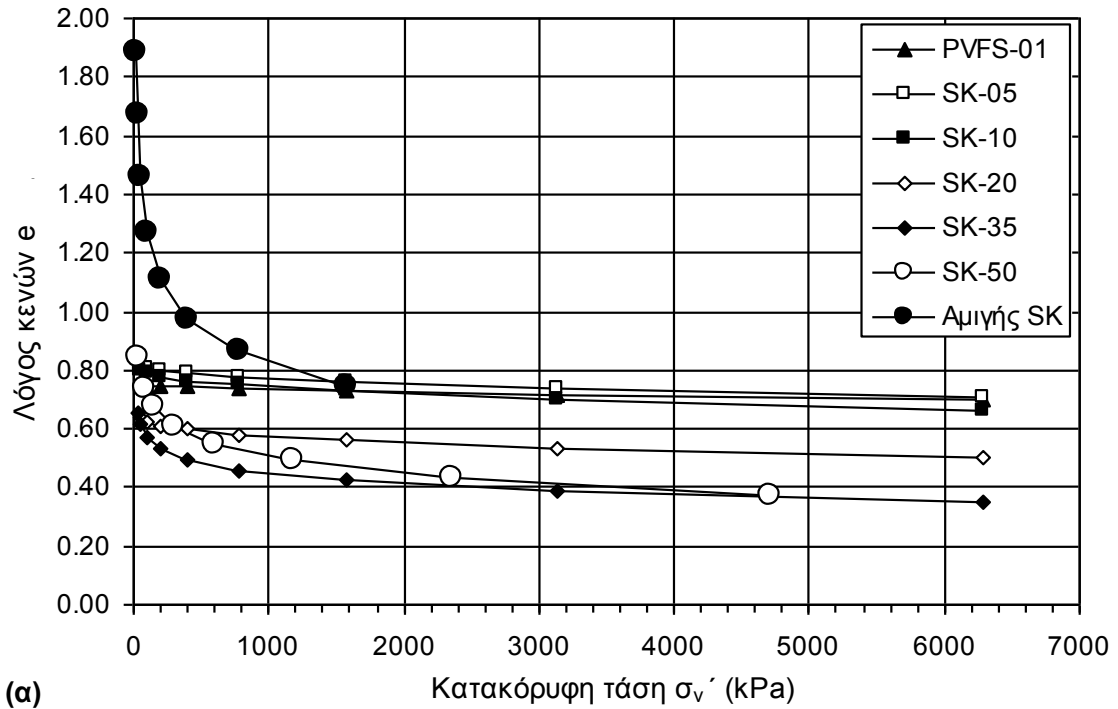
Στην Εξ. 5.2  $\Delta \sigma_v$  και  $\Delta \epsilon_v$  είναι η διαφορά της τελικής τιμής της κατακόρυφης τάσης από την αρχική και η διαφορά της τελικής τιμής της παραμόρφωσης στον κατακόρυφο άξονα από την αρχική αντίστοιχα, ενώ στην Εξ. 5.3 τα αντίστοιχα μεγέθη είναι οι διαφορές στην τιμή της τάσης και της παραμόρφωσης κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου του εδαφικού υλικού (έστω  $y$ ).

Στο Σχ. 5.8 παρουσιάζονται οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης που παρουσιάστηκαν ήδη στο Σχ. 5.5 σε όρους λόγου κενών-τάσης με την τάση να βρίσκεται σε γραμμική κλίμακα στο Σχ. 5.8α και σε όρους παραμόρφωσης-τάσης στο Σχ. 5.8β. Στο Σχ. 5.9 παρουσιάζεται η εξέλιξη του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης με την κατακόρυφη τάση στις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης των Σχ. 5.5 και 5.8, σε πλήρη κλίμακα στο Σχ. 5.9α και σε λεπτομέρεια για μικρές τιμές της τάσης και του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης στο Σχ. 5.9β.

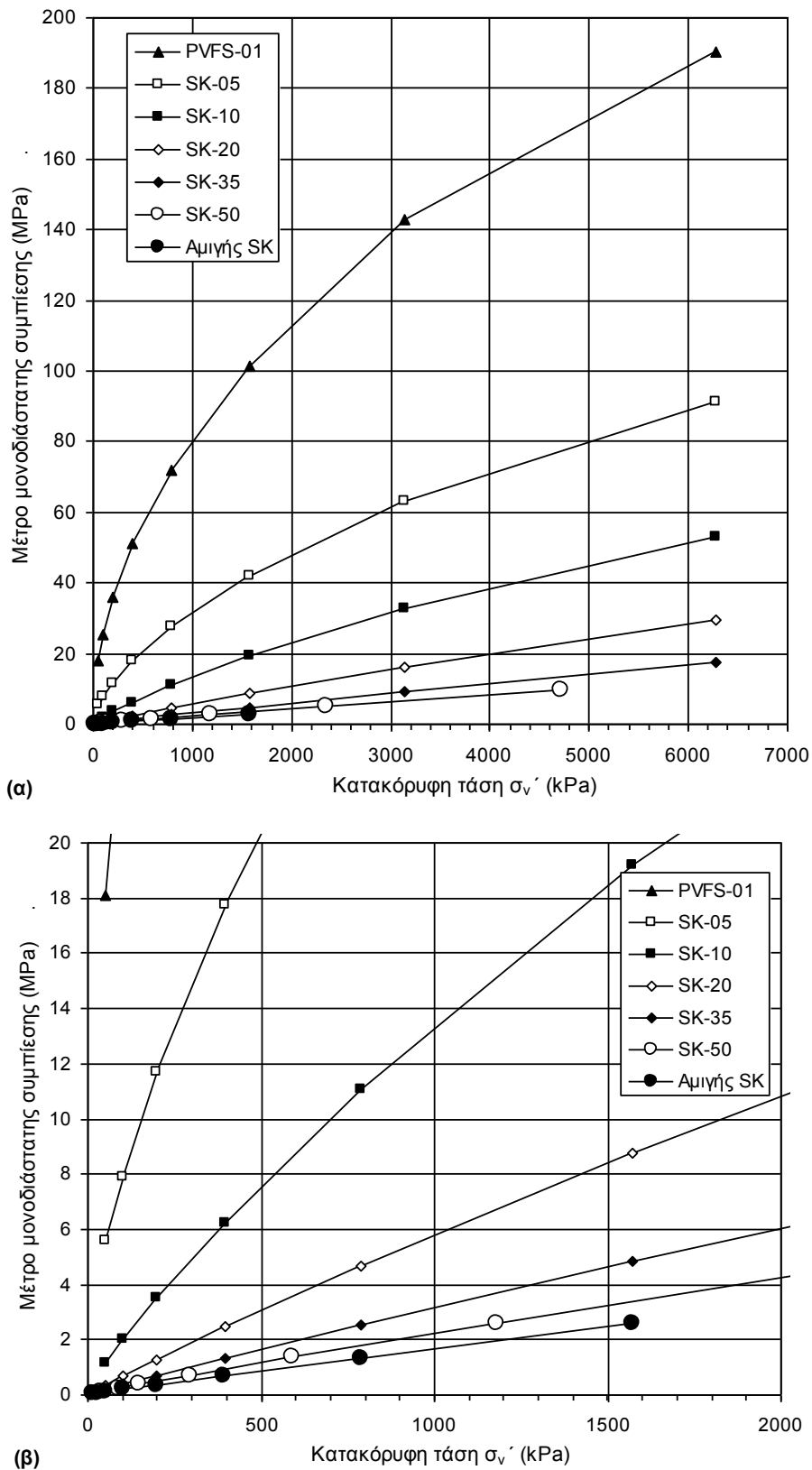
Όπως προαναφέρθηκε, οι δοκιμές, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στα Σχ. 5.8 και 5.9, έγιναν σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά. Προκειμένου για τέτοια υλικά, οι τιμές των μεγεθών που προκύπτουν από τις καμπύλες που παρουσιάζονται στα Σχ. 5.5, 5.8 και 5.9 (λόγος κενών,

<sup>3</sup> Προκειμένου για μονοδιάστατη συμπίεση, το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης αρκεί (μαζί βέβαια με την αρχική και τελική τάση) για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων. Προκειμένου για το μέτρο ελαστικότητας ωστόσο, ο υπολογισμός των παραμορφώσεων απαιτεί ταυτόχρονα και την υπόθεση ότι ισχύει και η θεωρία ελαστικότητας.





**Σχήμα 5.8.** Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε καθαρή πολύ λεπτή άμμο (PVFS-01), αμιγή καολίνη Speswhite (Αμιγής SK) και μίγματα αυτών (5% καολίνης στο μίγμα της δοκιμής SK-05, 10% στο μίγμα της δοκιμής SK-10, κ.ο.κ.): α) σε όρους λόγου κενών-τάσης, με την τάση σε γραμμική κλίμακα, και β) σε όρους παραμόρφωσης-τάσης, με την τάση σε γραμμική κλίμακα (χρησιμοποιείται η σύμβαση προσήμων της εδαφομηχανικής, δηλ. θετικές παραμορφώσεις είναι οι θλιπτικές).



**Σχήμα 5.9.** Εξέλιξη του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης στις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης των Σχ. 5.5 και 5.7: α) σε πλήρη κλίμακα, και β) σε λεπτομέρεια για μικρές τιμές της τάσης και του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης.

μεταβολές του για τις απεικονιζόμενες μεταβολές τάσης, παραμορφώσεις και τιμές μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης) δεν είναι αντιπροσωπευτικές για φυσικά εδαφικά υλικά. Είναι όμως αντιπροσωπευτικές των διαφορών στις τιμές αυτών των μεγεθών ανάμεσα σε κοκκώδη εδάφη και αργιλικά και του ρυθμού μετάβασης των τιμών από το ένα είδος υλικού στο άλλο μέσω των εξετασθέντων μιγμάτων άμμου-καολίνη. Έτσι από το Σχ. 5.8β προκύπτουν οι πολύ μεγαλύτερες παραμορφώσεις των αργιλικών εδαφών από των κοκκωδών, οι οποίες προκειμένου για αναζυμωμένα εδαφικά υλικά μπορεί να διαφέρουν ακόμα και μία τάξη μεγέθους για δεδομένη τάση (από την αμιγή άμμο και μίγματα άμμου-καολίνη με πολύ μικρό ποσοστό αργίλου) μέχρι τον αμιγή καολίνη. Οι πολύ μεγάλες αυτές διαφορές μεταφράζονται, όπως προκύπτει από το Σχ. 5.9, σε αντίστροφα μεγάλες διαφορές στις τιμές του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης, δηλ. τα κοκκώδη εδάφη έχουν πολύ μεγαλύτερο μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης από τα αργιλικά εδάφη. Πράγματι, η αμιγής πολύ λεπτόκοκκη άμμος έχει τιμές του μέτρου ελαστικότητας που φτάνουν ακόμα και τα 190 MPa για την μέγιστη τάση των 6400 kPa, και τιμές που κυμαίνονται από 18 έως 52 MPa για τιμές της κατακόρυφης τάσης από 50 έως 400 kPa, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τον αμιγή καολίνη κυμαίνονται από 0.11 έως 0.70 MPa (Σχ. 5.9β).

Επίσης από το Σχ. 5.8α προκύπτει η δυσκολία διαχείρισης των διαγραμμάτων σε όρους λόγου κενών-τάσης, όταν η τάση είναι σε γραμμική κλίμακα, σε σχέση με τα ίδια διαγράμματα όταν η τάση είναι σε λογαριθμική κλίμακα (Σχ. 5.5 και Σχ. 5.6) ή όταν σχεδιάζονται σε όρους παραμόρφωσης-τάσης.

Τέλος, πρέπει να επισημανθεί ότι οι καμπύλες λόγου κενών-τάσης (με την τάση σε λογαριθμική κλίμακα) για αμιγώς κοκκώδη εδάφη έχουν την γεωμετρική μορφή των καμπυλών των Σχ. 5.5 και 5.6, δηλ. στρέφουν τα κοίλα προς τα κάτω, μόνο για το εύρος των τιμών της τάσης που δεν γίνεται θραύση των κόκκων τους. Εάν η τάση φτάσει σε τόσο υψηλές τιμές (κατά τάξη μεγέθους μερικές δεκάδες MPa) τότε στην περιοχή της τάσης που αντιστοιχεί σε θραύση των κόκκων, η καμπύλη λόγου κενών-τάσης (ή παραμόρφωσης-τάσης) στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω ως αποτέλεσμα της ραγδαίας μεταβολής της κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού και της πλήρωσης προηγούμενα άδειων κενών από υλικό που προκύπτει από τη θραύση των κόκκων, οι οποίοι περιέρχονται ταυτόχρονα σε νέα διάταξη μικρότερου πορώδους. Η μορφή της καμπύλης παραμόρφωσης-τάσης που περιγράφηκε παραπάνω παρουσιάζεται στο Σχ. 5.10. Τονίζεται ότι για να εμφανιστεί η γεωμετρική αυτή μορφή της καμπύλης παραμόρφωσης-τάσης των κοκκωδών εδαφικών υλικών, οι τιμές της τάσης πρέπει να είναι πάρα πολύ μεγάλες, και πάλι ενδέχεται αυτή να μην μπορεί να διαφανεί τόσο ξεκάθαρα όπως επιδεικνύεται θεωρητικά στο

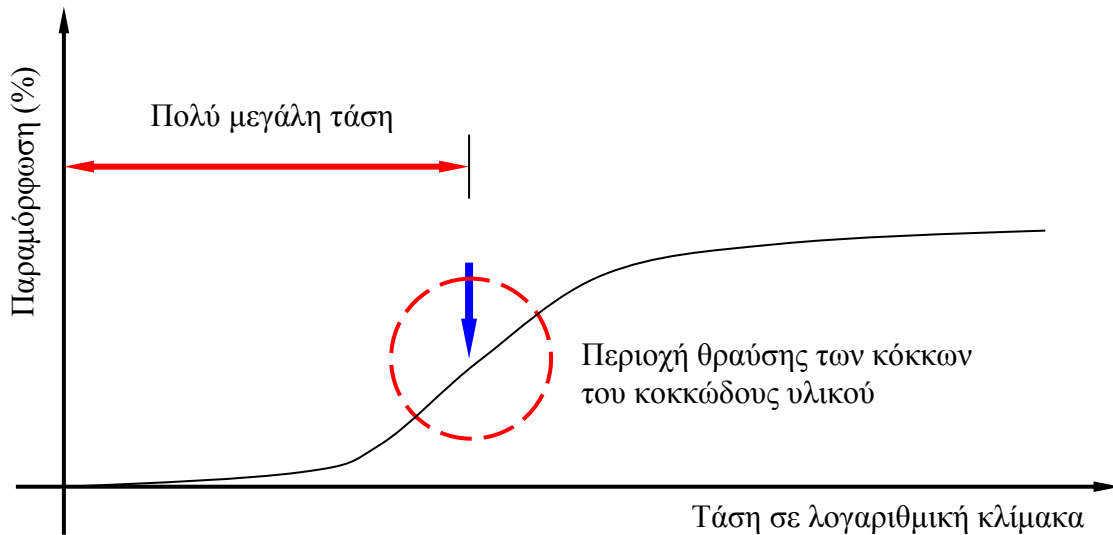
Σχ. 5.10, ανάλογα με το ποσοστό των λεπτοκόκκων, την μορφή των κόκκων (στρογγυλεμένοι ή γωνιώδεις), την κοκκομετρική διαβάθμιση του χονδρόκοκκου μέρους (καλή ή κακή) και την ορυκτολογική σύσταση των χονδρόκοκκων.

Προκειμένου να διερευνηθούν τέτοια φαινόμενα αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής νέα κυψέλη εφαρμογής υψηλών τάσεων (μέχρι 21.2 MPa στα διατιθέμενα συμπιεσόμετρα) και πραγματοποιήθηκαν οι σχετικές δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης που παρουσιάζονται στο Κεφ. 13 του δεύτερου μέρους. Ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχ. 5.11 καμπύλη παραμόρφωσης-τάσης από μία τέτοια δοκιμή σε χαλαρή θραυστή χονδρόκοκκη άμμο<sup>4</sup> ασβεστολιθικής προέλευσης. Η γεωμετρική ομοιότητα της πειραματικής καμπύλης του Σχ. 5.11 με την θεωρητική που επιδείχθηκε στο Σχ. 5.10 είναι χαρακτηριστική. Ακόμα όμως και για αυτό το υλικό, η τάση των 21.2 MPa δεν ήταν αρκετή για να παρατηρηθεί η στροφή των κοίλων προς τα κάτω για σημαντικό εύρος τάσεων.

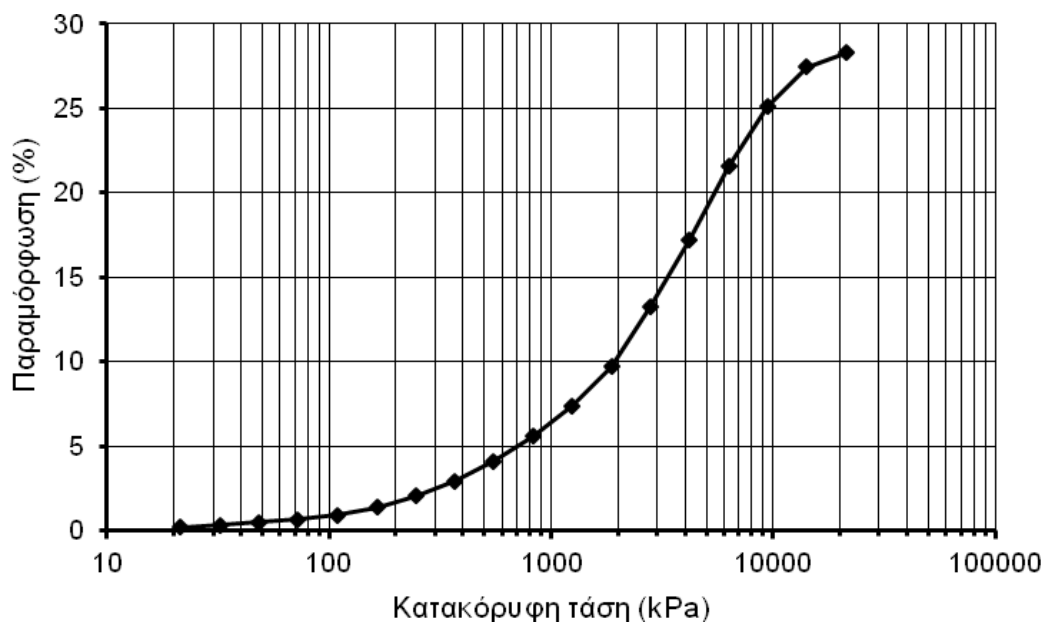
Τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρουσιάστηκαν στην παράγραφο αυτή (στα Σχ. 5.3, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 και 5.11) προς επίδειξη των γενικών αρχών που περιγράφονται στο παρόν κεφάλαιο. Η αναλυτική τους παρουσίαση και αξιολόγηση γίνεται στο Κεφ. 13 του 2<sup>ου</sup> μέρους της διατριβής, ενώ στο Κεφ. 10 του 2<sup>ου</sup> μέρους επεξηγείται η σκοπιμότητα εκτέλεσής τους.

---

<sup>4</sup> Το υλικό αυτό αναζητείται σε προμηθευτές δοκιμών υλικών με τον εργοταξιακό όρο «ρυζάκι».



**Σχήμα 5.10.** Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης κοκκώδους εδαφικού υλικού με επισήμανση της τάσης θραύσης κόκκων.



**Σχήμα 5.11.** Καμπύλη παραμόρφωσης-τάσης αρχικά χαλαρής θραυστής χονδρόκοκκης άμμου («ρυζάκι») από δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης που πραγματοποιήθηκε στη νέα κυψέλη εφαρμογής υψηλών τάσεων (μέχρι 21.2 MPa στα διατιθέμενα συμπιεσόμετρα) που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής (ιδέ Κεφ. 13).

### 5.3 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΟΓΚΟΥ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Στην §5.2 εξετάστηκαν εν συντομία και για λόγους πληρότητας οι μεταβολές όγκου των πλήρως κορεσμένων εδαφών. Από την παράγραφο αυτή και στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι βασικές αρχές των μεταβολών όγκου στα μη κορεσμένα εδάφη.

Όπως προαναφέρθηκε, η μελέτη των μεταβολών όγκου των μη κορεσμένων, αλλά και των μερικώς κορεσμένων, εδαφών είχε «εγκλωβιστεί» για μεγάλο χρονικό διάστημα στον διαχωρισμό των εδαφών σε *καταρρεύσιμα* (collapsible) και *διογκώσιμα* (expansive), που μεταφραζόταν στη συνέχεια στην αντίστοιχη διαχείριση του προβλήματος των μεταβολών όγκου.

*Καταρρεύσιμα* εδάφη ονομάζονται εκείνα τα οποία επιδεικνύουν σημαντική, *μή αντιστρεπτή*, μείωση του όγκου τους όταν υποβάλλονται σε ύγρανση, φόρτιση, ή συνδυασμό και των δύο. Το γεγονός ότι η μείωση αυτή του όγκου είναι *μή αντιστρεπτή* σημαίνει ότι έχει επέλθει αναδιάταξη των κόκκων και των πλακιδίων του εδάφους σε μία πυκνότερη διάταξη. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συμβεί και σε πλήρως κορεσμένα και σε μη κορεσμένα εδάφη. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζονται και επεξηγούνται οι μηχανισμοί που συμβαίνουν σε μη κορεσμένα εδάφη.

*Διογκώσιμα* εδάφη ονομάζονται εκείνα τα οποία επιδεικνύουν σημαντική αύξηση του όγκου τους όταν τους παρασχεθεί περίσσεια νερού ακόμα και αν βρίσκονται υπό σημαντική τάση. Η διόγκωσή τους υπό μηδενική τάση ονομάζεται *ελεύθερη διόγκωση* (free swell) και η κατακόρυφη τάση υπό την οποία δεν εκδηλώνουν διόγκωση υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως ονομάζεται *πίεση διόγκωσης* (swelling pressure). Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συμβεί και σε πλήρως κορεσμένα<sup>5</sup> και σε μη κορεσμένα εδάφη. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζονται και επεξηγούνται οι μηχανισμοί που συμβαίνουν σε μη κορεσμένα εδάφη.

Σήμερα πλέον έχει γίνει κατανοητό ότι αυτός ο διαχωρισμός αφορά όχι στα εδαφικά υλικά *αλλά στη μηχανική συμπεριφορά τους υπό δεδομένες συνθήκες*, και γι' αυτό πρέπει να γίνεται διαχωρισμός σε *καταρρεύσιμη και διογκώσιμη συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών*, η οποία

---

<sup>5</sup> Ειδικά για τη διόγκωση, συχνά θεωρείται αδύνατον να εκδηλωθεί διόγκωση σε ένα πλήρως κορεσμένο έδαφος όταν του παρέχεται περίσσεια νερού. Στην περίπτωση αυτή η αύξηση του όγκου δεν οφείλεται στη μεταβολή του βαθμού κορεσμού αλλά στην προσρόφηση μορίων νερού από τα αργιλικά ορυκτά του εδάφους (Katti, et al., 2002).

είναι δυνατόν να εμφανιστεί στο ίδιο εδαφικό υλικό ανάλογα με την εντατική κατάσταση στην οποία βρίσκεται, τη δομή του και την ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρυνσης.

*Καταρρεύσιμη* ονομάζεται η συμπεριφορά ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού όταν επιδεικνύει σημαντική, μή αντιστρεπτή, μείωση του όγκου του υπό την παροχή περίσσειας νερού, και *διογκώσιμη* η συμπεριφορά ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού όταν επιδεικνύει σημαντική, μή αντιστρεπτή, αύξηση του όγκου του υπό την παροχή περίσσειας νερού. Στις επόμενες παραγράφους του κεφαλαίου αυτού θα επιδειχθεί ο μηχανισμός εμφάνισης αυτής της συμπεριφοράς και του τρόπου με τον οποίο μπορεί να παρουσιαστεί στο ίδιο εδαφικό υλικό υπό διαφορετικές συνθήκες. Για να επιδειχθεί όμως ο μηχανισμός αυτός θα εξεταστούν πρώτα βήμα προς βήμα διάφορες τασικές διαδρομές υπό τις οποίες μπορούν να συμβούν μεταβολές όγκου μή κορεσμένων εδαφών και καθώς προχωρά η ανάπτυξη του αντικειμένου αυτές θα συνδυάζονται με την εισαγωγή ενός ενιαίου χώρου ολικής τάσης-μύζησης-λόγου κενών.

Η πρόοδος στην κατανόηση του μηχανισμού των μεταβολών όγκου στα μή κορεσμένα και στα μερικώς κορεσμένα εδάφη έχει φτάσει στη διατύπωση ολοκληρωμένων καταστατικών προσομοιωμάτων που περιγράφουν και προβλέπουν τη μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη συναρτήσει της εντατικής κατάστασης και των υπολοίπων παραγόντων που επηρεάζουν και προαναφέρθηκαν. Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται εισαγωγή στα καταστατικά αυτά προσομοιώματα πριν την αναλυτική παρουσίαση τους στο τρίτο μέρος της διατριβής. Επίσης στο Κεφ. 15 του δεύτερου μέρους παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ειδικών εργαστηριακών δοκιμών που έγιναν για τον προσδιορισμό της διόγκωσης/συρρίκνωσης κατά τη διαβροχή υπό διάφορες κατακόρυφες τάσεις σε συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης.

## **5.4 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΟΓΚΟΥ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΥΠΟ ΜΗΔΕΝΙΚΗ ΟΛΙΚΗ ΤΑΣΗ**

### **5.4.1 Εισαγωγή**

Στην §5.2 εξετάστηκαν εν συντομία οι μεταβολές όγκου των πλήρως κορεσμένων εδαφών λόγω μεταβολών της τάσης. Στην παράγραφο αυτή αρχίζει η λεπτομερής εξέταση των μεταβολών όγκου που οφείλονται στις μεταβολές της μύζησης των εδαφών. Ως αφετηρία θεωρήθηκε σκόπιμο να εξεταστούν πρώτα οι μεταβολές όγκου που συμβαίνουν για μεταβολές της μύζησης υπό μηδενική ολική τάση, πριν εξεταστούν πιο πολύπλοκοι συνδυασμοί εντατικών καταστάσεων και τασικών διαδρομών που προκαλούν μεταβολές όγκου στην §5.5.

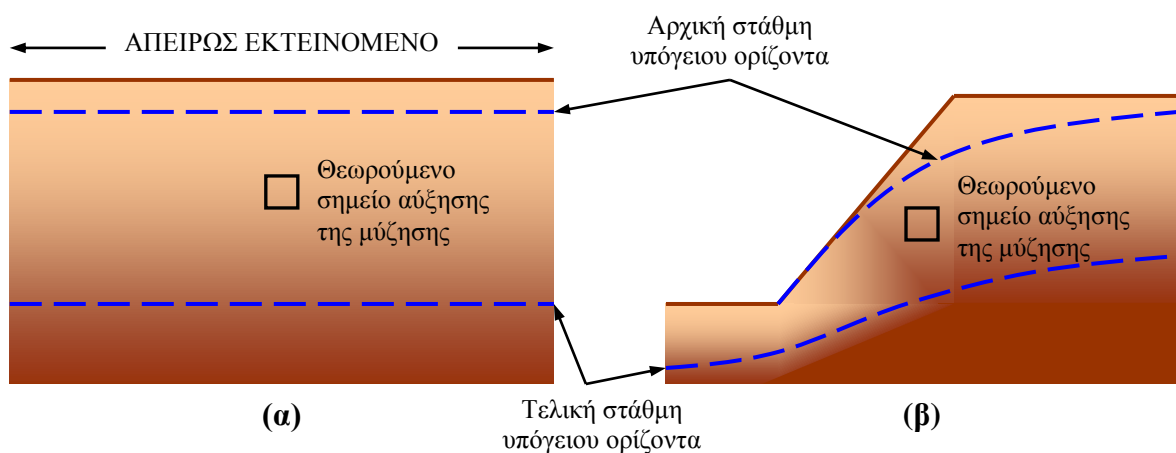
### **5.4.2 Μεταβολές όγκου για μύζηση μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα**

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού έχει εξελιχθεί στις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού μία εκ των οποίων είναι και η συσχέτιση λόγου κενών-μύζησης. Με βάση όσα αναφέρθηκαν στο Κεφ. 4 για τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα των εδαφικών υλικών, αυτά είναι πλήρως κορεσμένα. Κατά συνέπεια μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα, οι μεταβολές του όγκου των κενών είναι όμοιες με τις αντίστοιχες μεταβολές όγκου του ίδιου εδαφικού υλικού αν ήταν πλήρως κορεσμένο και φορτιζόταν υπό τάση ίδια με την τιμή της μύζησης και υπό τις ίδιες συνθήκες παραμόρφωσης (π.χ. μονοδιάστατες συνθήκες παραμόρφωσης ή άλλες). Κατά συνέπεια αν η πίεση διείσδυσης αέρα του εδαφικού υλικού είναι μεγαλύτερη από την τάση φαινόμενης προστερεοποίησης, τότε κατά τις μεταβολές της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα θα παρατηρηθεί αντίστοιχη μύζηση διαρροής σε τιμή ίδια με την τιμή της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης (πάντοτε υπό τις ίδιες συνθήκες παραμόρφωσης). Αντίθετα αν η τιμή της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης του εδαφικού υλικού είναι μεγαλύτερη από την τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα του εδαφικού υλικού, τότε για μεταβολές της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα δεν θα παρατηρηθεί μύζηση διαρροής, δηλαδή τιμή της μύζησης μετά από την οποία παρατηρούνται ραγδαίες μεταβολές του λόγου κενών. Αντίστοιχα, υπό ίδιες συνθήκες φορτίσεως, η παράμετρος μεταβολής του λόγου κενών λόγω αύξησης της μύζησης θα είναι η ίδια με την αντίστοιχη παράμετρο μεταβολής του λόγου κενών λόγω αύξησης της τάσης (δείκτης επανασυμπίεσης για τιμές της μύζησης πριν τη μύζηση που αντιστοιχεί στην τάση φαινόμενης προστερεοποίησης και



δείκτης συμπίεσης για τιμές της μύζησης μεταξύ τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης και πίεσης διείσδυσης αέρα, εάν η πίεση διείσδυσης αέρα είναι μεγαλύτερη της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης, αλλιώς μόνο δείκτης επανασυμπίεσης).

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο ένα σχόλιο για τις συνθήκες παραμόρφωσης υπό τις οποίες συμβαίνει η μεταβολή όγκου λόγω μεταβολών της μύζησης. Στα πλήρως κορεσμένα εδάφη είναι γνωστό ότι άλλες μεταβολές όγκου προκύπτουν για συμπίεση υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως ( $K = \sigma_h' / \sigma_v' = K_0$ ), άλλες για ισοτροπικές ( $\sigma_h' = \sigma_v'$  δηλ.  $K=1$ ) και άλλες για τασικές διαδρομές συμπίεσης κατά τις οποίες η τιμή του λόγου  $\sigma_h' / \sigma_v'$  παίρνει διάφορες τιμές, διαφορετικές από τις προαναφερθείσες. Υπάρχει λοιπόν το ερώτημα προς ποια εντατική κατάσταση συμπίεσης των πλήρως κορεσμένων εδαφών ομοιάζει η ξήρανση των εδαφών για τιμές της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα. Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα αφορά καταρχήν στις φυσικές συνθήκες στο πεδίο και την εντατική κατάσταση στην οποία αυτές οδηγούν. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ταπείνωσης της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα σε εδαφικό σχηματισμό όπου η επιφάνεια του εδάφους είναι οριζόντια (Σχ. 5.12α) και άρα ισχύουν μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως, οι αναμενόμενες μεταβολές όγκου λόγω μεταβολών της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα σε σημείο του εδάφους πάνω από την τελική στάθμη του υπόγειου ορίζοντα θα αντιστοιχούν επίσης σε μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως. Αν πάλι η ταπείνωση της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα γίνεται σε εδαφικό σχηματισμό όπου η επιφάνεια του εδάφους δεν είναι οριζόντια αλλά έχει σημαντική κλίση (Σχ. 5.12β), τότε οι συνθήκες δεν είναι μονοδιάστατες και αντίστοιχες θα είναι και οι μεταβολές όγκου που προκαλεί η αύξηση της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα του εδαφικού υλικού.



**Σχήμα 5.12.** Αύξηση της μύζησης: α) υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως ( $K_0$ ) και β) υπό συνθήκες όπου  $K \neq K_0$ .

### 5.4.3 Μεταβολές όγκου για μύζηση μεγαλύτερη της πίεσης διείσδυσης αέρα και μικρότερη της μύζησης επίτευξης παραμένουτος ποσοστού υγρασίας

Προκειμένου να απλοποιηθεί η περιγραφή των φαινομένων συμπίεστικότητας στο εύρος τιμών της μύζησης μεταξύ της πίεσης διείσδυσης αέρα και της μύζησης που αντιστοιχεί στην επίτευξη του παραμένουτος ποσοστού υγρασίας θα θεωρηθεί καταρχήν ότι έχουμε ξήρανση ενός πολλού αναζυμωμένης αργίλου. Η θεώρηση αυτή επιτρέπει τη λογική υπόθεση ότι ο κλάδος της καμπύλης λόγου κενών-μύζησης για τιμές της μύζησης πριν από την πίεση διείσδυσης αέρα έχει κλίση ίση με τον δείκτη συμπίεσης του πολλού σε όλο το μήκος του κλάδου μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα, αφού στα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά δεν παρουσιάζεται τάση διαρροής στην καμπύλη λόγου κενών-τάσης. Για την επεξήγηση των μεταβολών που συμβαίνουν σε αυτό το εύρος τιμών της μύζησης θα χρησιμοποιηθεί το Σχ. 5.13. Στο Σχ. 5.13α παρουσιάζεται ενδεικτικά το διάγραμμα λόγου κενών-μύζησης ενός αργιλικού εδαφικού υλικού με σημαντικές ογκομετρικές μεταβολές κατά την ξήρανση, στο Σχ. 5.13β το διάγραμμα λόγου κενών-ποσοστού υγρασίας (καμπύλη συρρίκνωσης) του ίδιου υλικού, στο Σχ. 5.13γ το διάγραμμα βαθμού κορεσμού-ποσοστού υγρασίας και τέλος στο Σχ. 5.13δ το διάγραμμα βαθμού κορεσμού-μύζησης.

Για μεταβολές της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα, στο διάγραμμα λόγου κενών-μύζησης (Σχ. 5.13α) η καμπύλη ακολουθεί ευθύγραμμο κλάδο (με τον άξονα της μύζησης σε λογαριθμική κλίμακα), η κλίση του οποίου ταυτίζεται (προκειμένου όπως προαναφέρθηκε για αναζυμωμένο αργιλικό εδαφικό υλικό) με την κλίση της καμπύλης συμπίεσης (καμπύλη λόγου κενών-τάσης σε λογαριθμική κλίμακα) υπό τις αντίστοιχες συνθήκες φόρτισης με τις οποίες συνέβη και η ξήρανση μέχρι αυτή την τιμή της μύζησης. Η αντίστοιχη μεταβολή κατά μήκος της καμπύλης συρρίκνωσης στο Σχ. 5.13β γίνεται επί της ευθείας λόγου κενών-ποσοστού υγρασίας που αντιστοιχεί στον πλήρη κορεσμό. Ο βαθμός κορεσμού  $S_r$ , ο λόγος κενών  $e$  και το ποσοστό υγρασίας  $w$  συνδέονται μεταξύ τους και με την ανηγμένη πυκνότητα στερεάς φάσης  $G_s$  μέσω της Εξ. 5.4.

$$w \cdot G_s = e \cdot S_r \quad (5.4)$$

Αν ο βαθμός κορεσμού είναι 100% τότε ο λόγος κενών είναι ανάλογος του ποσοστού υγρασίας με σταθερά αναλογίας την ανηγμένη πυκνότητα στερεάς φάσης. Έτσι για μεταβολές της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα, όπου το εδαφικό υλικό είναι εξ ορισμού πλήρως

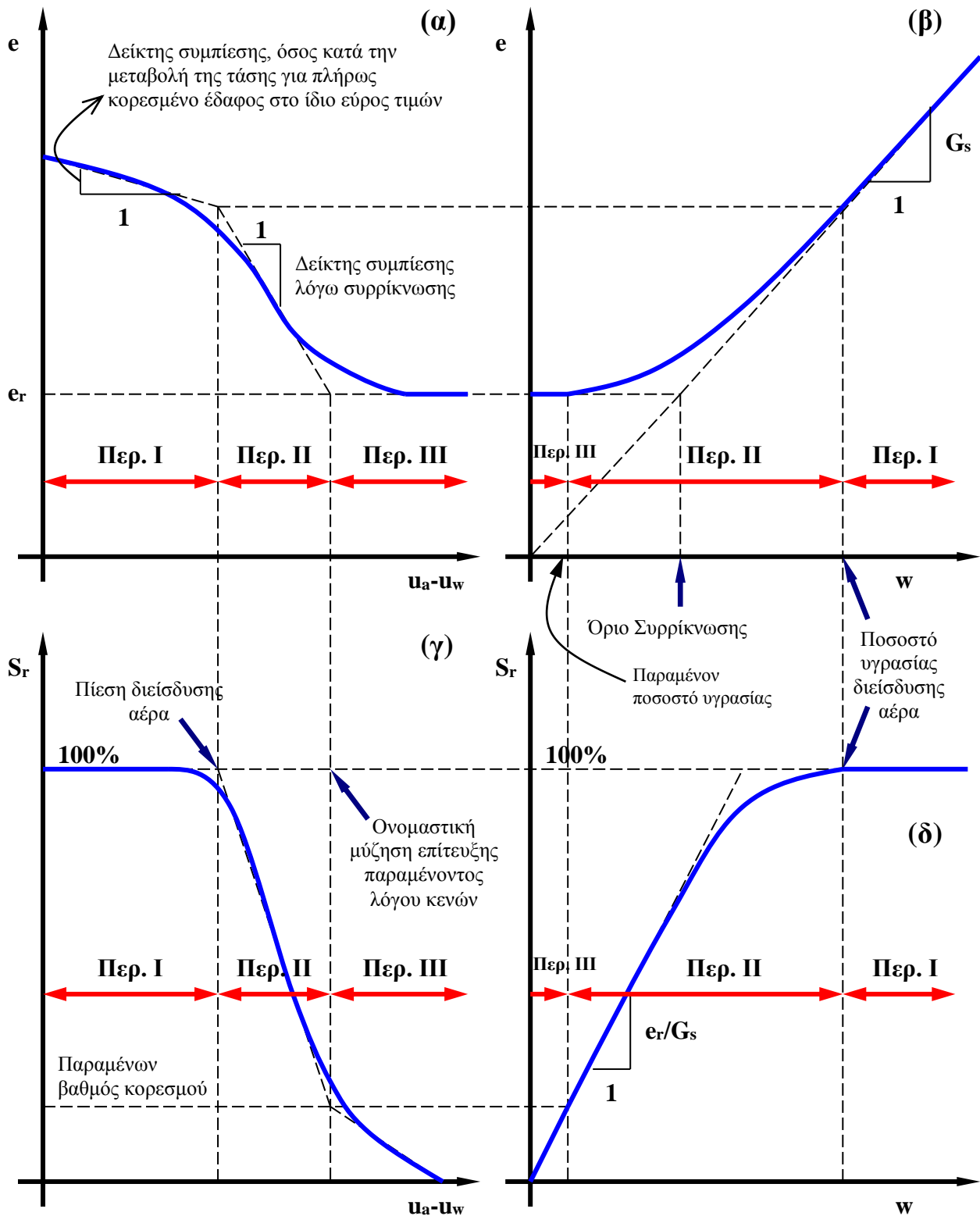
κορεσμένο, τότε η αντίστοιχη μεταβολή στο Σχ. 5.13β γίνεται κατά μήκος της ευθείας  $e = w \cdot G_s$ . Αντίστοιχα στο Σχ. 5.13γ η μεταβολή αυτή της μύζησης βρίσκεται επί της ευθείας  $S_r = 100\%$  και στο Σχ. 5.13δ η ίδια μεταβολή βρίσκεται επίσης στο ευθύγραμμο τμήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού  $S_r = 100\%$ .

Όταν η μύζηση ξεπεράσει την πίεση διείσδυσης αέρα, τότε στην καμπύλη λόγου κενών-μύζησης στο Σχ. 5.13α εμφανίζεται ένα σημείο καμψής από το οποίο και μετά η μείωση του λόγου κενών γίνεται πιο έντονη για τις ίδιες μεταβολές της μύζησης (προκειμένου για έντονα συμπιεστά αργιλικά εδάφη<sup>6</sup>). Αυτό το σημείο καμψής αντιστοιχεί στο Σχ. 5.13β στο σημείο από το οποίο αρχίζει η απομάκρυνση της καμπύλης λόγου κενών-ποσοστού υγρασίας από την ευθεία  $e = w \cdot G_s$ , όπου πλέον η καμπύλη συρρίκνωσης αρχίζει να στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω. Το ίδιο σημείο επί της καμπύλης βαθμού κορεσμού-ποσοστού υγρασίας αντιστοιχεί στο σημείο από το οποίο αρχίζει η απομάκρυνση της καμπύλης από την ευθεία  $S_r = 100\%$ , όπου πλέον η καμπύλη αυτή αρχίζει να στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω τείνοντας προς την ευθεία  $S_r = \frac{e_r}{G_s} \cdot w$ , όπου  $e_r$

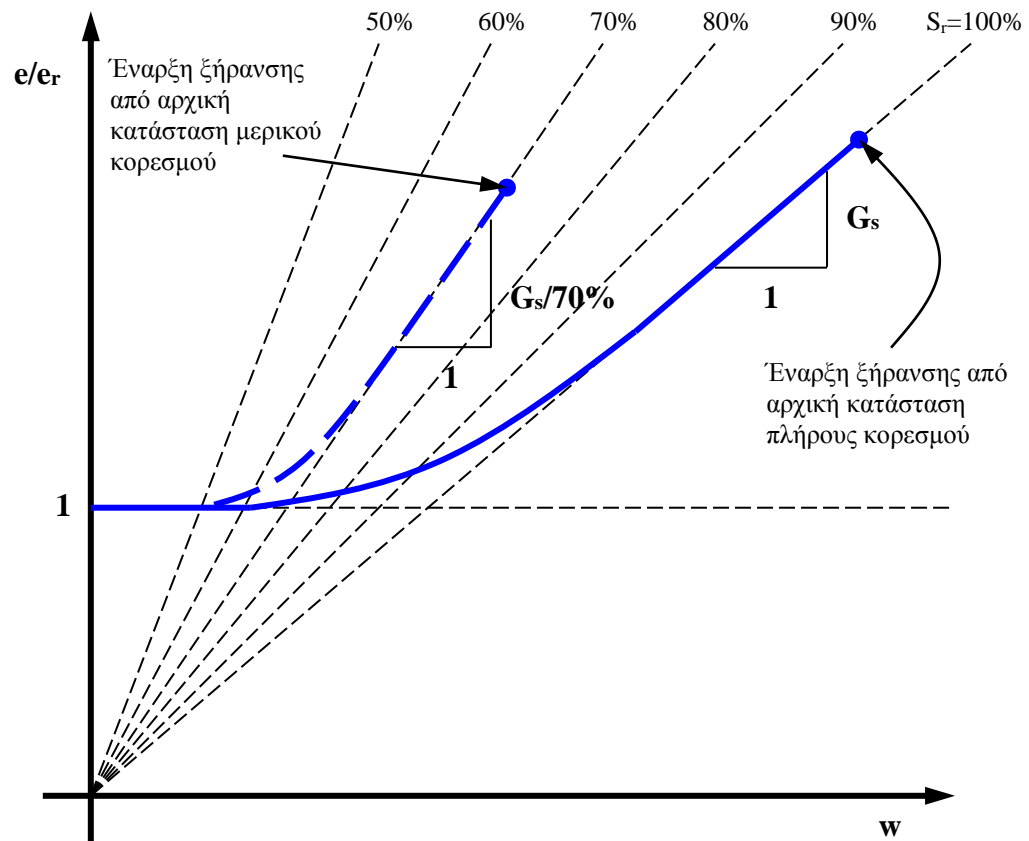
είναι ο παραμένον λόγος κενών (βλ. επόμενη παράγραφο). Τέλος το ίδιο σημείο στο Σχ. 5.13δ αντιστοιχεί στο πρώτο σημείο καμψής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που οριοθετεί την μετάβαση από την Περιοχή I στην Περιοχή II (βλ. Κεφ. 4).

Η εξέλιξη αυτή των καμπυλών του Σχ. 5.13 συνεχίζεται μέχρι την σταθεροποίηση του λόγου κενών σε μία τιμή που ονομάζεται παραμένον λόγος κενών  $e_r$  (Σχ. 5.13α) και αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας του υλικού  $w_r$  (Σχ. 5.13β) και στον παραμένοντα βαθμό κορεσμού (Σχ. 5.13δ). Η ονομαστική τιμή του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας προκύπτει από το σημείο τομής της ευθείας  $e = w \cdot G_s$  με την ευθεία  $w = w_r$  και είναι γνωστή ως *όριο συρρίκνωσης*. Σήμερα έχουν διατυπωθεί μαθηματικά προσομοιώματα των καμπυλών συρρίκνωσης, τα οποία επιτρέπουν την προσομοίωσή της για ξήρανση και από αρχικές συνθήκες πλήρους κορεσμού και από αρχικές συνθήκες μερικού κορεσμού (Fredlund et al., 2002). Στο Σχ. 5.14 παρουσιάζονται καμπύλες κανονικοποιημένου λόγου κενών-ποσοστού υγρασίας με τις ευθείες που αντιστοιχούν σε διάφορες σταθερές τιμές βαθμού κορεσμού καθώς και δύο ενδεικτικές καμπύλες ξήρανσης για αρχικές συνθήκες πλήρους κορεσμού και αρχικές συνθήκες μερικού κορεσμού (στο παράδειγμα αυτό 70%). Ο λόγος κενών στον κατακόρυφο άξονα έχει κανονικοποιηθεί με τον

<sup>6</sup> Αυτό δεν είναι υποχρεωτικό να συμβεί ακόμα και σε αρκετά συμπιεστά αργιλικά εδάφη και σίγουρα όχι σε αργιλοϊλυώδη και αργιλοαμώδη υλικά που είναι λιγότερο συμπιεστά. Τότε λοιπόν δεν εμφανίζεται το αναφερόμενο σημείο καμψής.



**Σχήμα 5.13.** α) Εξέλιξη του λόγου κενών με την μύζηση, β) η αντίστοιχη εξέλιξη του λόγου κενών με το ποσοστό υγρασίας (καμπύλη συρρίκνωσης), γ) η αντίστοιχη εξέλιξη του βαθμού κορεσμού με το ποσοστό υγρασίας, και δ) η αντίστοιχη καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης. Παρατίθεται σχηματικά η αντιστοιχία των χαρακτηριστικών σημείων της κάθε καμπύλης επί των άλλων καμπυλών, καθώς και κλίσεις χαρακτηριστικών τμημάτων τους.



**Σχήμα 5.14.** Εξέλιξη του λόγου κενών κανονικοποιημένου ως προς τον παραμένοντα λόγο κενών  $e_r$  με το ποσοστό υγρασίας (καμπύλη συρρίκνωσης) για έναρξη ξήρανσης από αρχική κατάσταση πλήρους κορεσμού και αρχική κατάσταση μερικού κορεσμού (με βαθμό κορεσμού 70%). Στο διάγραμμα παρατίθενται και ευθείες σταθερού βαθμού κορεσμού από 50% έως 100% ανά 10%.

παραμένοντα λόγο κενών  $e_r$  ( $e/e_r$ ) προκειμένου να απλοποιηθούν ζητήματα που σχετίζονται με την εξέλιξη του παραμένοντος λόγου κενών συναρτήσει των αρχικών συνθηκών, ειδικά μάλιστα στην ιδιαίτερη περίπτωση που αφορά σε αρχικές συνθήκες μερικού κορεσμού (είτε φυσικά εδάφη με αρχικό βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100% λόγω ξήρανσης, είτε συμπυκνωμένα εδάφη που αμέσως μετά τη συμπύκνωσή τους έχουν επίσης βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100%). Οι Bardanis & Kavvas (2006 & 2008c) και Μπαρδάνης & Καββαδάς (2006α) έχουν επιδείξει ότι ο παραμένον λόγος κενών αποτελεί παράμετρο που μεταβάλλεται ακόμα και για το ίδιο υλικό ανάλογα με την ιστορία φόρτισης-αποφόρτισής του και την δομή του όπως αυτές αποτυπώνονται στον αρχικό λόγο κενών του πριν την έναρξη της ξήρανσης (βλ. αναλυτική παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας διδακτορικής διατριβής στο Κεφ. 14 του Μέρους II). Η ακόμα πιο πολύπλοκη συμπεριφορά των φυσικών εδαφών που έχουν ήδη

υποστεί και ιστορία ξήρανσης-ύγρανσης, εκτός από ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης, και των συμπτυκνωμένων εδαφών αναμένεται ότι οδηγεί σε διαφορετικές τιμές του παραμένοντος λόγου κενών ακόμα και για το ίδιο υλικό, χωρίς όμως να διατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία για να επιδείξουν κάτι τέτοιο ή τον τρόπο της διαφοροποίησης του παραμένοντος λόγου κενών ως προς την τιμή του για αρχικά πλήρως κορεσμένο έδαφος. Γι' αυτόν το λόγο επιλέχθηκε η σχεδίαση του διαγράμματος του Σχ. 5.14 σε όρους κανονικοποιημένου λόγου κενών-ποσοστού υγρασίας.

Όπως προαναφέρθηκε, σήμερα έχουν διατυπωθεί μαθηματικά προσομοιώματα των καμπυλών συρρίκνωσης, τα οποία επιτρέπουν την προσομοίωσή της καμπύλης αυτής για ξήρανση και από αρχικές συνθήκες πλήρους κορεσμού και από αρχικές συνθήκες μερικού κορεσμού. Οι Fredlund, et al. (2002) πρότειναν την Εξ. 5.5 για τη μαθηματική προσομοίωση της καμπύλης συρρίκνωσης εκπεφρασμένης σε όρους λόγου κενών-ποσοστού υγρασίας (e-w):

$$e = \alpha_{sh} \cdot \left[ \left( \frac{w}{b_{sh}} \right)^{c_{sh}} + 1 \right]^{1/c_{sh}} \quad (5.5)$$

όπου  $\alpha_{sh}$  ο ελάχιστος λόγος κενών στην καμπύλη συρρίκνωσης, δηλ. ο παραμένων λόγος κενών  $e_r$ ,  $b_{sh}$  η κλίση της εφαπτομένης στην καμπύλη συρρίκνωσης στο τμήμα πλήρους κορεσμού της καμπύλης και  $c_{sh}$  παράμετρος που εκφράζει την καμπυλότητα της καμπύλης συρρίκνωσης μεταξύ ευθύγραμμου τμήματος πλήρους κορεσμού και οριζόντιου τμήματος που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών.

Οι μεταβολές που περιγράφηκαν στο Σχ. 5.13 πρέπει να τονιστεί ότι αφορούν σε πολύ παραμορφώσιμα εδάφη, τα οποία μάλιστα είναι μή κορεσμένα και όχι μερικώς κορεσμένα. Γι' αυτό άλλωστε υποτέθηκε ότι το εδαφικό υλικό των καμπυλών στο Σχ. 5.13 είναι μία αναζυμωμένη άργιλος. Προκειμένου για φυσικές σκληρές αργίλους και μάργες, κοκκώδη υλικά και εδάφη που έχουν συμπτυκνωθεί σημαντικά, οι μεταβολές όγκου κατά την ξήρανση είναι από μικρές έως αμελητέες. Στις περιπτώσεις αυτών των υλικών οι απεικονιζόμενες καμπύλες στα Σχ. 5.13α και 5.13β μπορεί να είναι ευθείες γραμμές ή του ίδιου σχήματος μεν, πολύ πιο απαλές δε. Το γεγονός αυτό έχει σημαντική επιρροή στη μέθοδο μετατόπισης άξονα για τον εργαστηριακό έλεγχο της μύζησης προκειμένου να μπορούν να γίνουν ακριβείς μετρήσεις του λόγου κενών των εδαφικών υλικών σε διάφορες τιμές της μύζησης (βλ. σχετικά §4.3.2 και ειδικά Σχ. 4.22).

#### **5.4.4 Μεταβολές όγκου για μύζηση μεγαλύτερη της μύζησης επίτευξης παραμένουτος ποσοστού υγρασίας**

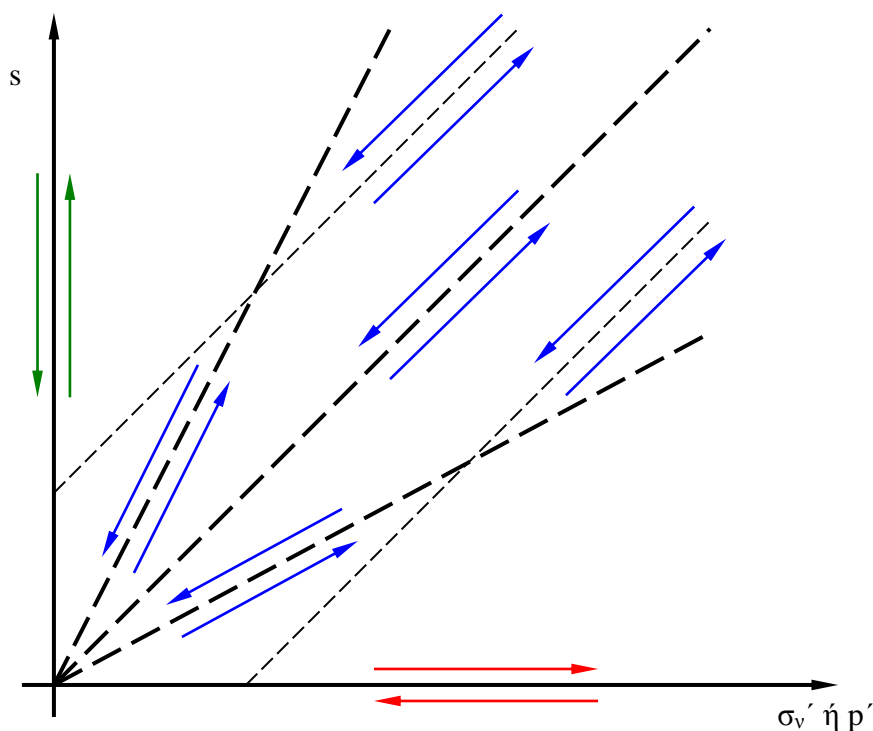
Όπως προκύπτει από τον ορισμό του παραμένουτος ποσοστού υγρασίας, δεδομένου ότι στην παράγραφο αυτή εξετάζονται μεταβολές όγκου υπό μηδενική ολική τάση, ο λόγος κενών έχει λάβει και εκείνος την οριακή του τιμή –παραμένων λόγος κενών- και γι' αυτόν το λόγο δεν είναι πλέον δυνατόν να συμβούν ογκομετρικές μεταβολές για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες από τη μύζηση επίτευξης του παραμένουτος ποσοστού υγρασίας. Στο σημείο αυτό τονίζεται η διάκριση μεταξύ του πραγματικού παραμένουτος λόγου κενών και του παραμένουτος λόγου κενών στην ονομαστική τιμή της μύζησης επίτευξης του (μεγαλύτερη τιμή από την προηγούμενη) και αντίστοιχα η διάκριση ανάμεσα στο πραγματικό παραμένον ποσοστό υγρασίας και στην ονομαστική του τιμή που είναι το όριο συρρίκνωσης (μεγαλύτερη από την πρώτη), στην οποία αντιστοιχεί η ονομαστική τιμή του παραμένουτος λόγου κενών. Προφανώς για μεταβολές της μύζησης μεταξύ της ονομαστικής τιμής της μύζησης επίτευξης του παραμένουτος λόγου κενών και της μύζησης επίτευξης του πραγματικού παραμένουτος λόγου κενών είναι δυνατόν να συμβούν μικρές μεταβολές όγκου, αλλά αυτές προκύπτουν απλώς λόγω της μικρής διαφοράς μεταξύ των δύο τιμών του λόγου κενών. Για μεταβολές της μύζησης από τη μύζηση επίτευξης της πραγματικής τιμής του λόγου κενών και μετά, δεν υπάρχουν περαιτέρω ογκομετρικές μεταβολές. Η σκοπιμότητα του ορισμού και της χρησιμοποίησης της ονομαστικής τιμής της μύζησης επίτευξης του παραμένουτος λόγου κενών επεξηγείται στην επόμενη παράγραφο.

## 5.5 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΟΓΚΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ

### 5.5.1 Εισαγωγή – Δυνατές καταστάσεις μεταβολών μύζησης και τάσης

Στις προηγούμενες παραγράφους έγινε αναφορά στις μεταβολές όγκου των εδαφικών υλικών συναρτήσει μεταβολών της τάσης μόνο και αναλυτική παρουσίαση των μεταβολών όγκου των εδαφικών υλικών συναρτήσει μεταβολών της μύζησης μόνο. Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά στις ογκομετρικές μεταβολές που προκύπτουν από ταυτόχρονη μεταβολή της ολικής τάσης και της μύζησης.

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμη η εξέταση των πραγματικών δυνατοτήτων εμφάνισης ταυτόχρονων μεταβολών και των δύο παραμέτρων. Στο Σχ. 5.15 παρουσιάζεται ο χώρος ολικής τάσης-μύζησης με τις διαδρομές που εξετάστηκαν ως τώρα και τις διαδρομές που εξετάζονται στην παρούσα παράγραφο.



**Σχήμα 5.15.** Το επίπεδο ολικής τάσης-μύζησης με τις διαδρομές που αντιστοιχούν σε μεταβολές της ολικής τάσης υπό μηδενική μύζηση (επί του άξονα της ολικής τάσης), σε μεταβολές της μύζησης υπό μηδενική ολική τάση (επί του άξονα της μύζησης), και σε ταυτόχρονες μεταβολές της ολικής τάσης και της μύζησης (κατά μήκος ακτινικών ή μη διαδρομών).



Τα κόκκινα βέλη στο Σχ. 5.15 συμβολίζουν τις διαδρομές που αντιστοιχούν σε μεταβολές της ολικής τάσης υπό μηδενική μύζηση (μεταβολές της ενεργού τάσης ουσιαστικά, οι οποίες συμβαίνουν σε πλήρως κορεσμένα εδάφη) και γίνονται επί του άξονα των ολικών τάσεων. Τα πράσινα βέλη στο Σχ. 5.15 συμβολίζουν τις διαδρομές που αντιστοιχούν σε μεταβολές της μύζησης υπό μηδενική ολική τάση και γίνονται επί του άξονα της μύζησης. Τα μπλε βέλη συμβολίζουν διαδρομές υπό ταυτόχρονες μεταβολές και της μύζησης και της ολικής τάσης, κατά μήκος είτε ακτινικών διαδρομών (έντονες διακεκομμένες γραμμές διαφόρων κλίσεων στο Σχ. 5.15), είτε άλλων που αντιστοιχούν σε αρχικές εντατικές καταστάσεις με μη μηδενική ολική τάση ή μύζηση (διακεκομμένες γραμμές στο Σχ. 5.15 με διάφορες αρχικές εντατικές καταστάσεις).

Μεταβολές της μύζησης υπό μηδενική ολική τάση ή κάποια σταθερή τιμή της είναι πράγματι πιθανές καθώς αντιστοιχούν σε ξήρανση ή ύγρανση που προκλήθηκε από ατμοσφαιρικές συνθήκες ή ταπείνωση/ανύψωση του υπόγειου ορίζοντα σε έδαφος χωρίς καμμία φόρτιση (εδαφικά υλικά σε μικρό βάθος) ή σε έδαφος υπό την πρακτικά σταθερή φόρτιση π.χ. του ίδιου βάρους τους ή ενός κτιρίου. Και στις δύο περιπτώσεις μπορεί πράγματι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες ή η ταπείνωση/ανύψωση της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα που προκαλούν τη μεταβολή της μύζησης να συμβούν σε τέτοιο χρονικό διάστημα που το φορτίο σε ένα θεωρούμενο στοιχείο να παρέμεινε μηδενικό ή σταθερό.

Μεταβολές της τάσης υπό μηδενική μύζηση ή κάποια σταθερή τιμή της είναι πράγματι πιθανές καθώς αντιστοιχούν σε φόρτιση ή αποφόρτιση του εδάφους, τόσο «ραγδαία» που πράγματι η μύζηση να παραμένει μηδενική ή σταθερή μη μηδενική. Σε ό,τι αφορά τις μεταβολές της τάσης υπό μηδενική τιμή της μύζησης αυτές είναι προφανώς εφικτές αφού αφορούν κάθε μεταβολή της τάσης σε πλήρως κορεσμένα εδάφη. Σε ό,τι αφορά τις μεταβολές της τάσης υπό σταθερή μη μηδενική τιμή της μύζησης, είναι και αυτές εφικτές υπό δύο προϋποθέσεις. Η πρώτη από αυτές είναι η μεταβολή της τάσης να γίνεται αρκετά ραγδαία ώστε οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επιδρούν σε ένα εδαφικό υλικό να παραμένουν πράγματι σταθερές και να αντιστοιχούν σε μεταβολές όγκου που δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή του βαθμού κορεσμού. Για παράδειγμα ένα κτίριο τέτοιων διαστάσεων που κατασκευάζεται μέσα σε διάστημα δύο μηνών της ίδιας εποχής του έτους, μπορεί πρακτικά να θεωρηθεί ότι επέβαλε στο έδαφος μία μεταβολή της τάσης υπό σταθερή μύζηση, εκείνη που κατά μέσο όρο αντιστοιχεί στις ατμοσφαιρικές συνθήκες και τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα του διμήνου της κατασκευής. Η δεύτερη από αυτές σχετίζεται με το κατά πόσο η ίδια η τιμή της μύζησης αλλάζει υπό την επιβολή της

μεταβολής της τάσης. Για παράδειγμα, αύξηση της τάσης σε συμπιεστό έδαφος, ακόμα και υπό τόσο ταχείς ρυθμούς που να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε πραγματικά σταθερή τιμή της μύζησης λόγω μη μεταβολής των ατμοσφαιρικών συνθηκών ή της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα, θα προκαλέσει μείωση της ολικού όγκου υπό σταθερό ποσοστό υγρασίας προκαλώντας αύξηση του βαθμού κορεσμού και κατά συνέπεια μείωση της μύζησης. Η μεταβολή αυτή της μύζησης είναι δευτερογενής ως αποτέλεσμα της μεταβολής της τάσης και μπορεί να είναι αρκετά σημαντική σε εδαφικά υλικά με μεγάλη συμπιεστότητα έως πρακτικά ασήμαντη σε εδαφικά υλικά με πολύ μικρή συμπιεστότητα.

Αυτή η τελευταία δευτερογενής μεταβολή της μύζησης λόγω μεταβολής της τάσης συνιστά και τον μόνο πρακτικό τρόπο εμφάνισης ταυτόχρονης μεταβολής της μύζησης και της ολικής τάσης. Ακτινικές διαδρομές ή διαδρομές ταυτόχρονης μεταβολής της μύζησης και της τάσης από αρχικές συνθήκες μη μηδενικών τιμών της τάσης ή/και της μύζησης, είναι μάλλον πολύ δύσκολο να εμφανιστούν στην πράξη για οποιαδήποτε κατασκευαστική διαδικασία. Η κατασκευή ενός έργου θα έπρεπε να γίνεται τόσο αργά (ή το έργο να είναι τόσο μεγάλο), ώστε να εκτείνεται η επιβολή του φορτίου της κατασκευής σε χρονική περίοδο εντός ενός έτους ή περισσότερων ετών κατά την οποία να συμβεί ταυτόχρονα μεταβολή της μύζησης λόγω της μεταβολής των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, η ίδια η κατασκευή του έργου πιθανόν θα περιορίζει την δυνατότητα μεταβολής της μύζησης. Ραγδαία αύξηση της μύζησης που θα οφειλόταν σε ξήρανση λόγω αυξημένης θερμοκρασίας, ηλιοφάνειας και έντασης ανέμου ή μειωμένης υγρασίας, ουσιαστικά περιορίζεται από την παρουσία μίας κατασκευής στην επιφάνεια του εδάφους, η οποία ουσιαστικά αποτρέπει την έκθεση του εδάφους σε αυτές τις συνθήκες. Αντίστοιχα, ραγδαία μείωση της μύζησης που θα οφειλόταν σε ύγρανση λόγω μειωμένης θερμοκρασίας, ηλιοφάνειας και έντασης ανέμου ή αυξημένης υγρασίας, ή ακόμα συνηθέστερα επεισοδίων βροχόπτωσης, περιορίζεται με τον ίδιο τρόπο από μία κατασκευή που εμποδίζει την έκθεση του εδάφους σε αυτές τις συνθήκες. Αντίθετα, στην περίπτωση αποφόρτισης –π.χ. εκσκαφή ενός πρανούς- η κατασκευαστική διαδικασία επιβάλλει παράλληλα με την μεταβολή της τάσης –μείωση εν προκειμένω λόγω της εκσκαφής- μεγαλύτερο μέτωπο στο οποίο μπορούν να εφαρμοστούν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που μπορούν να προκαλέσουν μείωση ή αύξηση της μύζησης<sup>7</sup>. Ακόμα όμως και στην περίπτωση αυτή, επειδή οι μεταβολές της μύζησης που οφείλονται σε μεταβολές της θερμοκρασίας, της υγρασίας, της ηλιοφάνειας και της έντασης του ανέμου, είναι εξαιρετικά αργές (ειδικά –αλλά όχι μόνο- σε αργιλικά εδάφη), η

---

<sup>7</sup> Χωρίς να παραγνωρίζονται μεταβολές στην πίεση του νερού των πόρων του εδάφους και λόγω της μεταβολής της ολικής τάσης εξαιτίας της εκσκαφής.

«ταυτόχρονη» εξέλιξη μύζησης και ολικής τάσης, είναι πολύ πιθανόν ότι θα έχει τη μορφή βαθμιδωτής καμπύλης εξέλιξης, με τμήματα πρακτικά παράλληλα στον άξονα της ολικής τάσης λόγω της κατασκευαστικής διαδικασίας και τμήματα παράλληλα στον άξονα της μύζησης λόγω ξαφνικών επεισοδίων βροχόπτωσης (θα αντιστοιχούν σε μείωση της μύζησης). Τμήματα παράλληλα στον άξονα της μύζησης που θα αντιστοιχούν σε αύξηση της μύζησης (ξήρανση) αναμένονται για χρονικές περιόδους στην κατασκευαστική διαδικασία των έργων που οι εργασίες που προκαλούν αύξηση ή μείωση της ολικής τάσης έχουν πρακτικά σταματήσει και επικρατούν πλέον «θερινές» ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Τα παραπάνω δικαιολογούν, αφενός τη διαχείριση ενός τριδιάστατου χώρου ολικής τάσης-μύζησης-παραμόρφωσης ή λόγου κενών με τομές που ορίζουν επίπεδα σταθερής μύζησης ή ολικής τάσης, και αφετέρου την πρακτική –εκτός από τη θεωρητική– σημασία της κατάστρωσης εργαστηριακών δοκιμών στις οποίες διατηρείται η μία από τις δύο παραμέτρους τάσης σταθερή και μεταβάλλεται η άλλη. Στις παραγράφους που ακολουθούν εξετάζεται η μεταβολή των παραμέτρων που περιγράφουν τη συμπίεστικότητα των εδαφών για μεταβολή της μύζησης.

### 5.5.2 Ο χώρος ολικής τάσης-μύζησης-λόγου κενών

Όπως φάνηκε ήδη, για την κατανόηση των προβλημάτων των μεταβολών όγκου χρειάζεται η παρουσίαση και επεξεργασία τους σε έναν τριδιάστατο χώρο, στον οποίο θα μπορεί να καταγραφεί η μεταβολή του λόγου κενών και λόγω μεταβολών της τάσης και λόγω μεταβολών της μύζησης. Ο χώρος αυτός λοιπόν στην απλούστερη του μορφή είναι ο χώρος της ολικής μέσης τάσης-μύζησης-λόγου κενών (p-s-e). Το επίπεδο μηδενικής μύζησης (πλήρους κορεσμού) έχει τη μορφή του Σχ. 5.1 προκειμένου για αργίλους και του Σχ. 5.4 προκειμένου για κοκκώδη εδαφικά υλικά. Το επίπεδο μηδενικής ολικής τάσης (χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού) έχει τη μορφή του Σχ. 5.13α ανεξαρτήτως τύπου εδάφους, με το σχήμα της καμπύλης να διακρίνεται σαφώς, προκειμένου για περισσότερο συμπίεστα υλικά όπως μαλακές άργιλοι, και λιγότερο για λιγότερο συμπίεστα υλικά όπως στιφρές άργιλοι και μάργες και κοκκώδη υλικά.

Σε ό,τι αφορά τις υπόλοιπες δυνατές καταστάσεις μη μηδενικών τιμών της μέσης ολικής τάσης και της μύζησης, τα διατιθέμενα πειραματικά δεδομένα συμφωνούν γενικά ως προς τα εξής (για μεταβολές της ολικής τάσης υπό σταθερή μύζηση, αυξανομένης της μύζησης υπό την οποία γίνονται οι μεταβολές της τάσης):

- α) Μείωση της συμπίεστος,της,
- β) Αύξηση της τάσης φαινόμενης προστεροποίησης,

Η μείωση της συμπίεστος,της εκφράζεται με τη μείωση του δείκτη συμπίεσης αυξανόμενης της μύζησης. Οι Alonso, et al. (1990) παρουσίασαν το πρώτο ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα στο οποίο επιδεικνύεται η μεταβολή του δείκτη συμπίεσης με τη μύζηση. Στο Σχ. 5.16α παρουσιάζονται καμπύλες ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση σε όρους ειδικού όγκου  $v - μέσης ολικής τάσης p$  (σε κλίμακα φυσικών λογαρίθμων), όπου ειδικός όγκος  $v = 1 + e$ . Η πρώτη από τις δύο καμπύλες είναι εκείνη του πλήρως κορεσμένου εδάφους και αντιστοιχεί σε μηδενική μύζηση για την οποία ο δείκτης επανασυμπίεσης είναι  $k$  και ο δείκτης συμπίεσης  $\lambda$ , εν προκειμένω  $\lambda(s = 0)$ . Η δεύτερη καμπύλη ισοτροπικής συμπίεσης αντιστοιχεί σε σταθερή τιμή της μύζησης, έστω  $s_1$ . Για αυτήν ο δείκτης επανασυμπίεσης παραμένει  $k$  (όπως τεκμηριώνεται από πειραματικά δεδομένα), αλλά ο δείκτης συμπίεσης έχει γίνει μικρότερος (αφού το υλικό έχει γίνει πιο στιφρό) ίσος με  $\lambda(s = s_1)$ . Οι Alonso et al. (1990) πρότειναν για τη μεταβολή του δείκτη συμπίεσης με τη μύζηση δύο εμπειρικές συσχετίσεις (Εξ. 5.6 & 5.7).

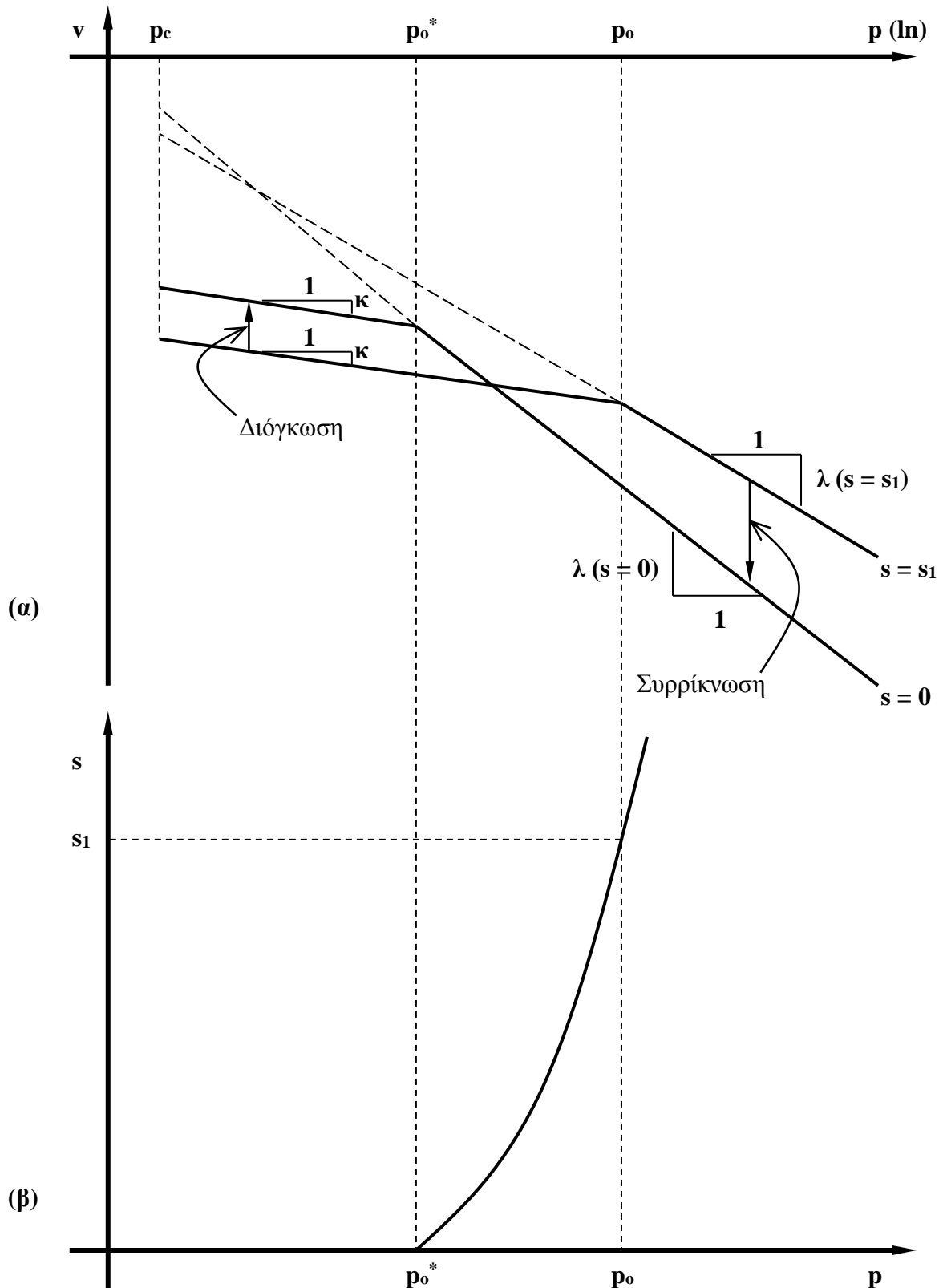
$$\lambda(s) = b + d \ln s \tag{5.6}$$

$$\lambda(s) = \lambda(s = 0) [(1 - r) \exp (-\beta s) + r] \tag{5.7}$$

Οι παράμετροι  $b$ ,  $d$ ,  $r$  και  $\beta$  είναι εμπειρικές.

Η Εξ. 5.6 προέκυψε με βάση τα πειραματικά δεδομένα των Lloret & Alonso (1985) και προβλέπει επιτυχώς μείωση του δείκτη συμπίεσης για τιμές της παραμέτρου  $d$  μικρότερες του 0. Έχει ωστόσο τα μειονεκτήματα ότι προβλέπει συνεχή μείωση του δείκτη συμπίεσης αυξανόμενης της μύζησης, οπότε πρέπει να περιορίζεται το εύρος των τιμών της μύζησης για τις οποίες πρέπει να χρησιμοποιείται, και επίσης δεν νοούνται μαθηματικά οι τιμές του δείκτη συμπίεσης για μηδενική τιμή της μύζησης.

Η Εξ. 5.7 αντίθετα προβλέπει ότι ο δείκτης συμπίεσης τείνει ασυμπτωτικά σε μία ελάχιστη τιμή με την αύξηση της μύζησης. Η τιμή αυτή καθορίζεται από την εμπειρική παράμετρο  $r$ , η οποία ορίζεται θεωρητικά ως ο λόγος του δείκτη συμπίεσης για τη μύζηση τείνουσα στο άπειρο προς τον δείκτη συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους,  $r = \lambda(s \rightarrow \infty) / \lambda(s = 0)$ . Η παράμετρος  $\beta$  καθορίζει τον ρυθμό μείωσης του δείκτη συμπίεσης. Η Εξ. 5.7 εκτός του ότι προσεγγίζει πιο ρε-



**Σχήμα 5.16.** α) Καμπύλες ιστροπικής συμπίεσης για πλήρως κορεσμένο έδαφος και μη κορεσμένο υπό σταθερή μύζηση  $s$ , και β) καμπύλη μεταβολής της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης στο επίπεδο ολικής τάσης-μύζησης με την αντιστοιχία των σημείων μεταξύ των δύο καμπυλών.

αλιστικά την εξέλιξη του δείκτη συμπίεσης με τη μύζηση, οδηγεί σε λογική πρόβλεψη της τιμής του δείκτη συμπίεσης για μηδενική τιμή της μύζησης, αφού για  $s = 0$ , γίνεται  $\lambda(s) = \lambda(s = 0)$ , για οποιαδήποτε τιμή των παραμέτρων  $\gamma$  και  $\beta$ .

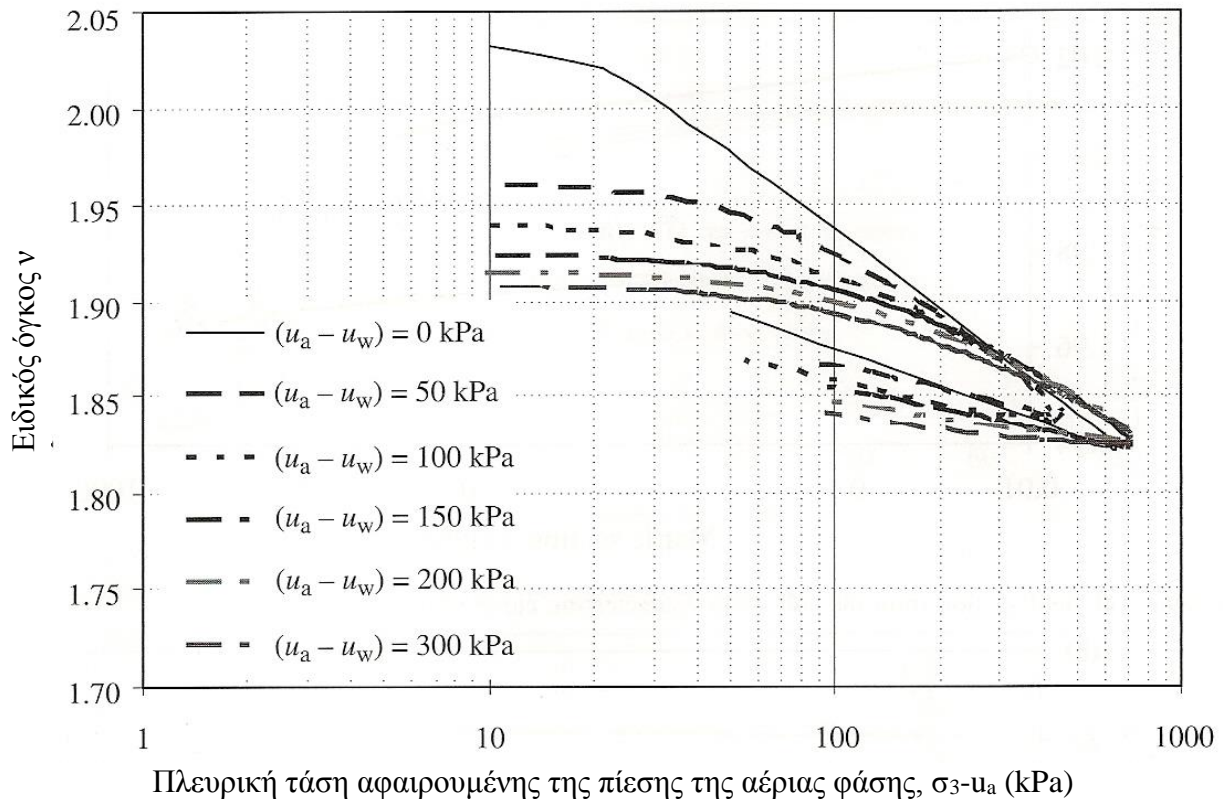
Η αύξηση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης (ή τάσης διαρροής) αποτελεί και αυτή συνέπεια της αύξησης της σφιγρότητας των εδαφικών υλικών όταν μειώνεται ο βαθμός κορεσμού τους. Στο Σχ. 5.16α παρουσιάζεται η διαφορετική τάση διαρροής των δύο καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης για μηδενική μύζηση και μία τιμή της μύζησης διάφορη του μηδενός και στο Σχ. 5.16β ο γεωμετρικός τόπος της τάσης διαρροής στο επίπεδο μέσης ολικής τάσης – μύζησης. Οι Alonso, et al. (1990) πρότειναν την Εξ. 5.8 για την εξέλιξη της τάσης διαρροής με την μύζηση, όπου  $p_o$  η τάση διαρροής για τιμή της μύζησης  $s$ ,  $p_o^*$  η τάση διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους και  $p_c$  τυχαία, αυθαίρετα επιλεγόμενη, τιμή αναφοράς της μέσης ολικής τάσης.

$$\left( \frac{p_o}{p_c} \right) = \left( \frac{p_o^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \quad (5.8)$$

Στο Σχ. 5.16 παρουσιάζονται πραγματικές καμπύλες ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερές τιμές της μύζησης όπως μετρήθηκαν από τους Thu, et al. (2007) σε συμπακνωμένο καολίνη από τη Μαλαισία με κοκκομετρική διαβάθμιση που αντιστοιχούσε σε ιλύ (15% άργιλος, 85% ιλύς,  $w_L=51\%$ ,  $I_p=14.5$ ,  $G_s=2.65$ , κατάταξη κατά USCS, MH). Η ισοτροπική συμπίεση πραγματοποιήθηκε σε τριαξονική δοκιμή με έλεγχο της μύζησης εδαφικού σκελετού μέσω της μεθόδου μετατόπισης άξονα. Οι καμπύλες του Σχ. 5.17 αντιστοιχούν στο πλήρως κορεσμένο έδαφος και σε τιμές σταθερής μύζησης 50, 100, 150, 200 και 300 kPa. Παρατηρείται η προοδευτική μείωση του δείκτη συμπίεσης και η προοδευτική αύξηση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης με την αύξηση της μύζησης υπό την οποία γίνεται η ισοτροπική συμπίεση.

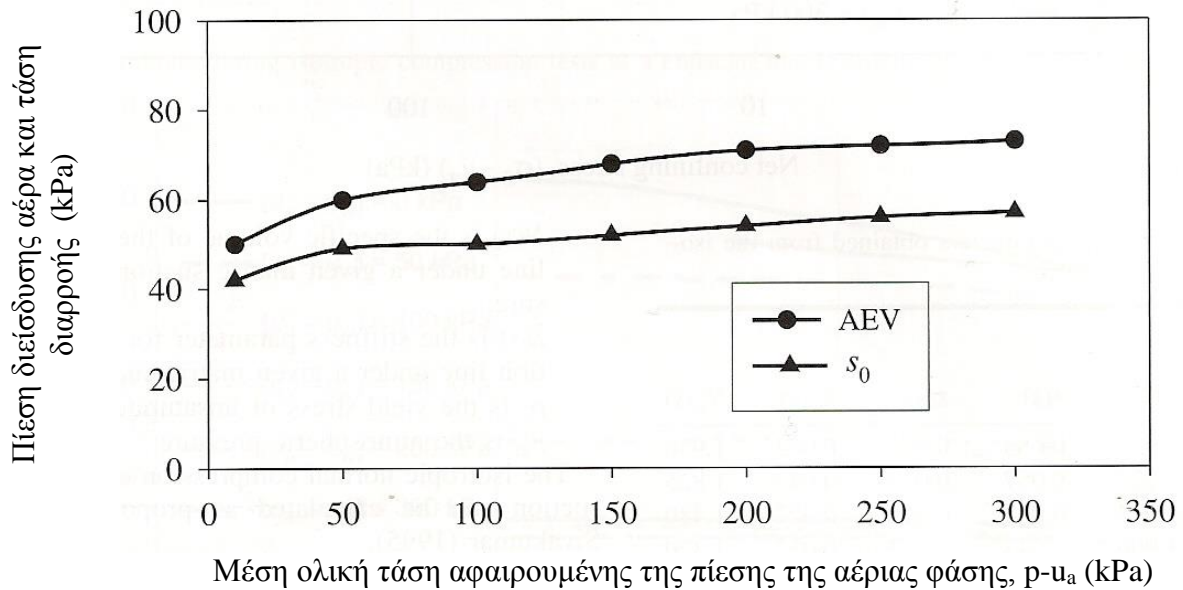
Εκτός των καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση, οι Thu, et al. (2007) μέτρησαν και τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού του ίδιου υλικού υπό σταθερές τιμές της τάσης και προσδιόρισαν για κάθε μία από αυτές ότι αυξανόμενη της τάσης αυξάνεται και η πίεση διείδυσης αέρα του υλικού αλλά και η τάση διαρροής που παρατηρείται στις καμπύλες ειδικού όγκου-μύζησης,  $v-s$ . Στο Σχ. 5.18 παρουσιάζεται η εξέλιξη της πίεσης διείδυσης αέρα και της τάσης διαρροής επί καμπυλών  $v-s$  του υλικού. Παρατηρείται ότι μεταξύ

πίεσης διείσδυσης αέρα και τάσης διαρροής υπάρχει μικρή διαφορά και οι τιμές των δύο μεγεθών δεν ταυτίζονται. Αυτό πιθανόν οφείλεται στις γεωμετρικές κατασκευές που χρησιμοποιούνται επί των καμπυλών  $v-s$  και  $S_r-s$  για τον προσδιορισμό των ονομαστικών τιμών της μύζησης διαρροής και της πίεσης διείσδυσης αέρα.



**Σχήμα 5.17.** Καμπύλες ιστροπικής συμπίεσης για πλήρως κορεσμένο καολίνη και μή κορεσμένο υπό σταθερή μύζηση  $s$  (Thu, et al., 2007).

Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει από το Σχ. 5.16α είναι ότι για αρχικές συνθήκες που αντιστοιχούν σε συνδυασμό μέσης ολικής τάσης και μύζησης, τέτοιον ώστε το έδαφος να βρίσκεται επί του κλάδου επανασυμπίεσης, μείωση της μύζησης υπό σταθερή μέση ολική τάση προκαλεί *διόγκωση* (swelling), ενώ για αρχικές συνθήκες που αντιστοιχούν σε συνδυασμό μέσης ολικής τάσης και μύζησης επί του κλάδου συμπίεσης του μή κορεσμένου εδάφους, μείωση της μύζησης αντιστοιχεί σε *συρρίκνωση* (collapse) του εδάφους. Κατά συνέπεια τα μή κορεσμένα εδαφικά υλικά *επιδεικνύουν διογκώσιμη συμπεριφορά* όσο η μέση ολική τους τάση αντιστοιχεί σε τιμές μικρότερες της τάσης διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους, και *καταρρεύσιμη συμπεριφορά* όταν η μέση ολική τους τάση αντιστοιχεί σε τιμές μεγαλύτερες της τάσης διαρροής

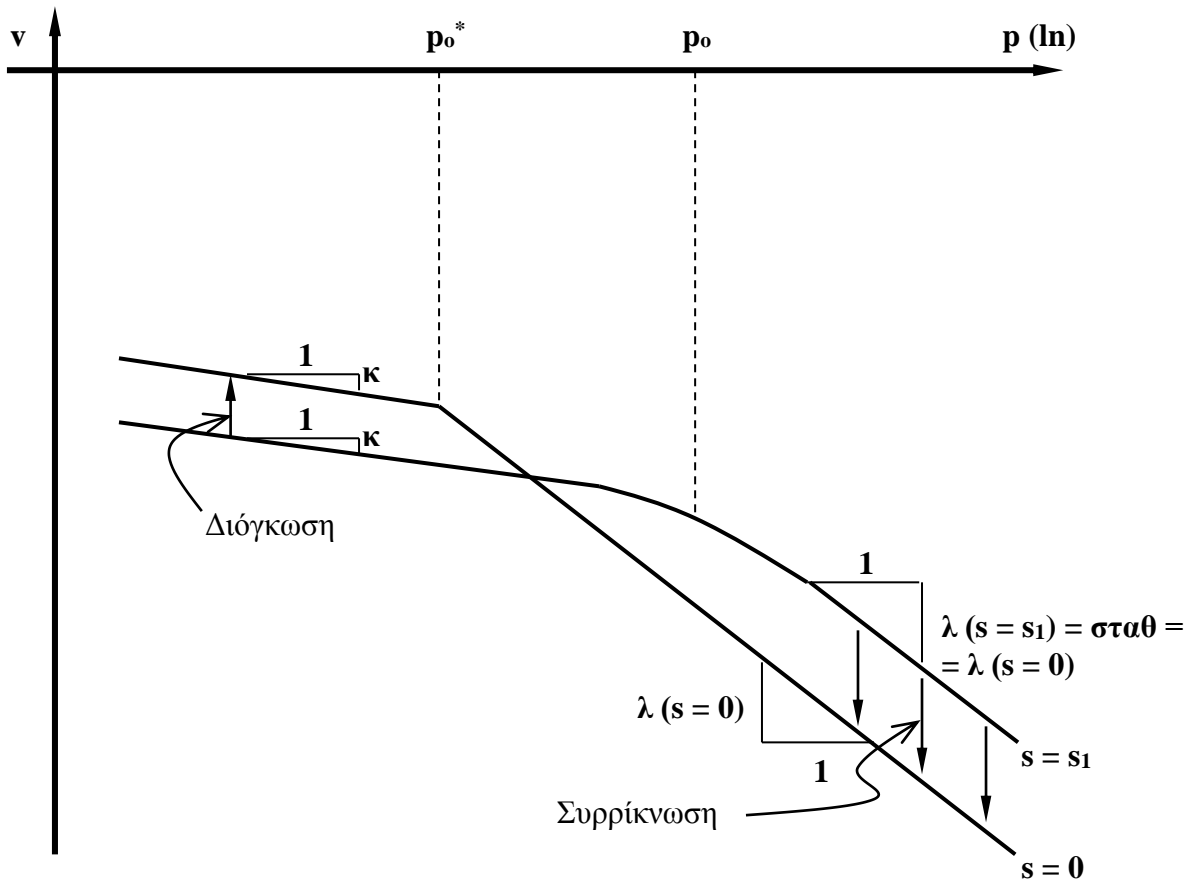


**Σχήμα 5.18.** Μεταβολή της πίεσης διείσδυσης αέρα και της τάσης διαρροής επί καμπυλών  $v-s$  του υλικού με την μέση ολική τάση αφαιρουμένης της πίεσης της αέριας φάσης (Thu et al., 2007).

τους που αντιστοιχεί στη μύζηση υπό την οποία βρίσκονται. Στο ενδιάμεσο –μικρό- εύρος τιμών της μέσης ολικής τάσης η συμπεριφορά που θα επιδειχθεί εξαρτάται από τον συνδυασμό των τιμών τάσης και μύζησης.

Οι προτάσεις των Alonso, et al. (1990) για την εξέλιξη του δείκτη συμπίεσης και της τάσης διαρροής όπως επιδεικνύονται στα Σχ. 5.16α και 5.16β και περιγράφονται από τις Εξ. 5.7 και 5.8, οδηγούν στην πρόβλεψη συνεχούς αύξησης της αναμενόμενης συρρίκνωσης με την αύξηση της μέσης ολικής τάσης. Πειραματικά δεδομένα επιδεικνύουν ότι αυτό δεν είναι αληθές για όλους τους τύπους εδαφών. Υπάρχουν εδαφικά υλικά στα οποία η συρρίκνωση τους σταθεροποιείται από μία τιμή της τάσης και μετά ή ακόμα και μειώνεται. Αυτό σημαίνει ότι για τα εδαφικά αυτά υλικά, ανεξαρτήτως τιμών μύζησης, μεταβάλλεται μεν η τάση διαρροής, αλλά η τιμή του δείκτη συμπίεσης παραμένει σταθερή με τη μύζηση, με την παρεμβολή μόνο πιθανόν ενός καμπύλου τμήματος μεταξύ του κλάδου επανασυμπίεσης και του κλάδου συμπίεσης, το οποίο εκτείνεται σε σημαντικό εύρος τιμών της τάσης (Σχ. 5.19).

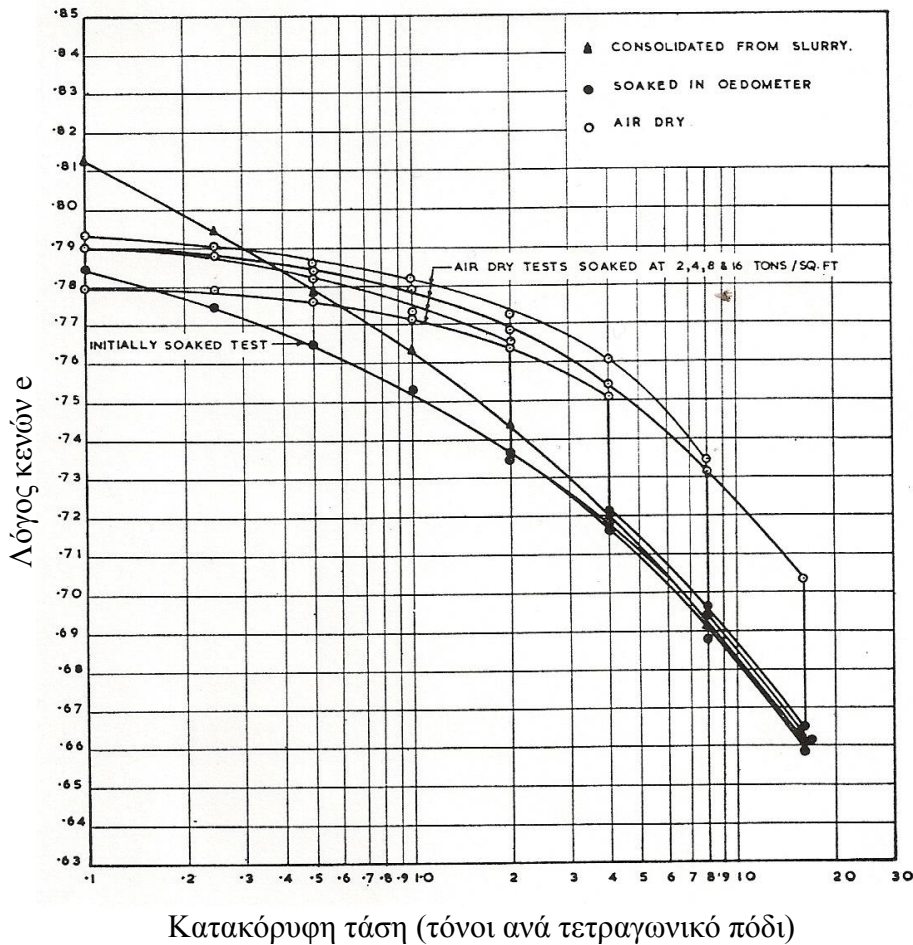




**Σχήμα 5.19.** Καμπύλες ιστροπικής συμπίεσης για πλήρως κορεσμένο έδαφος και μη κορεσμένο υπό σταθερή μύζηση  $s$  για εδαφικά υλικά στα οποία σταθεροποιείται το ποσοστό συρρίκνωσης με την αύξηση της μέσης ολικής τάσης.

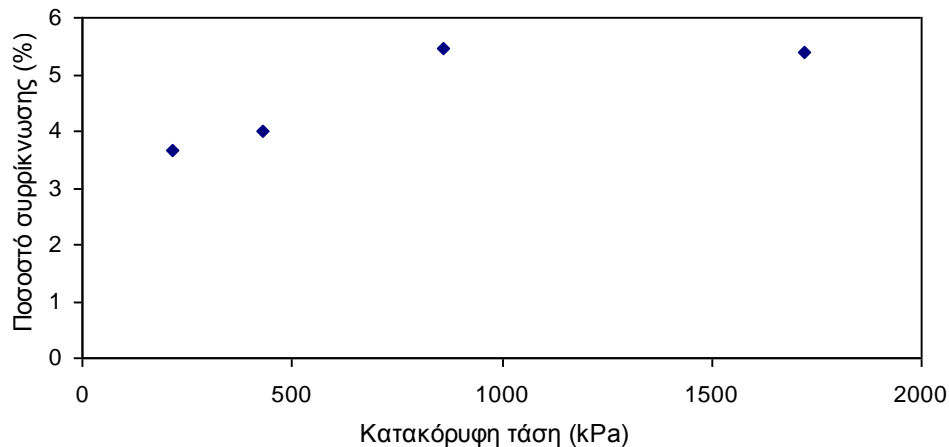
Στο Σχ. 5.20 παρουσιάζονται οι κλασσικές δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης των Jennings & Burland (1962) σε χαλαζιτική ιλύ (μη πλαστική). Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται και η καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης του ίδιου υλικού σε μορφή πολτού με αρχικό ποσοστό υγρασίας 35%. Οι υπόλοιπες καμπύλες αντιστοιχούν σε δοκίμια της ίδιας ιλύος, τα οποία προήλθαν από ξήρανση του πολτού της ιλύος στις ατμοσφαιρικές συνθήκες του εργαστηρίου μέχρι σταθεροποίησης του βάρους των δοκιμίων και στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε μονοδιάστατη συμπίεση σε κυψέλες χωρίς νερό μέχρι κατακόρυφης τάσης 2, 4, 8 και 16 τόνων ανά τετραγωνικό πόδι (215, 430, 860 και 1720 kPa), υπό τις οποίες τους παρασχέθηκε περίσσεια νερού και η φόρτισή τους συνεχίστηκε μέχρι τη μέγιστη τάση. Όπως παρατηρείται στο Σχ. 5.20, η μείωση του λόγου κενών λόγω της διαβροχής είναι πρακτικά σταθερή από την τάση των 860 kPa και μετά. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για δοκίμια που είχαν προετοιμαστεί με τον ίδιο τρόπο αλλά υποβλήθηκαν σε ιστροπική συμπίεση. Στις δοκιμές αυτές δεν υπήρχε έλεγχος

της μύζησης αλλά μόνο του ποσοστού υγρασίας<sup>8</sup>. Κατά συνέπεια δεν ήταν δυνατόν να παρατηρηθούν οι μεταβολές στον δείκτη συμπίεσης και την τάση διαρροής που περιγράφηκαν προηγουμένως. Σε κάθε περίπτωση όμως επιδείχθηκε η σταθεροποίηση του ποσοστού συρρίκνωσης αυξανόμενης της τάσης υπό την οποία έγινε η διαβροχή των δοκιμίων. Πράγματι, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.21 το ποσοστό της συρρίκνωσης αυξάνεται αρχικά μέχρι την μέγιστη τιμή του στα 860 kPa, από την οποία και μετά σταθεροποιείται στην τιμή 5.4%.



**Σχήμα 5.20.** Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης των Jennings & Burland (1962) σε πλήρως κορεσμένη χαλαζιτική ιλύ και την ίδια ιλύ μετά από ξήρανση στις ατμοσφαιρικές συνθήκες και συμπίεση μέχρι δεδομένη τάση, υπό την οποία γίνεται διαβροχή των δοκιμίων (1 τόνος ανά τετραγωνικό πόδι ισούται περίπου με 107.5 kPa).

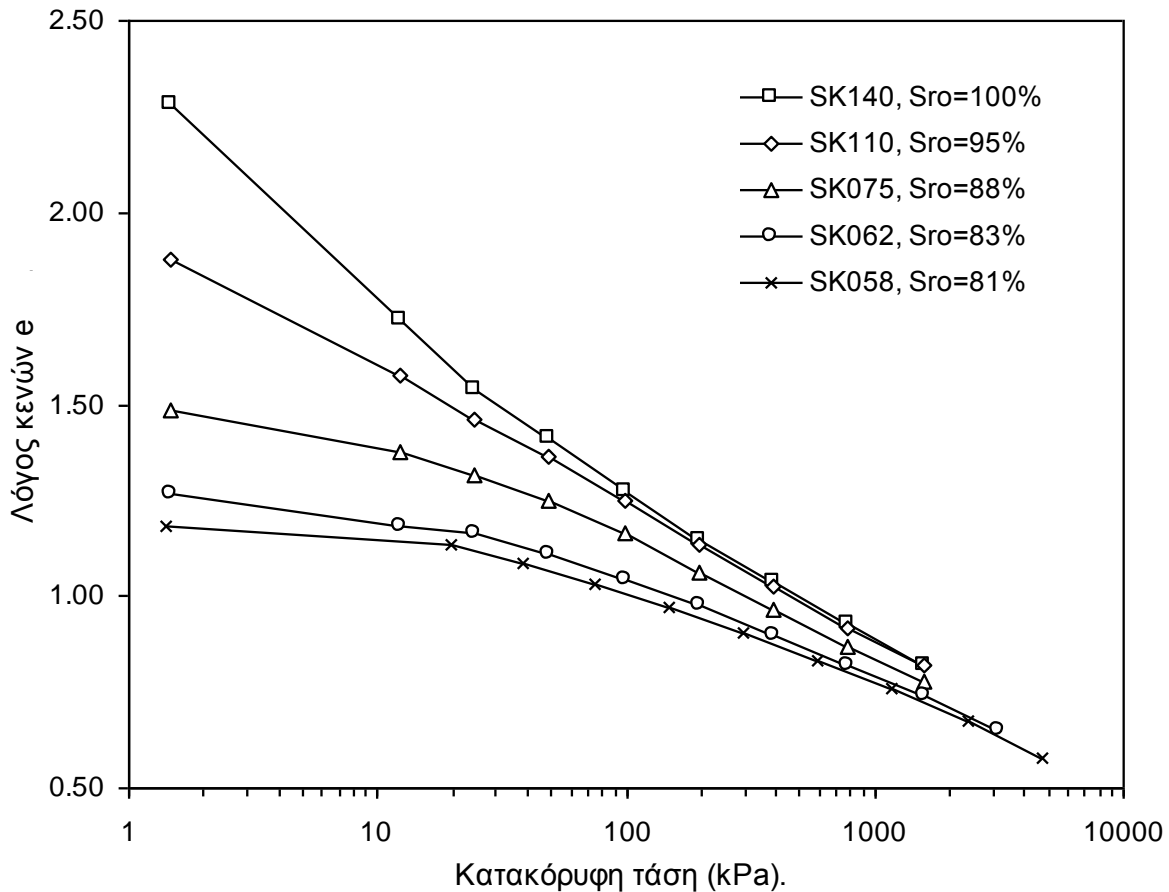
<sup>8</sup> Όταν εκτελείται αυτό το είδος της δοκιμής, οι πορόλιθοι που χρησιμοποιούνται στην κυψέλη είναι και εκείνοι στην ίδια κατάσταση ξήρανσης με τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα οι Jennings & Burland (1962) άφησαν και τους πορολίθους των κυψελών να ξεραθούν στις ατμοσφαιρικές συνθήκες του εργαστηρίου μέχρι σταθεροποίησης του βάρους τους, όπως έκαναν και με τα δοκίμια της ιλύος. Προφανώς αν η δοκιμή αυτή εκτελεστεί με τους πορολίθους πλήρως κορεσμένους με νερό, όπως όταν εκτελείται η συμβατική δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης (ASTM, D 2435), τότε τα δοκίμια αρχίζουν να υγραίνονται πριν την παροχή περίσσειας νερού και δεν παρατηρούνται οι καμπύλες του Σχ. 5.18. Για την δοκιμή υπάρχει πρότυπο της ASTM, το D 4546.



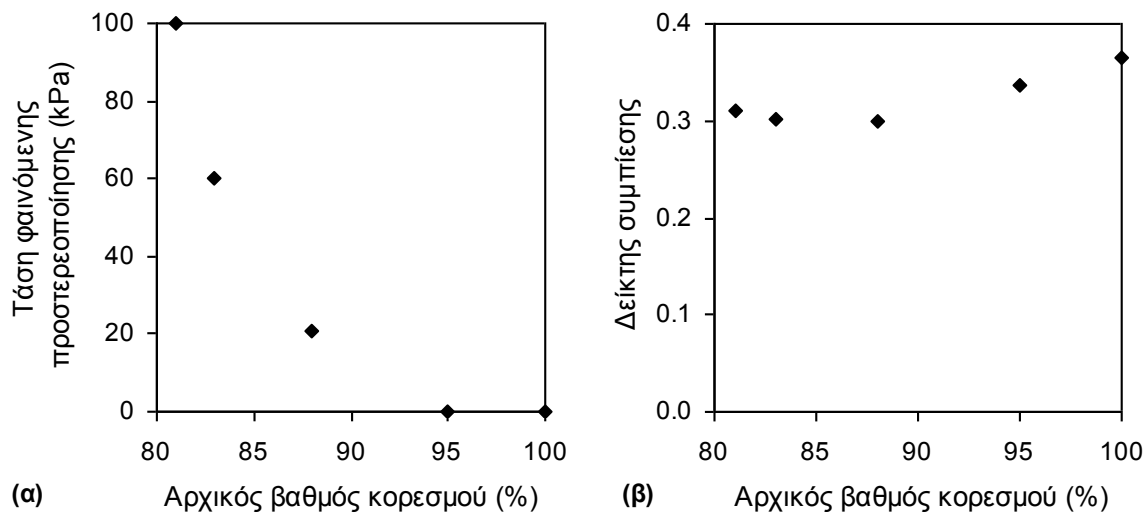
**Σχήμα 5.21.** Ποσοστό συρρίκνωσης με την τάση υπό την οποία έγινε η διαβροχή των δοκιμών από τις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης των Jennings & Burland (1962).

Παρόμοια σειρά δοκιμών με αυτή των Jennings & Burland (1962) έγινε και στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Κεφ. 15 του δεύτερου μέρους της διατριβής.

Στα πλαίσια του προγράμματος εργαστηριακών δοκιμών της παρούσας διδακτορικής διατριβής εκτελέστηκε μία σειρά δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένο καολίνη τύπου Speswhite (ο ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές που παρουσιάστηκαν στην §5.2). Αρχικά πραγματοποιήθηκε δοκιμή σε πλήρως κορεσμένο πολτό με αρχικό ποσοστό υγρασίας 140% του ορίου υδαρότητας του υλικού (64%) και στη συνέχεια δοκιμές σε πολτούς με προοδευτικά χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας που οδηγούσε και σε ολοένα και μικρότερο αρχικό βαθμό κορεσμού, μέχρι και αρχικό ποσοστό υγρασίας 58% του ορίου υδαρότητας που είχε αρχικό βαθμό κορεσμού 81%. Στο Σχ. 5.22 παρουσιάζονται οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης που προέκυψαν από τις δοκιμές αυτές (Bardanis & Kanvadas, 2003b). Όπως παρατηρείται, ενώ οι καμπύλες από τις δοκιμές για αρχικό ποσοστό υγρασίας του πολτού 140% και 110% του ορίου υδαρότητας (100% και 95% αρχικός βαθμός κορεσμού αντίστοιχα) είναι πρακτικά γραμμικές, για τις μικρότερες τιμές αρχικού ποσοστού υγρασίας και άρα βαθμού κορεσμού, αυτές γίνονται μή γραμμικές, και μάλιστα διακρίνεται τάση προστερεοποίησης (προφανώς φαινόμενη λόγω μερικού κορεσμού, εξ ου και τάση φαινόμενης προστερεοποίησης όπως προαναφέρθηκε), η οποία μετρήθηκε επί των καμπυλών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του Casagrande (ASTM, D 2435). Αντίστοιχα, ο δείκτης συμπίεσης μειώνεται με την μείωση του αρχικού ποσοστού υγρασίας του πολτού και άρα του βαθμού κορεσμού. Στο Σχ. 5.23α



**Σχήμα 5.22.** Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης αναζυμωμένου καολίνη τύπου Speswhite για διάφορες τιμές του αρχικού ποσοστού υγρασίας και του βαθμού κορεσμού του πολτού.



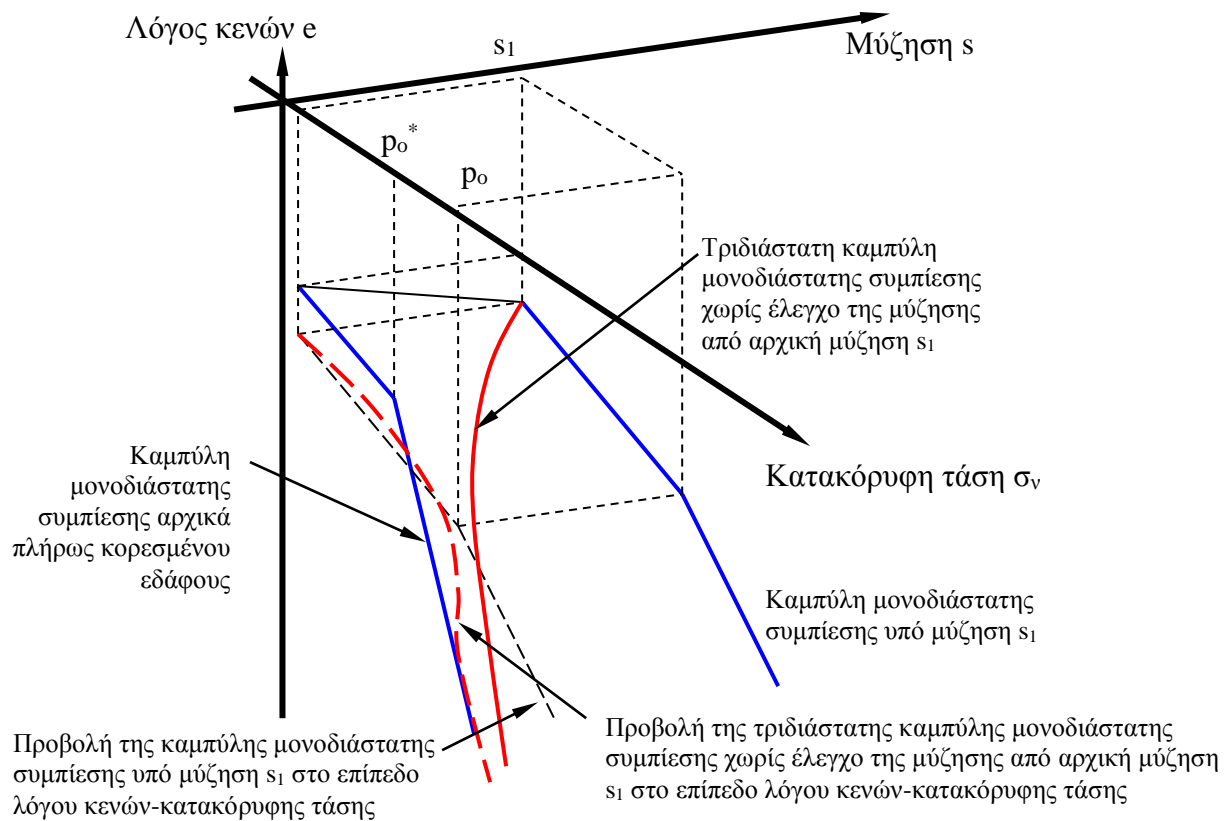
**Σχήμα 5.23.** Εξέλιξη α) της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης, και β) του δείκτη συμπίεσης με τον αρχικό βαθμό κορεσμού από τις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης αναζυμωμένου καολίνη τύπου Speswhite του Σχ. 5.20.

παρουσιάζεται η εξέλιξη της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης με τον αρχικό βαθμό κορεσμού και στο Σχ. 5.23β η εξέλιξη του φαινομένου δείκτη συμπίεσης με τον αρχικό βαθμό κορεσμού των δοκιμίων. Και σε αυτές τις δοκιμές, όπως στις δοκιμές των Jennings & Burland (1962), δεν υπήρχε έλεγχος της μύζησης. Αυτή κατά συνέπεια δεν παρέμενε σταθερή διαρκούς της φόρτισης αλλά μειωνόταν (αφού μειωνόταν ο συνολικός όγκος των δοκιμίων) και επιπλέον σε αυτά παρείχετο περίσσεια νερού αφού οι κυψέλες ήταν πλήρεις νερού. Δεδομένης της μεγάλης συμπιεστότητας όμως του συγκεκριμένου υλικού, παρατηρήθηκε και η μείωση στον (φαινόμενο) δείκτη συμπίεσης και η αύξηση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης, αυτή η τελευταία μάλιστα πολύ περισσότερο, αφού τα υλικά ήταν αναζυμωμένα χωρίς κανέναν παράγοντα εισαγωγής δομής πλην του μερικού κορεσμού.

Για να εξηγηθεί αυτή η συμπεριφορά στις δοκιμές καολίνη του Σχ. 5.22 χρησιμοποιείται το Σχ. 5.24. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται ενδεικτικά η τριδιάστατη απεικόνιση στον χώρο κατακόρυφη τάση-μύζηση-λόγος κενών μίας από τις καμπύλες του Σχ. 5.22 όπου το δοκίμιο είχε βαθμό κορεσμού μικρότερο από 100%. Η καμπύλη στις τρεις διαστάσεις του χώρου αυτού αντιστοιχεί στην πραγματικότητα σε ταυτόχρονη μείωση της μύζησης με την αύξηση της ολικής τάσης, αλλά αυτό που μετρείται και παρουσιάζεται μόνο στο Σχ. 5.22 είναι η προβολή αυτής της τριδιάστατης καμπύλης στο επίπεδο λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται και η καμπύλη που θα αντιστοιχούσε στην σταθερή μύζηση του αρχικού βαθμού κορεσμού του δοκιμίου του μή κορεσμένου εδάφους. Στις δοκιμές που γίνονται χωρίς έλεγχο της μύζησης, η τάση φαινόμενης προστερεοποίησης υποτιμάται σε σχέση με εκείνη που θα προέκυπτε αν η μύζηση διατηρείτο σταθερή όση εκείνη που αντιστοιχεί στον αρχικό βαθμό κορεσμού, και ο δείκτης συμπίεσης υπερτιμάται.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάστηκε και επεξηγήθηκε η επιρροή του βαθμού κορεσμού και της μύζησης στον δείκτη συμπίεσης και την τάση φαινόμενης προστερεοποίησης εισάγοντας ταυτόχρονα για πρώτη φορά βασικές έννοιες του καταστατικού προσομοιώματος για μή κορεσμένα εδάφη που χρησιμοποιήθηκε σαν προσομοίωμα αναφοράς στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, του προσομοιώματος των Alonso, et al. (1990). Επιδείχθηκε επίσης ότι υπάρχει καταρρευσίμη και διογκώσιμη συμπεριφορά και όχι εδάφη, και ότι το καταστατικό προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990) έχει την ικανότητα να προβλέπει την εμφάνισή της ανάλογα με το επίπεδο τάσης και μύζησης στον τριδιάστατο χώρο μέσης ολικής τάσης-μύζησης-ειδικού όγκου. Στο τρίτο μέρος της διατριβής παρουσιάζεται αναλυτικότερα το προσομοίωμα αυτό και ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη του νέου θεωρητικού

πλαίσιου για μη κορεσμένα εδάφη στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.



**Σχήμα 5.24.** Ενδεικτική απεικόνιση τριδιάστατης καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης (χωρίς έλεγχο της μύζησης) αρχικά μη κορεσμένου εδάφους στον χώρο κατακόρυφης τάσης-μύζησης-λόγου κενών με την προβολή της στο επίπεδο κατακόρυφης τάσης-λόγου κενών.

### 5.5.3 Εργαστηριακές συσκευές προσδιορισμού της συμπιεστότητας των μη κορεσμένων εδαφών υπό ελεγχόμενη μύζηση και μη μηδενικές τιμές της ολικής τάσης

#### 5.5.3.1 Εισαγωγή

Στην παράγραφο αυτή γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στις εργαστηριακές μεθόδους διερεύνησης της συμπιεστότητας, όπως αντίστοιχα στα Κεφ. 6 και 7 γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στις εργαστηριακές μεθόδους διερεύνησης της διαμητικής αντοχής και της διαπερατότητας αντίστοιχα. Η αναφορά αυτή δεν επεκτείνεται στην επανάληψη των διαφόρων μεθόδων ελέγχου

της μύζησης, καθώς αυτές έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφ. 4, αλλά στον τρόπο υιοθέτησής τους σε κάποιες από τις υπάρχουσες συσκευές διερεύνησης της συμπεστότητας των εδαφικών υλικών, και συγκεκριμένα τα συμπεσόμετρα και τις συσκευές τριαξονικής φόρτισης.

#### 5.5.3.2 Συμπιεσόμετρα δοκιμίων μικρού μεγέθους

Στις συσκευές μονοδιάστατης στερεοποίησης (συμπιεσόμετρα) έχουν υιοθετηθεί μέχρι σήμερα η μέθοδος μετατόπισης άξονα (η πιο διαδεδομένη από τις μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί), η μέθοδος ωσμωτικού ελέγχου, η μέθοδος ελέγχου της σχετικής υγρασίας, αλλά και συνδυασμοί αυτών των μεθόδων στις πιο εξελιγμένες συσκευές.

Στην μέθοδο μετατόπισης άξονα ελέγχεται η πίεση του αέρα που εισάγεται σε μία αεροστεγή κυψέλη του συμπιεσομέτρου και η πίεση του νερού είναι συνήθως η ατμοσφαιρική (αν και υπάρχουν περιπτώσεις ελέγχου της) με το δοκίμιο να τοποθετείται επί κεραμικού πορολίθου υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα ή ημιδιαπερατή μεμβράνη. Οι Escario & Saez (1973) παρουσίασαν ένα συμπιεσόμετρο, το οποίο αντί για κάτω πορόλιθο είχε ημιδιαπερατή μεμβράνη (Σχ. 5.25α). Σε αυτού του τύπου τις συσκευές πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην στεγανότητα της –κλειστού τύπου- κυψέλης για λόγους ασφαλείας του προσωπικού χειρισμού της συσκευής. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στη στεγανότητα περιμετρικά του εμβόλου μέσω του οποίου ασκείται η κατακόρυφη τάση στο δοκίμιο. Για να επιτευχθεί αυτή η στεγανότητα απαιτείται να είναι σημαντικές οι δυνάμεις τριβής περιμετρικά του εμβόλου στο σημείο στεγάνωσης. Λόγω αυτής της υψηλής τιμής των δυνάμεων τριβής εκεί, απαιτείται διόρθωση της τιμής της εφαρμοζόμενης στο δοκίμιο δύναμης, μέσω βαθμονόμησης (η οποία μάλιστα πρέπει να γίνει με δυναμομετρικό δακτύλιο ή κυψέλη φορτίου που να μπορεί να λειτουργήσει υπό την υψηλή πίεση αέρα που υπάρχει εντός της κυψέλης). Άλλα συμπιεσόμετρα που ενσωματώνουν τη μέθοδο μετατόπισης άξονα για τον έλεγχο της μύζησης έχουν αναπτυχθεί από τους Lloret (1982), τους Perez-Garcia & Cortez-Ochoa (2002) και τους Padilla, et al. (2005).

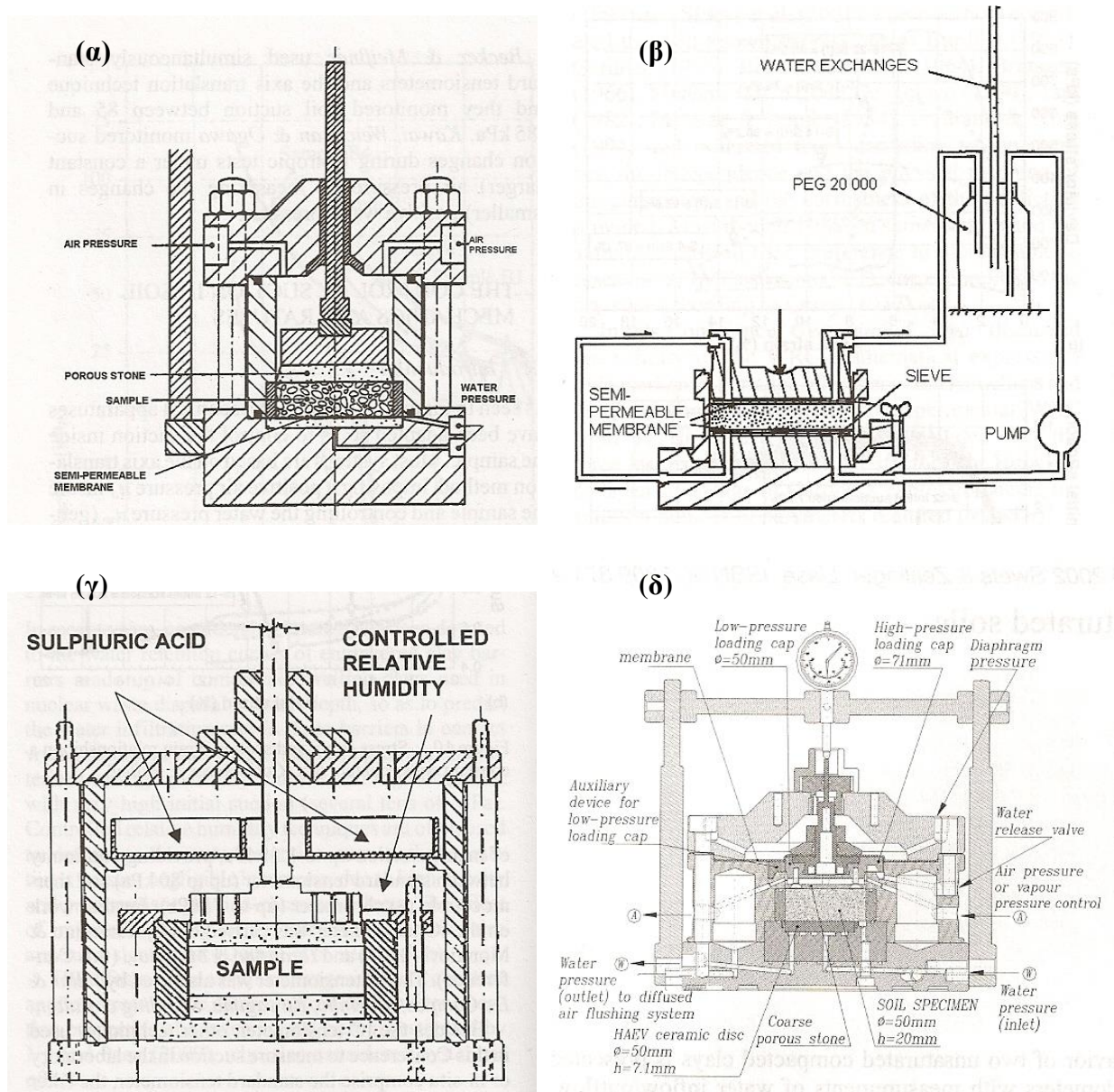
Η μέθοδος ωσμωτικού ελέγχου της μύζησης εδαφικού σκελετού έχει ενσωματωθεί σε συμπιεσόμετρα από τους Kassif & Ben Salom (1971). Οι Delage, et al. (1992) πρότειναν την ενσωμάτωση στο συμπιεσόμετρο των Kassif & Ben Salom (1971) ενός συστήματος κυκλοφόρησης του διαλύματος PEG και της παρακολούθησης της ανταλλαγής νερού μεταξύ διαλύματος και νερού των πόρων του δοκιμίου μέσω ογκομετρικών σωλήνων στο δοχείο του

διαλύματος για τον προσδιορισμό των μεταβολών του ποσοστού υγρασίας του δοκιμίου. Η διάταξη αυτή παρουσιάζεται στο Σχ. 5.25β. Εναλλακτικά της παρακολούθησης των ανταλλαγών νερού μέσω μετρήσεων μεταβολών όγκου, οι Dineen & Burland (1995) πρότειναν την τοποθέτηση του δοχείου του διαλύματος πάνω σε ζυγό ακριβείας όσο διαρκεί η δοκιμή προκειμένου η ανταλλαγή νερού να παρακολουθείται μέσω της καταγραφής των μεταβολών μάζας του διαλύματος (σαφώς ακριβέστερη μέθοδος σε σχέση με εκείνη των Delage et al., 1992, που βασίζεται στη μέτρηση μεταβολών όγκου από ανάγνωση ογκομετρικών σωλήνων). Όπως αναφέρθηκε και στην §4.3.3 η μέθοδος ωσμωτικού ελέγχου της μύζησης εδαφικού σκελετού επιτρέπει την εφαρμογή τιμών έως 10 MPa, σε αντίθεση με τη μέθοδο μετατόπισης άξονα που επιτρέπει εφαρμογή μύζησης εδαφικού σκελετού μέχρι 1.5 MPa.

Η μέθοδος ελέγχου της σχετικής υγρασίας για τον έλεγχο της ολικής μύζησης υιοθετήθηκε για πρώτη φορά σε συμπίεσόμετρο από τον Esteban (1990). Από τότε διάφορες παραλλαγές έχουν αναπτυχθεί, όπως π.χ. από τους Oteo-Mazo, et al. (1995) (Σχ. 5.25γ), ειδικά μάλιστα στα πλαίσια της έρευνας που πραγματοποιείται σχετικά με την συμπεριφορά αργιλικών διαφραγμάτων για την υπόγεια ταφή πυρηνικών αποβλήτων (Al Mukhtar, et al., 1993, Bernier, et al., 1997, κ.α.). Η μέθοδος αυτή απαιτεί τους μεγαλύτερους χρόνους επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας σε σχέση με τη μέθοδο μετατόπισης άξονα και τη μέθοδο ωσμωτικού ελέγχου της μύζησης. Αποτελεί όμως τη μόνη εφαρμόσιμη μέθοδο ελέγχου της ολικής μύζησης σε συσκευές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών μέχρι εξαιρετικά μεγάλες τιμές της ολικής μύζησης (βλ. §4.3.6 για τις τιμές ολικής μύζησης που επιβάλλουν κορεσμένα διαλύματα διαφόρων αλάτων –Πιν. 4.1- και ακόρεστα διαλύματα NaCl και KCl διαφόρων συγκεντρώσεων –Πιν. 4.2). Το χαρακτηριστικό αυτό εξηγεί άλλωστε και τη μεγάλη διάδοση της μεθόδου στην έρευνα σχετικά με τη συμπεριφορά αργιλικών διαφραγμάτων για την υπόγεια ταφή πυρηνικών αποβλήτων, αφού στη συγκεκριμένη εφαρμογή αναμένεται η ανάπτυξη πολύ υψηλών τιμών της μύζησης (κατά τάξη μεγέθους αρκετές δεκάδες έως εκατοντάδες MPa). Οι Cuisinier & Masroufi (2002) παρουσίασαν ένα συμπίεσόμετρο με έλεγχο της μύζησης μέσω ελέγχου της σχετικής υγρασίας και πρότειναν τον περιορισμό της χρήσης τέτοιων συσκευών για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες των 10 MPa, λόγω των μεγάλων αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται για τιμές της σχετικής υγρασίας που αντιστοιχούν σε μικρότερες τιμές της ολικής μύζησης. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. από τον γράφοντα μια νέα κυψέλη συμπίεσομέτρου με ικανότητα ελέγχου της ολικής μύζησης. Η κυψέλη αυτή και τα αποτελέσματα από τις εργαστηριακές δοκιμές με αυτήν παρουσιάζονται στο Κεφ. 15 του δεύτερου μέρους της διατριβής.



Εκτός από τα συμπιεσόμετρα στα οποία έχει υιοθετηθεί μόνο μία μέθοδος ελέγχου της μύζησης, οι di Mariano, et al. (2002) παρουσίασαν ένα συμπιεσόμετρο στο οποίο έχει υιοθετηθεί και η μέθοδος μετατόπισης άξονα για τον έλεγχο της μύζησης εδαφικού σκελετού μέχρι 1.5 MPa και η μέθοδος ελέγχου σχετικής υγρασίας για τον έλεγχο της ολικής μύζησης μέχρι κατά τάξη



**Σχήμα 5.25.** Συμπιεσόμετρα με ενσωματωμένη κάποια από τις μεθόδους ελέγχου της μύζησης: α) με τη μέθοδο μετατόπισης άξονα για τον έλεγχο της μύζησης εδαφικού σκελετού, Escario & Saez (1973), β) με τη μέθοδο ωσμωτικού ελέγχου της μύζησης εδαφικού σκελετού, Delage et al. (1992), γ) με τη μέθοδο ελέγχου της σχετικής υγρασίας για τον έλεγχο της ολικής μύζησης, Esteban (1990), και δ) με ταυτόχρονη υιοθέτηση της μεθόδου μετατόπισης άξονα για τον έλεγχο της μύζησης εδαφικού σκελετού και της μεθόδου ελέγχου της σχετικής υγρασίας για τον έλεγχο της ολικής μύζησης, di Mariano, et al.(2002).

μεγέθους εκατοντάδες MPa (Σχ. 5.25δ). Το συμπιεσόμετρο αυτό είναι το μόνο στο οποίο έχουν υιοθετηθεί δύο διαφορετικές μέθοδοι ελέγχου της μύζησης, η μία μάλιστα για τον έλεγχο της μύζησης εδαφικού σκελετού και η άλλη για τον έλεγχο της ολικής μύζησης, και το μόνο στο οποίο είναι δυνατόν να υπάρξει έλεγχος της μύζησης με μεγάλη ακρίβεια από πάρα πολύ μικρές τιμές της (δεκάδες kPa) μέχρι πάρα πολύ υψηλές (εκατοντάδες MPa). Ενστάσεις για τη συγκεκριμένη συσκευή και τις μεθόδους που ενσωματώνει ανακύπτουν για την περιοχή τιμών της μύζησης στην οποία αρχίζει να εφαρμόζεται η μέθοδος ελέγχου σχετικής υγρασίας και να μην εφαρμόζεται η μέθοδος μετατόπισης άξονα. Οι Hoffmann, et al. (2005) παρουσίασαν τον τρόπο διαδοχικής εφαρμογής των δύο μεθόδων στην συσκευή.

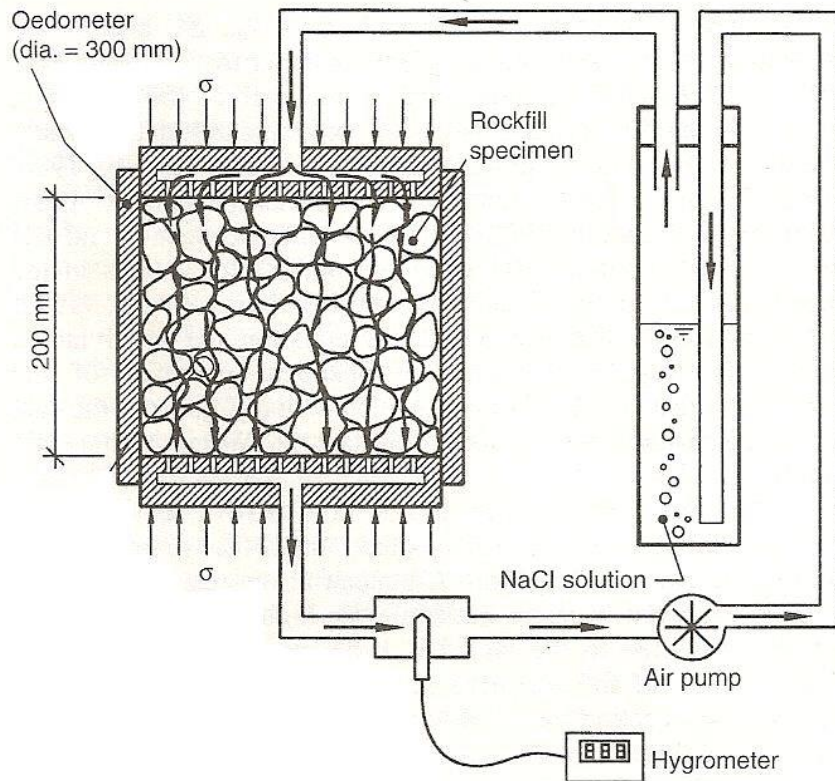
### 5.5.3.3 Συμπιεσόμετρα δοκιμίων μεγάλου μεγέθους (για δοκίμια λιθορριπής)

Μία ειδική κατηγορία συμπιεσομέτρων με έλεγχο της μύζησης αποτελούν οι συσκευές που έχουν κατασκευαστεί για τη διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς της λιθορριπής. Λιθόρριπτα φράγματα έχουν επιδείξει σημαντικές παραμορφώσεις της λιθορριπής, οι οποίες μάλιστα μπορούν να διαρκέσουν για δεκαετίες (Sowers, et al., 1965), με τα μεγαλύτερα μεγέθη παραμορφώσεων να εκδηλώνονται στα ανάντη σώματα στήριξης των φραγμάτων κατά την πλήρωση της λεκάνης κατάκλυσης. Η διαβροχή λόγω βροχόπτωσης έχει παρατηρηθεί ότι μπορεί να προκαλέσει και αυτή σημαντικές παραμορφώσεις (ο Bauman, 1960, αναφέρει καθιζήσεις ίσες με 4% του συνολικού ύψους του φράγματος Cogswell κατά τη διάρκεια της κατασκευής του μετά από ένα επεισόδιο βροχόπτωσης με ύψος βροχής 360 mm), αν και γενικά μικρότερες και μεγαλύτερης διάρκειας από εκείνες που προκαλούνται κατά την πλήρωση της λεκάνης κατάκλυσης (Marsal, et al., 1976, Alonso & Oldecop, 2000). Οι παρατηρήσεις αυτές έγιναν και σε πραγματικά φράγματα και σε εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού της παραμορφωσιμότητας της λιθορριπής κατά τον κορεσμό της (Sowers, et al., 1965, Marsal, 1973, Nohari & Duncan, 1972). Ο μηχανισμός εκδήλωσης των μεγάλων αυτών παραμορφώσεων της λιθορριπής έχει διερευνηθεί και αποδίδεται αφενός στη θραύση των ακμών αιχμηρών λίθων υπό τις υψηλές τάσεις που αναπτύσσονται και τη συνεπαγόμενη δημιουργία περισσότερου λεπτόκοκκου υλικού και αναδιάταξη σε μια πιο σταθερή κατάσταση (Terzaghi, 1960) και αφετέρου στην επιρροή της μεταβολής του ποσοστού υγρασίας της λιθορριπής πριν και μετά την πλήρωση ή τη διαβροχή λόγω βροχόπτωσης. Και η πρόταση του Terzaghi (1960) έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά (ενδεικτικά: Sowers, et al., 1965, Marsal, 1973) με την προσθήκη μάλιστα της επιρροής του κυρίαρχου μεγέθους των λίθων (όσο μεγαλύτεροι είναι οι λίθοι, τόσο

μεγαλύτερη αναμένεται η παραμόρφωση, αφού αναμένεται ότι τόσο περισσότερες θα είναι στατιστικά οι μικρορωγμές στο εσωτερικό τους, Marachi, et al., 1969), αλλά και η επιρροή της μεταβολής του ποσοστού υγρασίας (Nobari & Duncan, 1972), η τελευταία μάλιστα ιδιαίτερος την τελευταία δεκαετία που η εργαστηριακή διερεύνηση των παραμορφώσεων της λιθορριπής δεν εξαντλείται σε μετρήσεις του ποσοστού υγρασίας αλλά προχωρά στον έλεγχο της μύζησης μέσα σε ειδικά συμπιεσόμετρα μεγάλου μεγέθους.

Η ιδιαιτερότητα των συσκευών αυτών έγκειται αφενός στο μεγάλο μέγεθος των κυψελών, αφού για να φτιαχτούν αντιπροσωπευτικά δοκίμια, αυτά πρέπει να έχουν πολύ μεγάλες διαστάσεις ώστε να περιλαμβάνουν αρκετούς από τους μεγάλους λίθους, και αφετέρου στη μικρή πίεση διείδυσης αέρα του υλικού. Αυτό το τελευταίο χαρακτηριστικό σημαίνει ότι ήδη για πολύ μικρές τιμές της μύζησης το εδαφικό αυτό υλικό βρίσκεται στην Περιοχή II της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και για μικρές τιμές της στην Περιοχή III. Κατά συνέπεια η ολική μύζηση είναι αυτή που παίζει ρόλο, αφού για πολύ μεγάλο εύρος τιμών της μύζησης (και ήδη από πολύ μικρές τιμές της) έχει αποκατασταθεί η συνέχεια της αέριας φάσης των πόρων και οι περισσότερες μεταβολές στο ποσοστό υγρασίας γίνονται με μεταφορά υδρατμών. Επομένως στις συσκευές αυτές ο έλεγχος της μύζησης *επιβάλλεται* να γίνεται μέσω του ελέγχου της σχετικής υγρασίας και οι μετρήσεις εντός των δοκιμίων της λιθορριπής να γίνονται με διάφορους τύπους ψυχομέτρων. Οι Alonso & Oldecop (2000) χρησιμοποίησαν ένα τροποποιημένο κελί τύπου Rowe για την πραγματοποίηση δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης με έλεγχο της μύζησης σε δείγματα λιθορριπής από έναν σχιστόλιθο (Σχ. 5.26). Οι διαστάσεις του δοκιμίου σε αυτή τη συσκευή είναι αρκετά μικρές για λιθορριπή (μόλις 300 mm διάμετρος και 200 mm ύψος), αλλά η συσκευή αυτή αποτελεί το πρώτο καταγεγραμμένο συμπιεσόμετρο μεγάλων διαστάσεων με έλεγχο της μύζησης. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα από τη συσκευή αυτή, οι Oldecop & Alonso (2001) παρουσίασαν το πρώτο καταστατικό προσομοίωμα για τη συμπίεστικότητα της λιθορριπής συναρτήσει μεταβολών της ολικής τάσης και της ολικής μύζησης.

Ο γράφων σχεδίασε και υλοποίησε στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. συσκευή άμεσης διάτμησης με κυκλική κυψέλη μεγάλων διαστάσεων (διάμετρος 45cm και ύψος 30cm) εντός της οποίας μπορούν να πραγματοποιηθούν και δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι κατακόρυφη τάση 1500 kPa. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης, άμεσης διάτμησης και διαβροχής υπό διάφορες κατακόρυφες τάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται στο Κεφ. 6 και στο Κεφ. 15 όπως και η ίδια η συσκευή.



**Σχήμα 5.26.** Το μεγάλης διαμέτρου συμπιεσόμετρο των Alonso & Oldecop (2000) για δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης υπό ελεγχόμενη μύζηση σε δείγματα λιθορριπής.

#### 5.5.3.4 Συσκευές τριαξονικής φόρτισης

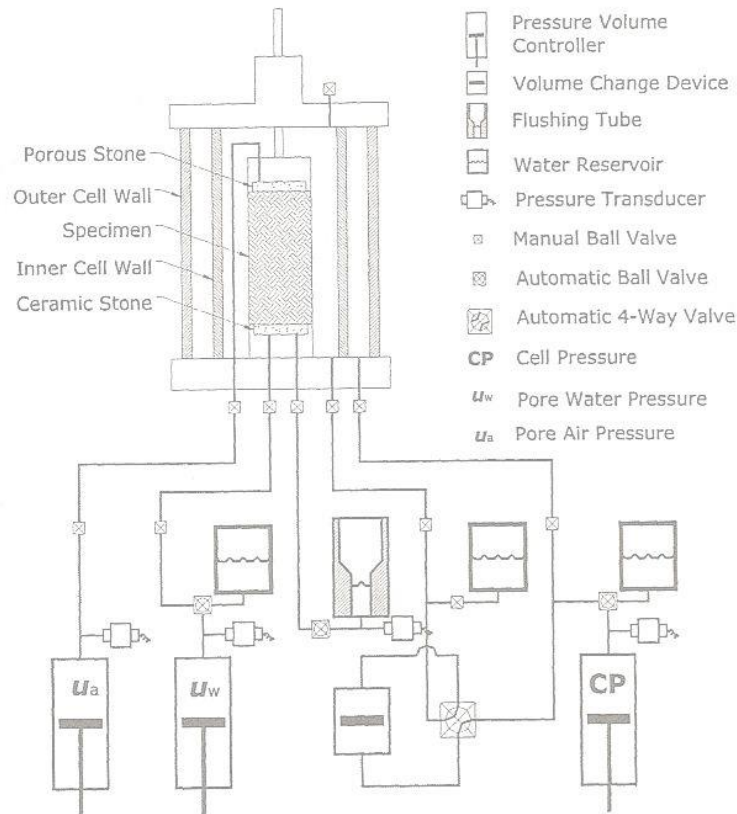
Οι ίδιες μέθοδοι ελέγχου της μύζησης που έχουν υιοθετηθεί στα συμπιεσόμετρα, έχουν υιοθετηθεί και στη συσκευή τριαξονικής φόρτισης. Σε ό,τι αφορά τη μέθοδο μετατόπισης άξονα, ο περιορισμός της αντοχής των συνήθων κυβελών μέχρι τα 2 MPa επιβάλλει περιορισμούς στις μέγιστες τιμές της πλευρικής τάσης και της πίεσης αέρα που μπορούν να εφαρμοστούν. Το αποτέλεσμα είναι ότι ακόμα και με χρήση πορολίθων πίεσης διείδυσης αέρα 15 Bar, η μέγιστη μύζηση  $u_a - u_w$  που συνήθως εφαρμόζεται δεν ξεπερνά τα 400-500 kPa (Delage, 2004). Οι Padilla, et al. (2006α) παρουσίασαν μία συσκευή τριαξονικής φόρτισης με έλεγχο της μύζησης μέσω της μεθόδου μετατόπισης άξονα με έμφαση στην ακριβή μέτρηση των μεταβολών του ολικού όγκου του δοκιμίου και τον έλεγχο της διήθησης αέρα (air diffusion) διά μέσω των κεραμικών πορολίθων λόγω της διαφορετικής συγκέντρωσης αέρα στη μία και στην άλλη άκρη του κεραμικού πορολίθου (Σχ. 5.27). Όπως επισημαίνουν οι Padilla, et al. (2005, 2006α, 2006β) η ποσότητα του διηθούμενου αέρα κάτω από τον κεραμικό πορόλιθο μπορεί να γίνει αρκετά

μεγάλη, εισάγοντας σημαντικά λάθη στη μέτρηση του όγκου του νερού στην έξοδο από τον κεραμικό πορόλιθο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα. Οι Padilla, et al. (2006β) μάλιστα μέτρησαν τη διήθηση αέρα σε πορολίθους διαφορετικής πίεσης διείσδυσης αέρα και κατέληξαν στις συστάσεις που συγκεντρώνονται στον Πίν. 5.1 σε ό,τι αφορά την απαιτούμενη συχνότητα ανανέωσης του νερού στο δοχείο κάτω από τον πορόλιθο. Προσθέτουν μάλιστα ακόμη ότι όσο η εφαρμοζόμενη τιμή της μύζησης δεν υπερβαίνει την πίεση διείσδυσης αέρα πορολίθων μικρότερης τέτοιας τιμής, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται εκείνοι οι πορόλιθοι ακόμα και σε συσκευές σχεδιασμένες για εφαρμογή μύζησης μέχρι τη μέγιστη πίεση διείσδυσης αέρα πορολίθων (1500 kPa).

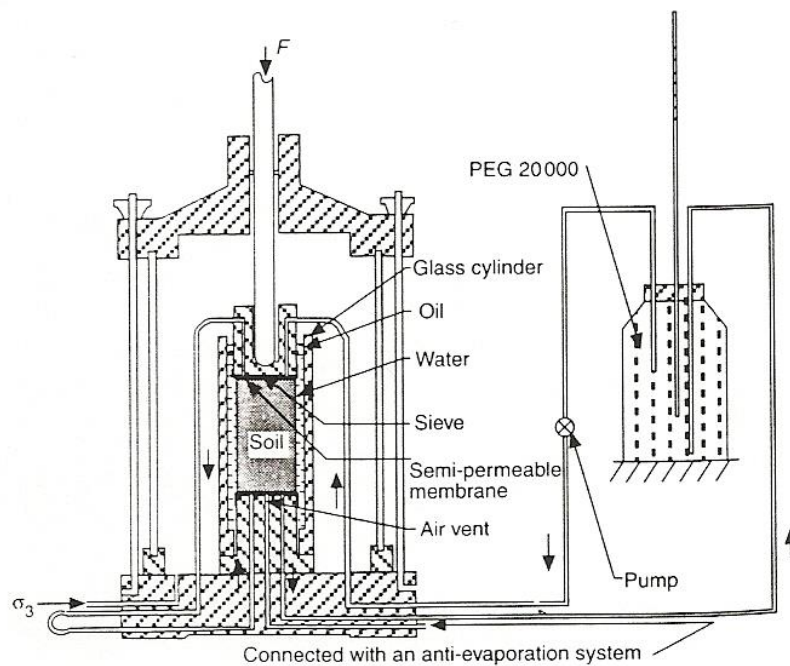
**Πίνακας 5.1.** Ποσότητα διηθηθέντος αέρα διά μέσω κεραμικών πορολίθων διαφόρων τιμών πίεσης διείσδυσης αέρα και συστάσεις για την συχνότητα ανανέωσης του νερού στο δοχείο νερού κάτω από τον πορόλιθο (flushing).

Πίεση διείσδυσης αέρα κεραμικού πορολίθου (kPa)	Εφαρμοζόμενη πίεση αέρα (ποσοστό επί της πίεσης διείσδυσης αέρα)	Μέση μέγιστη συγκέντρωση αέρα στο δοχείο νερού ανά ημέρα (cm <sup>3</sup> )	Απαιτούμενη συχνότητα ανανέωσης του νερού κάτω από τον πορόλιθο (flushing)
100	0-100	Μή μετρήσιμη	Κάθε 3 ημέρες
300	0-100	Μή μετρήσιμη	Κάθε 3 ημέρες
500	0-100	0.10	Κάθε 2 ημέρες
1500	<50	0.85	Κάθε 1 ημέρα
	>50	2.14	2 φορές ανά ημέρα

Η μέθοδος οσμωτικού ελέγχου της μύζησης έχει υιοθετηθεί στη συσκευή τριαξονικής φόρτισης από τους Delage, et al. (1987) και τους Cui & Delage (1996). Στο Σχ. 5.28 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη των Cui & Delage (1996). Το σύστημα διαθέτει διάταξη κυκλοφορίας του διαλύματος PEG για να αποφεύγονται προβλήματα τοπικών μειώσεων της συγκέντρωσης PEG γύρω από το δοκίμιο, και η μέτρηση των μεταβολών του ολικού όγκου του δοκιμίου γίνεται με διάταξη παρόμοια με αυτή των Bishop & Donald (1961), όπου όμως ο υδράργυρος έχει αντικατασταθεί από νερό διαχωριζόμενο από το υπόλοιπο νερό της κυψέλης μέσω στρώματος λαδιού σιλικόνης.



**Σχήμα 5.27.** Σχηματική διάταξη της συσκευής τριαξονικής φόρτισης των Padilla, et al. (2006α) με έλεγχο της μύζησης εδαφικού σκελετού μέσω της μεθόδου μετατόπισης άξονα.

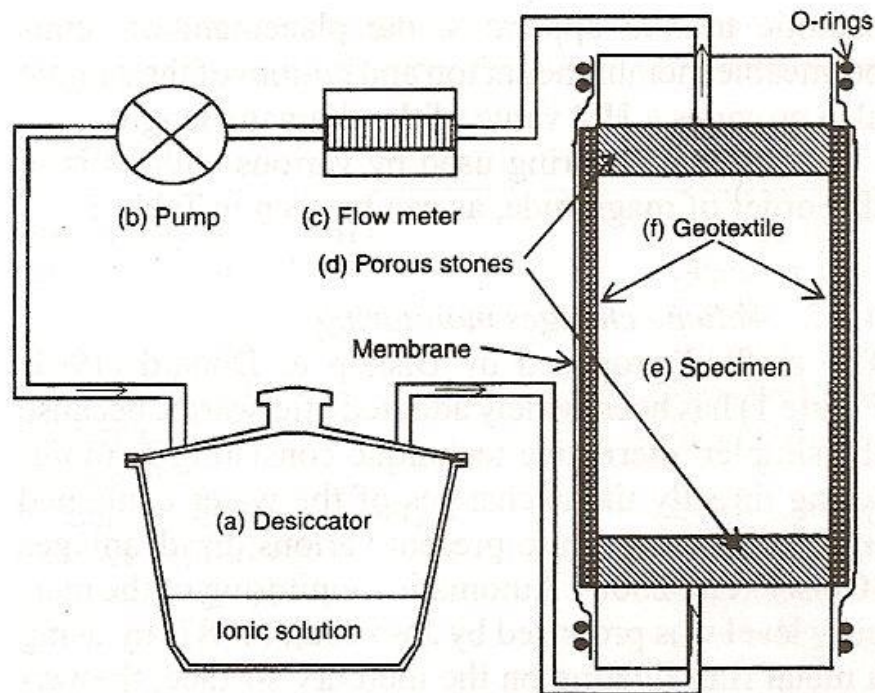


**Σχήμα 5.28.** Σχηματική διάταξη της συσκευής τριαξονικής φόρτισης των Cui & Delage (1996) με έλεγχο της μύζησης εδαφικού σκελετού μέσω της ωσμωτικής μεθόδου.

Η μέθοδος ελέγχου της σχετικής υγρασίας για τον έλεγχο της ολικής μύζησης έχει εφαρμοστεί και αυτή στη συσκευή τριαξονικής φόρτισης αλλά με το μεγάλο μειονέκτημα του εξαιρετικά μεγάλου χρόνου επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας (ακόμα μεγαλύτερου και από αυτόν που απαιτείται στα συμπιεσόμετρα που ενσωματώνουν την ίδια μέθοδο ελέγχου της μύζησης) λόγω της πολύ μεγαλύτερης διαδρομής στράγγισης όταν η επαφή του δοκιμίου με τους ατμούς των υδατικών διαλυμάτων επιβολής ολικής μύζησης γίνεται μόνο από την πάνω και την κάτω πλευρά του δοκιμίου.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, οι Blatz & Graham (2000) υλοποίησαν μία διάταξη στην οποία το δοκίμιο περιβάλλεται από ένα πορώδες γεωσυνθετικό, το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ δοκιμίου και μεμβράνης και στα άκρα του βρίσκεται σε επαφή με τον κάτω και τον πάνω πορόλιθο (Σχ. 5.29). Κατ' αυτόν τον τρόπο οι ατμοί των υδατικών διαλυμάτων επιβολής ολικής μύζησης κυκλοφορούν όχι μόνο στα άκρα του δοκιμίου αλλά και στην περιφέρειά του με αποτέλεσμα να μειώνεται στο μισό η διαδρομή στράγγισης (για δοκίμια με λόγο ύψους προς διάμετρο 2:1) σε συσκευές που οι ατμοί των διαλυμάτων επικοινωνούσαν με το δοκίμιο και στα δύο του άκρα, και στο ένα τέταρτο σε συσκευές που οι ατμοί των διαλυμάτων επικοινωνούσαν με το δοκίμιο μόνο μέσω του ενός του άκρου. Η μέθοδος ωστόσο έχει το τίμημα ότι λόγω της παρεμβολής του πορώδους, και συμπιεστού, γεωσυνθετικού υλικού γύρω από το δοκίμιο χρειάζεται προσεκτική βαθμονόμηση ως προς τις παραμορφώσεις του γεωσυνθετικού για διάφορα επίπεδα πλευρικής τάσης για να μπορούν να ερμηνευθούν οι μετρούμενες μεταβολές όγκου κατά τη δοκιμή και να υπολογιστούν οι πραγματικές μεταβολές του ολικού όγκου του δοκιμίου. Επίσης το ίδιο το γεωσυνθετικό πρέπει να παραμένει αρκετά πορώδες για να επιτρέπει την κίνηση των ατμών των διαλυμάτων για πίεση στην κυψέλη μέχρι περίπου 2.5 MPa<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Η συγκεκριμένη συσκευή τριαξονικής φόρτισης αποτελεί ειδική κατασκευή στο Πανεπιστήμιο της Μανιτόμπα στον Καναδά και περιλαμβάνει κυψέλη υψηλής αντοχής για εφαρμογή πλευρικών πιέσεων έως 10 MPa.

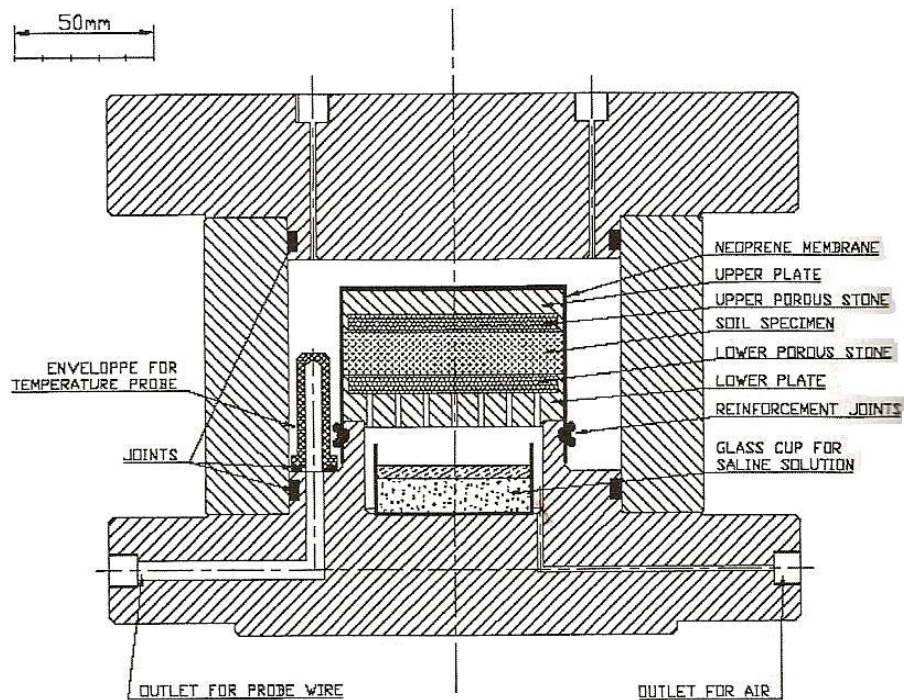


**Σχήμα 5.29.** Σχηματική διάταξη της συσκευής τριαξονικής φόρτισης των Blatz & Graham (2000) με έλεγχο της ολικής μύζησης μέσω της μεθόδου ελέγχου της σχετικής υγρασίας.

#### 5.5.3.5 Συσκευές εφαρμογής αποκλειστικά ιστροπικής συμπίεσης

Εκτός από εφαρμογή σε πλήρεις συσκευές τριαξονικής φόρτισης η μέθοδος ελέγχου της σχετικής υγρασίας έχει βρει εφαρμογή και σε ειδικές συσκευές ιστροπικής συμπίεσης, συσκευές δηλαδή με κυψέλες που επιτρέπουν την ιστροπική συμπίεση δοκιμίων αλλά όχι και την εφαρμογή διεκτροπικών τάσεων στα δοκίμια. Παράδειγμα τέτοιας συσκευής παρουσιάζεται στο Σχ. 5.30 (Tang, et al., 2006), στην οποία μάλιστα υπάρχει και έλεγχος της θερμοκρασίας για να μπορούν να γίνουν δοκιμές ιστροπικής συμπίεσης υπό ελεγχόμενη μύζηση σε διαφορετικές θερμοκρασίες για τη μελέτη της θερμομηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών. Τέτοιου είδους συσκευές είναι πολύ πιο απλές στην κατασκευή και λειτουργία, και όπως εξηγείται παρακάτω, επιτρέπουν ακριβέστερες μετρήσεις των μεταβολών του ολικού όγκου του δοκιμίου.





**Σχήμα 5.30.** Σχηματική διάταξη της συσκευής ισοτροπικής συμπίεσης των Tang, et al. (2006) με έλεγχο της ολικής μύζησης μέσω της μεθόδου ελέγχου της σχετικής υγρασίας.

#### 5.5.3.6 Μετρήσεις μεταβολών όγκου κατά τις δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών σε μη κορεσμένα εδάφη

Κατά τις δοκιμές σε μη κορεσμένα εδάφη υπάρχει η ανάγκη μετρήσεων δύο ειδών μεταβολών όγκου. Η μία από αυτές είναι η μεταβολή του ολικού όγκου του δοκιμίου και η άλλη είναι η μεταβολή του όγκου του νερού που εισρέει ή απομακρύνεται από το δοκίμιο κατά τη δοκιμή. Εάν είναι γνωστές αυτές οι δύο μεταβολές όγκου, τότε μπορούν να υπολογιστούν οι μεταβολές του λόγου κενών, του βαθμού κορεσμού, του ποσοστού υγρασίας και της ογκομετρικής παραμόρφωσης των δοκιμίων. Επιπρόσθετα αυτών και προκειμένου για τριαξονικές δοκιμές μπορούν να μετρηθούν οι τοπικά αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις κάθετα στο επίπεδο επιφανειών θραύσης που δημιουργούνται κατά την αστοχία των δοκιμίων μέσω βυθιζόμενων μορφοτροπέων τοπικών μετρήσεων στην περιφέρεια των δοκιμίων.

Προκειμένου για τις δοκιμές συμπίεσομέτρου υπό ελεγχόμενη μύζηση, και υπό την προϋπόθεση ότι η αύξηση της μύζησης γίνεται υπό μη μηδενική τιμή της ολικής τάσης, οι μεταβολές του ολι-

κού όγκου μπορούν να υπολογιστούν από τις μεταβολές του ύψους του δοκιμίου, οι οποίες μάλιστα μετρούνται εύκολα, απλά και με ακρίβεια μέσω της μέτρησης των μετακινήσεων του κατακόρυφου εμβόλου που επιβάλλει την κατακόρυφη τάση. Προκειμένου για αύξηση της μύζησης υπό μηδενική ολική τάση, η τασική διαδρομή έχει εκφυλιστεί σε χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και οι μεταβολές όγκου μετρούνται όπως περιγράφηκε στο Κεφ. 4 (αφού υπό μηδενική ολική τάση υπάρχουν και ακτινικές μεταβολές, οπότε οι μετρήσεις των μεταβολών του ύψους των δοκιμίων μόνο δεν επαρκούν για τον υπολογισμό των μεταβολών του ολικού όγκου). Οι μεταβολές του όγκου του νερού που εισρέει ή απομακρύνεται από το δοκίμιο μετρούνται με συμβατικές συσκευές όπως και για τα πλήρως κορεσμένα εδάφη όταν εφαρμόζεται η μέθοδος μετατόπισης άξονα για τον έλεγχο της μύζησης και με παρακολούθηση της μάζας ή του όγκου των διαλυμάτων PEG, στην περίπτωση της μεθόδου ωσμωτικού ελέγχου της μύζησης, ή των διαλυμάτων επιβολής ολικής μύζησης, στην περίπτωση της μεθόδου ελέγχου της σχετικής υγρασίας. Η ακρίβεια αυτών των μετρήσεων καθορίζεται από την ακρίβεια των μετρήσεων των μεταβολών όγκου ή μάζας, με τις μετρήσεις μεταβολών μάζας να είναι ευκολότερες, απλούστερες και ακριβέστερες, με αναλογικά μικρότερο κόστος για επίτευξη της ίδιας ακρίβειας. Μεγαλύτερη σημασία όμως για την ακρίβεια αυτών των μετρήσεων μεταβολών όγκου έχει η μέτρηση του όγκου του διηθούμενου αέρα διά μέσω του κεραμικού πορολίθου και η τακτική απομάκρυνσή του (βλ. §5.5.3.4). Προκειμένου για τις δοκιμές τριαξονικής φόρτισης, εκεί η κατάσταση αντιστρέφεται. Δηλαδή για τις μετρήσεις του όγκου του νερού που εισρέει ή απομακρύνεται από το δοκίμιο ισχύουν αυτά που προαναφέρθηκαν και για τις αντίστοιχες μετρήσεις μεταβολών όγκου στις δοκιμές συμπίεσομέτρου, αλλά οι μετρήσεις των μεταβολών του ολικού όγκου των δοκιμίων είναι πολύ πιο πολύπλοκες με σημαντικά περισσότερες αβεβαιότητες.

Ο πιο συνηθισμένος και απλούστερος τρόπος μέτρησης των μεταβολών του ολικού όγκου των δοκιμίων και σε πλήρως και σε μή κορεσμένα εδάφη είναι μέσω της μέτρησης της μεταβολής του όγκου του νερού στην κυψέλη, λαμβανομένων υπόψη των μεταβολών που επιφέρει η κίνηση του εμβόλου που επιβάλλει την κατακόρυφη τάση. Το πρόβλημα με αυτόν τον τρόπο μετρήσεων είναι ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η ενδοτικότητα του τοιχώματος της κυψέλης, η απορροφητικότητα του *perspex*, από το οποίο αυτή είναι κατασκευασμένη για επίτευξη μεγαλύτερης αντοχής, καθώς και τυχόν διαρροών από την κυψέλη. Μέρος των αβεβαιοτήτων αυτών αναιρείται μετά από προσεκτική βαθμονόμηση κάθε κυψέλης (και συνδυασμού απαρτίων για κάθε τασική διαδρομή) με χρήση χαλύβδινων δοκιμίων αλλά και πάλι προβλήματα ακρίβειας θα εξακολουθήσουν να υπάρχουν.

Οι Bishop & Donald (1961) πρότειναν εναλλακτικά την τοποθέτηση ενός εσωτερικού κυλίνδρου μέσα στην κυψέλη με ύψος μέχρι πάνω από την άνω πλευρά του δοκιμίου, με το εσωτερικό μεταξύ δοκιμίου και αυτού του κυλίνδρου να γεμίζεται με υδράργυρο, η ελεύθερη επιφάνεια του οποίου βρισκόταν σε επαφή με το νερό της κυψέλης, μέσω του οποίου εξακολουθούσε να επιβάλλεται η πλευρική τάση. Οι μετρήσεις των μεταβολών του ολικού όγκου του δοκιμίου λοιπόν γίνονταν πλέον με παρακολούθηση της στάθμης του υδραργύρου αντί για παρακολούθηση της μεταβολής του όγκου του νερού στην κυψέλη. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι και στις δύο πλευρές του εσωτερικού κυλίνδρου ασκείται η ίδια πίεση άρα δεν υπεισέρχονται λάθη λόγω παραμόρφωσής του εξαιτίας της επιβαλλόμενης πίεσης, ενώ ακριβώς επειδή για αυτόν τον λόγο δεν υπάρχει η απαίτηση αντοχής του κυλίνδρου αυτού, το υλικό κατασκευής του μπορεί να μην είναι perspex αλλά γυαλί το οποίο δεν παρουσιάζει απορροφητικότητα. Η ακρίβεια των μετρήσεων λοιπόν σε αυτή την περίπτωση είναι τόση όση μπορεί να είναι η ακρίβεια παρακολούθησης της στάθμης του υδραργύρου, με μόνο βασικό μειονέκτημα της μεθόδου τα προβλήματα ασφαλείας που δημιουργούνται με την χρήση υδραργύρου.

Οι Josa, et al. (1987) πρότειναν έναν αυτοματοποιημένο τρόπο μέτρησης των μεταβολών της στάθμης του υδραργύρου, οι Cui & Delage (1996) αντικατέστησαν τον υδράργυρο με νερό διαχωριζόμενο από το υπόλοιπο νερό της κυψέλης με ένα στρώμα λαδιού σιλικόνης, οι Rampino, et al. (1999) αντικατέστησαν το νερό έξω από τον εσωτερικό κύλινδρο με αέρα, ο Wheeler (1988) πρότεινε την υιοθέτηση ενός κλειστού μέχρι την εσωτερική οροφή της κυψέλης εσωτερικού κυλίνδρου και μέτρηση των μεταβολών όγκου ολόκληρης της ποσότητας του νερού στο απομονωμένο δοχείο μεταξύ δοκιμίου και εσωτερικού κυλίνδρου, και τέλος διάφοροι ερευνητές πρότειναν εναλλακτικούς ακριβέστερους τρόπους μέτρησης του όγκου των δοκιμίων και της κατανομής του ποσοστού υγρασίας σε αυτά (ηλεκτροοπτικοί αισθητήρες παρακολούθησης του περιγράμματος των δοκιμίων από τους Baumgartl, et al., 1995, τεχνικές λέιζερ για τον ίδιο σκοπό από τους Romero, et al., 1997, και επεξεργασία φωτογραφιών των δοκιμίων από τους Macari, et al., 1997). Όλες οι παραπάνω μετατροπές, διατάξεις και μέθοδοι επεξεργασίας έχουν επιτρέψει τη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων των μεταβολών του ολικού όγκου των δοκιμίων. Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα της αξιολόγησης αυτών των μεθόδων οι Geiser, et al. (2000) συνόψισαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου καθώς και την εκτίμηση για τη μέση ακρίβεια των μετρήσεων με αυτές όπως παρατίθενται στον Πίν. 5.2.

**Πίνακας 5.2.** Συνόψιση χαρακτηριστικών των μεθόδων μέτρησης των μεταβολών του ολικού όγκου των δοκιμίων στην τριαξονική δοκιμή (από τους Geiser, et al., 2000, και τους Sharma, et al., 2006).

Μέθοδος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Απόκλιση μεταβολής όγκου $\alpha$ , και ογκομετρικής παραμόρφωσης $\beta$
Τυπική κυψέλη τριαξονικής δοκιμής	Χρήση κοινής κυψέλης χωρίς τροποποιήσεις	Έμμεση μέθοδος μέτρησης που απαιτεί χρονοβόρα βαθμονόμηση.	$\alpha = \pm 0.45 \text{ cm}^3$ $\beta = \pm 2.2 \cdot 10^{-3}$
Κυψέλη με ανοικτό εσωτερικό κύλινδρο	Ελαχιστοποιεί τα προβλήματα της προηγούμενης μεθόδου. Έχει αυξημένη ακρίβεια λόγω του μικρότερου όγκου του υγρού που υψεισέρχεται στις μετρήσεις.	Έμμεση μέθοδος που απαιτεί βαθμονόμηση και πρακτικά δεν επιτρέπει την αυτοματοποίηση των μετρήσεων.	$\alpha = \pm 0.21 \text{ cm}^3$ $\beta = \pm 0.8 \cdot 10^{-3}$ (οι Bishop & Donald, 1961, βρήκαν για την ίδια συσκευή και δοκίμια όγκου $100 \text{ cm}^3$ : $\alpha = \pm 0.1 \text{ cm}^3$ , $\beta = \pm 10^{-3}$ )
Κυψέλη διπλού τοιχώματος	Όπως προηγούμενως. Επιτρέπει την συνεχή λήψη μετρήσεων.	Έμμεση μέθοδος που απαιτεί βαθμονόμηση.	$\alpha = \pm 0.6 - 1.02 \text{ cm}^3$ $\beta = \pm 6 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$ (κατά Sivakumar, 1993, για δοκίμια όγκου $100 \text{ cm}^3$ ανάλογα με την κυψέλη)
Σύστημα ελέγχου πλήρες αέρα	Απευθείας μέτρηση όγκου αέρα. Επιτρέπει την λήψη συνεχών μετρήσεων.	Ο όγκος του αέρα επηρεάζεται έντονα από την θερμοκρασία και την πίεση του ατμοσφαιρικού αέρα, ενώ δεν μπορούν να ελεγχθούν διαρροές αέρα.	$\alpha = \pm 2.2 \text{ cm}^3$ $\beta = \pm 1.1 \cdot 10^{-2}$ (πρέπει να προστεθεί και μία συνεχής απώλεια αέρα 2-3 $\text{cm}^3/\text{ημέρα}$ )
Σύστημα ελέγχου με αέρα και νερό	Όπως στην προηγούμενη μέθοδο, αλλά καλύτερα αφού ο μικρότερος όγκος αέρα μειώνει την επιρροή της θερμοκρασίας και της πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα και τις απώλειες αέρα από το σύστημα.	Όπως στην προηγούμενη μέθοδο αλλά ελαφρώς καλύτερα.	$\alpha = \pm 0.22 \text{ cm}^3$ $\beta = \pm 1.1 \cdot 10^{-3}$ (πρέπει να προστεθεί και μία συνεχής απώλεια αέρα 0.2 $\text{cm}^3/\text{ημέρα}$ )
Μέτρηση ακτινικών παραμορφώσεων	Απευθείας μετρήσεις διαστάσεων επί του δοκιμίου, οι οποίες μάλιστα μπορούν να γίνονται συνεχώς.	Για δοκίμια που αποκτούν ελλειψοειδές σχήμα πρέπει να υπάρχουν περισσότερες της μιας διατάξεις τοπικών μετρήσεων. Η τοποθέτηση των μορφοτροπέων επί των δοκιμίων απαιτεί ιδιαίτερα λεπτεπίλεπτους χειρισμούς και ένα αρχικά αρκετά στιφρό δοκίμιο.	Δεν έχει προσδιοριστεί
Τεχνική ακτίνων λέιζερ	Απευθείας μετρήσεις του δοκιμίου (χωρίς επαφή με αυτό), συνεχώς, καθ' όλο το ύψος του δοκιμίου, με δυνατότητα μετρήσεων από διάφορες θέσεις γύρω από το δοκίμιο.	Πολύ υψηλό κόστος και εξαιρετικά χρονοβόρα βαθμονόμηση για την επίτευξη μετρήσεων ακριβείας.	$\beta = \pm 0.7 \cdot 10^{-4}$ (κατά Romero, et al., 1997)
Τεχνική επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας	Απευθείας μετρήσεις του δοκιμίου (χωρίς επαφή με αυτό), καθ' όλο το ύψος του δοκιμίου, με διαδικασία βαθμονόμησης ελεγχόμενη από υπολογιστή.	Υψηλό κόστος και αδυναμία εφαρμογής για έστω ελαφρώς ασύμμετρα δοκίμια όταν χρησιμοποιείται μία μόνο κάμερα λήψης ψηφιακών εικόνων.	$\alpha = \pm 0.25 \text{ cm}^3$ $\beta = \pm 10^{-3}$

#### 5.5.4 Χρονική εξέλιξη των μεταβολών όγκου στα μή κορεσμένα εδάφη

Μέχρι αυτό το σημείο δεν εξετάστηκε η χρονική εξέλιξη των μεταβολών όγκου των μή κορεσμένων εδαφών. Όπως παρουσιάζεται και εξηγείται στο Κεφ. 7 του πρώτου μέρους, ο συντελεστής διαπερατότητας των μή κορεσμένων εδαφών ως προς την υγρή φάση των πόρων<sup>10</sup> μειώνεται, και μάλιστα κατά αρκετές τάξεις μεγέθους, με την μείωση του βαθμού κορεσμού και την συνεπακόλουθη αύξηση της μύζησης. Άμεση συνέπεια της μείωσης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση είναι ότι κάθε μεταβολή όγκου λόγω οποιασδήποτε μορφής έντασης των μή κορεσμένων εδαφών συμβαίνει πολύ πιο αργά από όσο θα συνέβαινε στο ίδιο εδαφικό υλικό αν ήταν πλήρως κορεσμένο. Το αποτέλεσμα είναι ότι σε εδαφικά υλικά μικρής διαπερατότητας όταν είναι πλήρως κορεσμένα, η ολοκλήρωση των επιβαλλόμενων μεταβολών μπορεί να διαρκέσει εξαιρετικά πολύ, και ακόμα και σε εδαφικά υλικά μεγάλης διαπερατότητας όταν είναι πλήρως κορεσμένα, ο απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωση των μεταβολών όγκου μπορεί να πλησιάζει αυτόν που θα αναμενόταν για πλήρως κορεσμένα εδάφη μικρής διαπερατότητας. Προκειμένου το θέμα να προσεγγιστεί πιο ολοκληρωμένα, παρουσιάζεται αναλυτικότερα στο Κεφ. 7, μετά την παρουσίαση της ροής των ρευστών φάσεων και των μεταβολών της διαπερατότητας ως προς την καθεμιά από αυτές στα μή κορεσμένα εδάφη.

---

<sup>10</sup> Στα μή κορεσμένα εδάφη συνυπάρχουν δύο ρευστές φάσεις, η υγρή και η αέρια, με αποτέλεσμα στα υλικά αυτά να υπάρχουν δύο συντελεστές διαπερατότητας, ένας ως προς την υγρή και ένας ως προς την αέρια φάση.

## **5.6 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ**

### **5.6.1 Γενικά**

Προκειμένου να διαφανεί καλύτερα η επιρροή του μερικού κορεσμού στη συμπίεστικότητα των εδαφικών υλικών επιχειρήθηκε η συγκέντρωση και αξιολόγηση πειραματικών δεδομένων πραγματικών δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης. Μέρος της αξιολόγησης αυτής έχει παρουσιαστεί από τους Μπαρδάνη & Καβουνίδη (2001α & 2001β), και τους Bardanis & Kanvadas (2003α & 2003β). Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται το σύνολο των συγκεντρωθέντων αποτελεσμάτων και της σχετικής επεξεργασίας.

### **5.6.2 Πειραματικά αποτελέσματα μονοδιάστατης στερεοποίησης**

Το δείγμα δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από αρχείο γεωτεχνικών μελετών και ερευνών ιδιωτικής εταιρείας<sup>11</sup>. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούνται από 305 δοκιμές μονοδιάστατης στερεοποίησης σε φυσικά αργιλικά εδάφη από ολόκληρη την Ελλάδα. Στον Πίν. 5.3 παρουσιάζεται η κατανομή των συγκεντρωθεισών δοκιμών ανά γεωγραφική περιοχή και εντός κάθε γεωγραφικής περιοχής. Όπως φαίνεται στον Πίν. 5.3 υπάρχει στατιστική προκατάληψη (statistical bias) του δείγματος προς τα αποτελέσματα των δοκιμών από την περιοχή της Αττικής και άρα στις προβλέψεις, με βάση το συγκεντρωθέν δείγμα, θα βαρύνουν ιδιαίτερα οι γεωλογικές συνθήκες της περιοχής Αττικής και μάλιστα του λεκανοπεδίου (από όπου και η πλειοψηφία των δοκιμών εντός του Νομού Αττικής). Η καταχώριση ωστόσο των στοιχείων της κάθε δοκιμής σε βάση δεδομένων επιτρέπει την εύκολη συμπλήρωση επιπλέον δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης από τις περιοχές που υποαντιπροσωπεύονται και την εύκολη ανανέωση της εικόνας από το δείγμα. Επίσης στις δοκιμές που περιλαμβάνονται στο δείγμα δεν υπάρχουν αρκετές δοκιμές που να έχουν γίνει σε πολύ μαλακές ή πρόσφατες αποθέσεις όπως αυτές που απαντώνται κοντά στις εκβολές ποταμών. Κατά συνέπεια το δείγμα των συγκεντρωθεισών δοκιμών δεν καταγράφει τις υψηλότερες τιμές του δείκτη συμπίεστικότητας που αναμένονται σε περιοχές με πολύ πρόσφατες εδαφικές αποθέσεις.

---

<sup>11</sup> ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

**Πίνακας 5.3.** Γεωγραφική κατανομή δοκιμών.

Γεωγραφική περιοχή	Αριθμός δοκιμών	Διαφορετικές τοποθεσίες
Αττική	106	12
Λοιπή Στερεά Ελλάδα	28	5
Πελοπόννησος	5	2
Θεσσαλία	14	3
Ήπειρος	53	4
Μακεδονία	21	3
Θράκη	4	1
Νησιά Αιγαίου & Κρήτη	37	12
Νησιά Ιονίου	37	7
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>305</b>	<b>49</b>

### 5.6.3 Συσχέτιση μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων

#### 5.6.3.1 *Φυσικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων*

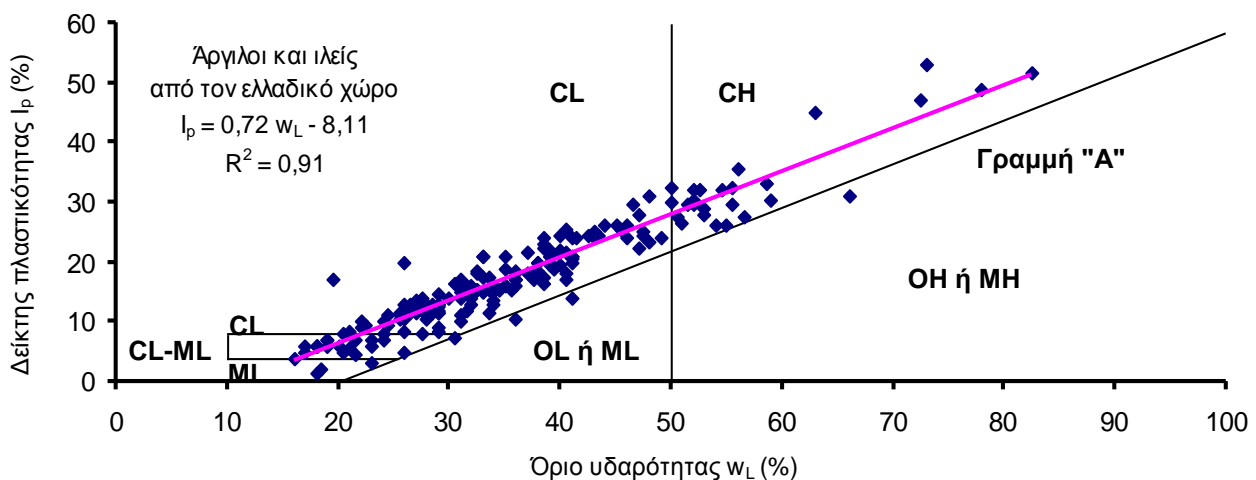
Πριν την επεξεργασία των δεδομένων του δείγματος έγινε ένας αρχικός έλεγχος προκειμένου να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των συγκεντρωθεισών δοκιμών και να απορριφθούν εκ των προτέρων δοκιμές αμφίβολης αξιοπιστίας. Τέτοιου είδους προβλήματα περιελάμβαναν τυχόν ασυμφωνίες μεταξύ των διαφόρων αναφερόμενων μεγεθών ή των παρουσιαζόμενων καμπυλών στα τεύχη με τις παρουσιάσεις ή αξιολογήσεις των δοκιμών. Το ποσοστό των δοκιμών που απορρίφθηκαν για αυτούς τους λόγους πριν την επεξεργασία ήταν περί το 30%. Η απόρριψη των δοκιμών αυτών δημιουργεί προβλήματα στη γεωγραφική κατανομή των δοκιμών, αλλά προτιμήθηκε να απορριφθούν οι αμφίβολης αξιοπιστίας δοκιμές πριν την επεξεργασία των δεδομένων, προς όφελος της μεγαλύτερης αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της στατιστικής επεξεργασίας του δείγματος.

Μετά από αυτή τη διαλογή, τα εδαφικά υλικά κατατάχθηκαν με χρήση του διαγράμματος πλαστικότητας του Casagrande. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στο Σχ. 5.31. Από την κατάταξη αυτή διακρίνεται η παρουσία ελάχιστων δειγμάτων κάτω από τη Γραμμή «Α», ενώ η πλειοψηφία των δειγμάτων στα οποία διεξήχθησαν οι δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης είναι άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας (CL), χωρίς ωστόσο να απουσιάζουν τόσο άργιλοι υψηλής

πλαστικότητας (CH) όσο και ιλεις (ML) ή αργιλοιλεις (CL-ML). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η θέση και η συγκέντρωση των στοιχείων του δείγματος, που επιτρέπει την διατύπωση μίας γραμμικής συσχέτισης μεταξύ του δείκτη πλαστικότητας και του ορίου υδαρότητας:

$$I_p = 0.72 w_L - 8.11 \quad (5.9)$$

Για την Εξ. 5.9 υπολογίστηκε συντελεστής γραμμικής συσχέτισης,  $R^2 = 0.91$ , ο οποίος είναι ιδιαίτερα υψηλός προσδίδοντας σημαντική αξιοπιστία στη διατυπωθείσα γραμμική συσχέτιση (εφόσον περιορίζεται για αργίλους και ιλεις από τον ελλαδικό χώρο χωρίς οργανικά, όπως περιγράφεται γενικά το δείγμα εδαφών για το οποίο προέκυψε). Ταυτόχρονα αξιοσημείωτη είναι και η παραλληλία της γραμμής, που αντιστοιχεί στη γραμμική αυτή συσχέτιση, με την Γραμμή «Α» του διαγράμματος πλαστικότητας.

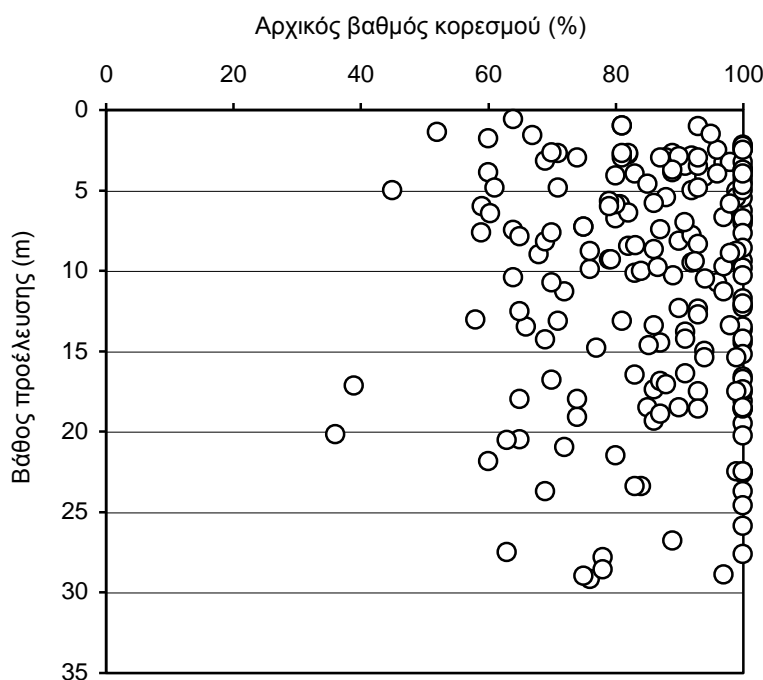


**Σχήμα 5.31.** Διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande για τα όρια Atterberg των εδαφικών υλικών των δειγμάτων σε δοκίμια των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι συγκεντρωθείσες δοκιμές μονοδιάστατης στερεοποίησης και βέλτιστη γραμμική προσέγγιση του σμήνους των σημείων.

Μετά από την απόκτηση της γενικής εικόνας για τα φυσικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι συγκεντρωθείσες δοκιμές έγινε συσχέτιση του δείκτη συμπίεσης των εδαφικών υλικών με το όριο υδαρότητας, τον δείκτη πλαστικότητας, το ποσοστό φυσικής υγρασίας, τον αρχικό λόγο κενών και τον αρχικό βαθμό κορεσμού των δοκιμίων. Πολλά από τα δοκίμια των συγκεντρωθεισών δοκιμών ήταν αρχικά μή κορεσμένα. Στο Σχ. 5.32 παρουσιάζονται οι τιμές του αρχικού βαθμού κορεσμού των δοκιμίων με το βάθος προέλευσης



των δειγμάτων από τα οποία μορφώθηκαν (ταυτίζεται με το Σχ. 2.3 του Κεφ. 2). Όπως φαίνεται, υπάρχουν καταγεγραμμένες πολύ χαμηλές τιμές του βαθμού κορεσμού, ακόμα και σε σημαντικά βάθη. Οι τιμές αυτές αποτελούν τις τιμές του βαθμού κορεσμού κατά την έναρξη των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης και δεν ταυτίζονται κατ' ανάγκη με τις πραγματικές τιμές του βαθμού κορεσμού επιτόπου<sup>12</sup>. Ο αρχικός μερικός κορεσμός των δοκιμών ελήφθη υπόψη με την διάκριση των δοκιμών σε αρχικά πλήρως κορεσμένα και αρχικά μη κορεσμένα. Όπως έχει ήδη εξηγηθεί (Κεφ. 2 και 3) ένα εδαφικό υλικό είναι μη κορεσμένο όταν ο βαθμός κορεσμού του πάψει να είναι 100%. Λόγω των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στις μετρήσεις στα πλαίσια εργαστηριακών δοκιμών που εκτελούνται σε εμπορικά εργαστήρια, η διάκριση των δοκιμών έγινε για τιμή του βαθμού κορεσμού 95%, δηλ. όσα είχαν αρχικό βαθμό κορεσμού μεγαλύτερο από 95% θεωρήθηκαν αρχικά πλήρως κορεσμένα και όσα είχαν μικρότερο θεωρήθηκαν αρχικά μη κορεσμένα.



**Σχήμα 5.32.** Βαθμός κορεσμού σε δείγματα αργιλικών εδαφών από τον ελλαδικό χώρο που πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης με το βάθος προέλευσης των δειγμάτων.

<sup>12</sup> Όπως έχει εξηγηθεί λοιπόν ήδη στο Κεφ. 2, στο Σχ. 5.32 καταγράφεται, εκτός από την τιμή του βαθμού κορεσμού των εδαφών επιτόπου, και η επιρροή της δειγματοληψίας, της παραμονής των δειγμάτων στις ατμοσφαιρικές συνθήκες μέχρι την περιτύλιξή τους με ελαστική μεμβράνη, της μεταφοράς τους στο εργαστήριο κλπ., με βάση την γεωερευνητική πρακτική στον ελλαδικό χώρο. Ακόμα λοιπόν και αν το Σχ. 5.32 δεν είναι ενδεικτικό της συχνότητας και του βάθους εμφάνισης μη κορεσμένων εδαφών στον ελλαδικό χώρο, τεκμηριώνει την αναγκαιότητα κατανόησης της επιρροής του βαθμού κορεσμού σε αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών. Η αναγκαιότητα αυτή συνιστά έναν ακόμα λόγο για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών, αφού τα δείγματα των γεωτρήσεων χάνουν μέρος της υγρασίας τους από την δειγματοληψία μέχρι την εκτέλεση των δοκιμών και ο βαθμός κορεσμού τους μειώνεται.

Κατά τη συσχέτιση του δείκτη συμπίεσης με τα φυσικά χαρακτηριστικά διατυπώθηκαν εμπειρικές συσχετίσεις για το συγκεκριμένο στατιστικό δείγμα δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης από τον ελλαδικό χώρο, οι οποίες παρατίθενται στις παραγράφους που ακολουθούν. Οι συσχετίσεις αυτές δεν προορίζονται να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς πρόβλεψης του δείκτη συμπίεσης για εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο. Διατυπώθηκαν περισσότερο για να περιγραφεί μαθηματικά η αναμενόμενη εξέλιξη του δείκτη συμπίεσης με τα φυσικά χαρακτηριστικά για αρχικά πλήρως κορεσμένα και μη κορεσμένα εδάφη. Σε ό,τι αφορά την σύγκριση των εμπειρικών αυτών συσχετίσεων με άλλες διατυπωμένες στην διεθνή βιβλιογραφία, οι Μπαρδάνης & Καβουνίδης (2001α) συγκέντρωσαν τις διατυπωμένες στην διεθνή βιβλιογραφία συσχετίσεις και οι Μπαρδάνης & Καβουνίδης (2001β) συνέκριναν τις προβλέψεις τους με τα στοιχεία του δείγματος των συγκεντρωθεισών δοκιμών σε εδάφη από τον ελλαδικό χώρο, καθώς και με τις προκύπτουσες για το δείγμα βέλτιστες γραμμικές προσεγγίσεις. Η επανάληψη αυτής της σύγκρισης ξεφεύγει από τον σκοπό του παρόντος κεφαλαίου που είναι η επίδειξη της επιρροής του αρχικού βαθμού κορεσμού στον δείκτη συμπίεσης των αργίλων και των ιλύων.

#### 5.6.3.2 Συσχέτιση δείκτη συμπίεσης – ορίου υδαρότητας

Στο Σχ. 5.33α παρατίθενται τα σημεία που αντιστοιχούν στο συγκεντρωθέν δείγμα και η βέλτιστη γραμμική προσέγγιση για το σμήνος των τιμών. Η εξίσωση που περιγράφει την τελευταία είναι:

$$C_c = 0.0033 (w_L + 8.42) \quad (5.10)$$

αλλά με πολύ χαμηλό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης ( $R^2 = 0.32$ ) που επιδεικνύει την αναξιοπιστία που θα πρέπει να αναμένεται γενικά κατά τη γραμμική συσχέτιση του δείκτη συμπίεσης για εδάφη από τον ελλαδικό χώρο με το όριο υδαρότητας<sup>13</sup>. Πέραν αυτού η διασπορά του δείγματος είναι τόσο μεγάλη που δεν διαφαίνεται η δυνατότητα διατύπωσης άλλου είδους (δηλ. μη γραμμικής) συσχέτισης.

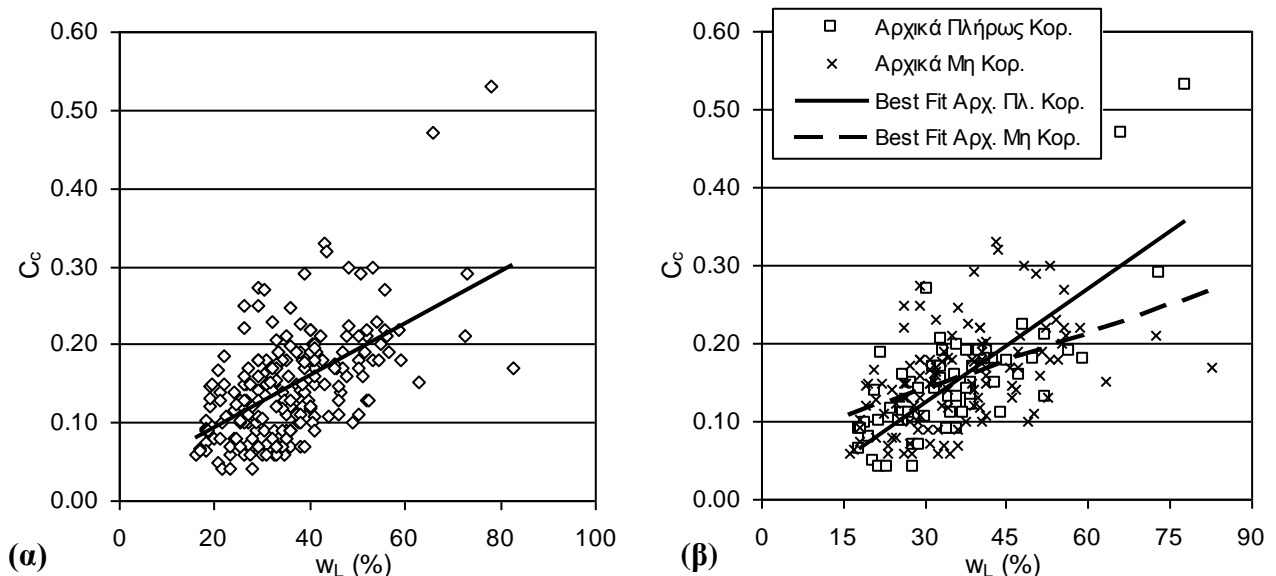
<sup>13</sup> Τουλάχιστον σε ό,τι αφορά τα αποτελέσματα συνήθων δοκιμών από εμπορικά εργαστήρια.

Διαχωρίζοντας τα δοκίμια που ήταν αρχικά πλήρως και αρχικά μή κορεσμένα προκύπτει το διάγραμμα του Σχ. 5.33β και δύο διαφορετικές εξισώσεις που αντιστοιχούν στις καλύτερες γραμμικές προσεγγίσεις για τα δύο δείγματα (οι Εξ. 5.11 και 5.12 για τα αρχικά πλήρως και τα αρχικά μή κορεσμένα εδάφη αντίστοιχα).

$$C_c = 0.0048 (w_L - 4.6) \quad (5.11)$$

$$C_c = 0.0024 (w_L + 29.3) \quad (5.12)$$

Από τις Εξ. 5.11 και 5.12 και από τη μορφή των γραφικών παραστάσεών τους στο Σχ. 5.33β προκύπτει ότι για  $w_L > 38.5\%$ , τα αρχικά μή κορεσμένα εδάφη παρουσιάζουν μικρότερο δείκτη συμπίεσης από τα αρχικά πλήρως κορεσμένα εδάφη, ενώ για μικρότερες τιμές του ορίου υδαρότητας, συμβαίνει το αντίθετο. Ταυτόχρονα, ενώ ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης και για τις δύο εξισώσεις είναι πολύ χαμηλός για να θεωρηθούν αξιόπιστες οι προβλέψεις τους, είναι αρκετά αυξημένος (0.56) στην περίπτωση των αρχικά πλήρως κορεσμένων εδαφών από ότι στην περίπτωση των αρχικά μή κορεσμένων (0.21). Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης για τα αρχικά πλήρως κορεσμένα εδάφη μάλιστα προέκυψε σημαντικά μεγαλύτερος από εκείνων για την βέλτιστη γραμμική προσέγγιση για το σύνολο των δειγμάτων.



**Σχήμα 5.33.** Δείκτης συμπίεσης σε σχέση με το όριο υδαρότητας: α) για το σύνολο των δειγμάτων, και β) για το σμήνος διαχωρισμένο σε αρχικά πλήρως κορεσμένα και αρχικά μή κορεσμένα δοκίμια. Παρατίθενται οι βέλτιστες γραμμικές προσεγγίσεις για κάθε περίπτωση.

### 5.6.3.3 Συσχέτιση δείκτη συμπίεσης – δείκτη πλαστικότητας

Στο Σχ. 5.34α παρατίθενται τα σημεία που αντιστοιχούν στο συγκεντρωθέν δείγμα και η βέλτιστη γραμμική προσέγγιση για το σμήνος των τιμών. Η εξίσωση που περιγράφει την τελευταία είναι:

$$C_c = 0.0041 I_p + 0.075 \quad (5.13)$$

αλλά με εξίσου χαμηλό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης ( $R^2 = 0.27$ ) όπως και στην περίπτωση της συσχέτισης μεταξύ δείκτη συμπίεσης και ορίου υδαρότητας.

Διαχωρίζοντας τα δοκίμια που ήταν αρχικά πλήρως και αρχικά μη κορεσμένα προκύπτει το διάγραμμα του Σχ. 5.34β. Από αυτό προκύπτουν δύο διαφορετικές εξισώσεις που αντιστοιχούν στις καλύτερες γραμμικές προσεγγίσεις για τα δύο δείγματα (οι Εξ. 5.14 και 5.15 για τα αρχικά πλήρως και τα αρχικά μη κορεσμένα εδάφη αντίστοιχα).

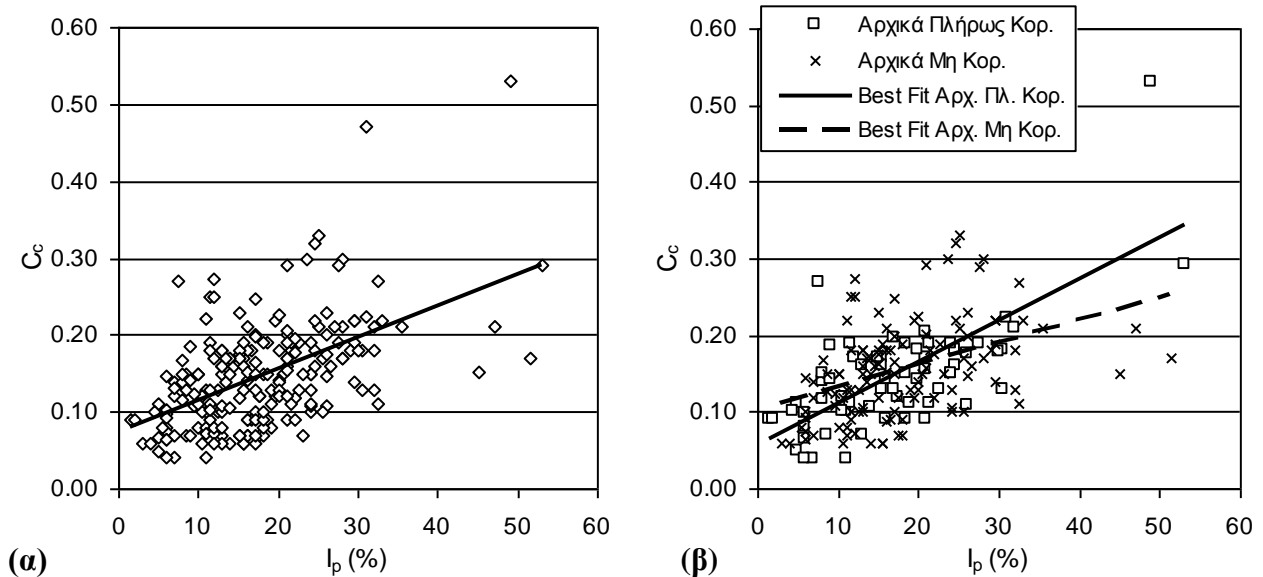
$$C_c = 0.0054 I_p - 0.056 \quad (5.14)$$

$$C_c = 0.0029 I_p + 0.103 \quad (5.15)$$

Τόσο από τις Εξ. 5.14 και 5.15 όσο και από τη μορφή των γραφικών παραστάσεών τους στο Σχ. 5.34β προκύπτει ότι για  $I_p > 18.7$  %, τα αρχικά μη κορεσμένα εδάφη παρουσιάζουν μικρότερο δείκτη συμπίεσης από τα αρχικά πλήρως κορεσμένα εδάφη, ενώ για μικρότερες τιμές του ορίου υδαρότητας, συμβαίνει το αντίθετο. Ταυτόχρονα ενώ ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης και για τις δύο εξισώσεις είναι πολύ χαμηλός για να θεωρηθούν αξιόπιστες οι προβλέψεις τους, είναι αρκετά αυξημένος (0.45) στην περίπτωση των αρχικά πλήρως κορεσμένων εδαφών από ότι στην περίπτωση των αρχικά μη κορεσμένων (0.18).

Συσχετίζοντας τα όρια του δείκτη πλαστικότητας και του ορίου υδαρότητας που υπολογίστηκαν για τις μεταβολές αυτές στη συμπίεσιότητα των εδαφών αναλόγως του αρχικού βαθμού κορεσμού τους, παρατηρούμε ότι προσεγγίζονται πολύ καλά το ένα από αυτά που προβλέπονται από το άλλο μέσω της Εξ. 5.9. Κατά συνέπεια ορίζεται στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande μία περιοχή για  $0 < w_L < 38$  % και  $0 < I_p < 18$  %, εντός της οποίας πρέπει να αναμένεται ότι ο δείκτης συμπίεσης αρχικά πλήρως κορεσμένων εδαφών θα είναι μικρότερος

εκείνου των αρχικά μή κορεσμένων και μία περιοχή για  $w_L > 38 \%$  και  $I_p > 18 \%$ , εντός της οποίας αναμένεται το αντίθετο.



**Σχήμα 5.34.** Δείκτης συμπίεσης σε σχέση με τον δείκτη πλαστικότητας: α) για το σύνολο των δειγμάτων, και β) για το σμήνος διαχωρισμένο σε αρχικά πλήρως κορεσμένα και αρχικά μή κορεσμένα δοκίμια. Παρατίθενται οι βέλτιστες γραμμικές προσεγγίσεις για κάθε περίπτωση.

#### 5.6.3.4 Συσχέτιση δείκτη συμπίεσης – ποσοστού φυσικής υγρασίας

Στο Σχ. 5.35α παρατίθενται τα σημεία που αντιστοιχούν στο συγκεντρωθέν δείγμα και η βέλτιστη γραμμική προσέγγιση για το σμήνος των τιμών. Η εξίσωση που περιγράφει την τελευταία είναι:

$$C_c = 0.0056 (w_n + 7.48) \quad (5.16)$$

αλλά με πολύ χαμηλό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης ( $R^2 = 0.41$ ), αν και υψηλότερο γενικά από εκείνο των καλύτερων γραμμικών προσεγγίσεων του δείκτη συμπίεσης με το όριο υδαρότητας ή τον δείκτη πλαστικότητας.

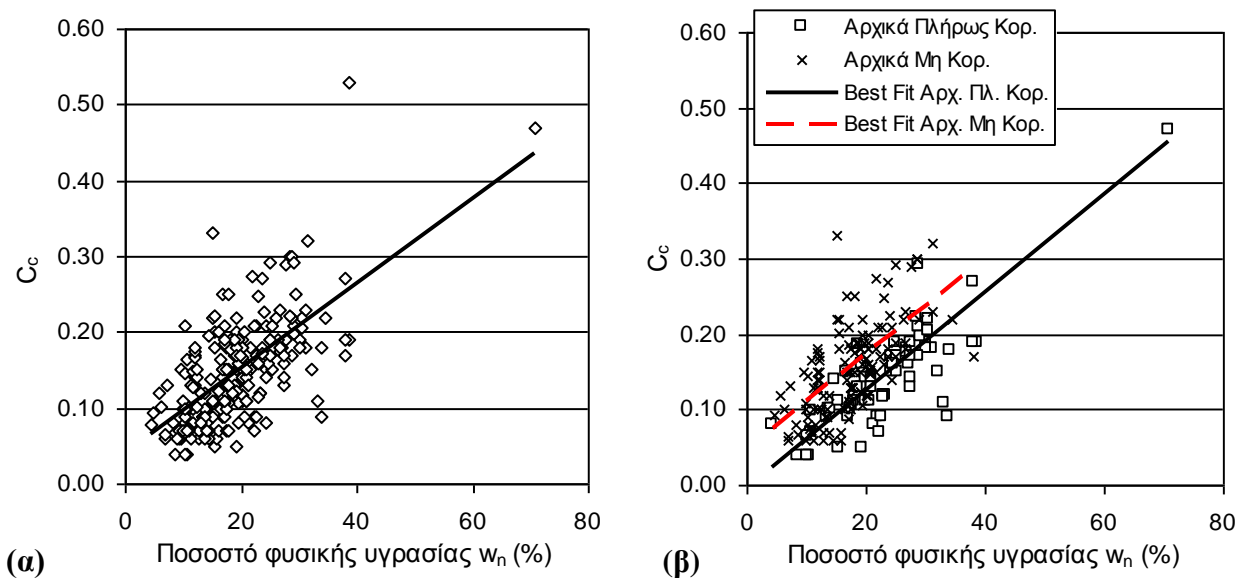
Διαχωρίζοντας τα δοκίμια που ήταν αρχικά πλήρως και αρχικά μή κορεσμένα προκύπτει το διάγραμμα του Σχ. 5.35β. Από αυτό προκύπτουν δύο διαφορετικές εξισώσεις που αντιστοιχούν

στις καλύτερες γραμμικές προσεγγίσεις για τα δύο δείγματα (οι Εξ. 5.17 και 5.18 για τα αρχικά πλήρως και τα αρχικά μή κορεσμένα εδάφη αντίστοιχα).

$$C_c = 0.0065 (w_n - 0.80) \tag{5.17}$$

$$C_c = 0.0064 (w_n + 6.88) \tag{5.18}$$

Τόσο από τις Εξ. 5.17 και 5.18 όσο και από τη μορφή των γραφικών παραστάσεών τους στο Σχ. 5.35β προκύπτει ότι τα αρχικά μή κορεσμένα εδάφη αναμένεται να έχουν μεγαλύτερο δείκτη συμπίεσης από τα αρχικά πλήρως κορεσμένα με το ίδιο ποσοστό φυσικής υγρασίας. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού από δύο εδάφη τα οποία έχουν το ίδιο ποσοστό φυσικής υγρασίας, εκείνο το οποίο είναι μή κορεσμένο θα έχει πιο ανοικτή δομή, αφού υπάρχει και ο όγκος που καταλαμβάνουν τα κενά του που περιέχουν αέρα. Κατά συνέπεια αυτό συνιστά ένδειξη ότι καθοριστική παράμετρος για να εκφράσει τη δομή του εδάφους, και ως εκ τούτου και τη συσχέτιση μεταξύ δείκτη συμπίεσης και δομής του εδάφους, είναι ο λόγος κενών. Ταυτόχρονα ενώ ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης και για τις δύο παραπάνω εξισώσεις είναι πολύ χαμηλός για να θεωρηθούν αξιόπιστες οι προβλέψεις τους, είναι αρκετά αυξημένος (0.60) στην περίπτωση των αρχικά πλήρως κορεσμένων εδαφών σε σχέση με την περίπτωση των αρχικά μή κορεσμένων (0.43).



**Σχήμα 5.35.** Δείκτης συμπίεσης σε σχέση με το ποσοστό φυσικής υγρασίας: α) για το σύνολο των δειγμάτων, και β) για το σμήνος διαχωρισμένο σε αρχικά πλήρως κορεσμένα και αρχικά μή κορεσμένα δοκίμια. Παρατίθενται οι βέλτιστες γραμμικές προσεγγίσεις για κάθε περίπτωση.

### 5.6.3.5 Συσχέτιση δείκτη συμπίεσης – αρχικού λόγου κενών

Στο Σχ. 5.36α παρατίθενται τα σημεία που αντιστοιχούν στο συγκεντρωθέν δείγμα και η βέλτιστη γραμμική προσέγγιση για το σμήνος των τιμών. Η εξίσωση που περιγράφει την τελευταία είναι:

$$C_c = 0.28 (e_o - 0.05) \quad (5.19)$$

αλλά με χαμηλό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης ( $R^2 = 0.63$ ), παρόλο που αυτός είναι ο υψηλότερος που βρέθηκε από όλες τις συσχετίσεις που διατυπώθηκαν για το σύνολο των δοκιμών του δείγματος.

Διαχωρίζοντας τα δοκίμια που ήταν αρχικά πλήρως και αρχικά μη κορεσμένα προκύπτει το διάγραμμα του Σχ. 5.36β. Από αυτό προκύπτουν δύο διαφορετικές εξισώσεις που αντιστοιχούν στις καλύτερες γραμμικές προσεγγίσεις για τα δύο δείγματα (οι Εξ. 5.20 και 5.21 για τα αρχικά πλήρως και τα αρχικά μη κορεσμένα εδάφη αντίστοιχα).

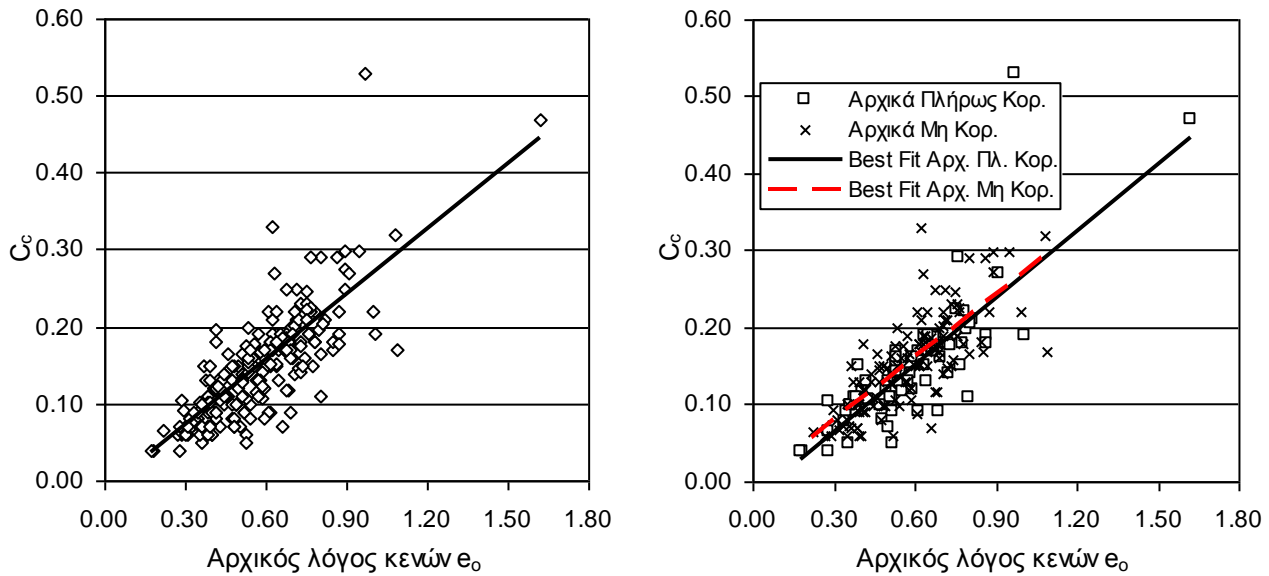
$$C_c = 0.29 (e_o - 0.08) \quad (5.20)$$

$$C_c = 0.27 e_o \quad (5.21)$$

Τόσο από τις Εξ. 5.20 και 5.21 όσο και από τη μορφή των γραφικών παραστάσεών τους στο Σχ. 5.36β προκύπτει ότι τα αρχικά μη κορεσμένα εδάφη αναμένεται να έχουν πρακτικά τον ίδιο δείκτη συμπίεσης με τα αρχικά πλήρως κορεσμένα για τον ίδιο αρχικό λόγο κενών. Ταυτόχρονα ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης χωρίς να έχει μεταβληθεί ιδιαίτερα είναι πιο αυξημένος (0.66) στην περίπτωση των αρχικά πλήρως κορεσμένων εδαφών σε σχέση με την περίπτωση των αρχικά μη κορεσμένων (0.58).

### 5.6.3.6 Συσχέτιση δείκτη συμπίεσης – βαθμού κορεσμού

Στο Σχ. 5.37α παρατίθενται τα σημεία που αντιστοιχούν στο συγκεντρωθέν δείγμα. Παρατηρείται ότι με την μείωση του βαθμού κορεσμού ο δείκτης συμπίεσης τείνει προς μία κοινή τιμή και για τα εδάφη υψηλής πλαστικότητας και για τα εδάφη χαμηλής πλαστικότητας.

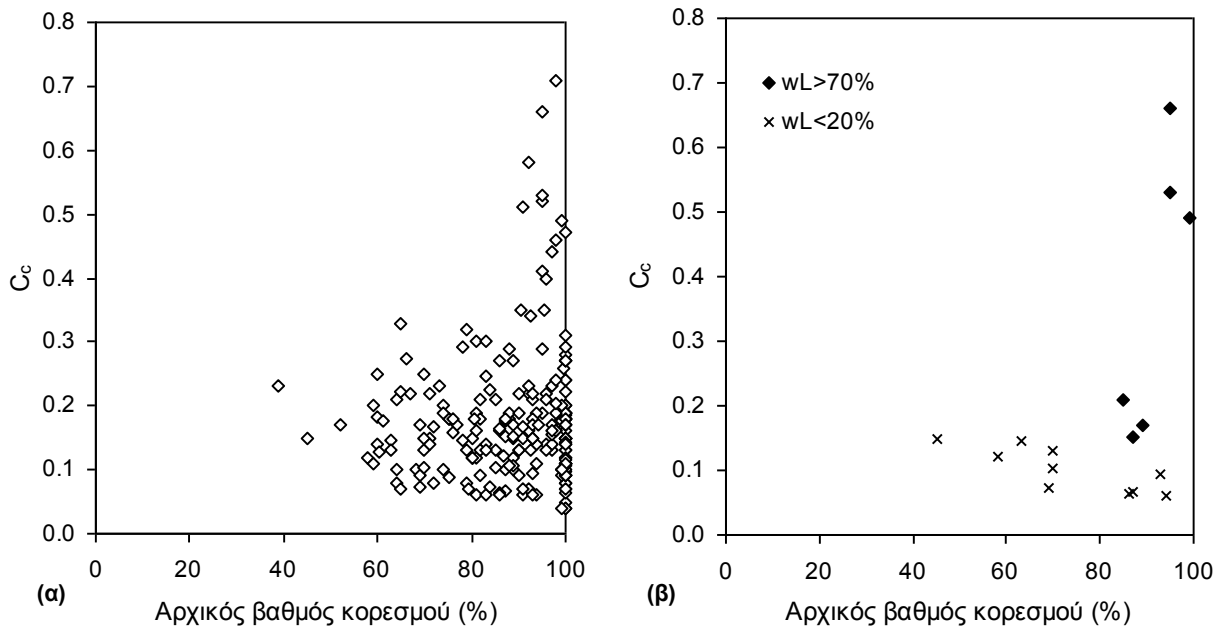


**Σχήμα 5.36.** Δείκτης συμπίεσης σε σχέση με τον αρχικό λόγο κενών: α) για το σύνολο των δειγμάτων, και β) για το σμήνος διαχωρισμένο σε αρχικά πλήρως κορεσμένα και αρχικά μη κορεσμένα δοκίμια. Παρατίθενται οι βέλτιστες γραμμικές προσεγγίσεις για κάθε περίπτωση.

Στο Σχ. 5.37β συσχετίζονται οι τιμές του δείκτη συμπίεσης με τον βαθμό κορεσμού μόνο για τα εδαφικά υλικά από το συγκεντρωθέν δείγμα με όριο υδαρότητας μεγαλύτερο του 70% και μικρότερο του 20%. Παρατηρείται ότι αυξανόμενου του βαθμού κορεσμού, τα εδαφικά υλικά με όριο υδαρότητας μεγαλύτερο του 70% παρουσιάζουν ραγδαία αύξηση του δείκτη συμπίεσής τους, ενώ τα εδαφικά υλικά με όριο υδαρότητας μικρότερο του 20% παρουσιάζουν μία μικρή μείωση του δείκτη συμπίεσής τους. Ταυτόχρονα οι μεταβολές του δείκτη συμπίεσης με τον βαθμό κορεσμού για τα εδαφικά υλικά με αυτές τις ακραίες τιμές του ορίου υδαρότητας αποτελούν το άνω ( $w_L > 70\%$ ) και κάτω ( $w_L < 20\%$ ) όριο του συνόλου των στοιχείων του δείγματος που παρουσιάζονται στο Σχ. 5.37α.

Στην §5.6.4 συνοψίζονται και επεξηγούνται περαιτέρω οι παρατηρήσεις από το Σχ. 5.37 και τα σχήματα της υπόλοιπης §5.6.3 στα πλαίσια της μεταβολής της συμπιεστότητας των μη κορεσμένων εδαφών όπως αυτή παρουσιάστηκε στην §5.5.2.

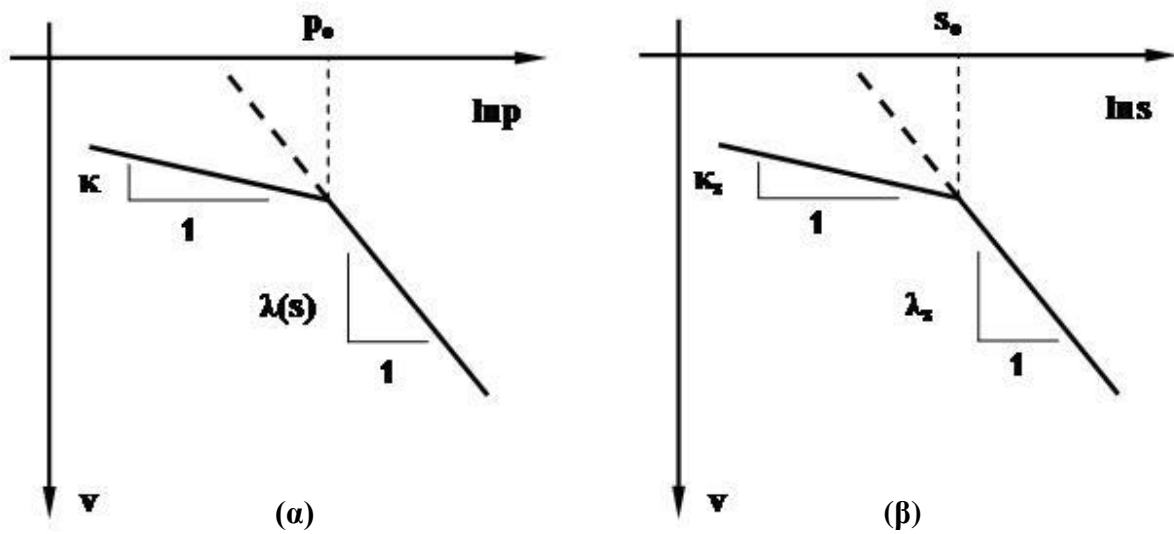




**Σχήμα 5.37.** Δείκτης συμπίεσης σε σχέση με τον βαθμό κορεσμού: α) για το σύνολο των δειγμάτων, και β) για τα δείγματα με όριο υδαρότητας > 70% και τα δείγματα με όριο υδαρότητας < 20%.

#### 5.6.4 Συμπεράσματα από τη συσχέτιση δείκτη συμπίεσης με τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών του δείγματος

Στην §5.5.2 περιγράφηκε ο τρόπος της μεταβολής των παραμέτρων συμπιεστότητας όπως έχει προταθεί από τους Alonso, et al. (1990). Στα πλαίσια του ίδιου καταστατικού προσομοιώματος προβλέπονται και οι μεταβολές του ειδικού όγκου  $v$  λόγω ξήρανσης για σταθερή τιμή της ολικής τάσης όπως φαίνεται στο Σχ. 5.38β, το οποίο βρίσκεται σε ακριβή αντιστοιχία με την μεταβολή του ειδικού όγκου για μεταβολές της ολικής πίεσης όπως φαίνεται στο Σχ. 5.38α και επεξηγήθηκε αναλυτικά στην §5.5.2. Η απεικονιζόμενη στο Σχ. 5.38β μεταβολή του ειδικού όγκου για μεταβολές της μύζησης περιγράφει ουσιαστικά την καμπύλη του Σχ. 5.13α στην §5.4.3, αλλά μόνο για τιμές της μύζησης αρκετά πριν την μύζηση επίτευξης παραμένουτος ποσοστού υγρασίας. Για μεγαλύτερες τιμές της μύζησης το προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990) υπερτιμά την μείωση του ειδικού όγκου με την αύξηση της μύζησης (δηλ. τις ογκομετρικές παραμορφώσεις λόγω συρρίκνωσης). Το μειονέκτημα αυτό του συγκεκριμένου προσομοιώματος εντοπίστηκε από νωρίς στην εξέλιξη του νέου θεωρητικού πλαισίου που καταστρώθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και ενσωματώθηκε η πρόβλεψη για την σταθεροποίηση των τιμών του ειδικού όγκου όταν η μύζηση



**Σχήμα 5.38.** Μεταβολές ειδικού όγκου συναρτήσει α) της ολικής τάσης υπό σταθερή μύζηση  $s$ , και β) της μύζησης υπό σταθερή ολική τάση.

προσεγγίζει την μύζηση επίτευξης παραμένουτος ποσοστού υγρασίας (όπως παρουσιάζεται δηλαδή ενδεικτικά στο Σχ. 5.13α). Οι μεταβολές αυτές στο προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990) παρουσιάζονται αναλυτικά στο τρίτο μέρος της διατριβής. Η τιμή της μύζησης  $s_0$  στο Σχ. 5.38β είναι μία μύζηση διαρροής που αντιστοιχεί στην μεταβολή του δείκτη συμπίεσης από μία αρχική τιμή  $\kappa_s$  σε μία μεγαλύτερη τιμή  $\lambda_s$  και οριοθετεί την μετάβαση από την περιοχή τιμών της μύζησης οι οποίες προκαλούν αναστρέψιμες («ελαστικές»<sup>14</sup>) μεταβολές στην τιμή του ειδικού όγκου και άρα στις παραμορφώσεις λόγω ξήρανσης, στην περιοχή όπου περαιτέρω αύξηση της μύζησης προκαλεί μη αναστρέψιμες («πλαστικές»<sup>11</sup>) μεταβολές στην τιμή του ειδικού όγκου και άρα στις παραμορφώσεις λόγω ξήρανσης. Αυτή η μύζηση *διαρροής* λοιπόν ταυτίζεται με την πίεσης διείδυσης αέρα θεωρητικά. Οι Thu, et al. (2007) μέτρησαν τις διαφορές μεταξύ της μύζησης διαρροής και της πίεσης διείδυσης αέρα αποδεικνύοντας με μετρήσεις ότι δεν ταυτίζονται ακριβώς οι τιμές των δύο μεγεθών (βλ. Σχ. 5.18 στην §5.5.2), αν και ενδεχομένως οι διαφορές αυτές οφείλονται στις γεωμετρικές κατασκευές που χρησιμοποιούνται επί των

<sup>14</sup> Ο όρος ελαστικές και πλαστικές χρησιμοποιείται εν προκειμένω εντός εισαγωγικών γιατί ο δείκτης συμπίεσης ως προς τις μεταβολές της μύζησης (υπό μηδενική μέση ολική τάση) για τιμές της μύζησης μικρότερες της πίεσης διείδυσης αέρα είναι τόσοσ όσος και ο δείκτης συμπίεσης για μεταβολές της μέσης ολικής τάσης στο ίδιο εύρος τιμών (βλ. §5.4.3). Πράγματι λοιπόν είναι δυνατόν να προκύψουν και πλαστικές παραμορφώσεις για μεταβολές της μύζησης μικρότερες της μύζησης  $s_0$  αλλά μεγαλύτερες της τάσης διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους, αν η μύζηση  $s_0$  είναι μεγαλύτερη της τάσης διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους. Για να ήταν πραγματικά ελαστικές και πλαστικές οι αναφερόμενες παραμορφώσεις στο κείμενο θα έπρεπε να ισχύει  $s_0 = p_0^*$ .

καμπυλών  $v$ - $s$  και  $S$ - $s$  για τον προσδιορισμό των ονομαστικών τιμών της πίεσης διεύθυνσης αέρα και της μύζησης διαρροής. Οι τιμές  $\kappa_s$  και  $\lambda_s$  αποτελούν τους δείκτες συμπίεσης λόγω μεταβολών της μύζησης πριν και μετά την μύζηση  $s_o$ . Στα πλαίσια του προσομοιώματος των Alonso, et al. (1990) οι δύο αυτές παράμετροι θεωρούνται σταθερές, ανεξάρτητες της μέσης ολικής τάσης.

Με τον τρόπο μεταβολής των χαρακτηριστικών συμπίεστικότητας των εδαφικών υλικών με την αύξηση της μύζησης που περιγράφηκε στην §5.5.2 (Σχ. 5.16α) προκύπτει ότι υπάρχει μία τιμή της ολικής μύζησης,  $p_t$ , στην οποία η προβολή στο επίπεδο  $v$ - $p$  της καμπύλης συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση  $s$  και της καμπύλης συμπίεσης υπό μηδενική μύζηση τέμνονται, δηλαδή για αυτήν την τιμή της ολικής τάσης έχουν κοινή τιμή του ειδικού όγκου. Χρησιμοποιώντας αυτήν την κοινή τιμή του ειδικού όγκου για τις δύο καμπύλες συμπίεσης προκύπτουν οι Εξ. 5.22 και 5.23 οι οποίες δίνουν την τιμή της μέσης ολικής τάσης  $p_t$  εάν η ξήρανση που προηγήθηκε της συμπίεσης έφτασε μέχρι μύζηση μικρότερη της μύζησης διαρροής  $s_o$  στο Σχ. 5.38β ή έφτασε μέχρι μύζηση μεγαλύτερη της μύζησης διαρροής  $s_o$  αντίστοιχα.

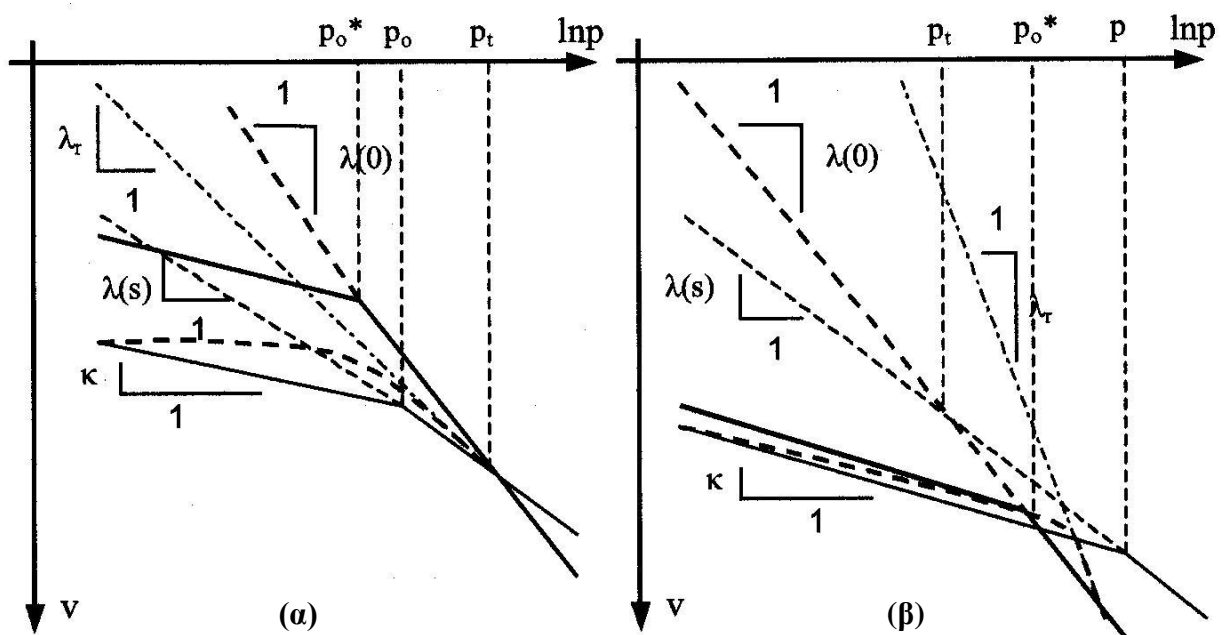
$$\ln\left(\frac{p_t}{p_c}\right) = \frac{\kappa_s \cdot \ln\left(\frac{s + p_{at}}{p_{at}}\right)}{\lambda(0) \cdot (1-r) \cdot (1 - e^{-\beta \cdot s})} \quad (5.22)$$

$$\ln\left(\frac{p_t}{p_c}\right) = \frac{\kappa_s \cdot \ln\left(\frac{s_o + p_{at}}{p_{at}}\right) + \lambda_s \ln\left(\frac{s}{s_o}\right)}{\lambda(0) \cdot (1-r) \cdot (1 - e^{-\beta \cdot s})} \quad (5.23)$$

Μετά από αυτήν την εισαγωγή ας φανταστούμε τις εξής δύο καταστάσεις. Στην πρώτη περίπτωση (Σχ. 5.39α) ένα αναζυμωμένο αργιλικό εδαφικό υλικό έχει φορτιστεί μέχρι μία τιμή της μέσης ολικής τάσης  $p_o^* < p_t$  και στη συνέχεια αποφορτιστεί χωρίς να έχει προηγηθεί της φόρτισης ξήρανση. Το ίδιο υλικό επίσης έχει φορτιστεί μέχρι την προβλεπόμενη τιμή της μέσης ολικής τάσης  $p_o < p_t$  και στη συνέχεια αποφορτιστεί στην ίδια τιμή της μέσης ολικής τάσης με πριν αλλά αυτή τη φορά είχε προηγηθεί ξήρανση πριν την φόρτιση. Εάν το εδαφικό υλικό της δεύτερης τασικής διαδρομής επαναφορτιστεί μέχρι κάποια μέση ολική τάση μικρότερη της τάσης  $p_t$ , τότε η τιμή του δείκτη συμπίεσης  $\lambda_t$  που θα προέκυπτε από την κλίση της καμπύλης συμπίεσης μέχρι αυτήν την τάση (δηλ. ο φαινόμενος δείκτης συμπίεσης από δοκιμές

μονοδιάστατης ή ισοτροπικής συμπίεσης στις οποίες η φόρτιση σταμάτησε μέχρι αναλογικά μικρές τιμές της τάσης) θα ήταν μικρότερος από τον δείκτη συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $\lambda(0)$ .

Στην δεύτερη περίπτωση (Σχ. 5.39β) ένα αναζυμωμένο αργιλικό εδαφικό υλικό έχει φορτιστεί μέχρι μία τιμή της μέσης ολικής τάσης  $p_o^* > p_t$  και στη συνέχεια αποφορτιστεί χωρίς να έχει προηγηθεί της φόρτισης ξήρανση. Το ίδιο υλικό επίσης έχει φορτιστεί μέχρι την προβλεπόμενη τιμή της μέσης ολικής τάσης  $p_o > p_t$  και στη συνέχεια αποφορτιστεί στην ίδια τιμή της μέσης ολικής τάσης με πριν αλλά αυτή τη φορά είχε προηγηθεί ξήρανση πριν την φόρτιση. Εάν το εδαφικό υλικό της δεύτερης τασικής διαδρομής επαναφορτιστεί μέχρι κάποια μέση ολική τάση μεγαλύτερη της τάσης  $p_t$  και της τάσης  $p_o^*$  αλλά μικρότερη της τάσης  $p_o$ , τότε η τιμή του δείκτη συμπίεσης  $\lambda_r$  που θα προέκυπτε από την κλίση της καμπύλης συμπίεσης μέχρι αυτήν την τάση (δηλ. ο φαινόμενος δείκτης συμπίεσης από δοκιμές μονοδιάστατης ή ισοτροπικής συμπίεσης στις οποίες η φόρτιση σταμάτησε μέχρι αναλογικά μικρές τιμές της τάσης) θα ήταν μεγαλύτερος από τον δείκτη συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $\lambda(0)$ .



**Σχήμα 5.39.** Δείκτης συμπίεσης σε σχέση με τον βαθμό κορεσμού: α) για το σύνολο των δειγμάτων, και β) για τα δείγματα με όριο υδαρότητας  $> 70\%$  και τα δείγματα με όριο υδαρότητας  $< 20\%$ .

Στις καταστάσεις που περιγράφηκαν προηγουμένως, η ξήρανση μπορεί να γίνει πριν ή μετά την

φόρτιση και σε στάδια ακόμη και οι παρατηρούμενες διαφορές μεταξύ  $\lambda_r$  και  $\lambda(0)$  να παραμένουν οι ίδιες, αρκεί η τάση  $p_0$  να μεταβάλλεται κατά τις προβλέψεις των Alonso, et al. (1990) και να αντιστοιχεί στην μύζηση μέχρι την οποία προχώρησε η ξήρανση και την τάση προστεροποίησης του πλήρως κορεσμένου εδάφους. Σε ό,τι αφορά τα αποτελέσματα των δοκιμών του δείγματος που συγκεντρώθηκε, όλα τους αφορούν σε δοκιμές που εκτελέστηκαν μέχρι μέγιστη κατακόρυφη τάση 800 kPa. Αν υποθεθεί ότι η τάση  $p_i$  είναι μεγαλύτερη των 800 kPa για εδαφικά υλικά υψηλής πλαστικότητας και μικρότερη των 800 kPa για εδαφικά υλικά μικρής πλαστικότητας (για την ίδια τάση προστεροποίησης μετά από ξήρανση  $p_0$ ), τότε οι καταστάσεις που περιγράφηκαν εξηγούν τις παρατηρηθείσες διαφορές για εδαφικά υλικά στην περιοχή  $0 < w_L < 38 \%$  και  $0 < I_p < 18 \%$ , εντός της οποίας πρέπει να αναμένεται ότι ο δείκτης συμπίεσης αρχικά πλήρως κορεσμένων εδαφών θα είναι μικρότερος εκείνου των αρχικά μη κορεσμένων και στην περιοχή για  $w_L > 38 \%$  και  $I_p > 18 \%$ , εντός της οποίας αναμένεται το αντίθετο (§5.6.3.2 και 5.6.3.3, Σχ. 5.33 και 5.34).

## 5.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό επιδείχθηκε ότι υπάρχει *καταρρεύσιμη και διογκώσιμη συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών*, η οποία είναι δυνατόν να εμφανιστεί στο ίδιο εδαφικό υλικό ανάλογα με την εντατική κατάσταση στην οποία βρίσκεται, τη δομή του και την ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρυνσης, και όχι γενικώς καταρρεύσιμα και διογκώσιμα εδάφη. Παρατέθηκαν πειραματικά αποτελέσματα που επιδεικνύουν την επιρροή της εντατικής κατάστασης υπό την οποία βρίσκεται ένα μη κορεσμένο έδαφος καθώς και της ιστορίας φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρυνσης και ο τρόπος που η επιρροή αυτή έχει ενσωματωθεί στις προβλέψεις του καταστατικού προσομοιώματος των Alonso, et al. (1990). Ο δείκτης συμπίεσης των εδαφικών υλικών μειώνεται όταν συμπιέζονται υπό σταθερή μύζηση, και μάλιστα τόσο περισσότερο όσο αυξάνεται η μύζηση (μέχρι σταθεροποίησης σε μια ελάχιστη τιμή για τιμές της μύζησης περί την μύζηση επίτευξης παραμένουτος ποσοστού υγρασίας και μετά). Αντίστοιχα, η τάση διαρροής επί των καμπυλών συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης υπό την οποία γίνεται η συμπίεση. Το θεωρητικό αυτό πλαίσιο εξηγεί τις διαφορές που παρατηρήθηκαν στην επιρροή του βαθμού κορεσμού επί του δείκτη συμπίεσης από δοκιμές από εμπορικά εργαστήρια σε εδάφη από τον ελλαδικό χώρο. Δεδομένου ότι οι δοκιμές αυτές είχαν εκτελεστεί μέχρι μέγιστη κατακόρυφη τάση 800 kPa, παρατηρήθηκε ότι για εδαφικά υλικά στην περιοχή του διαγράμματος πλαστικότητας του

Casagrande  $0 < w_L < 38 \%$  και  $0 < I_p < 18 \%$  πρέπει να αναμένεται ότι ο δείκτης συμπίεσης αρχικά πλήρως κορεσμένων εδαφών θα είναι μικρότερος εκείνου των αρχικά μη κορεσμένων, ενώ στην περιοχή για  $w_L > 38 \%$  και  $I_p > 18 \%$ , πρέπει να αναμένεται το αντίθετο. Συνοψίζοντας δηλαδή, αρχικά μη κορεσμένα εδάφη χαμηλής πλαστικότητας είναι πιο συμπιεστά από αρχικά πλήρως κορεσμένα εδάφη ίδιας πλαστικότητας, ενώ το αντίθετο ισχύει για τα εδάφη υψηλής πλαστικότητας. Επίσης αρχικά μη κορεσμένα εδάφη είναι συστηματικά πιο συμπιεστά από αρχικά πλήρως κορεσμένα εδάφη με το ίδιο ποσοστό φυσικής υγρασίας, γεγονός το οποίο συνιστά ένδειξη ότι η παράμετρος που εκφράζει τη σχέση μεταξύ της δομής των εδαφών και του δείκτη συμπίεσης είναι ο λόγος κενών, το οποίο άλλωστε τεκμηριώθηκε από το γεγονός ότι προβλέπεται ίδια τιμή του δείκτη συμπίεσης για τον ίδιο αρχικό λόγο κενών και για αρχικά πλήρως κορεσμένα εδάφη και για αρχικά μη κορεσμένα εδάφη. Τέλος ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης για κάθε παράμετρο συσχέτισης ήταν συστηματικά αυξημένος για τα αρχικά πλήρως κορεσμένα εδάφη σε σχέση με τα αρχικά μη κορεσμένα. Αυτό συνιστά ένδειξη ότι η σχέση αιτίου-αιτιατού μεταξύ φυσικών χαρακτηριστικών και δείκτη συμπίεσης που διατυπώνεται από τις εμπειρικές συσχετίσεις ισχύει μάλλον για πλήρως κορεσμένα εδάφη.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκε η φύση των μή κορεσμένων εδαφών, ορίστηκε και επεξηγήθηκε η βασική παράμετρος για τη μελέτη της μηχανικής τους συμπεριφοράς που είναι η μύζηση καθώς και η κεντρική έννοια για την κατηγοριοποίηση της μηχανικής τους συμπεριφοράς που είναι η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Μετά την παρουσίαση των μεταβολών όγκου των μή κορεσμένων εδαφών στο Κεφάλαιο 5, συνεχίζεται η παρουσίαση της μηχανικής τους συμπεριφοράς με τα χαρακτηριστικά της εξέλιξης της διατμητικής τους αντοχής με τον βαθμό κορεσμού και τη μύζηση. Ιδιαίτερα παρουσιάζεται το γενικευμένο κριτήριο διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb και οι διατιθέμενες εργαστηριακές μέθοδοι προσδιορισμού της περιβάλλουσας της διατμητικής αντοχής των μή κορεσμένων εδαφών συναρτήσει της μύζησης. Αναφορά γίνεται επίσης και στη συσχέτιση της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού καθώς και στα μαθηματικά προσομοιώματα για την πρόβλεψη της αντοχής από τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Τέλος δίνονται παραδείγματα από την επιρροή του βαθμού κορεσμού σε προβλήματα ευστάθειας πρανών και ένα παράδειγμα μέτρησης της διατμητικής αντοχής υλικού με μύζηση.

### 6.2 ΤΟ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ MOHR-COULOMB

#### 6.2.1 Το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για πλήρως κορεσμένα εδάφη σε όρους ενεργού τάσης διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον Terzaghi (1936):

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad (6.1)$$

όπου  $\tau$  είναι η μέγιστη διατμητική τάση ενός πλήρως κορεσμένου εδάφους ευρισκόμενου υπό ολική τάση  $\sigma$  και πίεση της υγρής φάσης των πόρων  $u_w$ , με ενεργό τιμή της *συνοχής*  $c'$  και ενεργό τιμή της *γωνίας διατμητικής αντοχής*  $\phi'$ .

Ήδη από τα πρώτα βήματα της εδαφομηχανικής (Terzaghi, 1925) ήταν γνωστό ότι αν στα όρια ενός εδαφικού υλικού ή μέσα στη μάζα του εφαρμόζεται μία αρνητική πίεση πόρων, τότε το έδαφος αυτό έχει μία *φαινόμενη συνοχή*  $q_t$  (scheinbare Kohäsion κατά Terzaghi, 1925) ίση με:

$$q_t = f_1 p_k \quad (6.2)$$

όπου  $p_k$  η εφαρμοζόμενη αρνητική πίεση πόρων και  $f_1$  παράμετρος χαρακτηριστική κάθε υλικού.

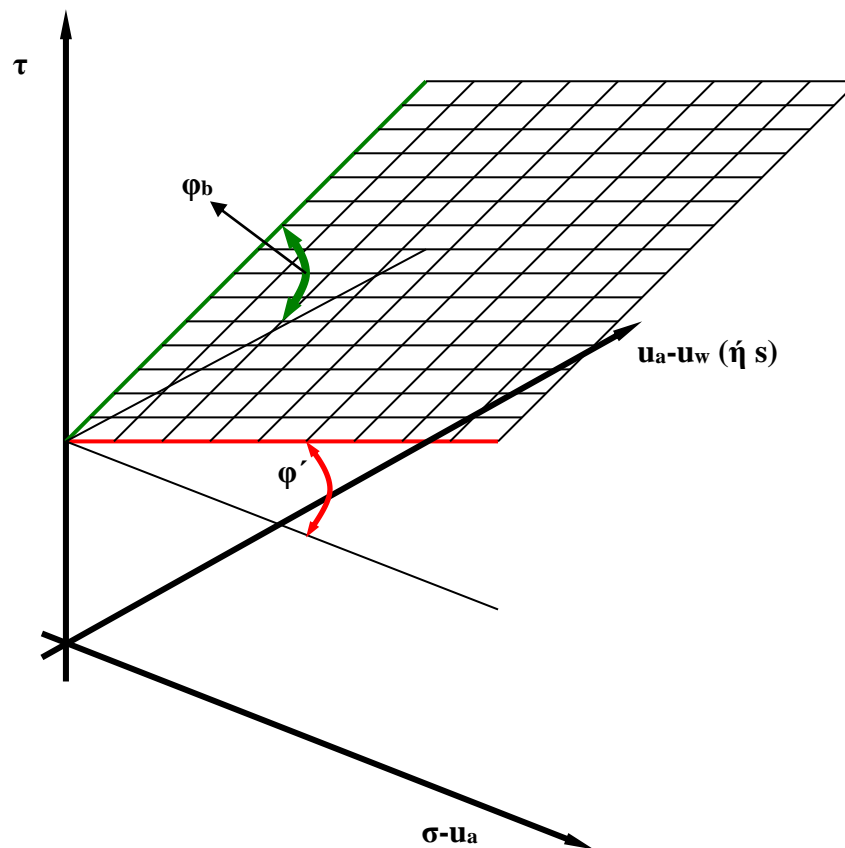
Οι Fredlund, et al. (1978) επέκτειναν το γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb όπως είχε διατυπωθεί για πλήρως κορεσμένα εδάφη, και για μη κορεσμένα εδάφη, διατυπώνοντάς το για τις παραμέτρους τάσης που ορίζουν τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών. Η διατύπωση αυτή έχει ως εξής:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad (6.3)$$

όπου  $\tau$  είναι η μέγιστη διατμητική τάση την οποία μπορεί να παραλάβει ένα εδαφικό υλικό με ενεργό τιμή *συνοχής*  $c'$ , ενεργό τιμή *γωνίας διατμητικής αντοχής*  $\phi'$  και ρυθμό αύξησης της *διατμητικής αντοχής* με την *μύζηση*  $\tan \phi_b$ , ευρισκόμενο υπό ορθή ολική τάση  $(\sigma - u_a)$  και *μύζηση*  $(u_a - u_w)$ . Για ένα πλήρως κορεσμένο έδαφος,  $u_a = 0$  και  $\phi_b = \phi'$  οπότε η Εξ. 6.3 εκφυλίζεται στην Εξ. 6.1. Η διατύπωση αυτή αποτελεί το *γενικευμένο* –και για μη κορεσμένα εδάφη πλέον- γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

Με την εισαγωγή των δύο παραμέτρων τάσης, αντί να έχουμε μια περιβάλλουσα γραμμή αστοχίας στο επίπεδο  $\tau$ - $\sigma'$ , έχουμε μια περιβάλλουσα επιφάνεια αστοχίας στο χώρο  $\tau - (\sigma - u_a) - (u_a - u_w)$ . Αυτή η επιφάνεια αστοχίας είναι επίπεδη για το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας (Εξ. 6.3) όπως φαίνεται στο Σχ. 6.1. Ο τελευταίος όρος της Εξ. 6.3 βρίσκεται σε ακριβή αντιστοιχία με τη φαινόμενη συνοχή που περιέγραφε ο Terzaghi (1925), αν θέσουμε  $p_k$  όπου  $(u_a - u_w)$  και  $f_1$  όπου  $\tan \phi_b$ .





**Σχήμα 6.1.** Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών με βάση το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.

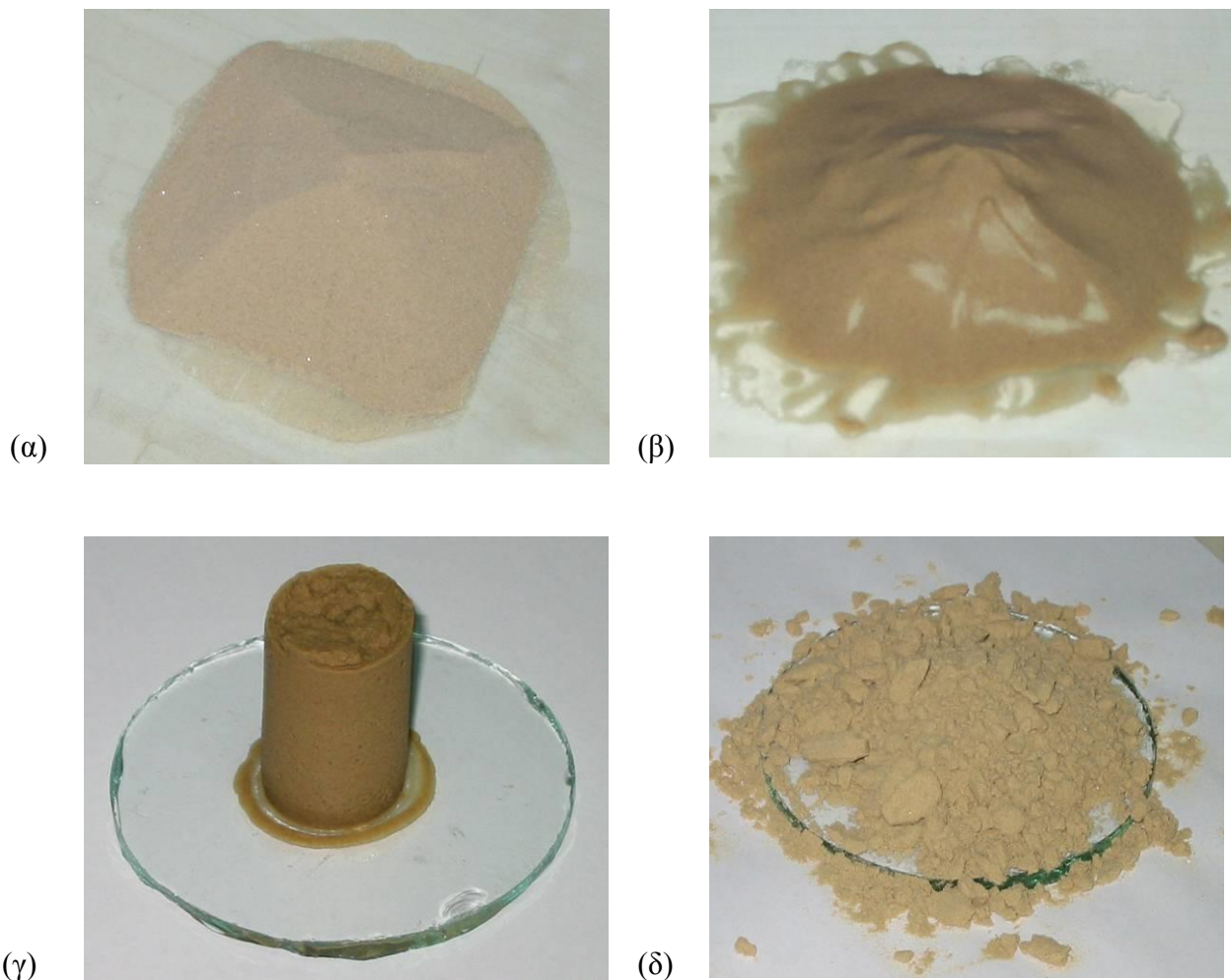
### 6.2.2 Το γενικευμένο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb εκφράζει τη *συνεχή* αύξηση της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών με την αύξηση της μύζησης και την αντίστοιχη μείωση του βαθμού κορεσμού. Όταν μάλιστα η γωνία  $\phi_b$  είναι σταθερή, τότε το γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb εκφράζει *σταθερή, συνεχή αύξηση* της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών. Τέτοιου είδους μεταβολή της διατμητικής αντοχής έχει αποδειχθεί πλέον ότι ισχύει είτε για περιορισμένο εύρος τιμών της τάσης (μέχρι την πίεση διείδυσης αέρα του υλικού ή και περιορισμένο εύρος της μύζησης από την τιμή αυτή και μετά), είτε μόνο για πολύ μικρό αριθμό εδαφικών υλικών (αργίλους πάρα πολύ υψηλής πλαστικότητας). Προκειμένου για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας, ιλεις και κοκκώδη υλικά, η διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών αναμένεται ότι αυξάνεται αρχικά με τη μύζηση

μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα των υλικών και στη συνέχεια είτε αυξάνεται με μειούμενο ρυθμό, είτε σταθεροποιείται, είτε ακόμα μειώνεται κιόλας.

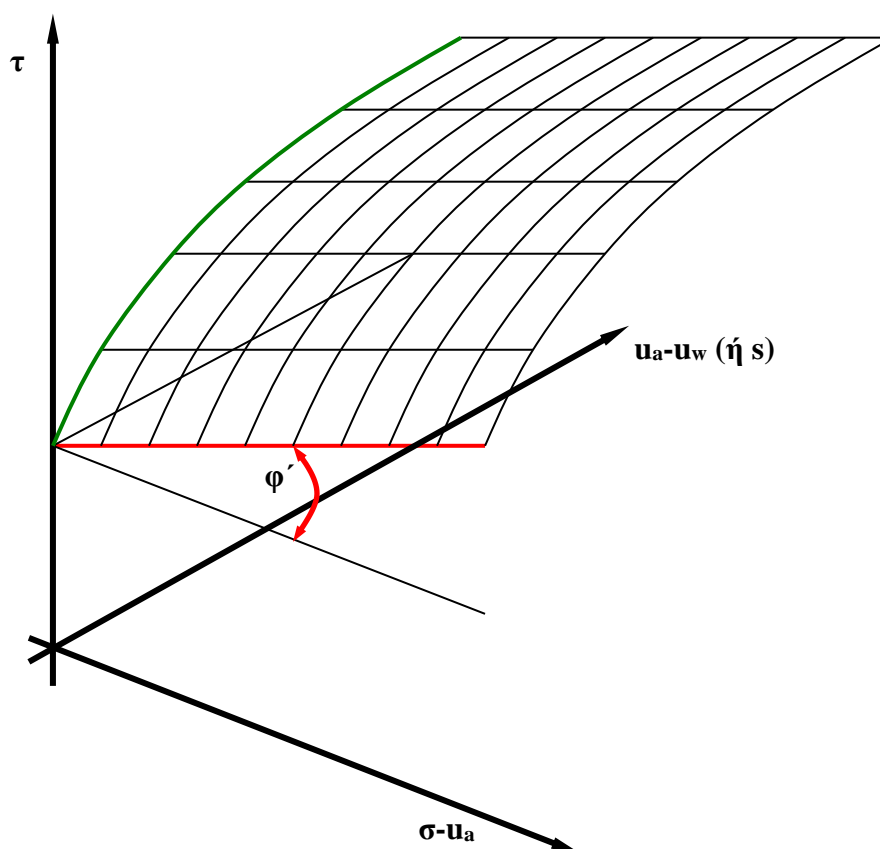
Προκειμένου να επιδειχθεί το τελευταίο χαρακτηριστικό, πραγματοποιήθηκε το εξής απλό πείραμα. Επιλέχθηκε μία καθαρή άμμος, η πολύ λεπτή Άμμος Λίμνης Ιωαννίνων, η οποία αρχικά αποτέθηκε εντελώς ξηρή σε μικρό σωρό με τη μέγιστη γωνία κλίσης του σωρού που ήταν δυνατόν να επιτευχθεί (Φωτ. 6.1α). Η γωνία κλίσης του σωρού αυτού ταυτίζεται πρακτικά με τη γωνία διατμητικής αντοχής της ξηρής άμμου. Στη συνέχεια η ίδια άμμος τοποθετήθηκε σε δοχείο με νερό, όπου και αφέθηκε για σημαντικό χρονικό διάστημα με τακτική ανάδευση και εφαρμογή πίεσης κενού προκειμένου να εξασφαλιστεί ο αρχικός κορεσμός της, και αποτέθηκε πλήρως κορεσμένη πλέον σε μικρό σωρό με τη μέγιστη γωνία κλίσης του σωρού που ήταν δυνατόν να επιτευχθεί (Φωτ. 6.1β). Η γωνία κλίσης και του σωρού αυτού ταυτίζεται με τη γωνία διατμητικής αντοχής της πλήρως κορεσμένης άμμου, η οποία είναι η ίδια με αυτή της εντελώς ξηρής άμμου. Με την ίδια πλήρως κορεσμένη άμμο μορφώθηκε κυλινδρικό δοκίμιο ύψους περί τα 5cm και διαμέτρου περί τα 2.5cm, το οποίο αφέθηκε μέσα στον τύπο μόρφωσής του να ξεραθεί υπό την επιρροή των ατμοσφαιρικών συνθηκών στο χώρο του εργαστηρίου. Μετά από σύντομο χρονικό διάστημα, οπότε το δοκίμιο είχε ξεραθεί λίγο, ο τύπος μπορούσε να αφαιρεθεί και το δοκίμιο να διατηρήσει τη μηχανική του ακεραιότητα χωρίς να καταρρεύσει (Φωτ. 6.1γ) φανερώνοντας ότι η ξήρανση, τουλάχιστον μέχρι αυτό το σημείο συνεισέφερε στην αύξηση της διατμητικής αντοχής της άμμου σε σχέση με εκείνη που έχει η εντελώς ξηρή και η πλήρως κορεσμένη άμμος. Καθώς ωστόσο προχωρούσε η ξήρανση του δοκιμίου, αυτό προοδευτικά άρχισε να αποφλοιώνεται (με την άμμο στην εξωτερική πλευρά του δοκιμίου να καταρρέει πρώτα, αφού προφανώς ξεράθηκε πρώτα αυτή που βρισκόταν πιο κοντά στην επιρροή των ατμοσφαιρικών συνθηκών), μέχρι που μετά από περίπου 48 ώρες βρέθηκε να έχει καταρρεύσει πλήρως (Φωτ. 6.1δ). Στον τελικό αυτό σωρό της άμμου μετά την πλήρη ξήρανσή της μέχρι τις συνθήκες ισορροπίας με τη σχετική υγρασία και τη θερμοκρασία του εργαστηρίου, διακρίνονται ακόμα συσσωματώματα κόκκων που δεν έχουν θρυμματιστεί αλλά η γενική κλίση του σωρού έχει επανέλθει πρακτικά πολύ κοντά σε εκείνη του σωρού της εντελώς ξηρής άμμου και της πλήρως κορεσμένης άμμου, υποδηλώνοντας ότι για αυτό το κοκκώδες υλικό, ενώ αρχικά η ξήρανση του προσέδωσε μεγαλύτερη αντοχή, στη συνέχεια όταν το υλικό έγινε πιο ξηρό ακόμη, αυτή η επιπλέον αντοχή χάθηκε και η διατμητική αντοχή του υλικού επανήλθε σε αυτήν που καθορίζεται από τη γωνία διατμητικής αντοχής μόνο. Το πείραμα που περιγράφηκε, αν και εξαιρετικά απλό χωρίς μετρήσεις φυσικών μεγεθών αλλά μόνο οπτικές παρατηρήσεις, εξυπηρετεί τον σκοπό της επίδειξης της επιρροής του βαθμού κορεσμού στη διατμητική αντοχή

κοκκωδών υλικών, και ακριβώς λόγω της απλότητάς του προσφέρεται και σαν πείραμα επίδειξης στη διάρκεια διδασκαλίας, ή πείραμα που θα μπορούσε να εκτελεστεί από σπουδαστές εδαφομηχανικής ακόμα και στο σπίτι τους με λίγη καθαρή άμμο από οποιαδήποτε παραλία. Με δεδομένο μάλιστα ότι η πολύ λεπτή άμμος που χρησιμοποιήθηκε ήταν το διερχόμενο από το κόσκινο Νο100 που παρέμενε στο κόσκινο Νο 200, δηλαδή η πιο λεπτόκοκκη άμμος που μπορεί να βρεθεί, η χρήση πιο χονδρόκοκκου υλικού θα επιτάχυνε πιθανόν και τον χρόνο ολοκλήρωσης του πειράματος.

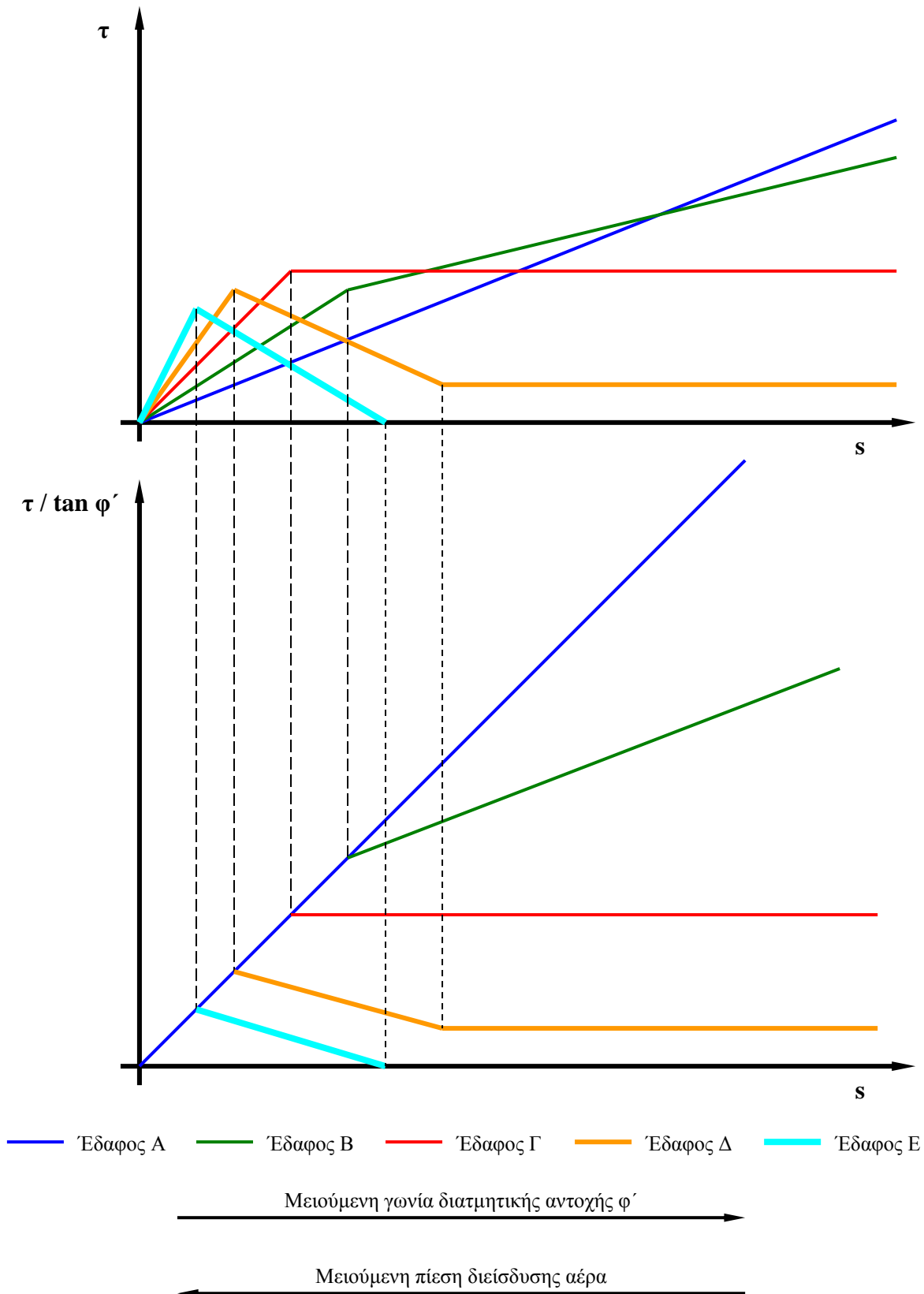


**Φωτογραφία 6.1.** Πολύ λεπτή Άμμος Λίμνης Ιωαννίνων: α) εντελώς ξηρή, σε σωρό με κλίση όση η γωνία διατμητικής αντοχής της,  $\phi'$ , β) πλήρως κορεσμένη, σε σωρό με κλίση όση η γωνία διατμητικής αντοχής της,  $\phi'$ , γ) υπό μερικό κορεσμό μετά από την μόρφωση της σε τύπο όντας πλήρως κορεσμένη και την άφεση της στην ατμόσφαιρα για ξήρανση, και δ) υπό καθεστώς παραμένοντος ποσοστού υγρασίας μετά από την ξήρανσή της στην ατμόσφαιρα, σε σωρό που έχει αποκτήσει πάλι πρακτικά την γωνία διατμητικής αντοχής του υλικού  $\phi'$ , παρόλο που διακρίνονται ακόμα συσσωματώματα κόκκων.

Κατά συνέπεια η αύξηση της διατμητικής αντοχής με τη μείωση του βαθμού κορεσμού και τη συνεπαγόμενη αύξηση της μύζησης δεν είναι σίγουρα σταθερή και ανάλογα με τη φύση του υλικού ενδέχεται να μην είναι και συνεχής, αλλά από ένα σημείο και μετά να μεταβάλλεται σε σταθεροποίηση ή και μείωση. Αυτό έχει επιδειχθεί σήμερα από πειραματικά αποτελέσματα (π.χ. Escario & Sáez, 1986, Krahn, et al., 1989) και έχει βρεθεί μάλιστα ότι ανάλογα με το ποσοστό του αργιλικού υλικού και το εύρος της μύζησης που ενδιαφέρει, η περιβάλλουσα αστοχίας δεν είναι επίπεδη αλλά διεδρική ή ακόμα και καμπύλη, αντιστοιχώντας σε μειούμενη τιμή της γωνίας  $\phi_b$  με τη μύζηση (Σχ. 6.2). Για κοκκώδη εδάφη μάλιστα η γωνία  $\phi_b$  μπορεί να γίνει ακόμα και αρνητική, δηλαδή να παρατηρείται από μία τιμή της μύζησης και μετά μείωση της διατμητικής αντοχής, όπως άλλωστε επιδείχθηκε και με το πείραμα που περιγράφηκε προηγουμένως. Οι αναμενόμενες αυτές διαφορές στην εξέλιξη της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση επιδεικνύονται ποιοτικά στο Σχ. 6.3. Στο Σχ. 6.3α συσχετίζεται η διατμητική αντοχή με τη μύζηση για μηδενικές τιμές της τάσης και στο Σχ. 6.3β συσχετίζεται η διατμητική αντοχή διαιρεμένη με την εφαπτομένη της γωνίας διατμητικής αντοχής  $\phi'$  κάθε υλικού με τη μύζηση, πάλι για μηδενικές τιμές της τάσης.



**Σχήμα 6.2.** Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών με βάση το γενικευμένο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.



**Σχήμα 6.3.** Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών για μηδενικές τιμές της τάσης και διάφορα είδη εδαφών: α) διατμητική αντοχή  $\tau$  με την μύζηση, και β) διατμητική αντοχή διαιρεμένη με την εφαπτομένη της γωνίας διατμητικής αντοχής  $\phi'$  κάθε υλικού με την μύζηση.

Στο Σχ. 6.3 παρουσιάζεται η αναμενόμενη εξέλιξη της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση για 5 τύπους εδαφών, για τα οποία έχει υποθεθεί ότι δεν έχουν συνοχή όταν είναι πλήρως κορεσμένα (δηλαδή όταν η μύζηση είναι μηδέν):

- *Εδαφος Α*: σταθερή, συνεχής αύξηση της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση. Αντιστοιχεί σε καθαρά αργιλικό έδαφος πολύ υψηλής πλαστικότητας.
- *Εδαφος Β*: συνεχής αύξηση της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση, με μειούμενο ρυθμό από ένα σημείο και μετά. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στην πίεση διείσδυσης αέρα. Αντιστοιχεί σε αργιλικό έδαφος μέσης έως υψηλής πλαστικότητας.
- *Εδαφος Γ*: αύξηση της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα. Από το σημείο αυτό και μετά η διατμητική αντοχή σταθεροποιείται. Αντιστοιχεί σε λεπτόκοκκη ιλύ έως άργιλο χαμηλής πλαστικότητας.
- *Εδαφος Δ*: Αύξηση της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα. Από το σημείο αυτό και μετά η διατμητική αντοχή αρχίζει να μειώνεται μέχρι μία τιμή στην οποία σταθεροποιείται. Αντιστοιχεί σε ιλυώδεις άμμους έως μη πλαστικές ιλεις.
- *Εδαφος Ε*: Αύξηση της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα. Από το σημείο αυτό και μετά η διατμητική αντοχή αρχίζει να μειώνεται μέχρι μηδενισμού της. Αντιστοιχεί σε χάλικες και άμμους χωρίς παρουσία λεπτοκόκκων.

Από το Σχ. 6.3 προκύπτει ότι για όλα τα εδαφικά υλικά υπάρχει αύξηση της διατμητικής αντοχής τους με τη μύζηση, για τιμές της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα, η οποία είναι τόση όση καθορίζεται από τη γωνία διατμητικής αντοχής του κάθε εδαφικού υλικού  $\phi'$ . Αυτό είναι λογικό αφού μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα όλα τα εδαφικά υλικά είναι πλήρως κορεσμένα, άρα η μύζηση συνιστά ουσιαστικά αρνητική πίεση πόρων και λόγω της ισχύος της αρχής των ενεργών τάσεων μέσα στην Περιοχή I της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, η αύξηση της μύζησης συνιστά αύξηση της ενεργού τάσης. Δεδομένου λοιπόν ότι τα πιο χονδρόκοκκα υλικά έχουν υψηλότερη γωνία διατμητικής αντοχής, για τιμές της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα του πιο χονδρόκοκκου από τα υλικά (Εδαφος Ε), το πιο χονδρόκοκκο υλικό αναμένεται ότι έχει την υψηλότερη διατμητική αντοχή από όλα (Σχ. 6.3α), και τα πιο λεπτόκοκκα πρέπει να βρεθούν υπό σημαντικά μεγαλύτερη τιμή της μύζησης για να αναπτύξουν μεγαλύτερη διατμητική αντοχή. Διαιρούμενη η διατμητική αντοχή με τη γωνία διατμητικής αντοχής του κάθε υλικού, προκύπτει από την Εξ. 6.3 ότι  $(\tau / \tan \phi') = u_w$ , αφού είναι  $\phi_b = \phi'$ ,  $u_a = 0$  και  $\sigma = 0$ , και κατά συνέπεια οι περιβάλλουσες αστοχίας ταυτίζονται για

όλα τα υλικά επί της γραμμής ( $\tau / \tan \phi' ) = u_w$ . Το Σχ. 6.3 εξυπηρετεί επίσης και στην επίδειξη της συσχέτισης εμφάνισης του πρώτου σημείου καμπής στην καμπύλη εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με την μύζηση, δηλαδή στα πιο χονδρόκοκκα υλικά το σημείο αυτό αντιστοιχεί σε πιο μικρή τιμή της μύζησης, αφού είναι πιο μικρή η πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού.

Συνοψίζοντας λοιπόν, σε ό,τι αφορά τη μή γραμμικότητα του γενικευμένου κριτηρίου Mohr-Coulomb ως προς τον ρυθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση φαίνεται ότι αυτό είναι αρχικά γραμμικό, έχει ένα πρώτο χαρακτηριστικό σημείο καμπής μέχρι το οποίο η διατμητική αντοχή αυξάνεται με τη μύζηση για όλα τα εδαφικά υλικά και από εκεί και πέρα την αντίστοιχη στη φύση του εδαφικού υλικού εξέλιξη της διατμητικής αντοχής (αύξηση, σταθεροποίηση ή μείωση). Πράγματι, μέχρι τη μύζηση που αντιστοιχεί στην πίεση διείσδυσης αέρα τα εδαφικά υλικά είναι πρακτικά πλήρως κορεσμένα και μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων αλλά με την πίεση του νερού των πόρων να είναι αρνητική αντί για θετική. Έτσι εξισώνοντας τα δεξιά μέλη των Εξ. 6.1 και 6.3 και θέτοντας  $u_a = 0$  προκύπτει ότι  $\phi_b = \phi'$ . Δεδομένου ότι αυτό βασίζεται στην αρχή των ενεργών τάσεων (όπως αυτή έχει διατυπωθεί για πλήρως κορεσμένα εδάφη) η γωνία αύξησης της διατμητικής αντοχής με την μύζηση  $\phi_b$  ισούται με την ενεργό γωνία διατμητικής αντοχής  $\phi'$  ανεξάρτητα από τη φύση του υλικού (είτε αυτό είναι αργιλικό, είτε είναι κοκκώδες) για τιμές της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα του συγκεκριμένου υλικού.

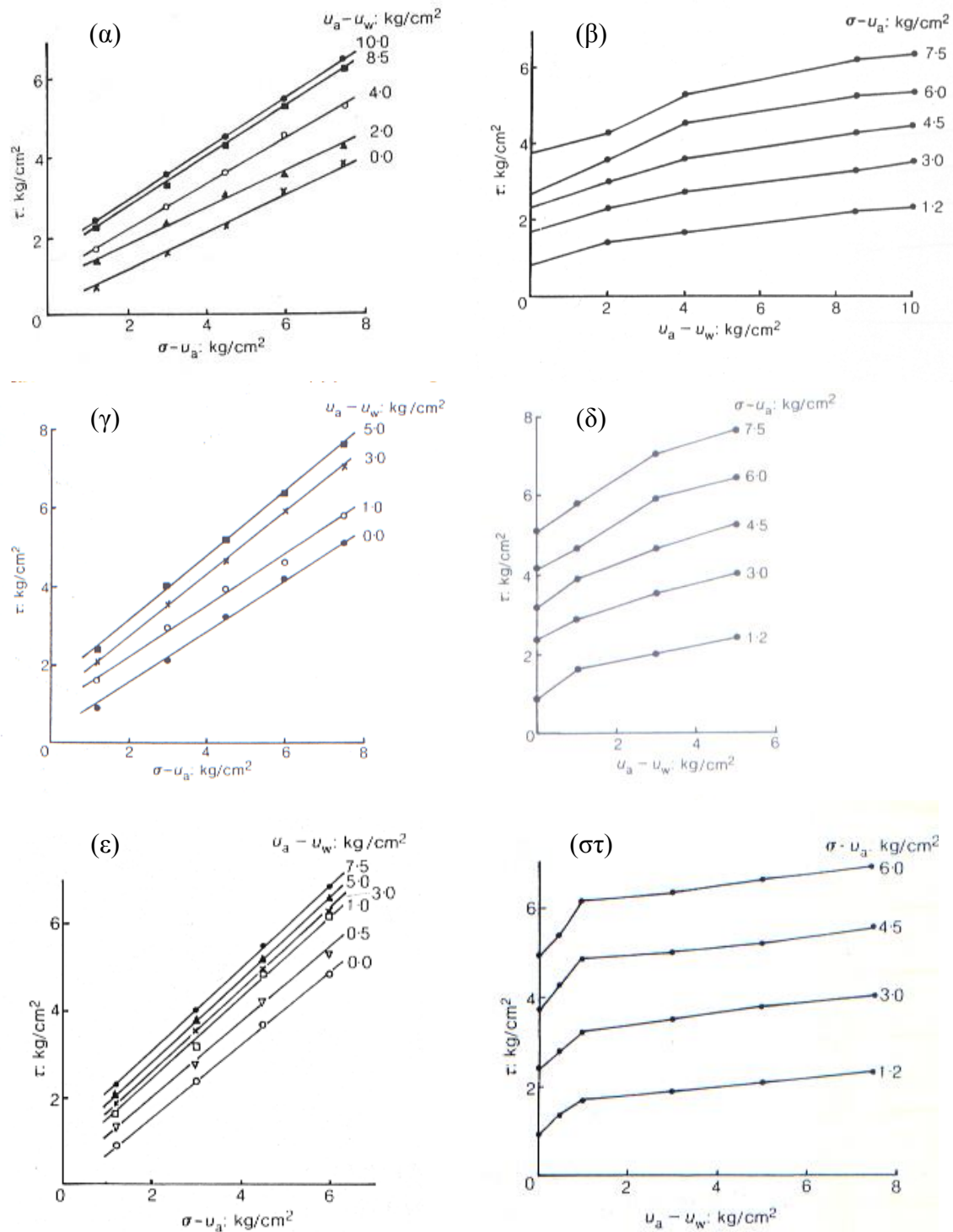
### 6.2.3 Παραδείγματα περιβαλλουσών αστοχίας Mohr-Coulomb μή κορεσμένων εδαφών – Μετρήσεις της γωνίας $\phi_b$

Ο παραπάνω συλλογισμός έχει αποδειχτεί πειραματικά από αριθμό ερευνητών. Οι Escario & Sáez (1986) πραγματοποίησαν δοκιμές απευθείας διάτμησης με ελεγχόμενη μύζηση σε τρία διαφορετικά εδαφικά υλικά αποδεικνύοντας ότι η γωνία αύξησης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση  $\phi_b$  ισούται με την ενεργό γωνία διατμητικής αντοχής  $\phi'$  ανεξάρτητα από τη φύση του υλικού για τιμές της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα, ενώ για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες αυτής μειώνεται και μάλιστα περισσότερο για το κοκκώδες παρά για το λεπτόκοκκο έδαφος. Τα εδαφικά υλικά στα οποία πραγματοποίησαν τις δοκιμές τους ήταν μία αργιλοϊλός υψηλής πλαστικότητας με  $w_L=71\%$ ,  $I_p=35\%$  και 99% περιεχόμενη αργιλοϊλύ (γκρίζα άργιλος Μαδρίτης), μία αμμώδης αργιλοϊλός μέσης πλαστικότητας με  $w_L=33\%$ ,  $I_p=13.6\%$  και 86.5% περιεχόμενη αργιλοϊλύ (κόκκινη άργιλος Guadalix de la Sierra) και μία αργιλώδης άμμος

με  $w_L=32\%$ ,  $I_p=15\%$  και  $17\%$  περιεχόμενη αργιλοϊλύ με το υπόλοιπο  $83\%$  να αποτελεί κυρίως λεπτόκοκκη και μεσόκοκκη άμμο (αργιλώδης άμμος Μαδρίτης). Τα χρησιμοποιηθέντα εδαφικά υλικά υποβλήθηκαν σε στατική συμπίκνωση μετά από αναμόχλευση για να αποκτήσουν ξηρή πυκνότητα ίση με την μέγιστη όπως προέκυψε για το κάθε υλικό κατά τη δοκιμή Proctor με την πρότυπη ενέργεια συμπίκνωσης υπό υγρασία 2.3 έως 4.7% μικρότερη της βέλτιστης. Ελήφθη ιδιαίτερη προσοχή για την ολοκλήρωση της στερεοποίησης πριν από την έναρξη της διάτμησης για κάθε υλικό (διάρκεια 4 ημερών για όλα τα εδαφικά υλικά με ύψος δοκιμίων μόλις 22mm). Αντίστοιχα οι ρυθμοί επιβολής οριζόντιας μετακίνησης ήταν οι ελάχιστοι δυνατοί που μπορούσαν να επιβληθούν με τη χρησιμοποιηθείσα συσκευή: μόλις 2.4mm ανά ημέρα, που οδήγησαν σε θραύση μετά από 1-2 ημέρες για την αργιλώδη άμμο, 2-3 ημέρες για την αμμώδη αργιλοϊλύ και 2.5-3 ημέρες για την αργιλοϊλύ υψηλής πλαστικότητας.

Όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.4α, 6.4γ και 6.4ε, η γωνία αύξησης της διατμητικής αντοχής με την ολική τάση παραμένει σταθερή όσο αυξάνεται η μύζηση και για τα τρία εδαφικά υλικά (υπό σταθερή τιμή της οποίας πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές σειρές απευθείας διατμήσεων υπό διαφορετική ολική τάση) ίση με την ενεργό τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής  $\phi'$  του κάθε εδαφικού υλικού όταν είναι πλήρως κορεσμένο. Όσο αυξάνεται λοιπόν η μύζηση έχουμε μία παράλληλη μετάθεση της περιβάλλουσας αστοχίας προς μεγαλύτερες τιμές της διατμητικής αντοχής με αποτέλεσμα η τιμή της συνοχής να αυξάνεται (λαμβάνοντας τη «φαινόμενη» τιμή της). Ο ρυθμός εξέλιξης όμως της παράλληλης αυτής μετάθεσης φαίνεται να ανακόπτεται από κάποια τιμή της μύζησης και μετά όπως φαίνεται καλύτερα στα Σχήματα 6.4β, 6.4δ και 6.4στ. Πράγματι προκειμένου για την αργιλοϊλύ υψηλής πλαστικότητας, η αύξηση της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση γίνεται με σταθερό ρυθμό περίπου μέχρι τα 400 kPa μύζησης και αντιστοιχεί σε γωνία αύξησης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση  $\phi_b$  ίση με τη γωνία διατμητικής αντοχής του υλικού  $\phi'$  (Σχήμα 6.4α) και για μεγαλύτερες τιμές της μύζησης εξακολουθεί να αυξάνεται αλλά με μικρότερο ρυθμό υποδηλώνοντας ότι η γωνία  $\phi_b$  έχει γίνει ελαφρώς μικρότερη της  $\phi'$ . Το ίδιο συμβαίνει και για την αμμώδη αργιλοϊλύ (Σχ. 6.4δ). Προκειμένου για την αργιλώδη άμμο όμως η αύξηση της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση γίνεται επίσης με σταθερό ρυθμό περίπου μέχρι τα 100 kPa μύζησης και αντιστοιχεί σε γωνία αύξησης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση  $\phi_b$  ίση με την γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού  $\phi'$  (Σχήμα 6.2ε), αλλά για μεγαλύτερες τιμές της μύζησης εξακολουθεί να αυξάνεται μεν, με πολύ μικρότερο ρυθμό δε, υποδηλώνοντας ότι η γωνία  $\phi_b$  έχει γίνει σημαντικά μικρότερη της  $\phi'$ . Η μείωση μάλιστα της γωνίας  $\phi_b$  για την αργιλώδη άμμο μετά τα 100 kPa μύζησης είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση της γωνίας  $\phi_b$  για την αργιλοϊλύ υψηλής πλαστικό-



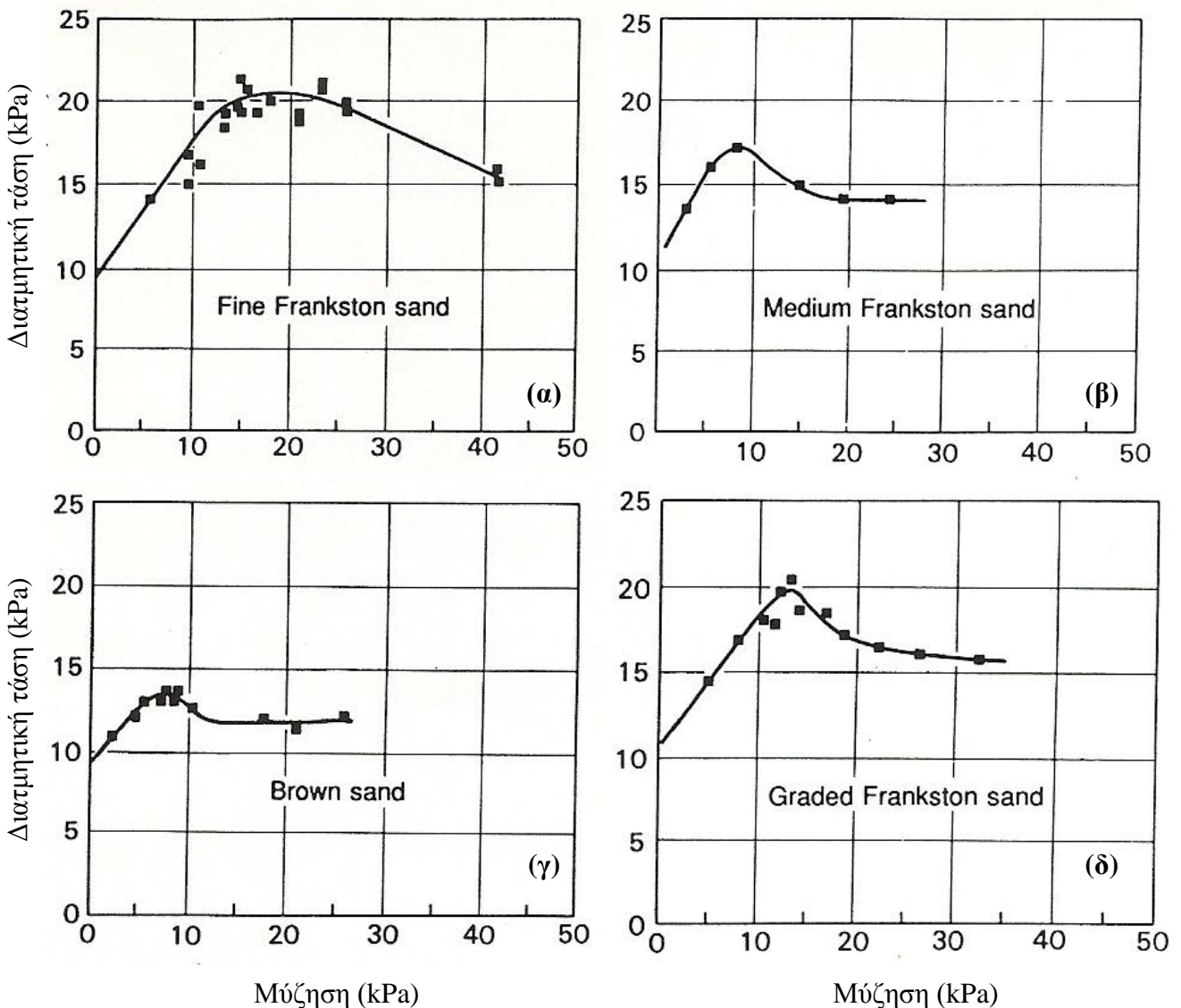


**Σχήμα 6.4.** Αποτελέσματα δοκιμών απευθείας απλής διάτμησης υπό ελεγχόμενη μύζηση σε γκρίζα άργιλο Μαδρίτης (α και β), κόκκινη άργιλο Guadalix de la Sierra (γ και δ) και αργιλώδη άμμο Μαδρίτης (ε και στ). Απεικονίζεται η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής με την ολική τάση (α, γ και ε) και της διατμητικής αντοχής με την μύζηση (β, δ και στ) (Escario & Sáez, 1986).

τητας και την αμμώδη άργιλο. Οι Escario & Sáez (1986) δεν αναφέρουν τιμές της πίεσης διείσδυσης αέρα για τα τρία υλικά προς συσχέτιση με τις χαρακτηριστικές τιμές καμπής των προβολών της περιβάλλουσας επιφάνειας αστοχίας για επίπεδα σταθερής ολικής τάσης που απεικονίζονται στα Σχήματα 6.4β, 6.4δ και 6.4στ. Οι τιμές όμως που προκύπτουν είναι μάλλον λογικές και ως τιμές πίεσης διείσδυσης αέρα για τη φύση των υλικών (100 kPa για την αργιλώδη άμμο, περί τα 300 kPa για την αμμώδη αργιλοϊλύ και 400 kPa για την αργιλοϊλύ υψηλής πλαστικότητας –αυτή η τελευταία ίσως να είναι χαμηλή).

Οι Escario & Sáez (1986) υπήρξαν μεταξύ των πρώτων που επέδειξαν τόσο συστηματικά την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών με τη μύζηση. Τα αποτελέσματά τους ωστόσο αφορούν σε αργιλικά εδάφη κυρίως, με εξαίρεση την αμμώδη αργιλοϊλύ (Σχ. 6.4ε και 6.4στ), δηλ. επιδεικνύουν συμπεριφορές που αντιστοιχούν στα εδαφικά υλικά Α έως Γ στο Σχ. 6.3 που επιδεικνύεται η θεωρητική συμπεριφορά διαφόρων εδαφικών υλικών σε ό,τι αφορά την εξέλιξη της διατμητικής τους αντοχής με τη μύζηση. Στο Σχ. 6.5 επιδεικνύονται οι περιβάλλουσες διατμητικής αντοχής στο επίπεδο διατμητικής τάσης-μύζησης που μετρήθηκαν σε τέσσερις άμμους από τον Donald (1956) σε συσκευές απευθείας διάτμησης με έλεγχο της μύζησης. Όπως φαίνεται από όλα τα διαγράμματα και ειδικά αυτά των Σχ. 6.5β έως 6.5δ, η διατμητική αντοχή αυξάνεται με τη μύζηση και στη συνέχεια μειώνεται και σταθεροποιείται σε μία μη μηδενική τιμή (εδαφικό υλικό Β στο Σχ. 6.3). Και πάλι δεν αναφέρονται οι τιμές της πίεσης διείσδυσης αέρα των υλικών για να μπορεί να γίνει σύγκριση ανάμεσα στην τιμή της μύζησης υπό την οποία η διατμητική αντοχή έγινε μέγιστη και στην πίεση διείσδυσης αέρα του κάθε υλικού, παρόλο που οι τιμές της μύζησης επίτευξης της μέγιστης διατμητικής αντοχής μοιάζουν λογικές και ως τιμές της πίεσης διείσδυσης αέρα για το κάθε ένα από τα υλικά (περί τα 20 kPa για τη λεπτόκοκκη άμμο του Σχ. 6.5α, μικρότερη των 10 kPa για τις άμμους στα Σχ. 6.5β και 6.5γ και περί τα 13 kPa για την άμμο του Σχ. 6.5δ). Στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν πειραματικά αποτελέσματα της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής των εδαφικών υλικών με τον βαθμό κορεσμού και τη μύζηση και για πολλά άλλα εδαφικά υλικά, είτε σε όρους διατμητικής αντοχής-μύζησης όπως στα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν ως τώρα, είτε σε όρους εφελκυστικής αντοχής-μύζησης, είτε σε όρους αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη-μύζησης. Η αναζήτηση και παράθεσή τους όμως ξεφεύγει από τον σκοπό της επίδειξης του τρόπου μεταβολής της αντοχής με τη μύζηση που επιδιώκεται σε αυτό το κεφάλαιο. Τα πειραματικά αποτελέσματα των Escario & Sáez (1986) και του Donald (1956) επιδεικνύουν τον τρόπο μεταβολής της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση, πρακτικά για ολόκληρο το εύρος τιμών πλαστικότητας και κοκκομετρικής διαβάθμισης που απαντάται στα πιο συνηθισμένα εδαφικά

υλικά, επιβεβαιώνοντας τη θεωρητική συσχέτιση που παρουσιάστηκε γενικά για όλα τα είδη εδαφικών υλικών στο Σχ. 6.3. Στη συνέχεια επιδιώκεται η παρουσίαση ιδιαίτερων θεμάτων που σχετίζονται με τη διατμητική αντοχή, όπως η συστολικότητα και η διαστολικότητα κατά την επιβολή διατμητικών παραμορφώσεων μέχρι την αστοχία και μετά από αυτήν, η εξέλιξη της παραμένουσας διατμητικής αντοχής των αργιλικών εδαφών με τη μύζηση και η εξέλιξη της κλίσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης με τον βαθμό κορεσμού και τη μύζηση.



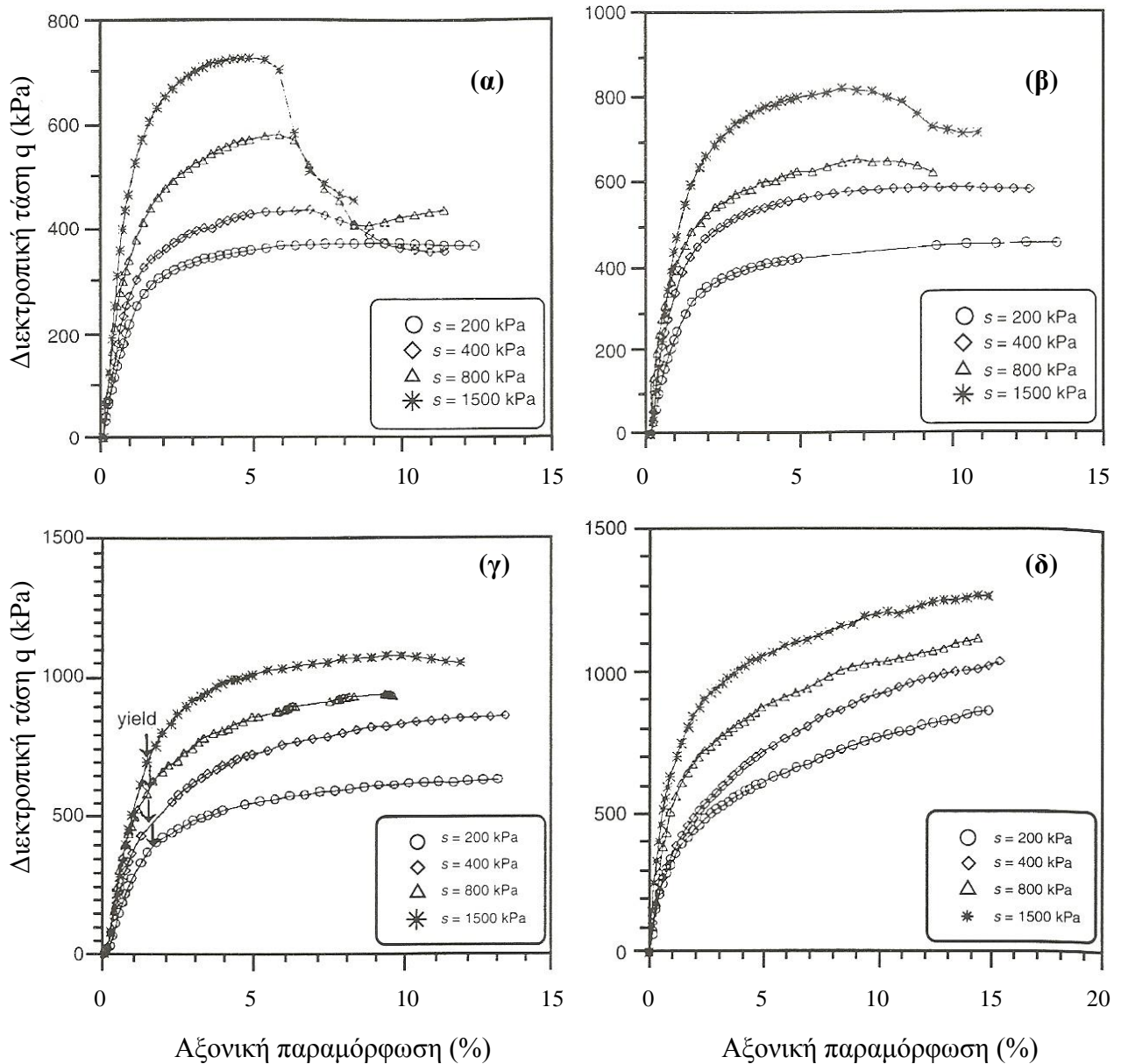
**Σχήμα 6.5.** Αποτελέσματα δοκιμών απευθείας απλής διάτμησης υπό ελεγχόμενη μύζηση: α) σε λεπτόκοκκη άμμο Frankston, β) σε μεσόκοκκη άμμο Frankston, γ) σε καφέ άμμο, και δ) σε διαβαθμισμένη άμμο Frankston (Donald, 1956).

### 6.3 ΣΥΣΤΟΛΙΚΟΤΗΤΑ-ΔΙΑΣΤΟΛΙΚΟΤΗΤΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Μέχρι αυτό το σημείο έχει εξεταστεί μόνο η αντοχή των μί κορεσμένων εδαφών. Στην παράγραφο αυτήν εξετάζονται οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων μέχρι την αστοχία και μετά από αυτήν, και κυρίως η εμφάνιση διαστολικότητας ή συστολικότητας συναρτήσει των μεταβολών του βαθμού κορεσμού και των συνεπακόλουθων μεταβολών της μύζησης.

Στο Σχ. 6.6 παρουσιάζονται οι καμπύλες διεκτροπικής τάσης-αξονικής παραμόρφωσης από τριαξονικές δοκιμές υπό ελεγχόμενη μύζηση σε συμπυκνωμένη ιλύ (Cui & Delage, 1996). Η ιλύς που χρησιμοποιήθηκε περιείχε 34% άργιλο και 66% ιλύ, είχε  $w_L=37\%$  και  $I_p=18\%$  και μέγιστο ξηρό ειδικό βάρος  $16.7 \text{ kN/m}^3$  κατά τη δοκιμή Proctor με την πρότυπη ενέργεια συμπύκνωσης επιτυγχανόμενο σε υγρασία 18%. Ο έλεγχος της μύζησης στη συσκευή τριαξονικής φόρτισης γινόταν με τη μέθοδο ωσμωτικού ελέγχου της μύζησης (βλ. Κεφ. 4, § 4.3.3 και Κεφ. 5, § 5.5.3.4). Όλα τα δοκίμια παρασκευάζονταν με στατική συμπύκνωση σε αρχικό ξηρό ειδικό βάρος ίσο με το μέγιστο και αρχική υγρασία ίση με τη βέλτιστη, συνδυασμός ο οποίος προσέδιδε αρχική μύζηση περί τα 200 kPa.

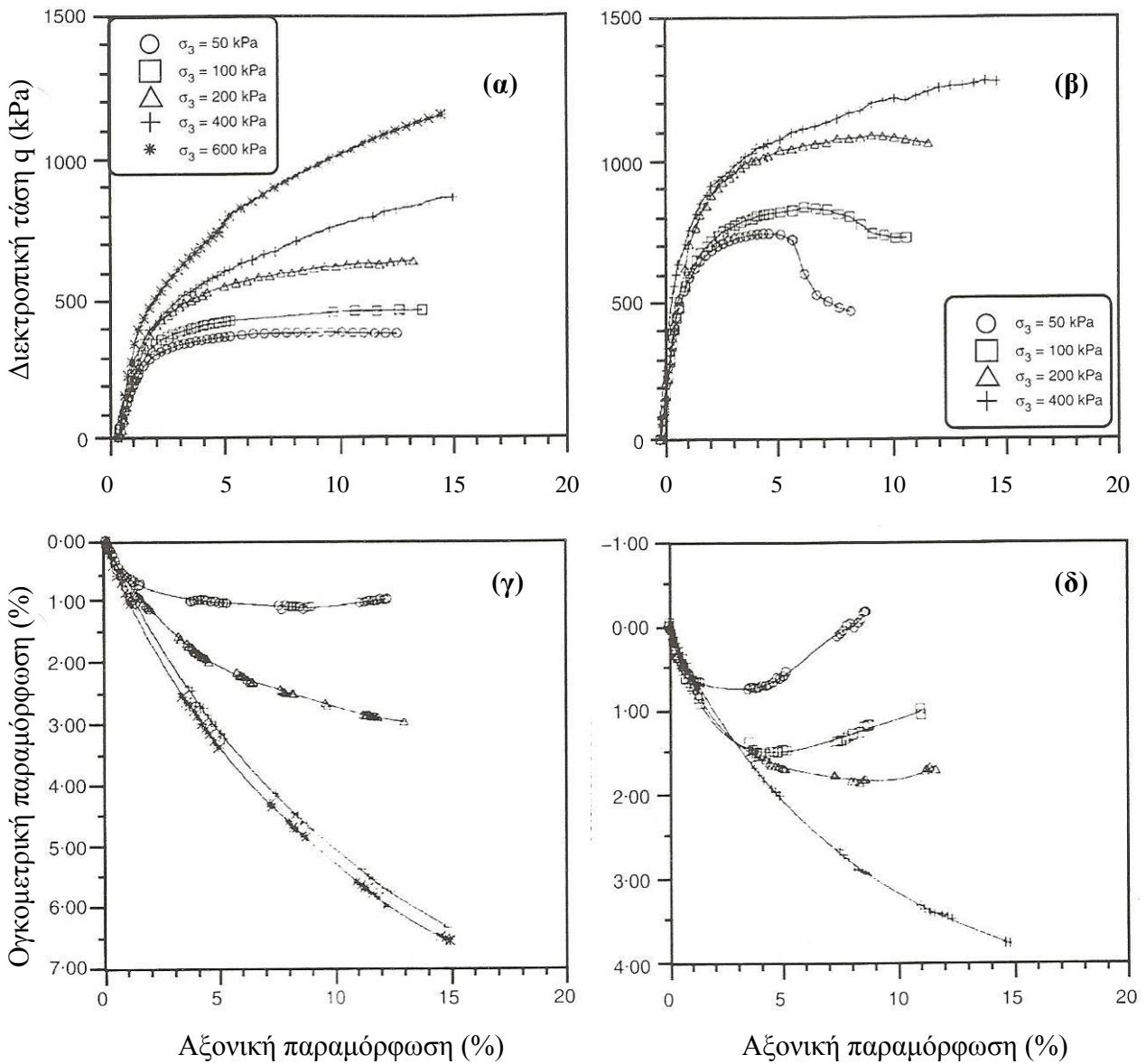
Στο Σχ. 6.6α παρουσιάζονται οι καμπύλες διεκτροπικής τάσης-αξονικής παραμόρφωσης για πλευρική τάση  $\sigma_3=50 \text{ kPa}$  και τιμές της μύζησης 200, 400, 800 και 1500 kPa. Στα Σχ. 6.6β έως 6.6δ παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες για τιμές της πλευρικής τάσης 100, 200 και 400 kPa αντίστοιχα. Όπως προκύπτει από τα Σχ. 6.6α έως 6.6δ για χαμηλές τιμές της πλευρικής τάσης το εδαφικό υλικό παρουσιάζεται οριακά όλκιμο για μύζηση 200 kPa και η ψαθυρότητά του αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης υπό την ίδια χαμηλή τάση, με αποκορύφωμα το εδαφικό υλικό στο δοκίμιο υπό μύζηση 1500 kPa και πλευρική τάση 50 kPa που είναι εντόνως ψαθυρό (Σχ. 6.6α), ενώ αυξανόμενης της πλευρικής τάσης χάνεται η ψαθυρότητα, ακόμα μάλιστα και για τη μέγιστη τιμή της μύζησης (Σχ. 6.6δ). Προκειμένου αυτή η εξέλιξη να επιδειχθεί καλύτερα παρατίθεται το Σχ. 6.7. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζονται οι καμπύλες διεκτροπικής τάσης-αξονικής παραμόρφωσης για μύζηση 200 kPa (Σχ. 6.7α) και 1500 kPa (Σχ. 6.7β) αλλά για όλες τις τιμές της πλευρικής τάσης από 50 kPa έως 600 kPa στις οποίες εκτέλεσαν τις δοκιμές τους οι Cui & Delage (1996). Για την ελάχιστη τιμή της μύζησης παρατηρείται ότι το υλικό είναι αρχικά οριακά ψαθυρό για την ελάχιστη πλευρική τάση και γίνεται εντόνως όλκιμο για τη μέγιστη πλευρική τάση. Για τη μέγιστη τιμή της μύζησης παρατηρείται ότι το υλικό είναι αρχικά εντονότατα ψαθυρό για την ελάχιστη πλευρική τάση και γίνεται οριακά όλκιμο για τη μέγιστη πλευρική τάση.



**Σχήμα 6.6.** Καμπύλες διεκτροπικής τάσης-αξονικής παραμόρφωσης από δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό ελεγχόμενη μύζηση: α) για πλευρική τάση  $\sigma_3 = 50$  kPa, β)  $100$  kPa, γ)  $200$  kPa, και δ)  $400$  kPa (Cui & Delage, 1996).

Ένα άλλο συμπέρασμα που προκύπτει από τα Σχ. 6.6 και 6.7 είναι ότι με την αύξηση της πλευρικής τάσης υπό σταθερή μύζηση αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας (όπως συμβαίνει και για πλήρως κορεσμένα εδάφη), πράγμα το οποίο συμβαίνει και με την αύξηση της μύζησης υπό σταθερή πλευρική τάση για τιμές της παραμόρφωσης μέχρι την αστοχία και μετά από αυτήν. Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση της ελάχιστης τιμής της πλευρικής τάσης, όπου για τις δύο

μέγιστες τιμές της μύζησης το μέτρο ελαστικότητας τείνει μετά την αστοχία στην ίδια πρακτικά τιμή (και ίσως και οριακά χαμηλότερη) με την τιμή στην οποία έχουν καταλήξει για την ίδια παραμόρφωση και τα εδαφικά υλικά με την ελάχιστη μύζηση, τα οποία επέδειξαν οριακά όλκιμη συμπεριφορά (Σχ. 6.6α).



**Σχήμα 6.7.** Αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής θλίψης υπό ελεγχόμενη μύζηση: α) καμπύλες διεκτροπικής τάσης-αξονικής παραμόρφωσης για μύζηση  $s = 200$  kPa, και β) 1500 kPa, γ) καμπύλες ογκομετρικής παραμόρφωσης-αξονικής παραμόρφωσης για μύζηση  $s = 200$  kPa, και δ) 1500 kPa (Cui & Delage, 1996).

Στο Σχ. 6.7 εκτός από τις καμπύλες διεκτροπικής τάσης-αξονικής παραμόρφωσης για τιμές της μύζησης 200 και 1500 kPa και όλες τις τιμές της πλευρικής τάσης (Σχ. 6.7α και 6.7β αντίστοιχα) παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες καμπύλες ογκομετρικής παραμόρφωσης-αξονικής παραμόρφωσης για τις ίδιες τιμές της μύζησης και όλες τις τιμές της πλευρικής τάσης (Σχ. 6.7γ και 6.7δ αντίστοιχα). Όπως προκύπτει από το Σχ. 6.7δ, για τη μέγιστη τιμή της μύζησης των 1500 kPa και την ελάχιστη τιμή της πλευρικής τάσης των 50 kPa το εδαφικό υλικό επιδεικνύει διαστολικότητα, δηλ. η ογκομετρική του παραμόρφωση αρχικά αυξάνεται με την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης αλλά στη συνέχεια μειώνεται και μάλιστα για αξονική παραμόρφωση από 7.5-8.0% και πάνω αρχίζει να έχει αρνητικές τιμές, δηλ. το υλικό διογκώνεται. Για τιμές της πλευρικής τάσης 100 και 200 kPa οι καμπύλες ογκομετρικής παραμόρφωσης-αξονικής παραμόρφωσης επιδεικνύουν γενικά το ίδιο σχήμα (αρχική αύξηση και στη συνέχεια μείωση) αλλά χωρίς να φτάσει ποτέ η ογκομετρική παραμόρφωση να γίνει αρνητική. Τέλος για τη μέγιστη τιμή της πλευρικής τάσης των 400 kPa παρουσιάζεται συνεχής –αν και μειούμενου ρυθμού– αύξηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης με την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης, δηλ. συνεχής συστολικότητα του εδαφικού υλικού σε όλο το εύρος των τιμών της αξονικής παραμόρφωσης. Η εικόνα είναι αντίστοιχη και στο Σχ. 6.7γ (μύζηση 200 kPa) μόνο που εδώ παρουσιάζεται αρχική αύξηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης με την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης μόνο για την πλευρική τάση των 50 kPa, ενώ για όλες τις υπόλοιπες τιμές της πλευρικής τάσης παρουσιάζεται συνεχής, μειούμενου ρυθμού, αύξηση της ογκομετρικής παραμόρφωσης με την αύξηση της αξονικής παραμόρφωσης. Συνοψίζοντας λοιπόν παρατηρούμε ότι με την αύξηση της πλευρικής τάσης υπό σταθερή μύζηση παρατηρείται τάση επίδειξης συστολικότητας (όπως άλλωστε και για πλήρως κορεσμένα εδάφη), ενώ με την αύξηση της μύζησης υπό σταθερή πλευρική τάση παρατηρείται τάση επίδειξης διαστολικότητας.

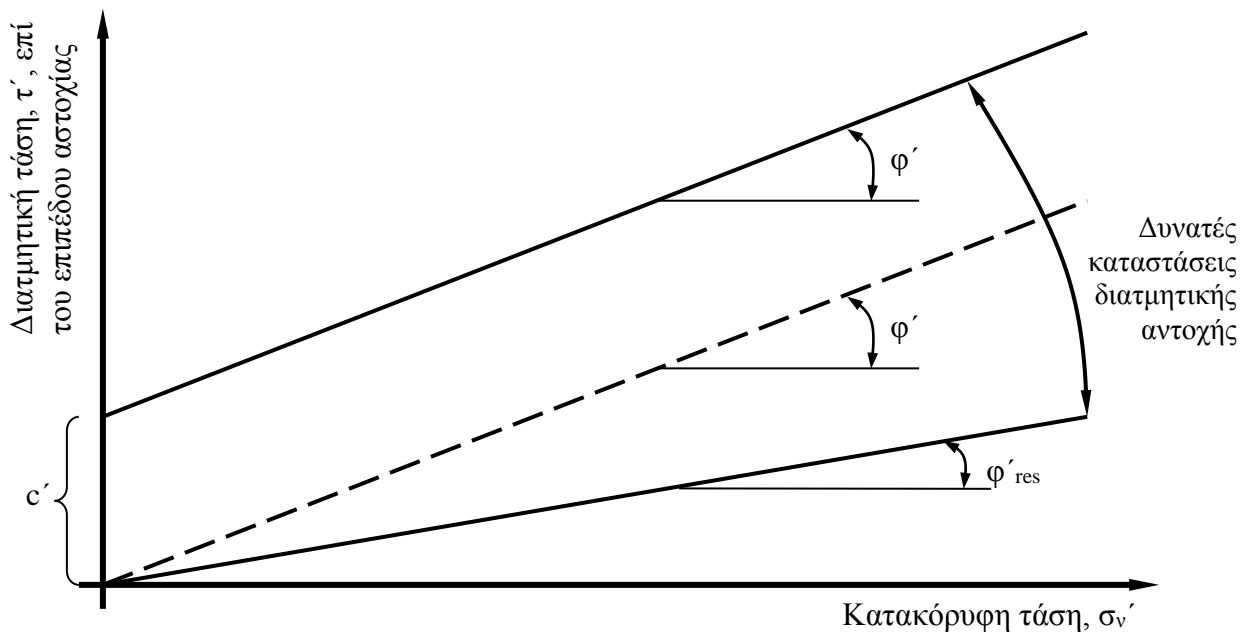
Παρόμοια αποτελέσματα με τους Cui & Delage (1996) έχουν επιδειχθεί και από πολλούς άλλους ερευνητές επιτρέποντας τη γενίκευση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τα Σχ. 6.6 και 6.7. Ενδεικτικά αναφέρονται οι Maâtouk, et al. (1995) που πραγματοποίησαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό ελεγχόμενη μύζηση σε μία αργιλοαμμώδη ιλύ με δείκτη πλαστικότητας 7%, οι Cattoni, et al. (2005 & 2007) που πραγματοποίησαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό ελεγχόμενη μύζηση σε μία σιμεντωμένη ποζολάνη (pozzolana nera), η οποία μάλιστα επέδειξε ψαθυρότητα και διαστολικότητα σε όλο το εύρος τιμών της πλευρικής τάσης, οι Colmenares & Ridley (2002) και οι Kato, et al. (2002), που πραγματοποίησαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης υπό ελεγχόμενο βαθμό κορεσμού και παρατήρησαν την ίδια μεταβολή της ψαθυρότητας των υλικών με τη μεταβολή του βαθμού κορεσμού (αύξηση της ψαθυρότητας με τη μείωση του

βαθμού κορεσμού). Αξιοσημείωτα είναι επίσης και τα πειραματικά αποτελέσματα των Alonso, et al. (2007) από δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δείγματα χαλίκων από ασβεστόλιθο υπό ελεγχόμενη σχετική υγρασία. Με τη μείωση της σχετικής υγρασίας –δηλαδή την αύξηση της ολικής μύζησης υπό την οποία γίνονταν οι δοκιμές– παρατηρήθηκε αύξηση της ψαθυρότητας και της διαστολικότητας, τόσο περισσότερο μάλιστα όσο μικρότερη ήταν η πλευρική τάση στην κάθε δοκιμή.

#### 6.4 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Στις παραγράφους που προηγήθηκαν έγινε αναφορά στην εξέλιξη της διατμητικής αντοχής ενός εδαφικού υλικού με τη μείωση του βαθμού κορεσμού και την αντίστοιχη αύξηση της μύζησης, για παραμορφώσεις τόσο μικρές, ώστε προκειμένου για αργιλικά εδαφικά υλικά, η αντοχή τους να μην έχει περιέλθει στην παραμένουσα κατάσταση της. Χάριν πληρότητας παρατίθεται το Σχ. 6.8 στο οποίο υπενθυμίζεται η έννοια της παραμένουσας διατμητικής αντοχής ενός αργιλικού εδάφους με συνοχή (Skempton, 1964). Προκειμένου για επιβολή διατμητικών παραμορφώσεων μέχρι τη θραύση των δοκιμίων ένα πλήρως κορεσμένο αργιλικό έδαφος έχει γενικά συνοχή και γωνία διατμητικής αντοχής σε όρους ενεργών τάσεων,  $c'$  και  $\phi'$  αντίστοιχα. Με την αύξηση της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης η διατμητική αντοχή μειώνεται σε τιμές τέτοιες που τα αργιλικά εδαφικά υλικά χάνουν τη συνοχή τους και η γωνία διατμητικής αντοχής τους παραμένει όση και αυτή στην αστοχία. Εάν τέλος η επιβαλλόμενη παραμόρφωση αυξηθεί ακόμα περισσότερο, τότε και η γωνία διατμητικής αντοχής μειώνεται μέχρι την τελική τιμή της που είναι η *γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής*,  $\phi'_{res}$  (residual angle of friction). Η τόσο χαμηλή τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής οφείλεται στην προοδευτική ευθυγράμμιση των αργιλικών πλακιδίων παράλληλα με το επίπεδο αστοχίας, γεγονός το οποίο μειώνει στο ελάχιστο την αναπτυσσόμενη αντίσταση στην περαιτέρω ολίσθηση μεταξύ τους. Η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής εξαρτάται από το εύρος τιμών της κατακόρυφης τάσης στο οποίο υπολογίζεται (Bishop, 1971, Skempton, 1985, Maksimović, 1989, Stark & Eid, 1994), την κοκκομετρική διαβάθμιση (Skempton, 1964, Kenney, 1967, Lupini, et al., 1981, Skempton, 1985, Kalteziotis, 1993), την πλαστικότητα (Kalteziotis, 1993, Wesley, 2003) και την ορυκτολογική σύσταση των εδαφικών υλικών (Mitchell, 1976, Brandl, 1987, Kalteziotis, 1993), τον ρυθμό επιβολής της διατμητικής παραμόρφωσης (Tika, et al., 1994), και τη χημική σύσταση του νερού των πόρων των εδαφικών υλικών (Di Maio, 1996a & 1996b).

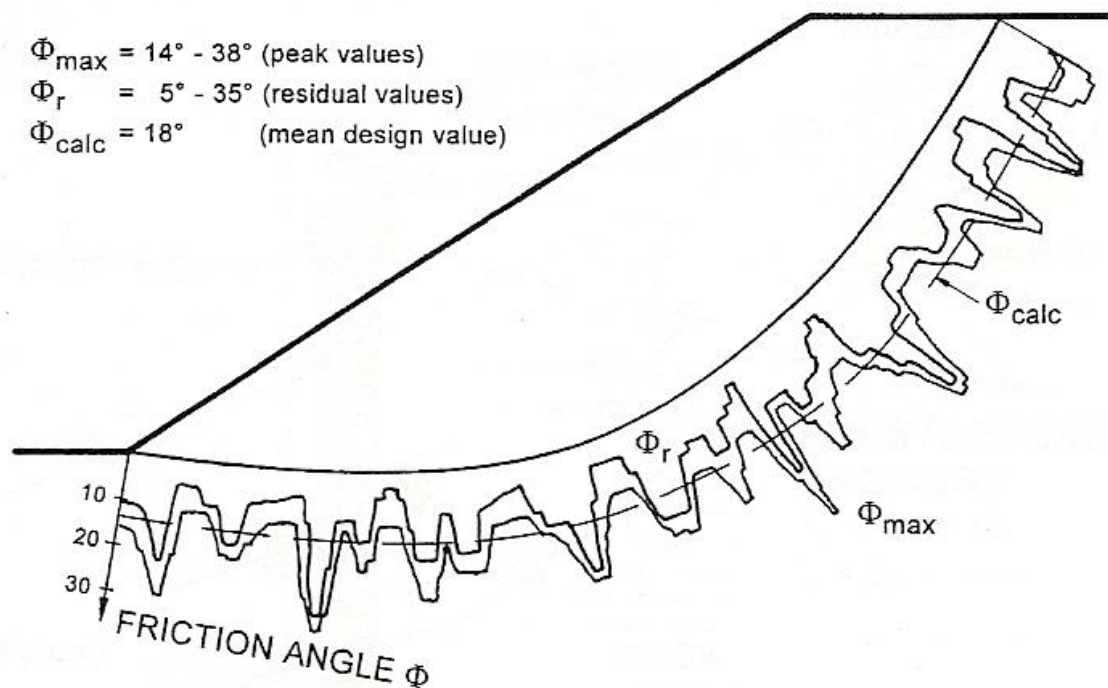




**Σχήμα 6.8.** Περιβάλλουσες διατμητικής αντοχής αργιλικών εδαφικών υλικών ανάλογα με το μέγεθος των παραμορφώσεων οι οποίες έχουν συμβεί κατά μήκος του επιπέδου αστοχίας.

Η γνώση της παραμέτρου αυτής είναι πολύ σημαντική στα πλαίσια της μελέτης αποκατάστασης κατολισθήσεων. Στις κατολισθήσεις, και ειδικά στις *παλαιοκατολισθήσεις* (palaeo-landslides), δηλαδή εκείνες που έχουν συμβεί πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα πριν από σήμερα και άρα έχουν συμβεί πολύ μεγάλες παραμορφώσεις επί των επιφανειών ολίσθησής τους, οι οποίες είναι σαφώς καθοριζόμενες, κινηματικά δυνατές, και κατά μήκος τους –ή τουλάχιστον σε μεγάλο τμήμα του μήκους τους- η διατμητική αντοχή έχει περιέλθει στην κατάσταση παραμένουσας αντοχής. Στις περιπτώσεις αυτές βέβαια η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής προσδιορίζεται από αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας (στις οποίες τίθεται  $c' = 0$ ) αντί για εργαστηριακές δοκιμές, προκύπτοντας πάντα λίγο μεγαλύτερη από την τιμή που προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές προκειμένου για κατολίσθηση η επιφάνεια ολίσθησης της οποίας διέρχεται από ομογενή αργιλικά εδάφη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η ίδια παραμόρφωση που έχει συμβεί κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης δεν έχει απαραίτητα το ίδιο αποτέλεσμα στο εδαφικό υλικό από το οποίο διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης σε κάθε σημείο της, απομειώνοντας με τον ίδιο τρόπο τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής. Το ίδιο αποτέλεσμα έχει επίσης και η ανομοιογένεια των υλικών από τα οποία διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης. Η επίδραση της ανομοιομορφίας έχει επιδειχθεί πολύ παραστατικά από τον Brandl (1997), όπως φαίνεται στο Σχ. 6.9. Η εγγύτητα της τιμής της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής από

αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας (στις οποίες έχει τεθεί  $c'=0$ ) και της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής από εργαστηριακές δοκιμές συνιστά μέτρο εκτίμησης του μεγέθους των παραμορφώσεων που έχουν συμβεί στη συγκεκριμένη κατολίσθηση και της επιρροής τους επί των παραμέτρων αντοχής των απαντώμενων από την επιφάνεια ολίσθησης υλικών.



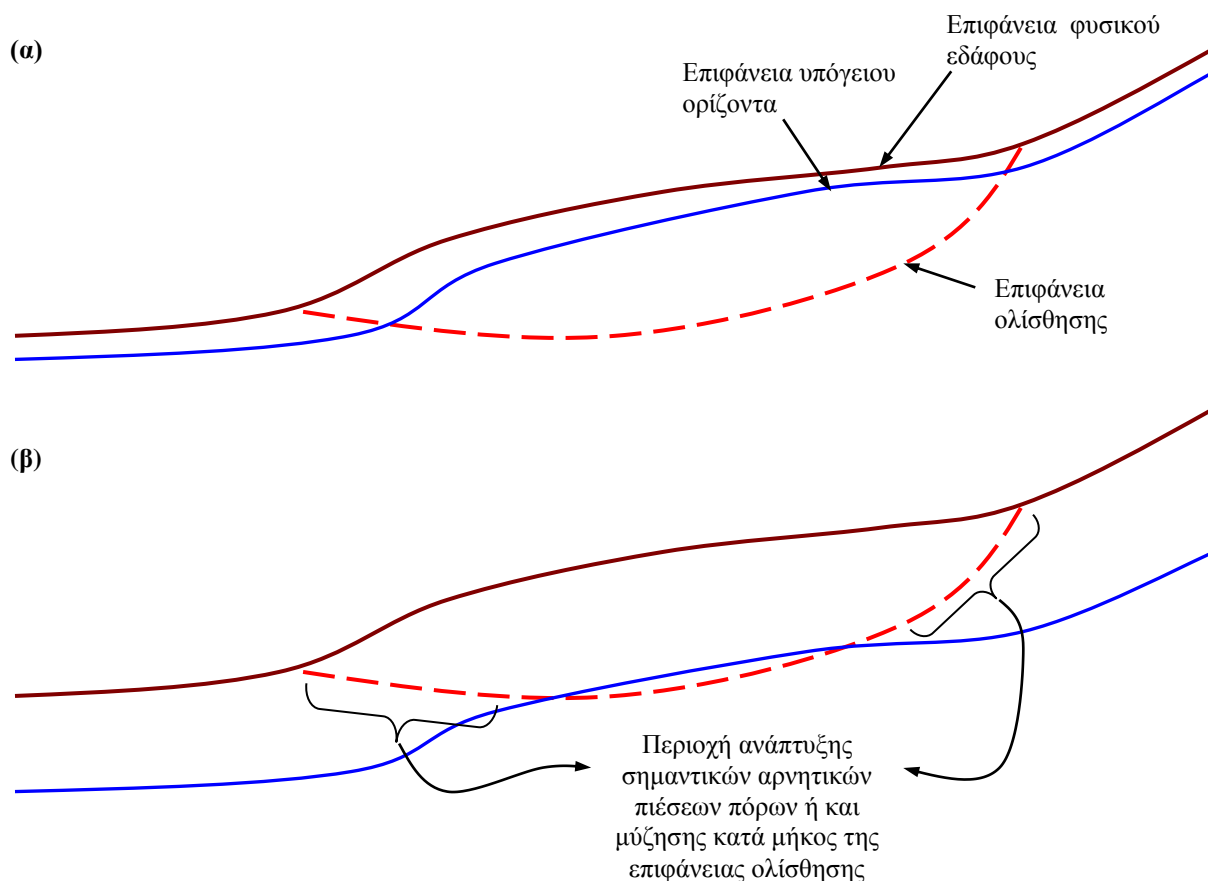
**Σχήμα 6.9.** Η επίδραση της επιρροής της ανομοιομορφίας των υλικών από τα οποία διέρχεται μία επιφάνεια ολίσθησης (Brandl, 1997).

Το ερώτημα όμως που προκύπτει ανεξάρτητα από τον τρόπο που προέκυψε η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής είναι πως –και αν– μεταβάλλεται η παράμετρος αυτή με τον βαθμό κορεσμού και τη μύζηση. Οι λόγοι για τους οποίους ένα τέτοιο ερώτημα καθίσταται σημαντικό είναι ο τρόπος με τον οποίο θα αποφασιστούν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής επί μίας επιφάνειας ολίσθησης, κατά μήκος της οποίας έχει αναπτυχθεί αρνητική πίεση πόρων ή και μύζηση, ώστε με τις παραμέτρους αυτές να σχεδιαστούν τα μέτρα σταθεροποίησης της κατολίσθησης. Στο Σχ. 6.10 παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις κατολισθήσεων. Στη μία περίπτωση η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα είναι ψηλά (Σχ. 6.10α) και στην άλλη χαμηλά (Σχ. 6.10β). Εάν ισχύουν οι συνθήκες του Σχ. 6.10α, δηλ. η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα είναι τόσο «ψηλά» που μικρό μόνο μέρος της επιφάνειας ολίσθησης βρίσκεται πάνω από τη στάθμη του

υπόγειου ορίζοντα, τότε μπορεί να υπολογιστεί η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής θέτοντας τον συντελεστή ασφαλείας ίσο με τη μονάδα σε αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας. Από τις αναλύσεις αυτές θα υπολογιστεί πράγματι η «μέση» τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης θέτοντας  $c'=0$ . Χρησιμοποιώντας αυτήν την παράμετρο αντοχής για το σχεδιασμό των μέτρων σταθεροποίησης, τότε στις ευθείες αναλύσεις προκύπτει ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας για τα μέτρα σταθεροποίησης που εισήχθησαν. Εάν ωστόσο ισχύουν οι συνθήκες του Σχ. 6.10β, τότε σε σημαντικά τμήματα της επιφάνειας ολίσθησης έχουν αναπτυχθεί αρνητικές πιέσεις πόρων ή και μύζηση (ανάλογα με την τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα των υλικών που απαντώνται κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, τη μεταβολή στη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και το μέγεθος της κατεισδύσης από την επιφάνεια του εδάφους και διά της επιφάνειας ολίσθησης, η οποία συχνά συνιστά και η ίδια επιλεκτική δίοδο για τα κατεισδύοντα ύδατα). Υπό αυτές τις συνθήκες, αν αγνοηθούν οι αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα κατά την εκτέλεση της αντίστροφης ανάλυσης, υπερεκτιμάται η τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής για  $c'=0$ , συχνά ακόμα και σε εξωπραγματικά μεγάλες τιμές για τη φύση των απαντώμενων υλικών. Αν αντίθετα οι τιμές της αρνητικής πίεσης πόρων ληφθούν υπόψη, υπολογίζεται μία μικρότερη τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Εάν οι τιμές της αντοχής από την αντίστροφη ανάλυση χωρίς να ληφθούν υπόψη οι αρνητικές πιέσεις πόρων ( $c'=0$ ,  $\varphi' > \varphi'_{res}$ ) εισαχθούν στις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας για τη διαστασιολόγηση των απαιτούμενων μέτρων σταθεροποίησης, τότε υπάρχει ο κίνδυνος σοβαρού υποσχεδιασμού των μέτρων αυτών. Και αυτό γιατί οι παράμετροι αντοχής που πρόεκυψαν από την αντίστροφη ανάλυση ευσταθείας εμπεριέχουν την επιρροή της αρνητικής πίεσης πόρων ή της μύζησης στην ευστάθεια μέσω του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb, αλλά και την επιρροή της μύζησης επί της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής αυτής καθεαυτής. Δεδομένου όμως ότι αυτή η επιρροή μπορεί να χαθεί ως συνέπεια της απώλειας της παροδικής παρουσίας της μύζησης, ο συντελεστής ασφαλείας με τα μέτρα σταθεροποίησης θα είναι αυτός που προκύπτει μόνο για τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής από αντίστροφη ανάλυση της κατάστασης όπως περιγράφεται στις συνθήκες του Σχ. 6.10β λαμβάνοντας υπόψη και τις αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση. Η λύση για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων κατά τη μελέτη σταθεροποίησης κατολισθήσεων βρίσκεται στην ορθή αναγνώριση των συνθηκών που περιγράφονται από το Σχ. 6.10β για κάθε κατολίσθηση και την υιοθέτησή τους στο προσομοίωμα κατά την εκτέλεση της αντίστροφης ανάλυσης ευσταθείας με εισαγωγή της αρνητικής πίεσης πόρων ή της μύζησης όπως έχει αναπτυχθεί κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Κάτι τέτοιο απαιτεί ιδιαίτερη εμπειρία από πλευράς μελετητή, αλλά αν

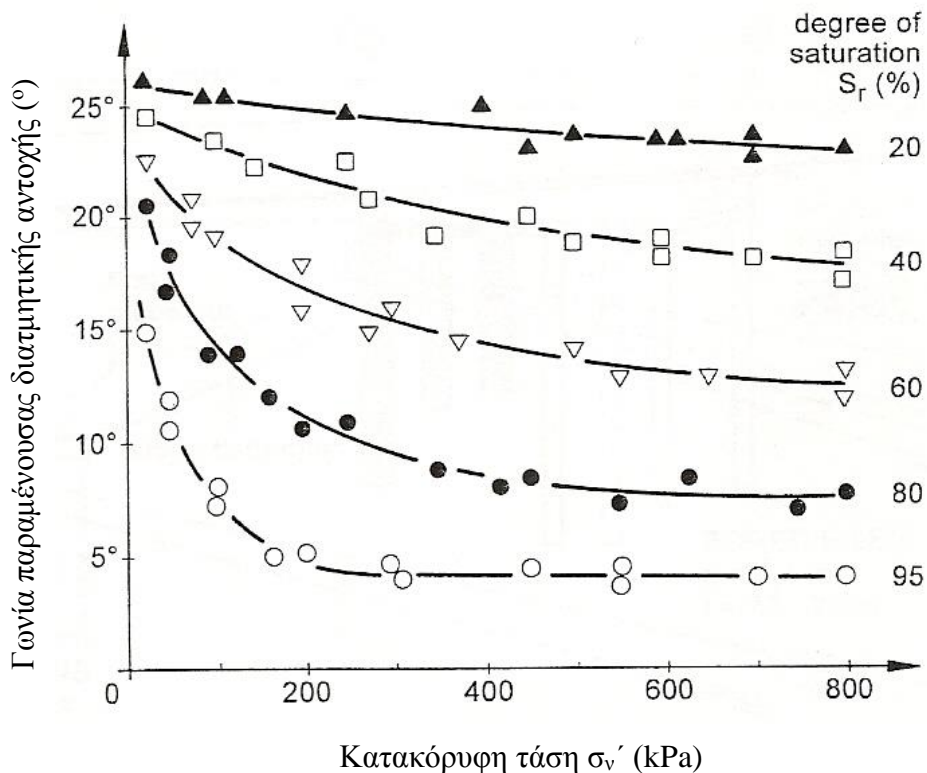
δεν υπάρχουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία μπορεί να οδηγήσει σε συντηρητικές εκτιμήσεις (όταν δεν υπάρχει μεγάλη εμπειρία) ή κατηγορίες εκ μέρους του κυρίου του έργου για συντηρητικό σχεδιασμό. Από την άλλη πλευρά, η ορθή εισαγωγή της αρνητικής πίεσης πόρων ή της μύζησης απαιτεί ένα πρόγραμμα γεωτεχνικής έρευνας πεδίου και εργαστηρίου που ξεφεύγει από την καθεστηκία πρακτική στην Ελλάδα και άλλες χώρες. Το θέμα αυτό επεξηγείται περαιτέρω στην Παρ. 6.9 μέσα από παραδείγματα αντιστρόφων και ευθειών αναλύσεων ευσταθείας, οι οποίες εκτελέστηκαν με την εισαγωγή της επιρροής της μύζησης και χωρίς αυτήν.

Η άμεση επιρροή της αρνητικής πίεσης πόρων και της μύζησης στην αντίσταση στην ολίσθηση κατά μήκος επιφανειών αστοχίας στις οποίες η διατμητική αντοχή καθορίζεται μόνο από τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής γίνεται αντιληπτή μέσω του γενικευμένου κριτηρίου



**Σχήμα 6.10.** Ενδεικτική απεικόνιση συνθηκών υπόγειου οριζόντα σε εκδηλωθείσες κατολισθήσεις: α) με τον υπόγειο οριζόντα «ψηλά», δηλαδή με ελάχιστο τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης να υπόκειται σε αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση, και β) με τον υπόγειο οριζόντα «χαμηλά», δηλαδή με σημαντικό τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης να υπόκειται σε αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση.

αστοχίας Mohr-Coulomb. Η μείωση του βαθμού κορεσμού και η συνεπαγόμενη αύξηση της μύζησης ωστόσο έχουν συνέπειες και επί της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής αυτής καθεαυτής. Στο Σχ. 6.11 παρουσιάζεται η επιρροή του βαθμού κορεσμού και της κατακόρυφης τάσης επί της γωνίας  $\phi'_{res}$  ιλυώδους αργίλου (μυλωνίτης)<sup>1</sup> όπως μετρήθηκε από τον Brandl (1996) σε συσκευή επαναλαμβανόμενης απευθείας διάτμησης με έλεγχο του βαθμού κορεσμού. Όπως παρατηρείται στο Σχ. 6.11 η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής μειώνεται με την κατακόρυφη τάση για σταθερό βαθμό κορεσμού, το οποίο άλλωστε είναι γνωστό και για πλήρως κορεσμένα εδάφη (Bishop, 1971, Skempton, 1985, Maksimović, 1989, Stark & Eid, 1994), και μάλιστα τόσο πιο ραγδαία, όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός κορεσμού. Η γωνία  $\phi'_{res}$  αυξάνεται επίσης ραγδαία με τη μείωση του βαθμού κορεσμού και μάλιστα τόσο πιο ραγδαία, όσο πιο μεγάλη είναι η εφαρμοζόμενη κατακόρυφη τάση. Για πολύ μικρές τιμές του βαθμού κορεσμού (20% στην ιλυώδη άργιλο του Σχ. 6.11) παρατηρείται ότι η επιρροή της κατακόρυφης τάσης πρακτικά εξαλείφεται.



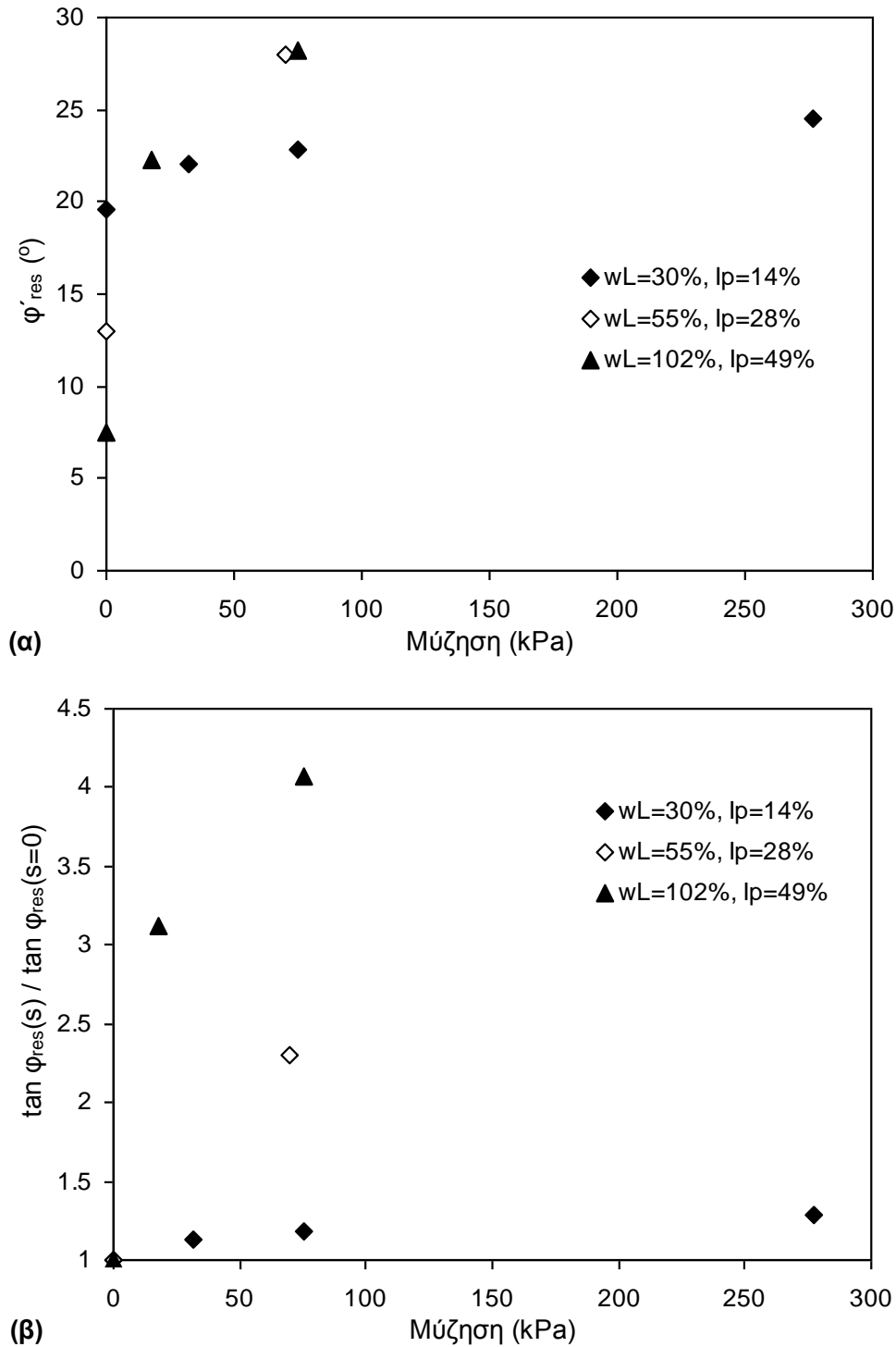
**Σχήμα 6.11.** Επιρροή του βαθμού κορεσμού και της κατακόρυφης τάσης επί της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής όπως παρατηρήθηκε σε ιλυώδη άργιλο μέσω δοκιμών επαναλαμβανόμενης απευθείας διάτμησης (Brandl, 1996).

<sup>1</sup> Η περιεχόμενη άργιλος στο υλικό έφτανε έως και 40%, ο δείκτης πλαστικότητας κυμαινόταν από 0 έως 20% και η ανηγμένη πυκνότητα στερεάς φάσης από 2.50 έως 2.70.

Οι Vaunat, et al. (2006) πραγματοποίησαν δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης σε μια ιλυώδη άργιλο χαμηλής πλαστικότητας ( $w_L=30\%$ ,  $I_p=14\%$ ,  $G_s=2.71$ ) χρησιμοποιώντας μία συσκευή Bromhead (Bromhead, 1979) στην οποία είχαν ενσωματώσει σύστημα ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω ελεγχόμενης σχετικής υγρασίας. Η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής του υλικού αυξήθηκε από  $19.6^\circ$  για το πλήρως κορεσμένο εδαφικό υλικό, σε  $22.0^\circ$  για μύζηση 32 MPa,  $22.8^\circ$  για μύζηση 75 MPa, και  $24.5^\circ$  για μύζηση 277 MPa. Η πίεση διείδυσης αέρα του υλικού ήταν περί το 1 MPa και η μύζηση επίτευξης παραμένουστος ποσοστού υγρασίας περί τα 70 MPa. Δεδομένου ότι η κατακόρυφη τάση που εφαρμόστηκε περιορίστηκε μέχρι τα 300 kPa, δεν παρατηρήθηκαν μεταβολές της γωνίας  $\phi'_{res}$  με την κατακόρυφη τάση. Χρησιμοποιώντας την ίδια συσκευή οι Vaunat, et al. (2007) μέτρησαν γωνία  $\phi'_{res}$   $28^\circ$  στην άργιλο Boom από το Βέλγιο ( $w_L=55\%$ ,  $I_p=28\%$ ) για μύζηση 70 MPa, όταν η γωνία  $\phi'_{res}$  του ίδιου υλικού πλήρως κορεσμένου είναι μόνο  $13^\circ$ , και οι Merchán, et al. (2008) μέτρησαν γωνία  $\phi'_{res}$   $28.2^\circ$  σε μπεντονίτη FEBEX ( $w_L=102\%$ ,  $I_p=49\%$ ,  $G_s=2.70$ ) για μύζηση 75 MPa και  $22.3^\circ$  για μύζηση 18 MPa, όταν η γωνία  $\phi'_{res}$  του ίδιου υλικού πλήρως κορεσμένου είναι μόνο  $7.5^\circ$ . Τα αποτελέσματα αυτά συγκεντρώνονται στο Σχ. 6.12. Στο Σχ. 6.12α συσχετίζεται η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής με τη μύζηση, και στο Σχ. 6.12β τα αποτελέσματα κανονικοποιούνται ως προς τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής κάθε εδαφικού υλικού όταν είναι πλήρως κορεσμένο,  $\phi_{res}(s=0)$ , συσχετίζοντας τον λόγο  $\tan \phi_{res}(s) / \tan \phi_{res}(s=0)$  με τη μύζηση, όπου  $\phi_{res}(s)$  η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής υπό μύζηση  $s$ . Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής αυξάνεται με τη μύζηση και μάλιστα τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερη είναι η πλαστικότητα των εδαφικών υλικών, με την αύξηση αυτή να επιδεικνύεται για τιμές της μύζησης μέχρι τη μύζηση επίτευξης του παραμένουστος ποσοστού υγρασίας, από την οποία και πάνω η γωνία  $\phi'_{res}$  πρακτικά σταθεροποιείται. Η μεταβολή αυτή της γωνίας  $\phi_{res}$  αποδίδεται στον σχηματισμό πολύ ισχυρά συνδεδεμένων συσσωματωμάτων των αργιλικών πλακιδίων λόγω της ξήρανσης που προκαλεί η αύξηση της μύζησης και τα οποία δεν μπορούν να διασπαστούν από την επιβαλλόμενη διατμητική παραμόρφωση. Η εξήγηση αυτή τεκμηριώθηκε από τους Merchán, et al. (2008) μέσω της φωτογράφισης των δοκιμίων τους σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Εκτός από την τροποποιημένη συσκευή Bromhead (Bromhead, 1979) των Vaunat, et al. (2006) η οποία ενσωματώνει τη μέθοδο ελέγχου της σχετικής υγρασίας για τον έλεγχο της ολικής μύζησης μέχρι πολύ υψηλές τιμές της, υπάρχει και η συσκευή των Sedano, et al. (2007) στην οποία ελέγχεται η μύζηση εδαφικού σκελετού μέσω της μεθόδου μετατόπισης άξονα και

εξασφαλίζει τον έλεγχο της μύζησης σε μικρότερο εύρος τιμών (μέχρι 1500 kPa η οποία είναι και η μεγαλύτερη πίεση διεύθυνσης αέρα κεραμικού πορολίθου).



**Σχήμα 6.12.** Επιρροή της μύζησης επί της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής από δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα: α) γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής με την μύζηση, και β) ο λόγος  $\tan \varphi_{res}(s) / \tan \varphi_{res}(s=0)$  με την μύζηση.

## 6.5 Η ΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Μια αναφορά στη διατμητική αντοχή και τη γωνία διατμητικής αντοχής οφείλει να περιλαμβάνει μία αναφορά στην κρίσιμη κατάσταση και ιδιαίτερα στην κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης. Η *κρίσιμη κατάσταση* (critical state) των εδαφικών υλικών περιγράφεται ως η κατάσταση κατά την οποία ένα εδαφικό υλικό δεν παρουσιάζει πλέον μεταβολές στην τάση ή τη μεταβολή του όγκου κατά την διάτμηση, και επέρχεται ως συνέπεια της εφαρμογής μεγάλων διατμητικών παραμορφώσεων. Η θεωρία της κρίσιμης κατάστασης (Schofield & Wroth, 1968) αποτελεί ένα χρήσιμο θεωρητικό πλαίσιο για την εξήγηση, την περιγραφή και την πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών, το οποίο άλλωστε αποτελεί και τη βάση των περισσότερων καταστατικών προσομοιωμάτων και ειδικά του προσομοιώματος των Alonso, et al. (1990) για μή κορεσμένα εδάφη, το οποίο απετέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη του νέου θεωρητικού πλαισίου στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Ο Toll (1990) πρότεινε ότι η κρίσιμη κατάσταση των μή κορεσμένων εδαφών μπορεί να περιγραφεί σε όρους διεκτροπικής τάσης  $q$  ( $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ), μέσης ολικής τάσης  $p$  ( $p = [\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3] / 3$ ), πίεσης της αέριας φάσης  $u_a$ , πίεσης της υγρής φάσης  $u_w$ , ειδικού όγκου  $v$  ( $v = 1 + e$ , όπου  $e$  ο λόγος κενών), και βαθμού κορεσμού  $S_r$ . Η κρίσιμη κατάσταση των μή κορεσμένων εδαφών απαιτεί πέντε παραμέτρους για να περιγραφεί, τις  $M_a$ ,  $M_b$ ,  $\Gamma_{ab}$ ,  $\lambda_a$  και  $\lambda_b$ , όπως υπεισέρχονται στις Εξ. 6.4 και 6.5.

$$q = M_a (p - u_a) + M_b (u_a - u_w) \quad (6.4)$$

$$v = \Gamma_{ab} - \lambda_a \ln (p - u_a) - \lambda_b \ln (u_a - u_w) \quad (6.5)$$

Σε ό,τι αφορά την Εξ. 6.5 στο Κεφ. 5 έχει γίνει ήδη αναφορά στον τρόπο της μεταβολής των παραμέτρων συμπίεστότητας  $\lambda_a$  και  $\lambda_b$  ως προς τη μέση ολική τάση και τη μύζηση αντίστοιχα και περαιτέρω αναφορά γίνεται στο Μέρος III της διατριβής όπου παρουσιάζεται το νέο θεωρητικό πλαίσιο.

Οι κλίσεις  $M_a$  και  $M_b$  στην Εξ. 6.4 αποτελούν τους λόγους στην κρίσιμη κατάσταση της διεκτροπικής τάσης  $q$  προς την μύζηση  $u_a - u_w$  και τη μέση τάση ως προς την αέρια φάση  $p - u_a$  αντίστοιχα, και από τη μορφή της Εξ. 6.4 προκύπτει ότι αυτοί είναι σταθεροί και περιγράφουν γραμμική συσχέτιση μεταξύ διεκτροπικής τάσης και μύζησης και ολικής μέσης τάσης



αντίστοιχα. Για το μέγεθος των παραμορφώσεων που πρέπει να επιβληθούν ώστε το εδαφικό υλικό να περιέλθει στην κρίσιμη κατάσταση, οι κλίσεις  $M_a$  και  $M_b$  εκφράζουν την εφαπτομένη της γωνίας διατμητικής αντοχής ως προς την αύξηση της ολικής τάσης και της μύζησης αντίστοιχα.

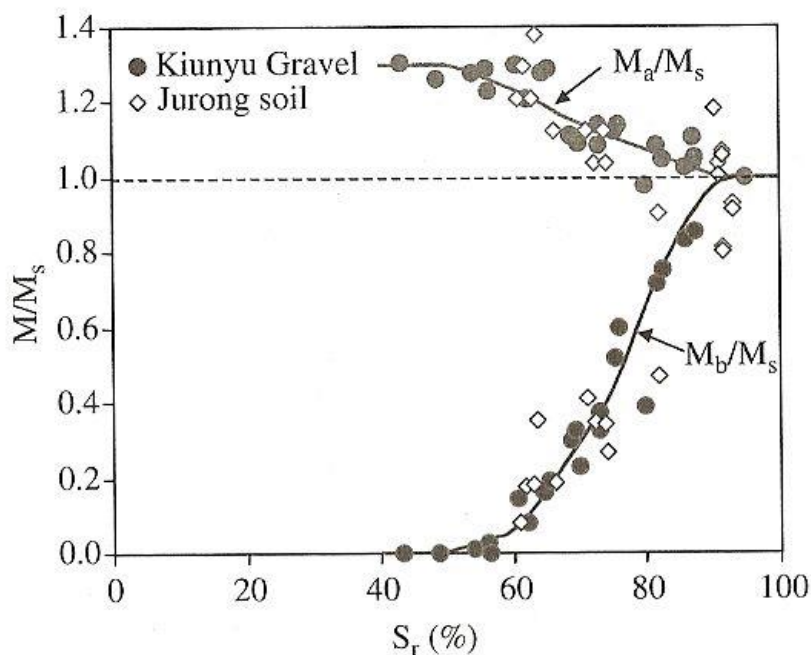
Για τη γωνία διατμητικής αντοχής ως προς την αύξηση της μύζησης,  $\phi_b$ , ωστόσο, έχει ήδη περιγραφεί και επεξηγηθεί (Παρ. 6.2.2 και 6.2.3) ότι αυτή δεν είναι σταθερή, αλλά παραμένει σταθερή και ίση με τη γωνία διατμητικής αντοχής των πλήρως κορεσμένων εδαφών για τιμές της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα και στη συνέχεια *μεταβάλλεται* ανάλογα με τη φύση των υλικών, μειούμενη γενικά ακόμα και μέχρι αρνητικές τιμές (σε ό,τι αφορά την εφαπτομενική τιμή της) προκειμένου για κοκκώδη εδαφικά υλικά. Το ίδιο λοιπόν πρέπει να αναμένεται γενικά και για την κλίση  $M_b$ . Στο Σχ. 6.13 παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα των Toll (1990) και Toll & Ong (2000), οι οποίοι επέδειξαν πως μειώνεται η τιμή της κλίσης  $M_b$  με τη μείωση του βαθμού κορεσμού, δηλ. την αύξηση της μύζησης, για λατεριτικούς χάλικες<sup>2</sup> ( $w_L=56-66\%$ ,  $I_p=29-35\%$ ) και ένα ελλουβιακό έδαφος μέσης πλαστικότητας ( $w_L=36\%$ ,  $I_p=15\%$ ) από τη Σιγκαπούρη. Η τιμή της κλίσης  $M_b$  έχει κανονικοποιηθεί με διαίρεσή της με την αντίστοιχη τιμή της κλίσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης κάθε εδαφικού υλικού κατά τον πλήρη κορεσμό,  $M_s$ .

Σε ό,τι αφορά την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης ως προς τη μέση ολική τάση,  $M_a$ , ο Toll (1990, 2000) επέδειξε για λατεριτικούς χάλικες ότι αυτή αυξάνει με τη μείωση του βαθμού κορεσμού και άρα την αύξηση της μύζησης. Το ίδιο επέδειξαν και για ένα ελλουβιακό έδαφος από τη Σιγκαπούρη οι Toll & Ong (2000), καθώς και για συμπακνωμένο καολίνη οι Zakaria, et al. (1995) και Wheeler & Sivakumar (1995), ενώ ουσιαστικά το ίδιο έχει βρεθεί και για τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής από πολλούς ερευνητές όπως επεξηγήθηκε και στην Παρ. 6.4. Στο Σχ. 6.13 παρουσιάζεται η εξέλιξη των κλίσεων  $M_a$  και  $M_b$  (τέμνουσες τιμές των κλίσεων και όχι εφαπτομενικές, οπότε αποκλείονται οι αρνητικές τιμές) με τον βαθμό κορεσμού για τα εδαφικά υλικά των Toll (1990) και Toll & Ong (2000), με τις τιμές των κλίσεων

<sup>2</sup> Η περιγραφή του υλικού αυτού ως χάλικες μοιάζει καταρχήν αντιφατική με τις υψηλές τιμές του ορίου υδαρότητας. Δεν πρέπει ωστόσο να λησμονείται η λατεριτική του φύση, που οδηγεί σε παρόμοια συμπεριφορά άλλων μαλακών βράχων, συχνά απαντώμενων και στον ελλαδικό χώρο όπως ο αποσαθρωμένος ιλυόλιθος του φλύσχη και της μολάσσας, πολύ σκληρές μάργες και ο αποσαθρωμένος σερπεντινίτης των Βορείων Σποράδων. Όλα αυτά τα υλικά προκύπτουν από την επεξεργασία κατά τις δοκιμές κατάταξης ως χάλικες ή χονδρόκοκοι άμμοι, αλλά στην πραγματικότητα μετά από εκσκαφή, αναμόχλευση και βαριά συμπίκνωση μετατρέπονται σε αμμοιλύωδεις αργίλους ποικίλης πλαστικότητας, κατάλληλες ακόμα και για αργιλικούς πυρήνες φραγμάτων (π.χ. ο πυρήνας του φράγματος Ευήνου από συμπακνωμένο ιλυόλιθο, ο πυρήνας του φράγματος Φερεκάμπου στη Σκύρο από συμπακνωμένο αποσαθρωμένο σερπεντινίτη κλπ).

κανονικοποιημένες ως προς την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης των ίδιων εδαφών κατά τον πλήρη κορεσμό.

Από την άλλη πλευρά, οι Alonso, et al. (1990) κατά τη διατύπωση του πρώτου καταστατικού προσομοιώματος για μή κορεσμένα εδάφη θεώρησαν ότι η κλίση  $M_a$  είναι σταθερή ίση με την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης κατά τον πλήρη κορεσμό<sup>3</sup>, γεγονός για το οποίο παραθέτουν πειραματικά αποτελέσματα οι Ng, et al. (2000), οι οποίοι βρήκαν για μια ελαφρώς αμμώδη ιλύ ηφαιστειακής προέλευσης ( $w_L=48\%$ ,  $I_p=13\%$ ) ότι η κλίση  $M_a$  είναι σταθερή, ίση με την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης του ίδιου υλικού κατά τον πλήρη κορεσμό του και άρα ανεξάρτητη του επιπέδου τιμών της μύζησης. Τέλος, οι Delage, et al. (1987) και Maâtouk, et al. (1995) παραθέτουν πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε μία ιλύ, από τα οποία προκύπτει ότι η κλίση  $M_a$  μειώνεται με την αύξηση της μύζησης, δηλ. τη μείωση του βαθμού κορεσμού.



**Σχήμα 6.13.** Επιρροή του βαθμού κορεσμού επί της κλίσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης ως προς την μέση ολική τάση ( $M_a$ ) και την μύζηση ( $M_b$ ) για λατεριτικούς χάλικες (Kiunyu Gravel, Toll, 1990) και ένα ελλουβιακό έδαφος από την Σιγκαπούρη (Jurong soil, Toll & Ong, 2000), κανονικοποιημένες ως προς την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης των ίδιων εδαφών πλήρως κορεσμένων (από τον Toll, 2004).

<sup>3</sup> Μια μάλλον λογική επιλογή κατά το στάδιο της δημοσίευσης των Alonso, et al. (1990), δεδομένου ότι το προσομοίωμα αυτό παρουσιάστηκε ως θεωρητικό προσομοίωμα (conceptual model) παρά την ευρύτατη διάδοση που γνώρισε στη συνέχεια.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, μπορούμε να καταλήξουμε ότι αφενός για την κλίση  $M_b$  είναι σαφές ότι μειώνεται με τη μείωση του βαθμού κορεσμού και άρα την αύξηση της μύζησης, ενώ για την κλίση  $M_a$  είναι ενδεχόμενο αυτή να αυξάνεται, να μένει σταθερή ή ακόμα και να μειώνεται με την αύξηση της μύζησης, με τα υπάρχοντα πειραματικά αποτελέσματα να επιδεικνύουν ότι μάλλον υπάρχει συσχέτιση ανάμεσα στο είδος της μεταβολής της κλίσης  $M_a$  και της πλαστικότητας των υλικών. Υλικά υψηλής και μέσης πλαστικότητας επιδεικνύουν αύξηση της κλίσης  $M_a$  με τη μείωση του βαθμού κορεσμού και άρα την αύξηση της μύζησης (Toll, 1990 & 2000, Zakaria, et al., 1995, Wheeler & Sivakumar, 1995, Toll & Ong, 2000), ενώ για υλικά μέσης ή χαμηλής πλαστικότητας η κλίση  $M_a$  μένει σταθερή (Ng, et al., 2000) και για ιλεις και κοκκώδη εδάφη αυτή μειώνεται (Delage, et al., 1987, Maâtouk, et al., 1996).

Το γενικό συμπέρασμα από την εξέταση των διαφόρων πειραματικών αποτελεσμάτων που έχουν δημοσιευτεί μέχρι σήμερα για την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης είναι ότι σε ένα καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά θα πρέπει να προβλέπεται ένας νόμος μεταβολής με τη μύζηση ή τον βαθμό κορεσμού, και για την κλίση  $M_b$  ως προς την μύζηση, και για την κλίση  $M_a$  ως προς την ολική τάση. Ειδικά μάλιστα για την κλίση  $M_a$  ο νόμος αυτός θα πρέπει να είναι έτσι διατυπωμένος ώστε να επιτρέπει με τις κατάλληλες τιμές των παραμέτρων που θα συσχετίζουν την κλίση  $M_a$  με τη μύζηση ή τον βαθμό κορεσμού, αυτή να μπορεί να μειώνεται, να μένει σταθερή ή να αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης, ανάλογα με την φύση των υλικών, τη μηχανική συμπεριφορά των οποίων προορίζεται να προσομοιώσει το προσομοίωμα.

## **6.6 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΥΖΗΣΗ**

### **6.6.1 Εισαγωγή**

Όπως και στην περίπτωση των εργαστηριακών μεθόδων προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και των παραμέτρων συμπίεστότητας των μη κορεσμένων εδαφών, έτσι και εδώ ζητούμενο αποτελεί ο έλεγχος της μύζησης. Οι μέθοδοι ελέγχου της διατμητικής τάσης και της διεκτροπικής τάσης είναι πρακτικά οι ίδιες αλλά μεγάλη σημασία έχει ο ρυθμός επιβολής τους, ώστε το σύστημα ελέγχου της μύζησης να μπορεί να διατηρεί τη μύζηση σταθερή κατά την επιβολή της διάτμησης. Όπως και στην περίπτωση των ειδικών

εργαστηριακών συσκευών που έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και τη μελέτη των μεταβολών όγκου των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών υπό ελεγχόμενη μύζηση, έτσι και εδώ έχουν εφαρμοστεί οι ίδιες μέθοδοι ελέγχου της μύζησης και στη συσκευή άμεσης διάτμησης και στη συσκευή τριαξονικής φόρτισης. Όπως αναφέρθηκε στην Παρ. 6.4 στη συσκευή δακτυλιοειδούς διάτμησης έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα η μέθοδος μετατόπισης άξονα και η μέθοδος ελέγχου της σχετικής υγρασίας για τον έλεγχο της ολικής μύζησης.

### **6.6.2 Συσκευές τριαξονικής φόρτισης με έλεγχο της μύζησης**

Στην Παρ. 5.5.3.4 παρουσιάστηκαν οι συσκευές τριαξονικής φόρτισης που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα και ενσωματώνουν κάποια από τις μεθόδους ελέγχου της μύζησης, ενώ στην Παρ. 5.5.3.6 παρουσιάστηκαν και οι διάφορες μέθοδοι μετρήσεων μεταβολών όγκου των δοκιμίων στη δοκιμή τριαξονικής φόρτισης. Στο Κεφ. 5 ωστόσο που έγιναν οι αναφορές αυτές ενδιέφερε μόνο η ισοτροπική ή ανισοτροπική συμπίεση, η οποία και περιγραφόταν. Αυτή ωστόσο γίνεται ουσιαστικά με έλεγχο της τάσης (stress-controlled test), αφού καθορίζονται τιμές της πλευρικής τάσης και της κατακόρυφης τάσης (προκειμένου για ανισοτροπική συμπίεση) και της μύζησης, οι οποίες επιβάλλονται διαδοχικά στα δοκίμια. Προκειμένου να επιβληθεί ωστόσο μεταβαλλόμενη διεκτροπική τάση μέχρι την αστοχία και πέρα από αυτήν, στα δοκίμια επιβάλλεται σταθερή παραμόρφωση κατά τον διαμήκη άξονα υπό σταθερή πλευρική τάση και μύζηση (strain-controlled test). Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά μόνο στα καταγεγραμμένα στοιχεία για τους ρυθμούς επιβολής της παραμόρφωσης μέσω της οποίας επιβάλλεται η διεκτροπική τάση. Προκειμένου για αργιλικά εδαφικά υλικά, τα οποία έχουν χαμηλή διαπερατότητα, ο ρυθμός επιβολής της παραμόρφωσης πρέπει να είναι τόσο μικρός ώστε το σύστημα επιβολής της μύζησης να μπορεί να επιβάλλει τις απαιτούμενες μεταβολές, ώστε η μύζηση να παραμένει σταθερή κατά τη φάση της επιβολής της διεκτροπικής τάσης. Προκειμένου για την πλευρική τάση, αυτή έχει επιβληθεί στο δοκίμιο μέσω της πίεσης στο νερό της κυψέλης και δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές που προκαλούνται στο δοκίμιο λόγω της επιβολής της κατακόρυφης παραμόρφωσης. Η επιβαλλόμενη διεκτροπική τάση μέσω της παραμόρφωσης ωστόσο προκαλεί μεταβολές στην πίεση της υγρής φάσης (και ανάλογα με το σύστημα ελέγχου της μύζησης) και στην αέρια φάση. Για αυτόν τον λόγο λοιπόν πρέπει η κατακόρυφη παραμόρφωση να επιβάλλεται τόσο αργά (αντιστοιχώντας πρακτικά σε στραγγιζόμενη τριαξονική δοκιμή με στερεοποίηση, CD) ώστε το σύστημα επιβολής της

μύζησης να μπορεί να διατηρεί τη μύζηση σταθερή. Είναι ο ίδιος λόγος ουσιαστικά για τον οποίο επιβάλλονται πολύ αργοί ρυθμοί παραμόρφωσης στις στραγγιζόμενες δοκιμές τριαξονικής θλίψης.

Ο Delage (2004) συγκέντρωσε δεδομένα για τους ρυθμούς επιβολής της παραμόρφωσης σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης με ελεγχόμενη μύζηση. Τα δεδομένα αυτά παρατίθενται στον Πιν. 6.1 μαζί με το είδος του υλικού στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές, το μήκος της διαδρομής στράγγισης εντός του δοκιμίου ως μέρος του ύψους του δοκιμίου και το είδος της μεθόδου ελέγχου της μύζησης. Η μείωση της διαδρομής στράγγισης απαιτεί συχνά εξαιρετικά ειδικό εξοπλισμό προκειμένου για τη μέθοδο μετατόπισης άξονα αφού η πίεση της αέριας φάσης πρέπει να διοχετευθεί από τη μέση του δοκιμίου (Maâtouk, et al., 1995) ή να υπάρχει ειδική περιμετρική του δοκιμίου διάταξη όπως αυτή των Romero, et al. (1997).

Τέλος, ειδικά σε ό,τι αφορά τη μέθοδο μετατόπισης άξονα υπενθυμίζεται ότι παρόλο που είναι δυνατή η τοποθέτηση κεραμικού πορολίθου 15 Bar, η εφαρμοζόμενη μύζηση περιορίζεται συχνά από την αντοχή των συνήθων κυψελών προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί ταυτόχρονα η ζητούμενη πλευρική τάση. Η μύζηση στη μέθοδο μετατόπισης άξονα είναι η διαφορά της πίεσης στην αέρια φάση  $u_a$  (πίεση αέρα που εφαρμόζεται στο δοκίμιο) από την πίεση στη υγρή φάση  $u_w$  (αντιπίεση), με την πίεση στην αέρια φάση να πρέπει να είναι τόσο μικρότερη από την πίεση στην κυψέλη,  $u_{cell}$ , όση είναι η ζητούμενη πλευρική τάση. Κατά συνέπεια αν είναι  $f$  η αντοχή της κυψέλης και  $s$  η υλοποιούμενη μύζηση στο δοκίμιο πρέπει να ισχύει η ακόλουθη συνθήκη (Εξ. 6.6):

$$f \geq u_{cell}, u_{cell} \geq u_a, u_a \geq u_w, \text{ με } \sigma_3 = u_{cell} - u_a \text{ και } s = u_a - u_w \quad (6.6)$$

Για παράδειγμα, για να εφαρμοστεί μύζηση 500 kPa με αντιπίεση 400 kPa και πλευρική τάση 600 kPa, θα πρέπει να είναι  $u_w = 400$  kPa,  $u_a = 1000$  kPa και  $u_{cell} = 1600$  kPa, η οποία μπορεί πράγματι να εφαρμοστεί αφού πρακτικά όλες οι διατιθέμενες κυψέλες έχουν αντοχή μεγαλύτερη από αυτήν την τιμή (η πλειοψηφία των προμηθευτών παρέχει κυψέλες με αντοχή 1.7 ή 2.0 MPa, για μεγαλύτερες αντοχές συνήθως πρέπει να αναζητηθούν κυψέλες ειδικής κατασκευής, τις περισσότερες φορές σε ερευνητικά ιδρύματα, βλ. για παράδειγμα Παρ. 5.5.3.4). Κατά συνέπεια όσο αυξάνεται η ζητούμενη μύζηση τόσο περιορίζεται η μέγιστη δυνατή πλευρική τάση που μπορεί να εφαρμοστεί και το αντίστροφο.

**Πίνακας 6.1.** Συνόπηση ρυθμών παραμόρφωσης σε συσκευές τριαξονικής φόρτισης με έλεγχο της μύζησης (από τον Delage, 2004).

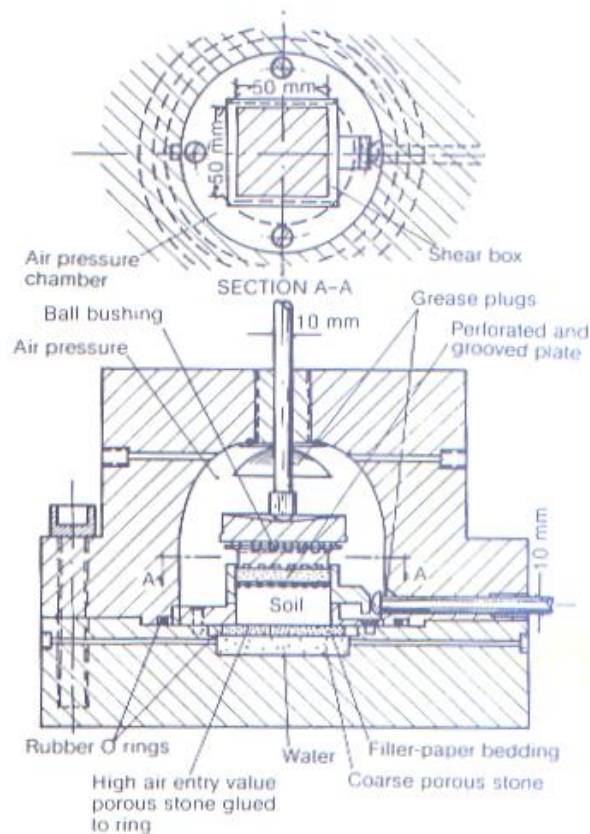
Αναφορά	Μέθοδος ελέγχου της μύζησης	Εδαφικό υλικό	Μήκος διαδρομής στράγγισης (H το ύψος του δοκιμίου)	Ρυθμός παραμόρφωσης (μm/min)
Bishop & Donald (1961)	Μέσω στήλης υδραργύρου <sup>1</sup>	Ιλύς Brahead	H	2.13
Gulhati & Satija (1981)	Μέθοδος μετατόπισης άξονα	Άργιλος Dhanauri, $I_p = 24$	H	6
Ho & Fredlund (1982)	Μέθοδος μετατόπισης άξονα	Ιλυώδης άμμος & αμμώδης ιλύς	H	1.43
Delage, et al. (1987)	Ωσμωτική μέθοδος	Ιλύς Jossigny (LP), $I_p = 19$	H/2	1
Romero, et al. (1997)	Μέθοδος μετατόπισης άξονα	Ιλύς Βαρκελώνης (LP), $I_p = 16$	H/2	1
Barrera, et al. (2002)	Μέθοδος μετατόπισης άξονα	Ιλύς Βαρκελώνης (LP), $I_p = 16$	H/2	1
Wheeler & Sivakumar (1995)	Μέθοδος μετατόπισης άξονα	Καολίνης Speswhite, $I_p = 33$	H	1.4
Maâtouk, et al. (1995)	Μέθοδος μετατόπισης άξονα	Ιλύς αιολικής προέλευσης (LP), $I_p = 7$	H/2	1.2
Rampino, et al. (1999) – Τριαξονική συσκευή	Μέθοδος μετατόπισης άξονα	Ιλυώδης άμμος, $I_p = 13$	H	1.26
Rampino, et al. (1999) – Τριαξονική συσκευή με κυψέλη συμπίεσομέτρου CRS	Μέθοδος μετατόπισης άξονα	Ιλυώδης άμμος, $I_p = 13$	H	5 <sup>2</sup>
Laloui, et al. (1997)	Μέθοδος μετατόπισης άξονα	Αμμώδης ιλύς, $I_p = 8$	H	1.5

<sup>1</sup> Η μέθοδος αυτή δεν περιγράφηκε στις μεθόδους ελέγχου της μύζησης. Αποτελεί την πρώτη μέθοδο ελέγχου της μύζησης στην συσκευή τριαξονικής φόρτισης και βασίζεται στην ταπείνωση της στάθμης στήλης υδραργύρου μέσω της οποίας εφαρμόζεται η ζητούμενη αρνητική πίεση πόρων.

<sup>2</sup> Ο αυξημένος ρυθμός εδώ δικαιολογείται γιατί το δοκίμιο έχει το ύψος δοκιμίου συμπίεσομέτρου όπως εισήχθη σε συσκευή τριαξονικής φόρτισης για δοκιμή σταθερού ρυθμού παραμόρφωσης (Constant Rate of Strain: CRS).

### 6.6.3 Συσκευές απευθείας διάτμησης με έλεγχο της μύζησης

Η πρώτη εφαρμογή μεθόδου ελέγχου της μύζησης στην συσκευή απευθείας διάτμησης έγινε από τον Escario (1980), όπως φαίνεται στο Σχ. 6.14. Η μέθοδος που υιοθετήθηκε ήταν η μέθοδος μετατόπισης άξονα με το δοκίμιο να επικάθεται πορολίθου υψηλής πίεσης διείδυσης αέρα και



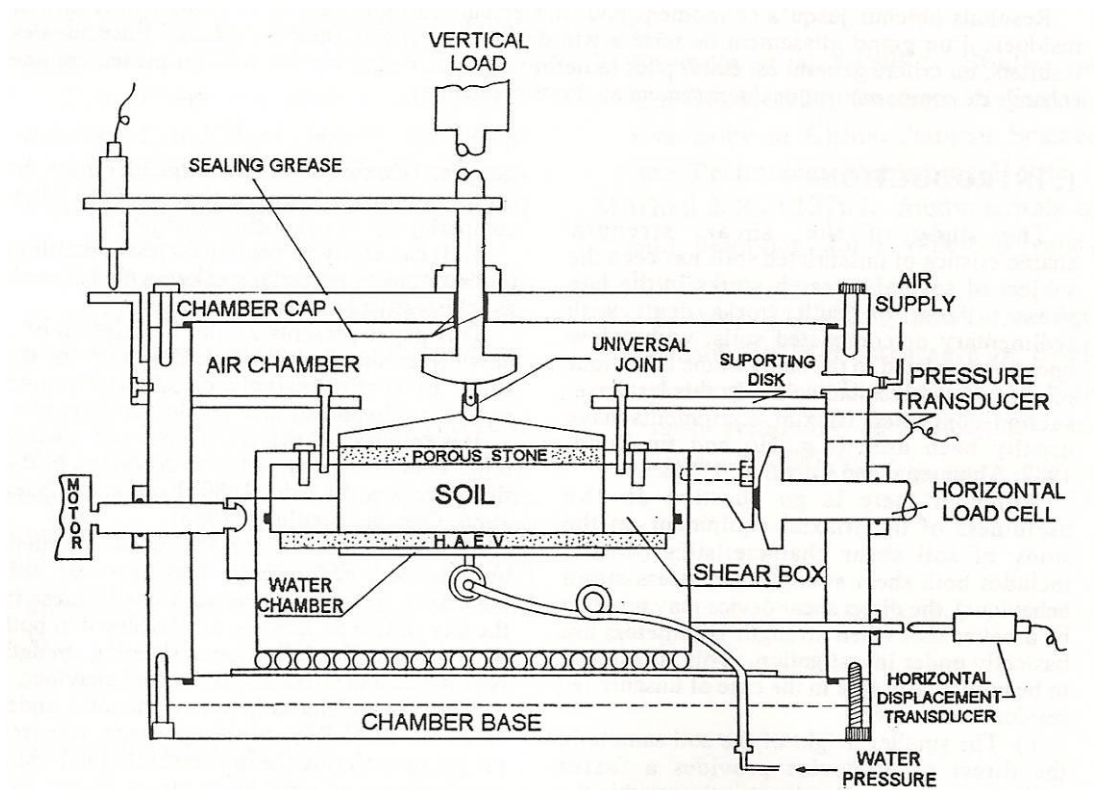
**Σχήμα 6.14.** Η συσκευή απευθείας διάτμησης υπό ελεγχόμενη μύζηση του Escario (1980).

ολόκληρη η κυψέλη της δοκιμής απευθείας διάτμησης να βρίσκεται μέσα σε θάλαμο μύζησης τον οποίο διαπερνούν δύο έμβολα: ένα κατακόρυφο για την εφαρμογή της κατακόρυφης τάσης και ένα οριζόντιο για την επιβολή της οριζόντιας παραμόρφωσης. Αντί για πορόλιθο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεμβράνες σελοουλόζης με υψηλότερη μάλιστα πίεσης διείσδυσης αέρα και από τους κεραμικούς πορολίθους<sup>4</sup>. Όπως εξηγήθηκε ήδη στο Κεφ. 5, για να εξασφαλίζεται η στεγανότητα του θαλάμου μύζησης υπό την υψηλή πίεση αέρα στο εσωτερικό του, και στα δύο έμβολα πρέπει να παρεμβάλλονται ελαστικοί δακτύλιοι (o-rings) υπό ένταση. Κατά συνέπεια η πραγματική κατακόρυφη δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο και η πραγματική οριζόντια δύναμη αντίστασης πρέπει να μετρούνται εσωτερικά του θαλάμου μύζησης μέσω των κατάλληλων κυψελών μέτρησης φορτίου που να μπορούν να λειτουργήσουν σε περιβάλλον υπό πίεση. Ο χρησιμοποιούμενος θάλαμος μύζησης πρέπει να είναι προφανώς τόσο μεγάλος ώστε να χωράει η κυψέλη της δοκιμής διάτμησης, οι κυψέλες μέτρησης

<sup>4</sup> Για τη σύγκριση μεμβρανών σελοουλόζης και κεραμικών πορολίθων υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα, βλ. Παρ. 3.3.1.

κατακόρυφου και οριζόντιου φορτίου και επίσης να επιτρέπει επαρκώς την κίνηση του άνω τμήματος της κυνέλης της δοκιμής διάτμησης για την επιβολή της απαιτούμενης διατμητικής παραμόρφωσης μέχρι την αστοχία και πέρα από αυτήν.

Έχουν αναπτυχθεί συσκευές απευθείας διάτμησης βασισμένες σε αυτήν τη μέθοδο στις οποίες μπορούν να επιβληθούν τιμές της μύζησης έως 12 MPa (Escario & Juca, 1989) χάρη στη χρήση μεμβρανών σελουλόζης. Παρόμοιες συσκευές απευθείας διάτμησης με αυτή του Escario (1980) έχουν αναπτυχθεί από τους Gan, et al. (1988), τους De Campos & Carrillo (1995) –βλ. Σχ. 6.15- και τους Miller & Hamid (2005, 2007), η τελευταία μάλιστα ειδικά για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής κατά μήκος διεπιφανειών μη κορεσμένου εδάφους και άλλων υλικών. Οι Yasufuku, et al. (2005) και Hormdee, et al. (2005) ανέπτυξαν μία συσκευή με ενσωματωμένη τη μέθοδο μετατόπισης άξονα στην οποία ενσωμάτωσαν και αισθητήρες ηλεκτρομαγνητικής μέτρησης του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (βλ. Παρ. 3.5.4). Σήμερα διατίθενται πια και εμπορικά συσκευές απευθείας διάτμησης που ενσωματώνουν τη μέθοδο μετατόπισης άξονα για τον έλεγχο της μύζησης, καθώς μάλιστα και αυτόματους τρόπους επιβολής του κατακόρυφου φορτίου αντί για χρήση βαρών όπως στην κλασική συσκευή απευθείας διάτμησης.



**Σχήμα 6.15.** Η συσκευή απευθείας διάτμησης υπό ελεγχόμενη μύζηση των De Campos & Carrillo (1995).



Εκτός από τις συσκευές απευθείας διάτμησης με έλεγχο της μύζησης μέσω της μεθόδου μετατόπισης άξονα, οι Boso, et al. (2005) ανέπτυξαν μία συσκευή απευθείας διάτμησης με ενσωματωμένη την ωσμωτική μέθοδο ελέγχου της μύζησης. Η μέγιστη επιτευχθείσα μύζηση στα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσίασαν ήταν 900 kPa, παρόλο που η πειραματική διάταξή τους και η χρησιμοποιούμενη πολυαιθυλική γλυκόλη (PEG20000) επιτρέπει την εφαρμογή και μεγαλύτερων τιμών της μύζησης με χρήση της κατάλληλης ημιδιαπερατής μεμβράνης (βλ. Παρ. 4.3.3).

#### 6.6.4 Συσκευές ανεμπόδιστης θλίψης με έλεγχο της μύζησης

Μια ιδιαίτερη υποπερίπτωση της χρήσης των συνήθων τριαξονικών κυψελών και πλαισίων φόρτισης για την εκτέλεση δοκιμών με έλεγχο της μύζησης είναι η εκτέλεση δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης. Στις συνήθειες κυψέλες που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση δοκιμών τριαξονικής φόρτισης υπάρχει μία είσοδος υδραυλικής πίεσης στην κυψέλη από την πάνω πλευρά της μέσω της οποίας ασκείται η ολική πλευρική τάση στο δοκίμιο (το οποίο είναι απομονωμένο από την τάση αυτή μέσω της μεμβράνης στην οποία βρίσκεται) και μία είσοδος υδραυλικής πίεσης στην υγρή φάση του δοκιμίου μέσω του κάτω πορολίθου (μέσω της οποίας εφαρμόζεται αντιπίεση και γίνεται η στράγγιση σε στραγγιζόμενες δοκιμές). Εάν ο κάτω πορόλιθος αντικατασταθεί από έναν κεραμικό πορόλιθο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα και στον πάνω πορόλιθο διανοιχθεί οπή μέσω της οποίας το δοκίμιο μπορεί να επικοινωνεί με την πίεση που εφαρμόζεται στην κυψέλη, τότε αντικαθιστώντας την υδραυλική πίεση στην κυψέλη με πνευματική έχουμε ουσιαστικά εφαρμογή της μεθόδου μετατόπισης άξονα για την εκτέλεση δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης υπό ελεγχόμενη μύζηση. Η πίεση της αέριας φάσης του δοκιμίου είναι όση η εφαρμοζόμενη μέσα στην κυψέλη και η αντοχή των συνήθων κυψελών μέχρι τα 1.7 ή 2 MPa επιτρέπει να γίνει χρήση των κεραμικών πορολίθων ακόμα και της μέγιστης πίεσης διείσδυσης αέρα των 1.5 MPa. Η διαφορά αυτή μάλιστα μεταξύ της πίεσης διείσδυσης αέρα του πορολίθου και της αντοχής της κυψέλης επιτρέπει την εκτέλεση της δοκιμής με την πίεση στο «δοχείο νερού» της μεθόδου μετατόπισης άξονα να είναι διάφορη του μηδενός, έως την τιμή των 500 kPa για τη μέγιστη δυνατή τιμή της εφαρμοζόμενης μύζησης των 1500 kPa προκειμένου για κεραμικούς πορολίθους της μέγιστης πίεσης διείσδυσης αέρα και κυψέλες αντοχής 2 MPa. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει τη δυνατότητα χρήσης συστημάτων αυτόματου ελέγχου της αντιπίεσης με ταυτόχρονη μέτρηση του νερού που προσροφάται από το δοκίμιο ή εξέρχεται από αυτό και επίσης περιορίζει τον όγκο του αέρα που διηθείται μέσω του κεραμικού πορολίθου,

αλλά έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί τη δυνατότητα εφαρμογής πίεσης αέρα μέχρι 2 MPa (περίπου 20 Bar)<sup>5</sup>. Ανεξάρτητα από την εφαρμογή της μεθόδου με αυξημένη ή μηδενική αντιπίεση, εντός της κυψέλης μπορεί να παρεμβληθεί εσωτερικός κύλινδρος γεμισμένος με νερό ή άλλο υγρό μέσω της μεταβολής του όγκου του οποίου να μετρούνται οι μεταβολές του όγκου του δοκιμίου. Στην περίπτωση που ο κύλινδρος είναι ανοικτός οι μετρήσεις των μεταβολών του ολικού όγκου του δοκιμίου θα είναι λιγότερο ακριβείς, ενώ στην περίπτωση που ο κύλινδρος είναι κλειστός, θα πρέπει το σύστημα εφαρμογής της πίεσης αέρα στο δοκίμιο και της πίεσης στο νερό ή το υγρό στο εσωτερικό τμήμα του κυλίνδρου να συνδυάζονται για ταυτόχρονη εφαρμογή των ίδιων τιμών της πίεσης. Έξω από τον κύλινδρο στην κυψέλη μπορεί να εφαρμόζεται πίεση με αέρα αντί με νερό ή άλλο υγρό όπως στη συσκευή τριαξονικής φόρτισης υπό ελεγχόμενη μύζηση με κυψέλη εσωτερικού τοιχώματος που εκτείνεται μέχρι την οροφή της.

Οι Kato, et al. (2002) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο που περιγράφηκε ήδη για τη μελέτη της εξέλιξης της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και των σχέσεων τάσεων-παραμορφώσεων μιας μη πλαστικής ιλυώδους αργίλου με τη μύζηση. Η πειραματική τους διάταξη ενσωματώνει ένα σύστημα ζύγισης του νερού που εξέρχεται ή εισέρχεται στο δοκίμιο κατά τη δοκιμή. Την ίδια διάταξη χωρίς παρακολούθηση των μεταβολών στο περιεχόμενο νερό χρησιμοποίησαν και οι Colmenares & Ridley (2002) διερευνώντας την εξέλιξη των ίδιων χαρακτηριστικών με τους Kato, et al. (2002) για μια αρχικά αναζυμωμένη αργιλώδη ιλύ.

---

<sup>5</sup> Αυτό το τελευταίο είναι μάλλον σχετικά δύσκολο να επιτευχθεί με χαμηλό κόστος, αφού απαιτεί αεροσυμπιεστή πολύ μεγάλης ικανότητας ή παρεμβολή δύο προωθητών (boosters) αν χρησιμοποιείται μικρότερος αεροσυμπιεστής. Αυτή η λύση όμως δεν αποτελεί τη βέλτιστη μέθοδο ρύθμισης της πίεσης είτε ως προς την ακρίβεια είτε ως προς την ασφάλεια, επηρεάζοντας μάλιστα συχνά την πίεση και στο υπόλοιπο δίκτυο πριν από το σημείο παρεμβολής των προωθητών (καθιστώντας δηλαδή δύσκολη τη ρύθμιση της πίεσης και σε εκείνο το τμήμα του δικτύου από άλλες συσκευές που μπορεί να χρησιμοποιούν την ίδια παροχή αέρα υπό πίεση από κεντρικό αεροσυμπιεστή).

## 6.7 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΥΖΗΣΗ

Λόγω της συσχέτισης που περιγράφηκε ήδη ανάμεσα στα σημεία καμψής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και τα σημεία καμψής της καμπύλης εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση, αρκετοί ερευνητές μέχρι σήμερα έχουν διατυπώσει μαθηματικά προσομοιώματα μέσω των οποίων επιχειρούν τη συσχέτιση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και της καμπύλης εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση. Σκοπός των προσομοιωμάτων αυτών είναι η πρόβλεψη της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση (και άρα τον βαθμό κορεσμού) αν είναι γνωστή η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού των εδαφικών υλικών. Στον Πιν. 6.2 συνοψίζονται όλες οι εξισώσεις πρόβλεψης της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών που συγκεντρώθηκαν από τη βιβλιογραφία, οι οποίες συνιστούν ουσιαστικά εναλλακτικές μορφές του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb, με πιο βολικές ως προς την ικανότητα υπολογισμού και πρόβλεψης παραμέτρων από την γωνία  $\phi_b$  της εξίσωσης των Fredlund, et al. (1978) –Εξ. 6.3.

Όπως προκύπτει από τις συγκεντρωθείσες εξισώσεις του Πιν. 6.2, όλες εκτός εκείνων που προτάθηκαν από τους Lee, et al. (2005) και την Vilar (2006) έχουν την ίδια γενική μορφή που εκφράζεται από την Εξ. 6.7.

$$\tau = [c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \phi'] + (u_a - u_w) \cdot \{[\Gamma O] \cdot \tan \phi'\} \quad (6.7)$$

Υπάρχει δηλαδή σε όλες τις εξισώσεις πλην των 6.14 και 6.15 ο ίδιος κοινός όρος  $[c' + (\sigma - u_a) \cdot \tan \phi']$  που εκφράζει την συνεισφορά της συνοχής του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $c'$  και της γωνίας διατμητικής αντοχής  $\phi'$ , καθώς και την άμεση επιρροή της κατακόρυφης ως προς το επίπεδο αστοχίας ολικής τάσης  $(\sigma - u_a)$ . Εκτός αυτού του όρου, σε όλες τις εξισώσεις υπάρχει ο όρος  $(u_a - u_w) \cdot \{[\Gamma O] \cdot \tan \phi'\}$ , ο οποίος εκφράζει την άμεση επιρροή της μύζησης  $(u_a - u_w)$ , αλλά και την επιρροή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, η οποία εκφράζεται μέσω του γινομένου  $\{[\Gamma O] \cdot \tan \phi'\}$ . Προφανώς στον όρο αυτό υπεισέρχεται η έμμεση επιρροή της ολικής τάσης και της μύζησης. Γενικά έχει επιλεγθεί από τους περισσότερους ερευνητές αντί ο όρος αυτός να καταγράφεται αυτόνομα, να καταγράφεται ως γινόμενο της εφαπτομένης της γωνίας διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου εδάφους με έναν γενικό όρο,  $\Gamma O$ , ο οποίος μεταβάλλεται από εξίσωση σε εξίσωση. Επίσης όταν το εδαφικό υλικό είναι πλήρως κορεσμένο (Περιοχή I της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού) ο όρος  $\Gamma O$  γίνεται μονάδα και η Εξ.

6.7 εκφυλίζεται στο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για πλήρως κορεσμένα εδάφη (Εξ. 6.3).

**Πίνακας 6.2.** Συνόπηση εξισώσεων πρόβλεψης της παραμένουσας διατμητικής αντοχής των μή κορεσμένων εδαφών.

Πηγή	Εξίσωση πρόβλεψης της διατμητικής αντοχής	Παράμετροι
Bishop (1959)	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan\phi' + (u_a - u_w) \cdot \chi \cdot \tan\phi'$ (6.8)	$\chi$ : παράμετρος συσχετιζόμενη με τον βαθμό κορεσμού
Fredlund, et al. (1996)	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan\phi' + (u_a - u_w) \cdot \Theta^k \cdot \tan\phi'$ (6.9)	$\Theta$ : κανονικοποιημένο ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, $\Theta = \theta_w / \theta_{sat}$ $k$ : παράμετρος βέλτιστης προσέγγισης
Vanapalli, et al. (1996)	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan\phi' + (u_a - u_w) \cdot [(\theta_w - \theta_{res}) / (\theta_{sat} - \theta_{res})] \cdot \tan\phi'$ (6.10)	$\theta_w$ : ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, $\theta_{res}$ : παραμένον ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, $\theta_{sat}$ : ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας κατά τον κορεσμό
Oberg & Sallfors (1997)	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan\phi' + (u_a - u_w) \cdot S_r \cdot \tan\phi'$ (6.11)	$S_r$ : βαθμός κορεσμού
Khallili & Khabbaz (1998)	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan\phi' + (u_a - u_w) \cdot [(u_a - u_w)^f / (u_a - u_w)^b]^{-0.55} \cdot \tan\phi'$ (6.12)	$(u_a - u_w)_f$ : μύζηση κατά την αστοχία, $(u_a - u_w)_b$ : πίεση διείσδυσης αέρα του εδαφικού υλικού
Bao, et al. (1998)	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan\phi' + (u_a - u_w) \cdot [\xi - \zeta \cdot \log(u_a - u_w)] \cdot \tan\phi'$ (6.13)	$\xi = \log(u_a - u_w) / [\log(u_a - u_w)_{res} - \log(u_a - u_w)_b]$ , $\zeta = 1 / [\log(u_a - u_w)_{res} - \log(u_a - u_w)_b]$ , $\log(u_a - u_w)_{res}$ : η μύζηση στο παραμένον ποσοστό υγρασίας
Lee, et al. (2005)	$\tau = c' + [(\sigma_n - u_a) + (u_a - u_w)] \cdot \tan\phi'$ , αν $(u_a - u_w) < AEV$ (6.14α)	$AEV$ : Πίεση διείσδυσης αέρα, $\Theta$ & $k$ : όπως στην Εξ. 6.9, $\lambda$ : παράμετρος βέλτιστης προσέγγισης πειραματικών δεδομένων
	$\tau = c' + [(\sigma_n - u_a) + AEV] \cdot \tan\phi' + [(u_a - u_w) - AEV] \cdot \Theta^k \cdot [1 + \lambda \cdot (\sigma_n - u_a)] \cdot \tan\phi'$ , αν $(u_a - u_w) < AEV$ (6.14β)	
Vilar (2006)	$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \cdot \tan\phi' + (u_a - u_w) / [a + b \cdot (u_a - u_w)]$ (6.15)	$a = 1 / \tan\phi'$ , $b = 1 / (c_{ult} - c')$ , $c_{ult}$ : η συνοχή των εδαφικών υλικών μετά από ξήρανση μέχρι το παραμένον ποσοστό υγρασίας

Έτσι προκειμένου για τον Bishop (1959) ο όρος αυτός είναι η παράμετρος  $\chi$ , για τους Fredlund, et al. (1996) και τους Vanapalli, et al. (1996) διαφορετικές μορφές του κανονικοποιημένου ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (ή εναλλακτικά του ποσοστού υγρασίας σε όρους βαρών και του βαθμού κορεσμού) υψωμένου ή όχι σε κάποια δύναμη που αποτελεί παράμετρο βέλτιστης προσέγγισης πραγματικών καμπυλών πειραματικών δεδομένων (οι Vanapalli & Fredlund, 2000, παραθέτουν στοιχεία για συσχέτιση της παραμέτρου  $\kappa$  με τον δείκτη πλαστικότητας), για τους Oberg & Sallfors (1997) ο βαθμός κορεσμού και για τους Khallili & Khabbaz (1998) ο λόγος της μύζησης στην αστοχία προς την πίεση διεύθυνσης αέρα υψωμένος σε μία σταθερή δύναμη.

Ειδικά για τους Bao, et al. (1998) ο όρος αυτός αποτελεί λογαριθμική συσχέτιση με τη μύζηση και η διατύπωσή του βασίζεται στη γραμμικότητα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στην Περιοχή II, στην οποία είχαν συγκεντρώσει το ενδιαφέρον τους αυτοί οι ερευνητές. Η παράμετρος  $\xi$  αποτελεί σταθερά που εκφράζει το σημείο μετάβασης από την Περιοχή I στην Περιοχή II της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και η παράμετρος  $\zeta$  σταθερά που εκφράζει την κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στην Περιοχή II. Για τον προσδιορισμό των τιμών των παραμέτρων  $\xi$  και  $\zeta$ , οι Bao, et al. (1998) πρότειναν την έναρξη της αναζήτησης των βέλτιστων τιμών τους για την προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων από την ικανοποίηση της συνθήκης που εκφράζει η Εξ. 6.16.

$$(\theta_w - \theta_{res}) / (\theta_{sat} - \theta_{res}) = \xi - \zeta \cdot \log(u_a - u_w) \quad (6.16)$$

Η εξίσωση που πρότειναν οι Oberg & Sallfors (1997) είναι πρακτικά όμοια με αυτήν του Bishop (1959) αλλά η παράμετρος  $\chi$  έχει τεθεί ίση με τον βαθμό κορεσμού. Με βάση όσα έχουν ήδη παρουσιαστεί για την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής των εδαφικών υλικών με τη μύζηση και τον βαθμό κορεσμού, μια τέτοια συσχέτιση δεν μπορεί να είναι αληθής για όλες τις κατηγορίες των εδαφικών υλικών, αφού δεν μπορεί να προβλέψει όλα τα είδη της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση για μηδενική ολική τάση (περαιτέρω αύξηση με μικρότερο ρυθμό, σταθεροποίηση, μείωση μέχρι σταθερή τιμή ή μείωση μέχρι μηδενική τιμή). Οι Oberg & Sallfors (1997) άλλωστε την πρότειναν μόνο για αμμώδη και μή πλαστικά ιλυώδη εδάφη, ενώ οι Vanapalli & Fredlund (2000) κατά την παραμετρική ανάλυση πολλών από τις εξισώσεις του Πιν. 6.2 κατέληξαν ότι η εξίσωση αυτή είχε τη μικρότερη ικανότητα πρόβλεψης της διατμητικής αντοχής και μάλιστα μόνο για πολύ περιορισμένο εύρος τιμών της μύζησης κοντά στο 0.

Οι Lee, et al. (2005) πρότειναν εναλλακτικά τις Εξ. 6.14α και 6.14β ανάλογα με το αν η μύζηση

στο εδαφικό υλικό είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την πίεση διείσδυσης αέρα. Με το σκεπτικό που έχει εξηγηθεί ως τώρα (βλ. Παρ. 6.2) ένας τέτοιος διαχωρισμός αποτελεί μάλλον πλεονασμό. Ταυτόχρονα, ο δεύτερος όρος στην Εξ. 6.14β ο οποίος εκφράζει τη συμμετοχή της μύζησης πέραν της πίεσης διείσδυσης αέρα, είναι πρακτικά όμοιος με τον δεύτερο όρο στη γενική εξίσωση (Εξ. 6.7) με τη διαφορά ότι αντί για τη μύζηση  $u_a - u_w$ , υπεισέρχεται η διαφορά της μύζησης στο εδαφικό υλικό από την πίεση διείσδυσης αέρα. Κατά τα άλλα ο γενικός όρος ΓΟ εμπλέκει και το κανονικοποιημένο ποσοστό υγρασίας  $\Theta$  όπως οι Fredlund, et al. (1996) στην Εξ. 6.9, το οποίο μεταφράζεται στην επιρροή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού, αλλά και εμμέσως την επιρροή της ολικής τάσης (εκτός από την άμεση επιρροή της που καταγράφεται στον πρώτο όρο όλων των εξισώσεων).

Η εξίσωση που προτάθηκε από την Vilar (2006) είναι η πιο εύκολη σε ό,τι αφορά την εκτίμηση των παραμέτρων που υπεισέρχονται για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής. Η παράμετρος  $a$  προσεγγίζεται πολύ καλά ως η συνεφαπτομένη της γωνίας διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου εδάφους και η παράμετρος  $b$  ως το αντίστροφο της διαφοράς της συνοχής μετά από ξήρανση μέχρι το παραμένον ποσοστό υγρασίας από τη συνοχή του πλήρως κορεσμένου εδάφους. Η σημασία του ορισμού της παραμέτρου  $b$  κατ' αυτόν τον τρόπο έγκειται στο ότι είναι δυνατή η εκτίμησή της μέσω συμβατικού εργαστηριακού εξοπλισμού, αφού η μεν ξήρανση των δοκιμίων μέχρι το παραμένον ποσοστό υγρασίας μπορεί να γίνει με έκθεσή τους στις ατμοσφαιρικές συνθήκες ώσπου να σταθεροποιηθεί το βάρος τους και η δοκιμή διάτμησης σε συμβατική συσκευή χωρίς έλεγχο της μύζησης, αφού το αποξηραμένο δοκίμιο έχει γίνει τόσο σκληρό που η συνοχή προκύπτει απευθείας από τη θραύση του χωρίς κατακόρυφο φορτίο.

## **6.8 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΕΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΜΥΖΗΣΗΣ**

### **6.8.1 Εισαγωγή**

Μετά την παρουσίαση στο κεφάλαιο αυτό των διατυπωμένων προσομοιωμάτων για την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής συναρτήσει του βαθμού κορεσμού, στην παράγραφο αυτή εισάγεται η επιρροή του βαθμού κορεσμού σε προβλήματα ευστάθειας πρανών παραθέτοντας παραδείγματα αναλύσεων ευσταθείας κατολισθήσεων και πρανών όπου ελήφθη υπόψη η επιρροή του βαθμού κορεσμού στη διατμητική αντοχή από τη διεθνή βιβλιογραφία. Η παράγραφος συνεχίζεται με την παρουσίαση της μεθοδολογίας για την εισαγωγή της επιρροής του βαθμού κορεσμού σε αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας κατολισθήσεων και τη σύγκριση των διαφορών των μέτρων σταθεροποίησης που προκύπτουν με βάση τα αποτελέσματα τέτοιων αναλύσεων με και χωρίς την εισαγωγή της επιρροής του βαθμού κορεσμού στη διατμητική αντοχή των σχηματισμών. Τέλος, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα μέτρησης της αυξημένης διατμητικής αντοχής ενός εδαφικού υλικού λόγω της παρουσίας μύζησης σε αυτό.

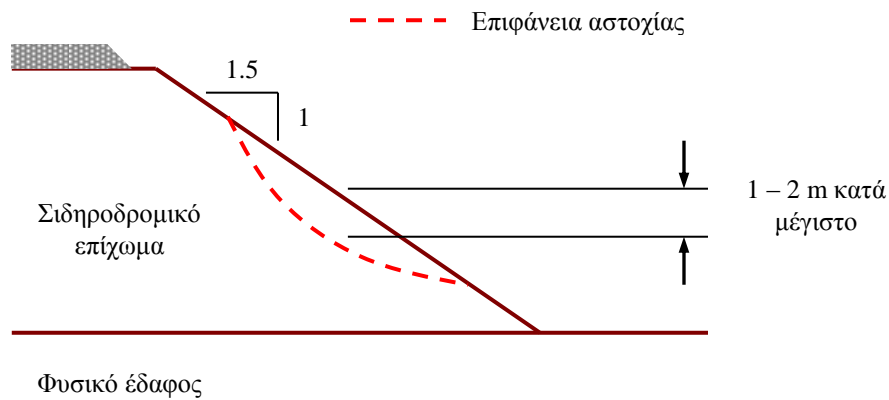
### **6.8.2 Παραδείγματα από τη διεθνή βιβλιογραφία**

Στην παράγραφο αυτή παρατίθενται διάφορα παραδείγματα κατολισθήσεων που καταγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία στις οποίες αποδείχτηκε ότι ο βαθμός κορεσμού και οι μεταβολές του έπαιζαν σημαντικό ρόλο στην εκδήλωση των φαινομένων, στην κατανόηση του μηχανισμού εκδήλωσής τους και την ανάλυσή του.

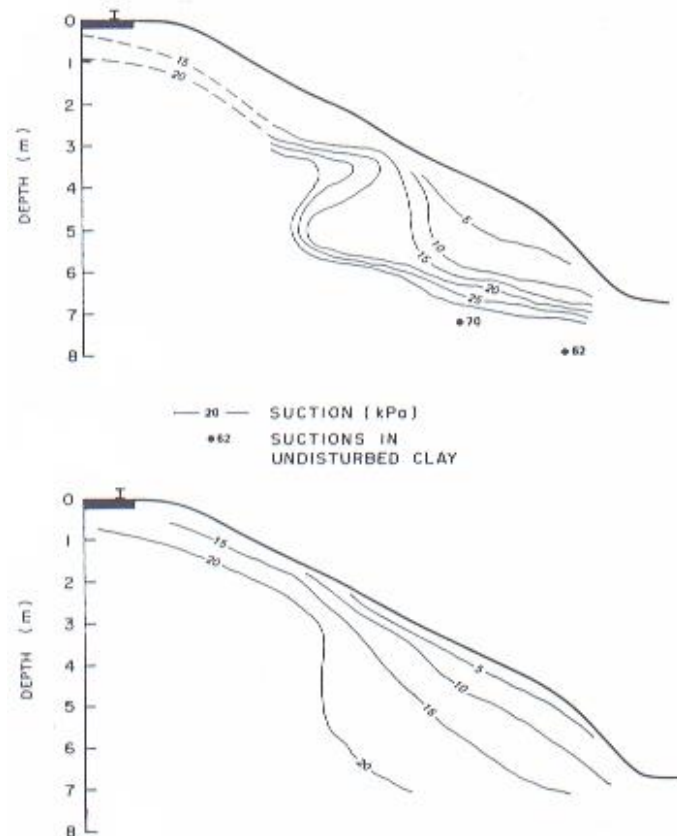
Το πρώτο παράδειγμα αφορά σε μία κατολίσθηση σιδηροδρομικού επιχώματος στον Καναδά, στη θέση Notch Hill (Krahn, et al., 1989). Σιδηροδρομικό επίχωμα κατασκευασμένο από συμπυκνωμένη ιλύ λιμναίας προέλευσης άρχισε να αστοχεί μετά από αρκετά χρόνια από την κατασκευή του. Τελικά εκδηλώθηκε ρηχή αστοχία και από τις δύο πλευρές του επιχώματος σε μήκος αρκετών χιλιομέτρων με πάχος κυμαινόμενο από 20 cm κατ' ελάχιστον έως 2 m κατά μέγιστο και μετακίνηση του κατολισθημένου υλικού για αρκετά μέτρα. Ο μηχανισμός αστοχίας που παρατηρήθηκε απεικονίζεται στο Σχ. 6.16. Τα πρανή του επιχώματος είχαν ύψος από 2 m έως 10 m και η κλίση τους ήταν 1:1.5 (κ:ο) που αντιστοιχεί σε γωνία κλίσης 33.7°. Αρχικά το

εδαφικό υλικό από το οποίο είχε κατασκευαστεί το επίχωμα είχε σημαντική «φαινόμενη» αντοχή λόγω αρνητικών πιέσεων πόρων. Με την προοδευτική απώλεια των αρνητικών πιέσεων πόρων η «φαινόμενη» αντοχή του υλικού μειώθηκε στην καθοριζόμενη από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του υλικού όταν αυτό ήταν πλήρως κορεσμένο, οι οποίες δεν επαρκούσαν για την ευστάθεια του επιχώματος, αφού αυτό ήταν κατασκευασμένο με πρηνή κλίση κοντά στην γωνία διατμητικής αντοχής του υλικού (το οποίο είχε συνοχή 0 όταν ήταν πλήρως κορεσμένο). Το υλικό από το οποίο είχε κατασκευαστεί το επίχωμα ήταν μη πλαστική ιλύς λιμναίας προέλευσης με 10 % άργιλο, 85 % ιλύ και 5 % άμμο. Η μέγιστη ξηρή πυκνότητά της (κανονική δοκιμή συμπύκνωσης Proctor) ήταν  $15.6 \text{ kN/m}^3$  για ποσοστό υγρασίας 21.5 %. Το υλικό είχε συμπυκνωθεί επιτόπου κατά την κατασκευή του επιχώματος πρακτικά στο 100 % της κανονικής δοκιμής συμπύκνωσης Proctor. Από δοκιμές τριαξονικής φόρτισης που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε ότι η ενεργός γωνία διατμητικής αντοχής για το πλήρως κορεσμένο υλικό ήταν  $35^\circ$  και η ενεργός τιμή της συνοχής 0. Από δοκιμές τριαξονικής φόρτισης υπό ελεγχόμενη μύζηση προέκυψε ότι η γωνία αύξησης της διατμητικής αντοχής με την μύζηση ήταν  $16^\circ$  (σημαντικά μικρότερη της  $\phi'$ ) για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες των 85 kPa. Εκτός από την εργαστηριακή διερεύνηση σε δείγματα του υλικού κατασκευής των επιχωμάτων πραγματοποιήθηκαν και επιτόπου μετρήσεις της μύζησης με тенσιόμετρα τύπου Quickdraw (βλ. Παρ. 3.7.2). Οι τιμές που μετρήθηκαν με το όργανο αυτό κυμαίνονταν από 5 έως 68 kPa με τάση μείωσης της μετρούμενης μύζησης να καταγράφεται προς την επιφάνεια των πρηνών του επιχώματος (βλ. Σχ. 6.17 με τις ισοβαρείς καμπύλες μύζησης στα πρηνά των επιχωμάτων). Πράγματι οι μετρήσεις αυτές της τιμής της μύζησης επιτόπου δικαιολογούν την απώλεια της διατμητικής αντοχής του επιχώματος κοντά στην επιφάνεια των πρηνών του αφού για συμπύκνωση κοντά στη βέλτιστη υγρασία ήταν λογική η ανάπτυξη μύζησης περί τα 50 kPa (αφού στη βέλτιστη υγρασία το συμπυκνωμένο υλικό είναι μή κορεσμένο) η οποία κοντά στην επιφάνεια των πρηνών είχε μειωθεί σημαντικά στα 5 έως 10 kPa, προφανώς λόγω της αύξησης του ποσοστού υγρασίας εξαιτίας της κατείδυσης ομβρίων υδάτων. Για τις υπολογισθείσες παραμέτρους διατμητικής αντοχής η πτώση αυτή της μύζησης ισοδυναμεί με μείωση του συντελεστή ασφαλείας έναντι επιφανειακής ολίσθησης όπως αυτή στο Σχ. 6.16 από μία τιμή περί το 3 σε μία τιμή περί τη μονάδα. Σε ό,τι αφορά την χρονική καθυστέρηση της εκδήλωσης των αστοχιών, όπως παρουσιάζεται στο Κεφ. 7, η μείωση του βαθμού κορεσμού επιφέρει και μείωση του συντελεστή διαπερατότητας σε τιμές τέτοιες που για ένα υλικό όπως αυτό από το οποίο ήταν κατασκευασμένο το συγκεκριμένο επίχωμα απαιτείτο σημαντικός χρόνος μέχρι την κατείδυση ομβρίων υδάτων σε τόσο βάθος που η αναπτυχθείσα κατά την συμπύκνωση μύζηση να μειωθεί σε τόσο χαμηλή τιμή ώστε να επέλθει η αστοχία του επιχώματος.





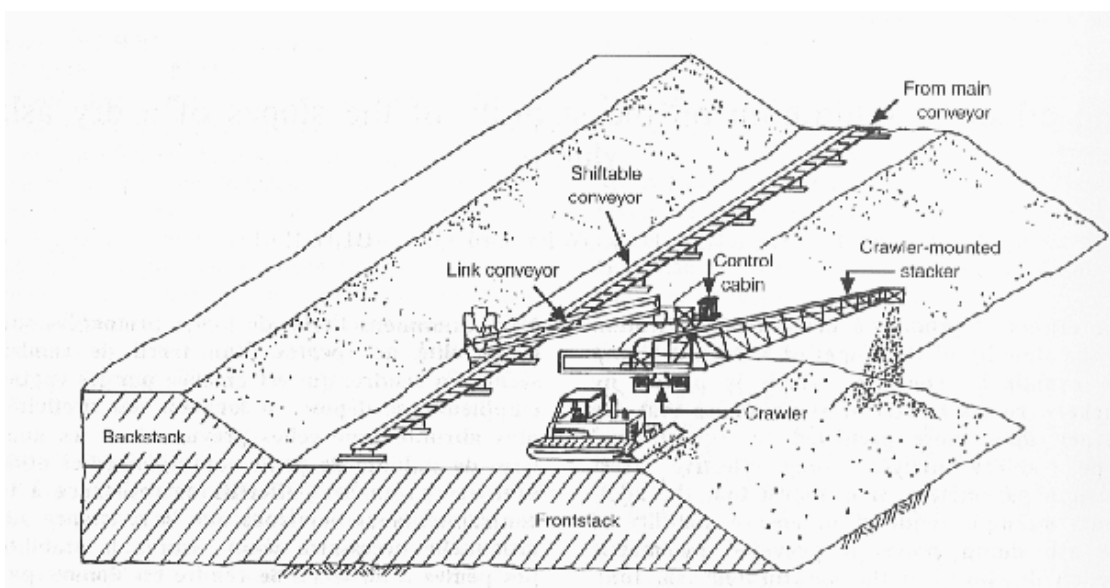
**Σχήμα 6.16.** Τυπικός μηχανισμός αστοχίας του σιδηροδρομικού επίχωματος του Notch Hill στον Καναδά (με βάση τους Krahn, et al., 1989).



**Σχήμα 6.17.** Ισοβαρείς καμπύλες μύζησης στα πρανή του σιδηροδρομικού επίχωματος του Notch Hill στον Καναδά (Krahn, et al., 1989).

Το δεύτερο παράδειγμα αφορά σε αβαθείς αστοχίες στα πρανή απόθεσης ξηρής τέφρας ανθρακωρυχείου στη Ν. Αφρική (Fourie, et al., 1999). Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής

ενέργειας από λιθάνθρακες στο Lethabo της Ν. Αφρικής παράγει τέφρα η οποία προ της απόθεσής της υγραίνεται για τον έλεγχο της σκόνης, ώστε το ποσοστό υγρασίας της να φτάσει τιμές μεταξύ 15 και 30 % και εν συνεχεία αποτίθεται χωρίς συμπύκνωση σε πρανή με ελεύθερα διαμορφούμενη κλίση από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του υλικού (Σχ. 6.18). Η γωνία κλίσης των σχηματιζόμενων με αυτό τον τρόπο απόθεσης πρανών είναι περίπου 37°. Από τις εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των παραμέτρων διατμητικής αντοχής προέκυψαν τιμές  $c' = 0$  και  $\phi' = 34^\circ$ , με δεδομένες τις οποίες ανακύπτει το ερώτημα πως σχηματίζονται πρανή μεγαλύτερης κλίσης (37°). Αρχικές έρευνες των ιδιοτήτων του υλικού εστίαστηκαν στην δυνατότητα ανάπτυξης επιπλέον διατμητικής αντοχής λόγω ποζολανικής σκλήρυνσης (pozzolanic hardening) η οποία θα δικαιολογείτο από την παρουσία ποσοστού υδρασβέστου μέσα στην τέφρα. Το ενδεχόμενο αυτό όμως αποκλείστηκε καθώς αποδείχθηκε ότι παρόλο που θα ήταν δυνατή η εμφάνιση ενός τέτοιου φαινομένου, δεν θα μπορούσε να συμβεί τόσο σύντομα ώστε να αναπτυχθεί αυτή η επιπλέον αντοχή κατά την απόθεση της τέφρας. Ταυτόχρονα, οι αστοχίες των πρανών της απόθεσης είχαν την μορφή επίπεδων αστοχιών μικρού βάθους (έως 2 m) κατά μήκος της επιφάνειας του πρανούς, οι οποίες εκδηλώνονταν κατά την διάρκεια και αμέσως μετά από επεισόδια βροχόπτωσης. Επιτόπου μετρήσεις της μύζησης απεκάλυψαν ότι η επιπλέον αντοχή που επέτρεπε την διαφορά μεταξύ της γωνίας κλίσης του πρανούς και της γωνίας διατμητικής αντοχής οφειλόταν στην μύζηση που είχε αναπτυχθεί μέσα στην τέφρα λόγω του ποσοστού υγρασίας στο οποίο περιερχόταν πριν την απόθεσή της και η απώλεια αυτής της μύζησης λόγω επεισοδίων βροχόπτωσης οδηγούσε σε ραγδαία μείωση του συντελεστή ασφαλείας από τιμές περί το 3 σε τιμές πρακτικά ίσες με την μονάδα.



**Σχήμα 6.18.** Διαδικασία απόθεσης ξηρής τέφρας στο ανθρακωρυχείο Lethabo της Ν. Αφρικής (Fourie, et al., 1999).

Το τρίτο παράδειγμα αφορά επίσης σε αβαθείς αστοχίες, συγκεκριμένα δύο με μηχανισμό αστοχίας όπως αυτόν που φαίνεται στο Σχ. 6.16 για την αστοχία που κατέγραψαν οι Krahn, et al. (1989), αλλά οι οποίες εκδηλώθηκαν σε πρανές ορύγματος αυτοκινητοδρόμου στο Virden της Manitoba στον Καναδά (Blatz, et al., 2004). Το μέγιστο βάθος των δύο κατολισθήσεων ήταν 3.5 m, τα πρανή είχαν εκσκαφθεί περίπου 30 χρόνια πριν από την εκδήλωση των αστοχιών με κλίση 1:3.4 (κ:ο) δηλαδή περίπου 17°, και λίγο πριν συμβούν αυτές το 1999 είχαν εκδηλωθεί έντονες βροχοπτώσεις πολύ μεγάλης διάρκειας. Τα υλικά κατολίσθησης αποτελούνταν κυρίως από αργιλώδη ιλύ με παρουσία χονδρόκοκκων τεμαχών αργιλώδους σχιστολίθου (ιζηματογενούς) και άλλων πυριτικών και μεταμορφωμένων υλικών κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (και κυρίως κοντά στην επιφάνεια του φυσικού εδάφους εκτός ορύγματος), η παρουσία των οποίων ήταν ενδεικτική της παγετωνικής δράσης που είχε συμβεί στην επιφάνεια του σχηματισμού. Εργαστηριακές αστράγγιστες δοκιμές τριαξονικής θλίψης με στερεοποίηση και μέτρηση της πίεσης πόρων και απευθείας βραδείας διάτμησης με στερεοποίηση οδήγησαν σε συνοχή περί το 0 και γωνία διατμητικής αντοχής 20-21°. Ο μηχανισμός αστοχίας των δύο κατολισθήσεων είχε παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με αυτόν που αναφέρουν οι Krahn, et al. (1989), δηλαδή οφρύ κατάντη της οφρύος του ορύγματος και πόδα ανάντη του ποδός του ορύγματος. Η γεωτεχνική έρευνα που ακολούθησε τις δύο αστοχίες και περιελάμβανε γεωτρήσεις και ερευνητικά φρέατα εντός της κατολισθημένης μάζας αποκάλυψε την επιφάνεια ολίσθησης καθώς και ίχνη παλαιότερης μετακίνησης σημαντικού μεγέθους με εμφανείς υπολλειμματικές γραμμώσεις (slickensides) υποδηλώνοντας ότι οι δύο κατολισθήσεις, ήταν επανενεργοποιημένες παλαιοκατολισθήσεις (παρά την μικρή τους μάζα). Στα τοιχώματα των ερευνητικών φρεάτων εντός της κατολίσθησης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της μύζησης με τενσιόμετρα τύπου Quickdraw (βλ. Παρ. 3.7.2). Οι τιμές που μετρήθηκαν με το όργανο αυτό κυμαίνονταν από 0 περί την επιφάνεια ολίσθησης έως 75 kPa σε βάθος περί το 0.5m από την επιφάνεια του εδάφους. Κοντά στην επιφάνεια ολίσθησης βρισκόταν υποκείμενο στρώμα μεγαλύτερης διαπερατότητας (ιλυώδης λεπτή άμμος), το οποίο συνιστούσε επιλεκτική δίοδο του νερού που επέτρεπε την μείωση της μύζησης στην περιοχή του στρώματος αυτού, οπότε και στην επιφάνεια ολίσθησης που βρισκόταν κοντά του. Η παρουσία του στρώματος αυτού μέσω αυτής της λειτουργίας του αποδείχθηκε καθοριστική για την επανενεργοποίηση των δύο κατολισθήσεων όταν η κατείδυση ξεπέρασε μία κρίσιμη τιμή που καθορίστηκε από την ένταση και την διάρκεια των επεισοδίων βροχόπτωσης πριν από την εκδήλωση των κατολισθήσεων. Οι Blatz, et al. (2004) αξιοποίησαν τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας υπαίθρου για να προσομοιώσουν με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το καθεστώς των πιέσεων πόρων στην περιοχή των κατολισθήσεων και μέσω της προσομοίωσης της εξέλιξης του συναρτήσει των

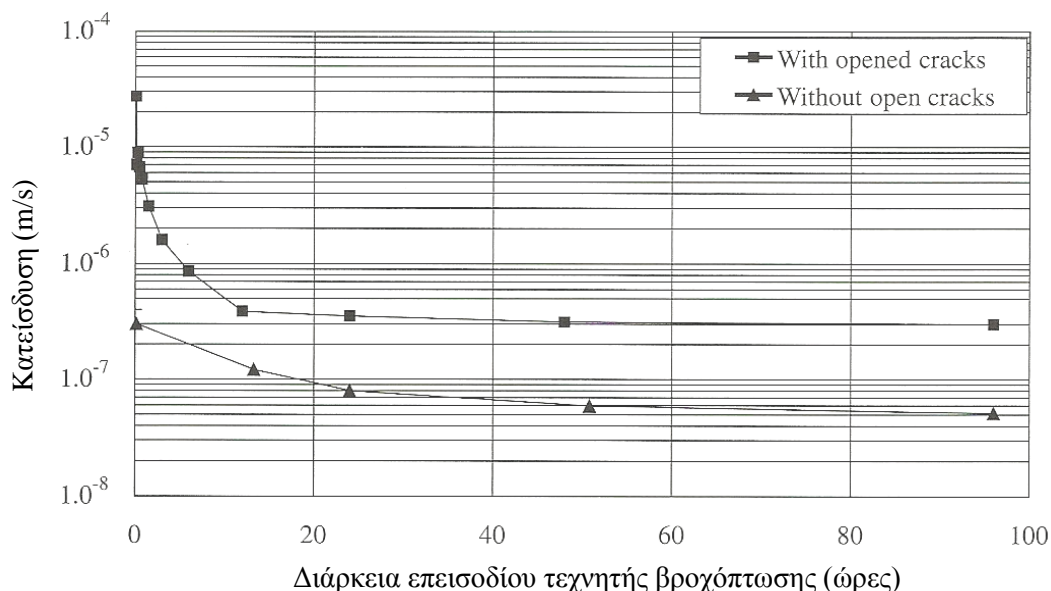
βροχομετρικών δεδομένων που είχαν διαθέσιμα από την περίοδο αμέσως πριν την εκδήλωση των αστοχιών προσομοίωσαν την εξέλιξη του συντελεστή ασφαλείας μέχρι την αστοχία (όπως τον υπολόγιζαν με την μέθοδο οριακής ισορροπίας με εισαγωγή των αρνητικών και θετικών πιέσεων πόρων που προέκυψαν από τις αναλύσεις με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για κάθε στάδιο). Η συγκεκριμένη αναφορά αποτελεί χαρακτηριστική καταγεγραμμένη απόπειρα αναπαραγωγής του καθεστώτος πιέσεων πόρων (θετικών και αρνητικών) πριν την εκδήλωση μίας πραγματικής αστοχίας, προκειμένου να προβλεφθεί ο αρχικός συντελεστής ασφαλείας και η εξέλιξη του συναρτήσει της απώλειας της μύζησης που προκάλεσε η κατείδυση κατά την διάρκεια των έντονων επεισοδίων βροχόπτωσης. Στα πλαίσια αυτά οι Blatz, et al. (2004) ξεκίνησαν την διαδικασία προσομοίωσης με την βαθμονόμηση των τιμών του συντελεστή διαπερατότητας στο προσομοίωμα της υπόγειας ροής για τα διαθέσιμα στοιχεία αρνητικών και θετικών πιέσεων πόρων πριν τα έντονα επεισόδια βροχόπτωσης και την εκδήλωση των αστοχιών. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί τον ορθό τρόπο προσέγγισης της περιγραφής της εκδήλωσης τέτοιων κατολισθητικών φαινομένων, υπό την βασική προϋπόθεση ότι προηγείται η βαθμονόμηση που προαναφέρθηκε. Οι Bardanis & Dounias (2004), οι Μπαρδάνης, και λοιποί (2006α & 2006β) και οι Bardanis, et al. (2009) έχουν περιγράψει λεπτομερώς τη σκοπιμότητα αλλά και τη διαδικασία τέτοιων βαθμονομήσεων αριθμητικών προσομοιωμάτων που περιγράφουν περίπλοκα πεδία πιέσεων πόρων σε μή ή πλήρως κορεσμένα εδάφη (στην προκειμένη περίπτωση μή γραμμικές κατανομές πίεσης πόρων σε σχηματισμούς με ανομοιογενή συντελεστή διαπερατότητας με ανισοτροπία στην βάση του σχηματισμού λόγω παρουσίας επιφάνειας ολίσθησης και υποστράγγιση).

Στα πλαίσια της ορθής προσομοίωσης του καθεστώτος των πιέσεων πόρων (αρνητικών ή θετικών) και της εξέλιξής του συναρτήσει της έντασης και διάρκειας επεισοδίων βροχόπτωσης έχουν αναπτυχθεί διατάξεις πλήρους κλίμακας εντατικών μετρήσεων πιέσεων, ποσοτών υγρασίας, βροχοπτώσεων και επιφανειακών απορροών σε φυσικά και τεχνητά πρανή. Οι διατάξεις αυτές δεν επιτρέπουν την ερμηνεία κατολισθητικών φαινομένων απευθείας, αφού υλοποιούνται σε ευσταθή πρανή (παρόλο που έχουν καταγραφεί και περιπτώσεις πρανών με τέτοιες διατάξεις παρακολούθησης στις οποίες το πρανές οδηγήθηκε τελικά στην αστοχία), αλλά παρέχουν πλήρη στοιχεία για την κατανόηση της επιρροής των επεισοδίων βροχόπτωσης στην αρνητική πίεση πόρων και τη μύζηση μέσα στο μή κορεσμένο έδαφος, συναρτήσει της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού αλλά και της καμπύλης μεταβολής του συντελεστή διαπερατότητας με τη μύζηση (βλ. Κεφ. 7).

Οι Tsaparas, et al. (2003) παρουσίασαν αποτελέσματα μετρήσεων βροχοπτώσεων και επιφανειακών επιρροών διάρκειας 12 μηνών σε δύο πρανή ορυγμάτων σε ελλουβιακά εδάφη στην Σιγκαπούρη, καθώς και των προσομοιώσεων του καθεστώτος των πιέσεων πόρων σε αυτά τα πρανή που ακολούθησαν. Τα όργανα παρακολούθησης που εγκαταστάθηκαν περιελάμβαναν ομάδες тенσιομέτρων με την κεφαλή του καθενός να καταλήγει σε διάφορα βάθη στο ίδιο σημείο του κάθε πρανού (τα βάθη εκτεινόταν από 0.5 έως 3.2 m), πιεζόμετρο ανοικτού τύπου για τον προσδιορισμό της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα, βροχογράφο, διάταξη μέτρησης της επιφανειακής απορροής, αλλά στο ένα από τα δύο πρανή ακόμα και σύστημα καταιωνισμού για τη δημιουργία τεχνητής βροχόπτωσης. Τα αποτελέσματα της υλοποίησης τεχνητής βροχόπτωσης παρουσιάστηκαν από τους Rahardjo, et al. (2005) με την προσθήκη μάλιστα παρακολούθησης του ποσοστού υγρασίας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους μέσω ηλεκτρομαγνητικών αισθητήρων (TDR, βλ. Παρ. 3.5.4).

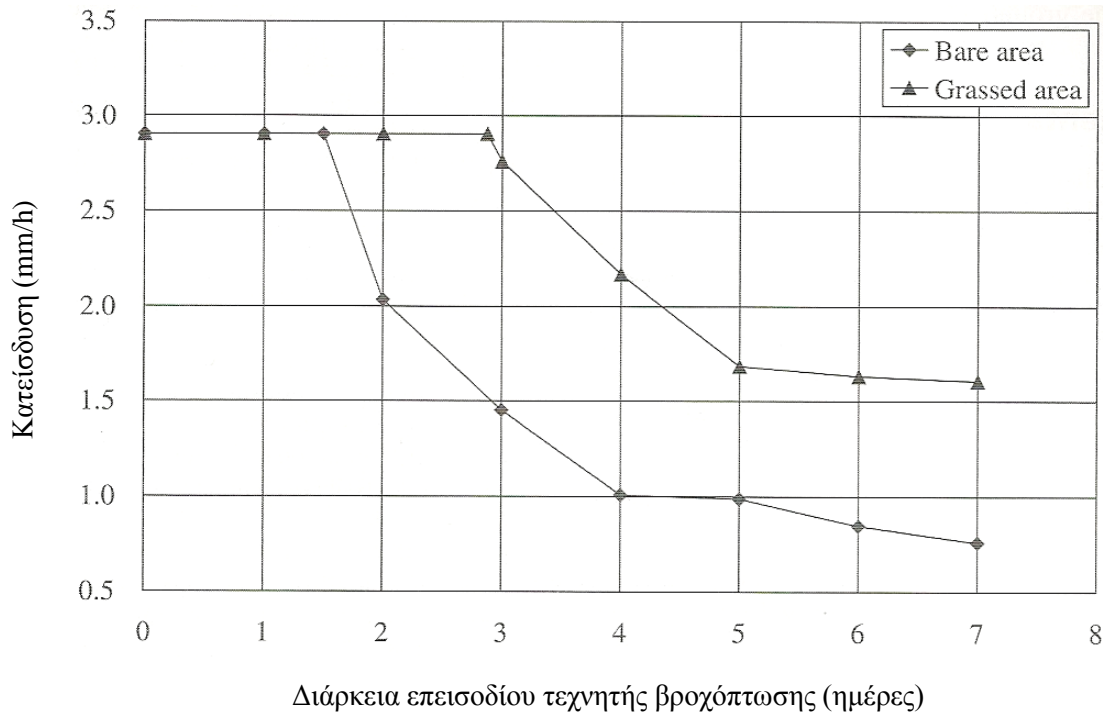
Παρόμοιες προσπάθειες παρακολούθησης της επιρροής επεισοδίων τεχνητής βροχόπτωσης στο καθεστώς των πιέσεων πόρων κοντά στην επιφάνεια του εδάφους ενός πρανού ορύγματος κλίσης 1:2.5 (κ:ο) και μέγιστου ύψους 11 m μέσω υλοποίησης διατάξεων παρακολούθησης μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας παρουσιάστηκαν και από τους Ng, et al. (2003) και Zhan, et al. (2007). Η τοποθεσία βρισκόταν στην επαρχία Hubei στην Κίνα, σε μία ημιορημική περιοχή (semi-arid) και το κύριο εδαφικό υλικό στο πρανές ήταν μία καφεκίτρινη διογκώσιμη άργιλος, ενώ το ενδιαφέρον στοιχείο εντοπίζεται ότι στο ίδιο πρανές συνέβησαν αβαθείς κατολισθήσεις με μηχανισμό αστοχίας παρόμοιο με αυτό που περιέγραψαν οι Blatz, et al. (2004), λόγω των επεισοδίων τεχνητής βροχόπτωσης που επιβλήθηκαν. Το εδαφικό υλικό είχε όριο υδαρότητας 51%, δείκτη πλαστικότητας 31, ποσοστό ελεύθερης διόγκωσης υπό μονοδιάστατες συνθήκες 6-8% και πίεση διόγκωσης υπό σταθερό όγκο 300-400 kPa. Το σύστημα καταιωνισμού μέσω του οποίου υλοποιήθηκαν επεισόδια τεχνητής βροχόπτωσης υλοποιήθηκε και σε τμήματα του πρανού στα οποία υπήρχε εκτεταμένο δίκτυο επιφανειακών ρωγμών λόγω συρρίκνωσης του εδάφους και σε τμήματα στα οποία δεν υπήρχαν –τουλάχιστον οφθαλμοφανείς- ρωγμές, αλλά και σε τμήματα καλυμμένα με γρασίδι και σε τμήματα χωρίς γρασίδι. Η σύγκριση των καταγραφέντων ρυθμών κατείσδυσης ανάμεσα στα τμήματα του πρανού με και χωρίς ρωγμές παρουσιάζονται στο Σχ. 6.19. Στο τμήμα εκείνο που δεν υπήρχαν ρωγμές, ο ρυθμός κατείσδυσης είχε μία αρχική τιμή πολύ κοντά στην τελική του τιμή, η οποία πρακτικά ταυτίζεται με την τιμή του συντελεστή διαπερατότητας του πλήρως κορεσμένου εδαφικού υλικού. Αντίθετα, στο τμήμα εκείνο που υπήρχαν ρωγμές, ο ρυθμός κατείσδυσης είχε μία αρχική τιμή περίπου τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την τελική τιμή, η οποία είναι

μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από την τελική τιμή στο τμήμα του πρανούς χωρίς ρωγμές. Σημαντική είναι και η διαφορά στον χρόνο μέσα στον οποίο επιτεύχθηκε πρακτικά η μεταβολή από την αρχική τιμή του ρυθμού κατείδυσης μέχρι την τελική: περίπου 12 h για το τμήμα του πρανούς με ρωγμές και 24 h για το τμήμα του πρανούς χωρίς ρωγμές. Η σύγκριση των καταγραφέντων ρυθμών κατείδυσης ανάμεσα στα τμήματα του πρανούς με και χωρίς γρασίδι παρουσιάζονται στο Σχ. 6.20. Στο τμήμα με γρασίδι, η κατείδυση διατηρήθηκε για τρεις ημέρες πριν αρχίσει να μειώνεται (και ταυτόχρονα να αυξάνεται η επιφανειακή απορροή), ενώ στο τμήμα χωρίς γρασίδι διατηρήθηκε μόλις για μιάμιση ημέρα και στη συνέχεια μειώθηκε σε σημαντικά μικρότερη τιμή από εκείνη στην οποία κατέληξε ο ρυθμός για την περιοχή με γρασίδι (περίπου 4 φορές μικρότερη). Οι μετρήσεις μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας από τα τενσιόμετρα και τους αισθητήρες ηλεκτρομαγνητικής μέτρησης του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας (Theta probes)<sup>6</sup> έδειξαν ότι το μέγιστο βάθος επιρροής της βροχόπτωσης ήταν περί τα 3.5 m, στο τέλος της τεχνητής βροχόπτωσης μετά από 7 ημέρες είχαν αναπτυχθεί θετικές πιέσεις πόρων μέσα σε αυτήν την ζώνη ειδικά προς τα κατάντη του πρανούς (ξεκινώντας από τιμές μέχρι και 70 kPa μύζησης πριν την έναρξη των τεχνητών επεισοδίων βροχόπτωσης) και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας αυξήθηκε από τιμές μεταξύ 33 και 36% σε τιμές μεταξύ 41 και 46%. Η αύξηση των πιέσεων πόρων ειδικά προς τα κατάντη του πρανούς οφειλόταν στην



**Σχήμα 6.19.** Εξέλιξη της κατείδυσης με την διάρκεια του επεισοδίου τεχνητής βροχόπτωσης σε τμήμα πρανούς με ρωγμές λόγω συρρίκνωσης στην επιφάνεια και τμήμα του ίδιου πρανούς χωρίς ρωγμές (Zhan, et al., 2007).

<sup>6</sup> Και εδώ η διάταξη των οργάνων συμπληρωνόταν από βροχογράφο και διάταξη μέτρησης της επιφανειακής απορροής των υδάτων.



**Σχήμα 6.20.** Εξέλιξη της κατείδυσης με την διάρκεια του επεισοδίου τεχνητής βροχόπτωσης σε τμήμα πρανούς χωρίς φυτοκάλυψη και τμήμα του ίδιου πρανούς καλυμμένο με γρασίδι (Zhan, et al., 2007).

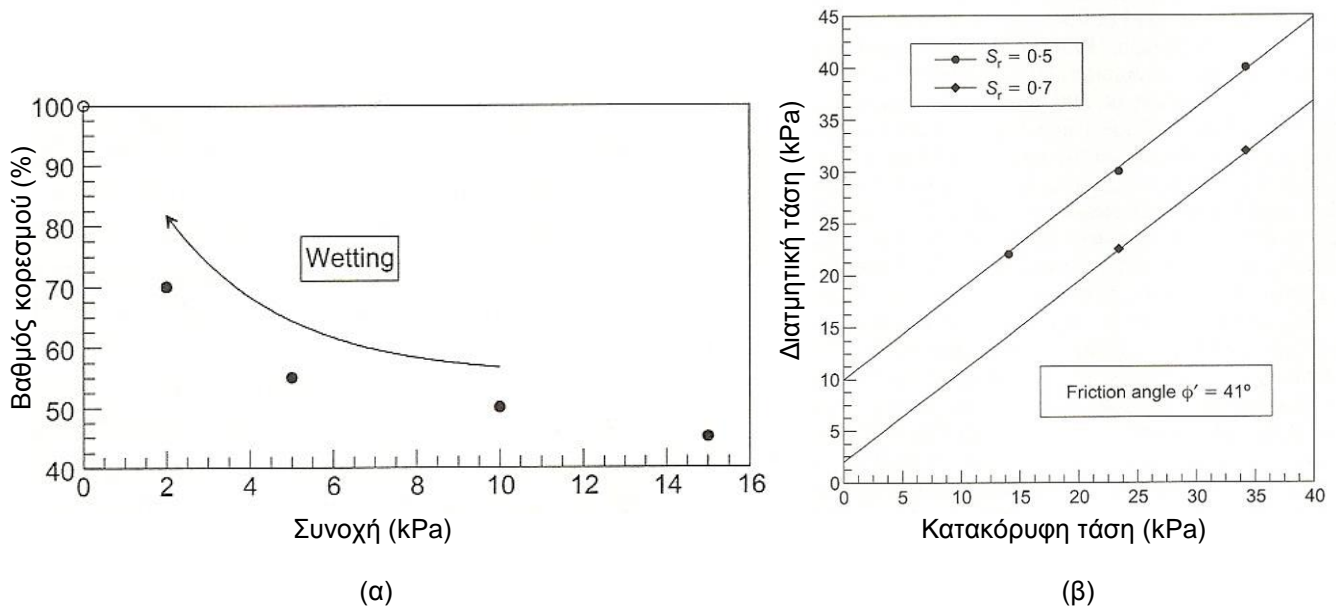
ανάπτυξη σημαντικής ροής κατά μήκος του νοητού επιπέδου κλεισίματος των ρωγμών κάτω από την επιφάνεια του πρανούς και σε εκείνο το βάθος παρουσιάστηκε αύξηση των μετακινήσεων στο κλισιόμετρο που είχε τοποθετηθεί. Παρόμοιες παρατηρήσεις και για τις πιέσεις πόρων και για τις τιμές του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας περί τον πόδα έκαναν και οι Rahardjo, et al. (2005), χωρίς όμως συγκρίσεις με δεδομένα κλισιομέτρων αφού το πρανές με εκείνη την διάταξη δεν έφτασε έως την αστοχία.

Ένα άλλο παράδειγμα πρανούς που οδηγήθηκε μέχρι την αστοχία υπό επεισόδια τεχνητής βροχόπτωσης αναφέρεται από τους Springman, et al. (2003). Οι Springman, et al. (2003) εγκατέστησαν διατάξεις μέτρησης της μύζησης και προσομοίωσης επεισοδίων βροχόπτωσης σε δύο πρανή μέσα σε μοραίνες σε μεγάλο υψόμετρο στις ελβετικές Άλπεις. Το ένα πρανές είχε κλίση περί τις  $31^\circ$  και  $100 \text{ m}^2$  έκταση και το άλλο περί τις  $42^\circ$  και  $55 \text{ m}^2$  έκταση. Το υλικό της μοραίνης ήταν παρόμοιο και στα δύο πρανή και περιείχε κατά μέσο όρο περί το 20% λίθους, περί το 40% χάλικες, περί το 20% άμμο και περί το 20% αργιλοϊλύ, με την άργιλο όμως να περιορίζεται μόλις στο 2-3%. Το ξηρό φαινόμενο βάρος του υλικού ήταν περί τα  $20 \text{ kN/m}^3$ , η φυσική του υγρασία περί το 4.5% και ο λόγος κενών του περί το 0.30. Οι διατάξεις

παρακολούθησης περιελάμβαναν ηλεκτρομαγνητικούς αισθητήρες (TDR, βλ. Παρ. 3.5.4) και тенσιόμετρα σε διάφορα βάθη, βροχογράφους και μηκυνσιόμετρα για την μέτρηση παραμορφώσεων στα δύο πρανή. Το σύστημα εφαρμογής επεισοδίων τεχνητής βροχόπτωσης εφάρμοσε παροχές 10 mm/h για μία εβδομάδα με εξάρσεις στα 30 και τα 40 mm/h. Με βάση τα βροχομετρικά δεδομένα από τον πλησιέστερο βροχομετρικό σταθμό στα δύο πρανή οι παρατηρηθείσες μέγιστες εντάσεις διήμερων και επταήμερων επεισοδίων βροχόπτωσης ήταν 5.9 και 2.3 mm/h αντίστοιχα, ενώ με βάση τα ίδια στοιχεία η πρόβλεψη μέγιστης έντασης διήμερων και επταήμερων επεισοδίων βροχόπτωσης ήταν 9.0 και 3.5 mm/h αντίστοιχα. Από την παρακολούθηση της μύζησης και των υπολοίπων στοιχείων, προέκυψε ότι με το επτάήμερο επεισόδιο τεχνητής βροχόπτωσης η μύζηση μειώθηκε από αρχικές τιμές μεταξύ 22 και 32 kPa σε τιμές 3 έως 10 kPa, και ο βαθμός κορεσμού αντίστοιχα αυξήθηκε από αρχικές τιμές μεταξύ 60 και 70% σε τιμές 80 έως 90%. Για την εκτίμηση των μεταβολών αυτών στην διατμητική αντοχή του υλικού εκτελέστηκαν δοκιμές άμεσης διάτμησης σε μεγάλα δοκίμια 250 επί 250 mm με την επιφάνεια διάτμησης σε ύψος 100 mm από την βάση των δοκιμίων υπό διάφορες σταθερές τιμές του ποσοστού υγρασίας και κατά συνέπεια του βαθμού κορεσμού. Οι δοκιμές αυτές έδειξαν ότι η συνοχή του υλικού της μοραίνης από πρακτικά μηδενική τιμή για τιμές του βαθμού κορεσμού μεγαλύτερες του 75-80% φτάνει ακόμα και τα 15 kPa για τιμές του βαθμού κορεσμού κάτω από 50% (Σχ. 6.21α), ενώ η τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής παραμένει σταθερή, περί τις 41° (Σχ. 6.21β). Εκτός από τις δοκιμές άμεσης διάτμησης πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές τριαξονικής φόρτισης σταθερού ποσοστού υγρασίας σε μεγάλα δοκίμια (διάμετρος 250mm και ύψος 500mm) με κόκκους μέγιστης διαμέτρου 45mm. Στις δοκιμές αυτές για να προσομοιωθεί η διαδικασία της κατείσδυσης υπογείων υδάτων (η οποία φυσικά πραγματοποιείται υπό πρακτικά σταθερή κατακόρυφη τάση<sup>7</sup>) διατηρείτο σταθερή η διεκτροπική τάση  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ , και μειωνόταν η μέση τάση  $p = (\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')/3$ . Από τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών προέκυψε κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης 1.59 από την οποία υπολογίστηκε γωνία διατμητικής αντοχής 39°. Με βάση τα στοιχεία αυτά οι Springman, et al. (2003) αξιολόγησαν την συμπεριφορά των δύο πρανών διαφορετικής κλίσης εξηγώντας την σταθερότητα του πρανούς κλίσης 31° και την αστάθεια που επήλθε στο πρανές κλίσης 42° υπό την τεχνητή βροχόπτωση που προκάλεσαν.

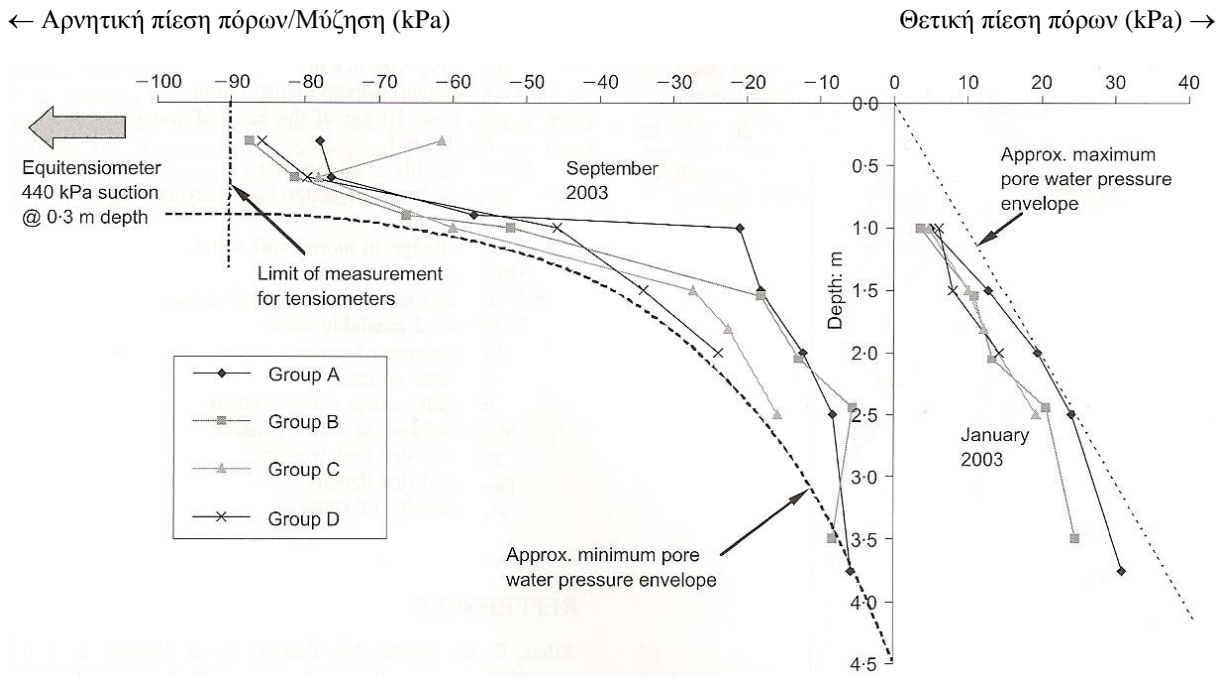
<sup>7</sup> Η αύξηση της κατακόρυφης τάσης λόγω της μεταβολής του φαινομένου βάρους πάνω από το βάθος που ενδιαφέρει, εξαιτίας της αύξησης του ποσοστού υγρασίας εκεί θεωρείται αμελητέα.



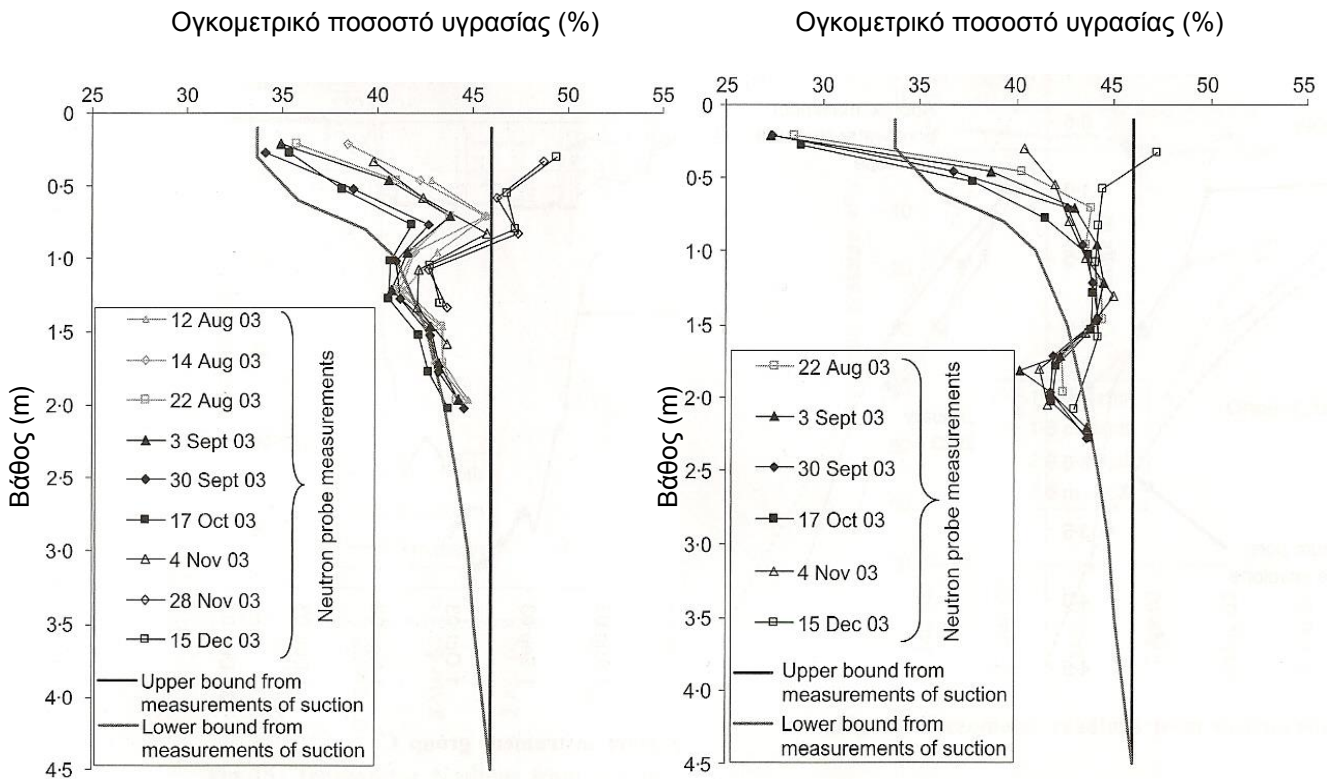


**Σχήμα 6.21.** α) Εξέλιξη της συνοχής με τον βαθμό κορεσμού κατά την ύγρανση, και β) περιβάλλουσες διατμητικής αντοχής, όπως προέκυψαν από δοκιμές άμεσης διάτμησης με δοκίμια μεγάλου μεγέθους σε υλικό μοραίνης από τους Springman, et al. (2003).

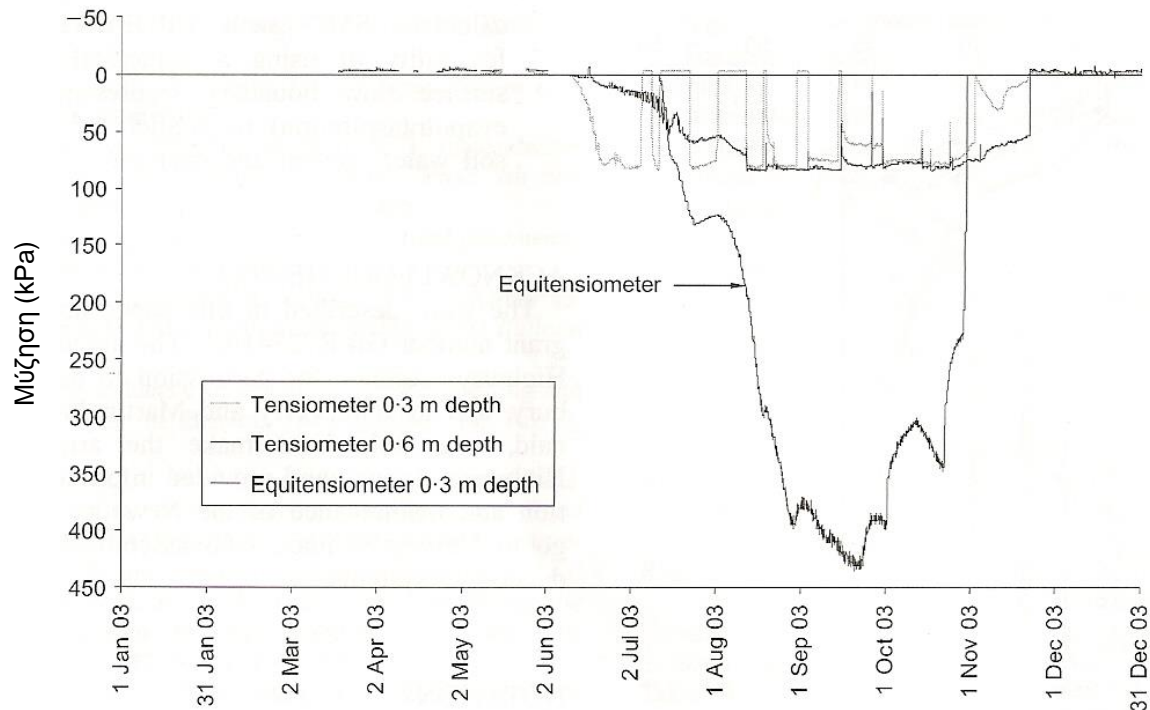
Οι Smethurst, et al. (2006) παρουσίασαν τα αποτελέσματα από επιτόπου μετρήσεις μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας σε ένα πρανές αυτοκινητοδρόμου στην Βρετανία. Το πρανές ήταν διαμορφωμένο μέσα σε Άργιλο Λονδίνου. Τα όργανα παρακολούθησης που εγκαταστάθηκαν περιελάμβαναν ομάδες тенσιομέτρων και πιεζομέτρων δονούμενης χορδής με την κεφαλή του καθενός να καταλήγει σε διάφορα βάθη στο ίδιο σημείο του κάθε πρανούς (τα βάθη εκτεινόταν από 0.5 έως 2.5 m για τα тенσιόμετρα και 1.0 έως 2.5 m για τα πιεζόμετρα), βροχογράφο, διάταξη μέτρησης της επιφανειακής απορροής, ηλεκτρομαγνητικούς αισθητήρες για τη μέτρηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας σε διάφορα βάθη (Theta Probes), ηλεκτρομαγνητικούς αισθητήρες μέτρησης της μύζησης (Equitensimeters) και τέλος σημεία πρόσβασης για μετρήσεις του ποσοστού υγρασίας με πυρηνικές μεθόδους (neutron probe method). Οι μετρήσεις που πραγματοποίησαν εκτεινόταν χρονικά σε ένα πλήρες ημερολογιακό έτος (2003) για το οποίο μπόρεσαν να προσδιορίσουν τα όρια των κατανομών πίεσης πόρων (Σχ. 6.22) και του ποσοστού υγρασίας (Σχ. 6.23) με το βάθος. Ταυτόχρονα, έχοντας εγκαταστήσει όργανα με ικανότητα μέτρησης τιμών της μύζησης μεγαλύτερων από 100 kPa (Equitensimeters) πέτυχαν να καταγράψουν τις μέγιστες τιμές των αναπτυσσόμενων τιμών της μύζησης κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, για μία χώρα με τόσο υγρό κλίμα όπως η Βρετανία (Σχ. 6.24).



Σχήμα 6.22. Όρια κατανομών πίεσης πόρων με το βάθος μέσα σε πρανές ορύγματος από Άργιλο Λονδίνου στην Βρετανία (Smethurst, et al., 2006).



Σχήμα 6.23. Όρια κατανομών ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας με το βάθος μέσα σε πρανές ορύγματος από Άργιλο Λονδίνου στην Βρετανία (Smethurst, et al., 2006).



**Σχήμα 6.24.** Μετρήσεις μύζησης καθ' όλη την διάρκεια του έτους 2003 με тенσιόμετρα εγκατεστημένα σε βάθος 0.3 και 0.6m και ηλεκτρομαγνητικό αισθητήρα (Equitensiometer) σε βάθος 0.3m σε πρανές ορύγματος από Άργιλο Λονδίνου στην Βρετανία (Smethurst, et al., 2006).

Στα συμπεράσματα από την παρακολούθηση αυτών των διατάξεων επιτόπου μετρήσεων περιλαμβάνονται:

- Υπάρχει ένα όριο βροχόπτωσης πάνω από το οποίο για κάθε πρανές (δηλ. για κάθε συνδυασμό κλίσης πρανούς, φυτοκάλυψης στην επιφάνεια και ιδιοτήτων επιφανειακού εδαφικού υλικού) παρουσιάζεται επιφανειακή απορροή και μέχρι εκείνο όλη η βροχόπτωση γίνεται κατείσδυση -Rahardjo, et al. (2005). Το όριο αυτό συναρτάται με την ένταση, αφού για να ισχύει αυτό πρέπει η τιμή της έντασης να είναι μικρότερη από τον συντελεστή διαπερατότητας του υλικού, υπό την αρνητική πίεση πόρων ή μύζηση που μπορεί να χει αναπτυχθεί σε αυτό.
- Το ποσοστό υγρασίας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους είναι πάντοτε μεγαλύτερο προς τον πόδα από όσο προς την οφρύ του πρανούς, ανεξαρτήτως έντασης και διάρκειας επεισοδίου βροχόπτωσης λόγω του μέρους εκείνου της ροής που συμβαίνει λόγω βαρύτητας -Rahardjo, et al. (2005).

- Ακόμα και σε χώρες με τόσο υγρό κλίμα όσο η Βρετανία, κατά τους θερινούς μήνες αναπτύσσονται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους τιμές της μύζησης που φτάνουν ακόμα και τα 400-450 kPa και μάλιστα όχι για μία συγκεκριμένη πολύ μικρή χρονική περίοδο αλλά για αρκετούς μήνες -Smethurst, et al. (2006).
- Ακόμα και σε ένα εδαφικό υλικό τόσο αδιαπέρατο όσο η Άργιλος Λονδίνου, μεταβολές στην μύζηση και γενικότερα την πίεση πόρων λόγω ξήρανσης από την επιφάνεια του εδάφους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, με τις συνεπακόλουθες μεταβολές στο ποσοστό υγρασίας, μπορούν να φτάσουν σε βάθος ακόμα και 4.5-5.0 m, συνοδευόμενες από τις αντίστοιχες μεταβολές στο ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας -Smethurst, et al. (2006).
- Οι αναλογίες από τα δύο τελευταία σημεία για συνθήκες αδιαπέρατων υλικών σε πολύ υγρό κλίμα, με το πολύ πιο ξηρό κλίμα άλλων χωρών (όπως η Ελλάδα) ή πιο διαπερατά εδαφικά υλικά στο ίδιο υγρό κλίμα ή ακόμα περισσότερο στο πιο ξηρό κλίμα άλλων χωρών, επιτρέπουν την εκτίμηση για το μέγεθος των αντίστοιχων μεγεθών σε αυτές τις χώρες (μέγιστες τιμές μύζησης, εύρος μεταβολών μύζησης και ποσοστού υγρασίας και μέγιστο βάθος εμφάνισης μεταβολών μεταξύ χειμερινών και καλοκαιρινών μηνών).
- Αντίστοιχες αναλογίες προκύπτουν και για τα μεγάλα υψόμετρα. Οι Springman, et al. (2003) επέδειξαν ότι ακόμα και σε ορεινές περιοχές με μεγάλη διάρκεια συνεχούς χιονοκάλυψης καθ'όλο το έτος, η ανάπτυξη και η απώλεια μύζησης εξηγούν την εμφάνιση βραχορροών σε μοραίνες.
- Εκτός αυτών των κύριων χαρακτηριστικών, τα οποία ουσιαστικά αξιολογούν την επιρροή κλιματολογικών συνθηκών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών για κάθε πρανές, επιμέρους χαρακτηριστικά όπως η παρουσία ή όχι φυτοκάλυψης του πρανού και η παρουσία δικτύου ρωγμών λόγω συρρίκνωσης στην επιφάνεια του εδάφους επηρεάζουν το μέγεθος και το βάθος εμφάνισης μύζησης αλλά και τις μεταβολές τους μετά από κατείσδυση ομβρίων υδάτων.

Αν τα συμπεράσματα αυτά συνδυαστούν με τα παραδείγματα των κατολισθητικών φαινομένων που αναφέρθηκαν πρώτα στην παράγραφο αυτή, μπορούν να εξηγηθούν σε μεγάλο βαθμό οι μηχανισμοί που οδηγούν στην αστοχία πρανών λόγω απώλειας μύζησης.

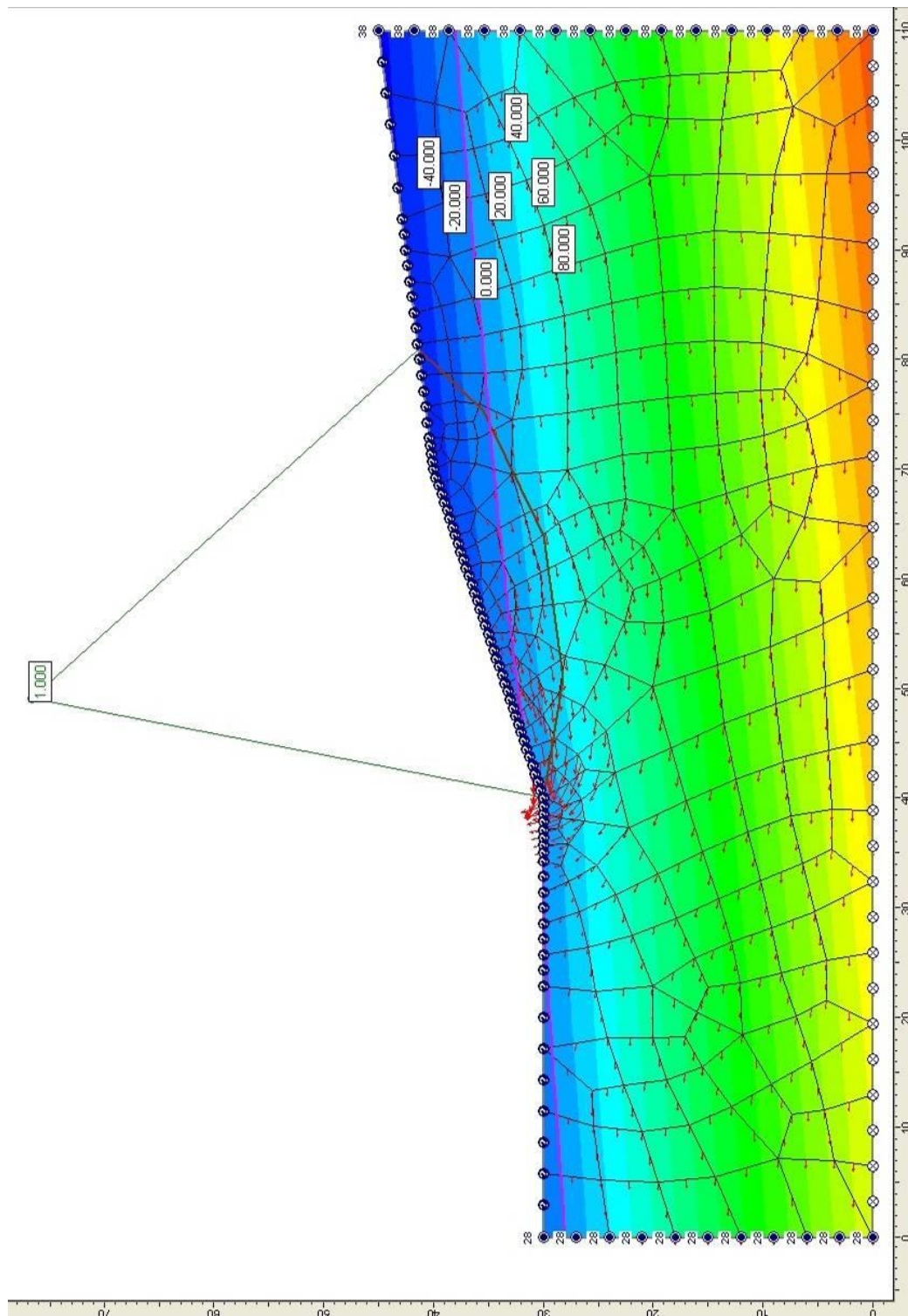
### 6.8.3 Αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας σε κατολισθήσεις με τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα χαμηλά

Όπως ήδη προαναφέρθηκε, παρά τη σημασία του βαθμού κορεσμού και της επιρροής αυτού στη διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών, η επιρροή του πολύ σπάνια και μόνο πρόσφατα λαμβάνεται υπόψη κατά τις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας πρανών, αφού η πιθανότητα απώλειας της συμβολής του στη διατμητική αντοχή είναι πολύ μεγάλη λόγω επεισοδίων βροχόπτωσης. Ο έλεγχος της κατείδυσης κατά τη διάρκεια αυτών άλλωστε, αν και έχει δοκιμαστεί, σίγουρα δεν αποτελεί καθημερινή πρακτική, λόγω της δυσκολίας και του κόστους υλοποίησής του. Κατά συνέπεια η χρησιμοποίηση της επιπλέον αυτής συνιστώσας της αντοχής λόγω μερικού κορεσμού σε ευθείες αναλύσεις ευσταθείας είναι σε βάρος της ασφάλειας, αφού θα οδηγήσει στην εκτίμηση μεγαλύτερου συντελεστή ασφαλείας από εκείνου που πολύ πιθανόν θα υπάρχει μετά την απώλεια αυτής της επιπλέον αντοχής σε περίπτωση βροχόπτωσης, η οποία απώλεια όμως δεν μπορεί ακόμα να προσομοιωθεί και να εκτιμηθεί με ασφάλεια (τουλάχιστον για συνήθη προβλήματα της καθημερινής γεωτεχνικής πράξης). Η χρησιμοποίησή της λοιπόν πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και μόνο όταν είναι γνωστά τα βροχομετρικά και γενικότερα τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής (συχνότητα, διάρκεια και ένταση επεισοδίων βροχόπτωσης, διάρκεια ηλιοφάνειας/νέφωσης, μεταβολές θερμοκρασίας κ.α.) και τα χαρακτηριστικά διαπερατότητας του σχηματισμού στον οποίο γίνεται ο σχεδιασμός, δηλαδή κατανομή βροχόπτωσης σε κατείδυση και επιφανειακή απορροή (όπως επηρεάζεται και από την γεωμετρία της τοποθεσίας), εξάτμιση και διαπνοή από την επιφάνεια του σχηματισμού, μικροδιαπερατότητα και μακροδιαπερατότητα του σχηματισμού συναρτήσει του βαθμού κορεσμού του, πιεζομετρικά δεδομένα εντός αυτού και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, τόσο ο κλάδος ξήρανσης, όσο και ο κλάδος ύγρανσης. Η γνώση όλων αυτών των στοιχείων δεν είναι δυνατή τις περισσότερες φορές, ιδίως για προβλήματα της καθημερινής γεωτεχνικής πράξης, ενώ συχνά ακόμα και όταν είναι γνωστά, ο χρόνος που απαιτείται για την αξιοποίησή τους με τα υπάρχοντα υπολογιστικά εργαλεία και οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τα αποτελέσματα των σχετικών αναλύσεων δεν επιτρέπουν την επίδειξη ιδιαίτερης εμπιστοσύνης στην επιπλέον συνιστώσα της διατμητικής αντοχής σε ευθείες αναλύσεις ευσταθείας. Σε κάθε περίπτωση δε τέτοιου είδους αναλύσεις πρέπει να περιορίζονται σε έργα με μικρό χρονικό ορίζοντα αφού βασίζονται σε εκτιμήσεις της εξέλιξης μετεωρολογικών δεδομένων, η αβεβαιότητα των οποίων μεγαλώνει όσο μεγαλώνει ο χρονικός ορίζοντας των εκτιμήσεων αυτών.

Αντίθετα από την περίπτωση των ευθειών αναλύσεων ευσταθείας όμως, στις οποίες το να αγνοηθεί η μύζηση και ο μερικός κορεσμός οδηγεί σε συντηρητικά αποτελέσματα, στις *αντίστροφες* αναλύσεις ευσταθείας κατολισθήσεων συμβαίνει το αντίθετο. Έστω ότι έχουμε επιφάνεια ολίσθησης μίας παλαιοκατολίσθησης, όπως αυτή που απεικονίζεται στο Σχ. 6.25. Το πρανές προσομοιώθηκε αριθμητικά με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων για επίλυση προβλημάτων υπόγειας ροής που υπάρχει ενσωματωμένος στο πρόγραμμα ανάλυσης ευστάθειας πρανών με την μέθοδο οριακής ισορροπίας (MOI) SLIDE ver. 5.036. Το αριθμητικό προσομοίωμα αποτελείται από 255 οκτακομβικά τετραπλευρικά πεπερασμένα στοιχεία με 838 κόμβους στους οποίους υπήρχαν βαθμοί ελευθερίας για την πίεση πόρων (αρνητική ή θετική). Οι οριακές συνθήκες καταστρώθηκαν όπως φαίνεται στο Σχ. 6.25: συνθήκες μηδενικής ροής κάθετα στο κάτω όριο του αριθμητικού προσομοιώματος, ορισμός ολικού υδραυλικού ύψους  $H$  (total head) στα πλευρικά όρια ( $H=38\text{m}$  στο δεξιό όριο και  $H=28\text{m}$  στο αριστερό) και ελεύθερες στην επιφάνεια. Ο συντελεστής διαπερατότητας ετέθη ίσος με  $10^{-9}$  m/sec και επιλύθηκε το πρόβλημα μόνιμης ροής. Η επίλυση του αριθμητικού προσομοιώματος προβλέπει βάθος υπόγειου ορίζοντα στην στέψη του πρανούς περί τα 8m. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αντίστροφη ανάλυση ευσταθείας<sup>8</sup> της συγκεκριμένης επιφάνειας ολίσθησης με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας χρησιμοποιώντας τις πιέσεις πόρων που προβλέφθηκαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ), αλλά χωρίς να χρησιμοποιηθούν οι αρνητικές πιέσεις πόρων πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα. Η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής προέκυψε  $18.42^\circ$ . Όταν εισήχθη η επιρροή των αρνητικών πιέσεων πόρων, η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής προέκυψε  $17.04^\circ$ . Για σύγκριση χρησιμοποιήθηκε για απλοποίηση των υπολογισμών η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα που προβλέφθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σαν απλή στάθμη υπόγειου ορίζοντα (φρεάτιος ορίζοντας) χωρίς το υπόλοιπο πεδίο πιέσεων πόρων. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε επί της ίδιας επιφάνειας επιβεβαίωσε καταρχάς ότι προέκυψε η ίδια γωνία τριβής όπως και για την ανάλυση χωρίς να ληφθεί υπόψη η αρνητική πίεση πόρων πάνω από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα με πολύ μικρή διαφορά μόνο:  $18.52^\circ$ .

Μετά από την αντίστροφη αυτή ανάλυση επιχειρήθηκε να εισαχθούν διάφορα μέτρα σταθεροποίησης της κατολίσθησης που προσομοιώθηκε μέσω των αντίστοιχων ευθειών αναλύσεων ευσταθείας. Στην πρώτη περίπτωση εισήχθη εκσκαφή περί την οφρύ της κατολίσθησης, μέσω της οποίας αφαιρέθηκε και τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης. Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή της τιμής  $\varphi_{\text{res}}$  από την αντίστροφη ανάλυση στην

<sup>8</sup> Για όλες τις αναλύσεις ευσταθείας που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη μέθοδος Janbu (Janbu, 1957, 1973).



**Σχήμα 6.25.** Αριθμητικό προσομοίωμα πρανούς με προδιαγεγραμμένη επιφάνεια ολίσθησης, όπως καταστρώθηκε για την επίλυση του καθεστώτος των πιέσεων πόρων υπό συνθήκες μόνιμης ροής με την ΜΠΣ και την εκτέλεση της αντίστροφης ανάλυσης ευσταθείας με την ΜΟΙ. Διακρίνονται ο κάρναβος των οκτακομβικών τετραπλευρικών πεπερασμένων στοιχείων, τα διανύσματα της ταχύτητας ροής, οι οριακές συνθήκες, η υπολογισθείσα στάθμη του υπόγειου ορίζοντα, η επιφάνεια ολίσθησης και ο χρωματισμός, οι διαφορές στον οποίο δηλώνουν τις καμπύλες ισοτιμών πίεσης πόρων.

οποία δεν ελήφθη υπόψη η μύζηση πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα προέκυψε συντελεστής ασφαλείας (Σ.Α.) 1.470 (Σχ. 6.26α), ενώ από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή της τιμής  $\varphi_{res}$  από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία ελήφθη υπόψη η μύζηση προέκυψε συντελεστής ασφαλείας 1.345, δηλαδή *σημαντικά μικρότερος από πριν*.

Εκτός από την περίπτωση σταθεροποίησης της κατολίσθησης μέσω εκσκαφής περί την οφρύ, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευσταθείας και για την περίπτωση σταθεροποίησης μέσω σταθεροποιητικού επιχώματος στον πόδα. Το επίχωμα θεωρήθηκε ότι είχε ύψος 3m και το υλικό κατασκευής του ότι είχε φαινόμενο βάρος  $20 \text{ kN/m}^3$ ,  $c'=10 \text{ kPa}$  και  $\varphi'=26^\circ$ . Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή της τιμής  $\varphi_{res}$  από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία δεν ελήφθη υπόψη η μύζηση πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα προέκυψε συντελεστής ασφαλείας 1.466 (Σχ. 6.27α), ενώ από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή της τιμής  $\varphi_{res}$  από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία ελήφθη υπόψη η μύζηση προέκυψε συντελεστής ασφαλείας 1.363, δηλαδή και πάλι *σημαντικά μικρότερος*.

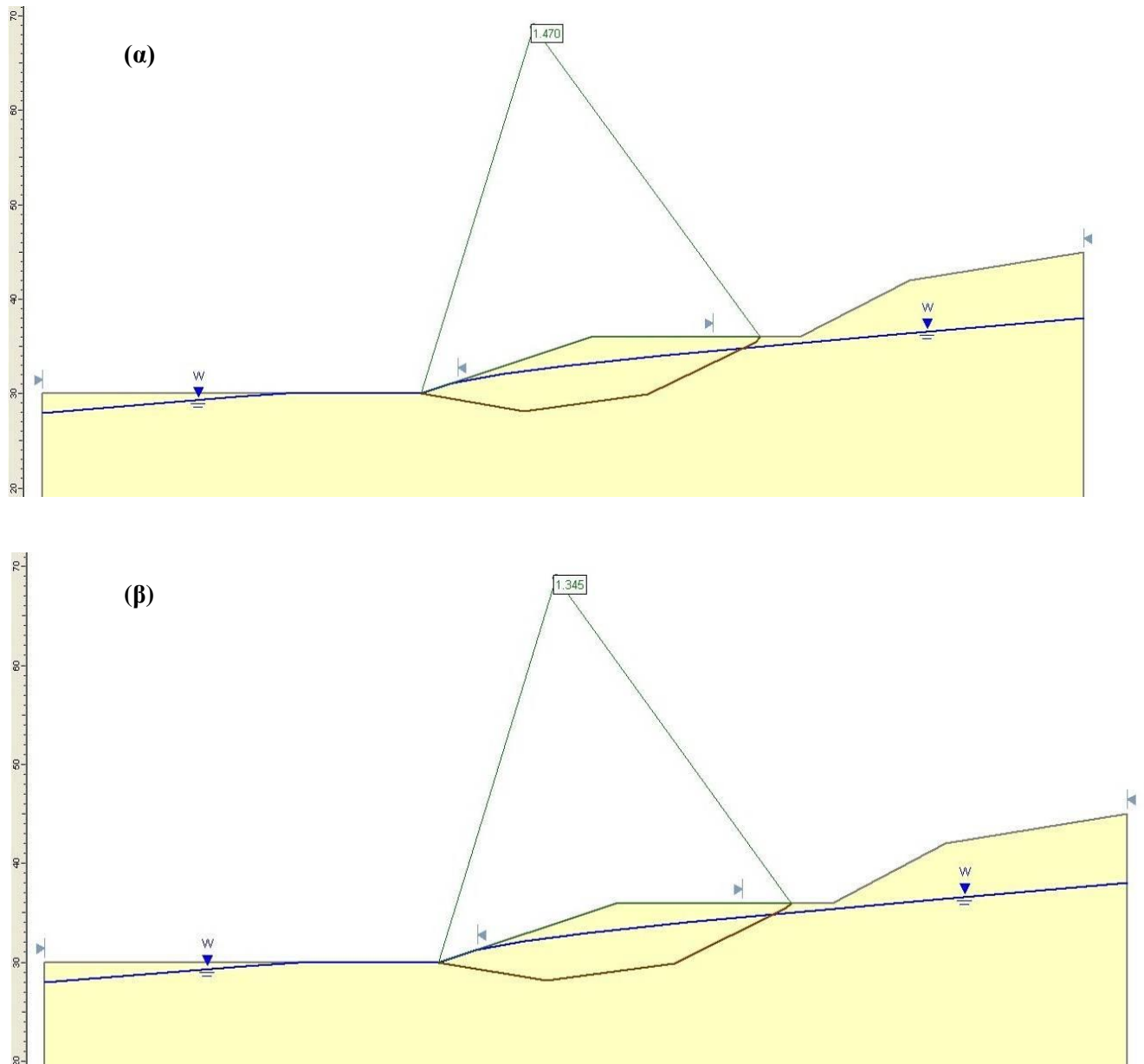
Τέλος, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευσταθείας και για την περίπτωση σταθεροποίησης μέσω σειρών μονίμων προεντεταμένων αγκυρώσεων. Εισήχθησαν δύο σειρές αγκυρώσεων με αγκύρια  $350 \text{ kN}$  ανά  $2 \text{ m}$ . Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή της τιμής  $\varphi_{res}$  από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία δεν ελήφθη υπόψη η μύζηση πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα προέκυψε συντελεστής ασφαλείας 1.444 (Σχ. 6.28α), ενώ από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με εισαγωγή της τιμής  $\varphi_{res}$  από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία ελήφθη υπόψη η μύζηση προέκυψε συντελεστής ασφαλείας 1.322, δηλαδή και πάλι *σημαντικά μικρότερος*.

Λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας δεν πραγματοποιήθηκε το αντίστοιχο ζευγάρι ευθειών αναλύσεων ευσταθείας και για την λύση σταθεροποίησης με πασσάλους, παρόλο που είναι βέβαιο ότι και σε αυτή την περίπτωση θα προέκυπτε το ίδιο αποτέλεσμα.

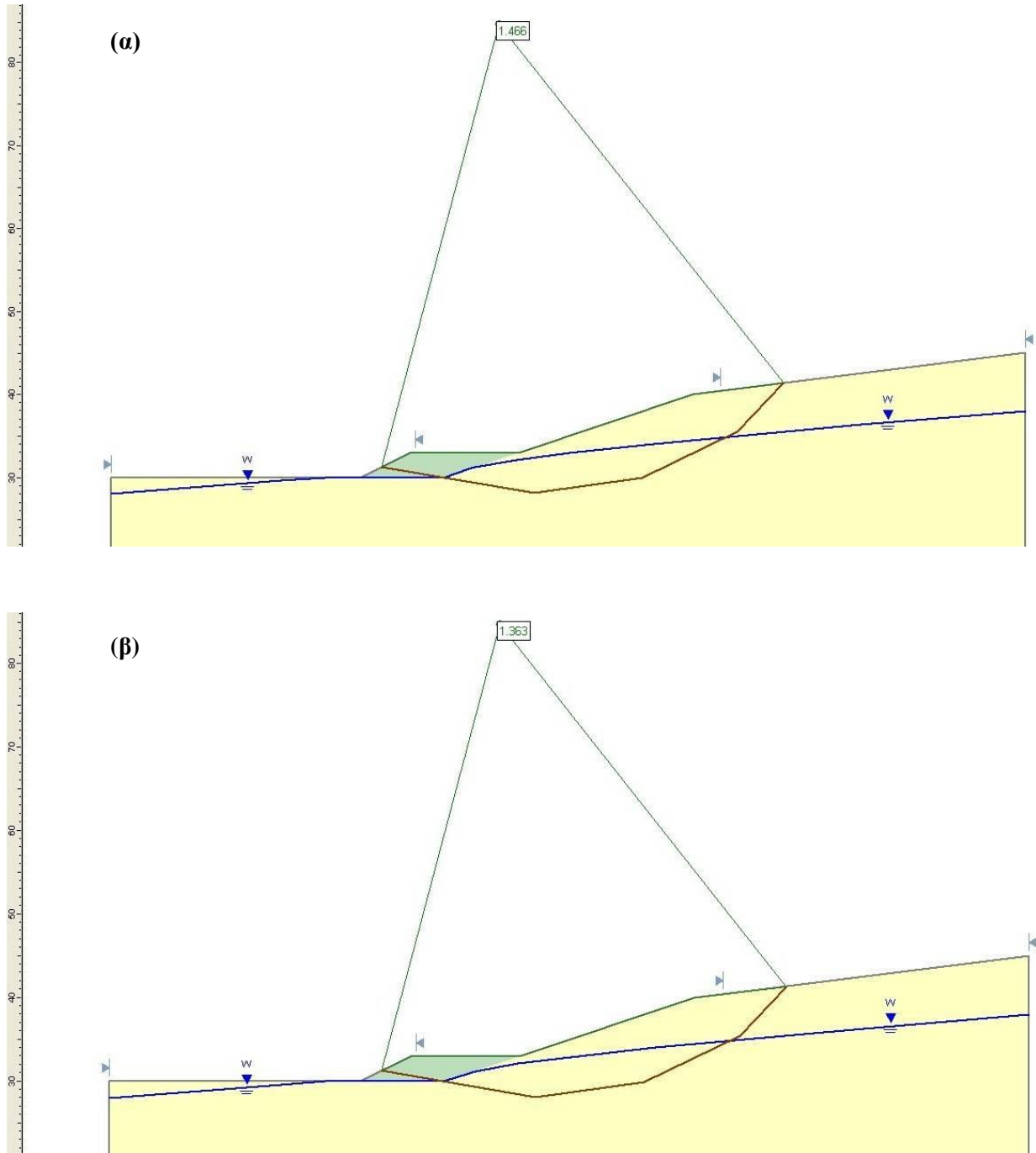
Συνοψίζοντας λοιπόν προκύπτει ότι, *όταν η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής κατολισθήσεων με τον υπόγειο ορίζοντα χαμηλά προκύπτει χωρίς να έχουν ληφθεί υπόψη οι αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση πάνω από αυτόν, η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής υπερτιμάται, με αποτέλεσμα τα μέτρα σταθεροποίησης που σχεδιάζονται στις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας που ακολουθούν με την τιμή αυτή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής να είναι υποδιαστασιολογημένα και ο πραγματικός συντελεστής ασφαλείας να είναι μικρότερος αυτού*



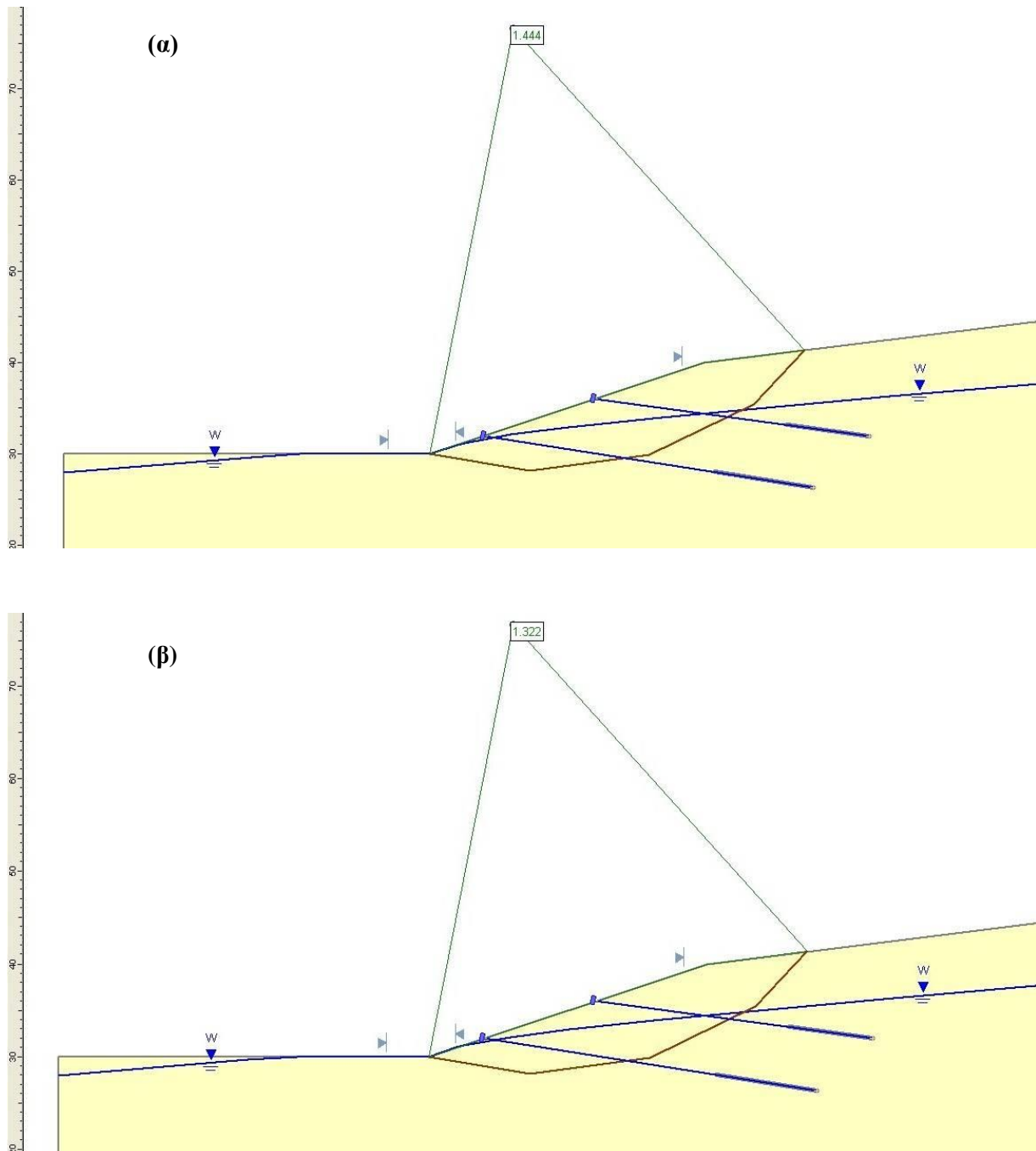
που υπολογίζεται, αφού η μύζηση αυτή πάνω από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα δεν μπορεί να υποθεθεί ότι θα υπάρχει πάντα. Ο μόνος τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, είναι κατά τον υπολογισμό της παραμένουσας διατμητικής αντοχής από αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας



**Σχήμα 6.26.** Αποτελέσματα αναλύσεων ευσταθείας επί της προδιαγεγραμμένης επιφάνειας ολίσθησης του Σχ. 6.25 μετά από εκσκαφή ελάφρυνσης περί την οφρύ μέσω της οποίας αφαιρέθηκε και τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης: α) με εισαγωγή της τιμής  $\phi_{res}'$  από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία δεν ελήφθη υπόψη η μύζηση ( $\Sigma.A.=1.470$ ), και β) με εισαγωγή της τιμής  $\phi_{res}'$  από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία ελήφθη υπόψη η μύζηση ( $\Sigma.A.=1.345$ ).



**Σχήμα 6.27.** Αποτελέσματα αναλύσεων ευσταθείας επί της προδιαγεγραμμένης επιφάνειας ολίσθησης του Σχ. 6.24 μετά από εισαγωγή σταθεροποιητικού αντιβάρου στον πόδα: α) με εισαγωγή της τιμής  $\phi_{res}'$  από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία δεν ελήφθη υπόψη η μύζηση ( $\Sigma.A.=1.466$ ), και β) με εισαγωγή της τιμής  $\phi_{res}'$  από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία ελήφθη υπόψη η μύζηση ( $\Sigma.A.=1.363$ ).



**Σχήμα 6.28.** Αποτελέσματα αναλύσεων ευσταθείας επί της προδιαγεγραμμένης επιφάνειας ολίσθησης του Σχ. 6.24 μετά από εισαγωγή προεντεταμένων αγκυρίων: α) με εισαγωγή της τιμής  $\varphi_{res}'$  από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία δεν ελήφθη υπόψη η μύζηση ( $\Sigma.A.=1.444$ ), και β) με εισαγωγή της τιμής  $\varphi_{res}'$  από την αντίστροφη ανάλυση στην οποία ελήφθη υπόψη η μύζηση ( $\Sigma.A.=1.322$ ).

κατολισθήσεων να λαμβάνονται υπόψη οι αρνητικές τιμές πίεσης πόρων/μύζηση πάνω από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Για παράδειγμα, στο πρόγραμμα SLIDE αυτό μπορεί να γίνει

αυτόματα αν πρώτα προσομοιωθεί το καθεστώς των πιέσεων πόρων μέχρι να προβλεφθεί η στάθμη υπόγειου ορίζοντα που έχει μετρηθεί, ενώ γενικά σε άλλα προγράμματα που δεν υφίσταται η δυνατότητα προσομοίωσης του καθεστώτος των πιέσεων πόρων μπορεί να εισάγεται μία μικρή τιμή της συνοχής, η οποία έχει ελεγχθεί ότι αντιστοιχεί σε μια λογική μέση τιμή της μύζησης πολλαπλασιασμένη με την εφαπτομένη της υπολογιζόμενης γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής, και η οποία κατά τις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας θα αγνοείται. Η δεύτερη μέθοδος υπολογισμού απαιτεί σημαντική κρίση προκειμένου να υποτεθεί μία λογική μέση τιμή της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα, και υπολογιστικά έναν αριθμό επαναλήψεων, αφού αρχικά η αντίστροφη ανάλυση εκτελείται χωρίς συνοχή και υπολογίζεται μία τιμή  $\phi_{res}'$ , από αυτήν υπολογίζεται μία τιμή συνοχής η οποία εισάγεται και από την οποία προκύπτει νέα τιμή  $\phi_{res}'$  κ.ο.κ. έως ότου υπολογιστεί η ορθή τιμή  $\phi_{res}'$ .

Υπενθυμίζεται και πάλι ότι η παρατήρηση αυτή ισχύει για κατολισθήσεις στις οποίες η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα βρίσκεται τόσο χαμηλά που σημαντικό τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης βρίσκεται πάνω από αυτήν την στάθμη. Σε αυτή την ιδιαίτερη περίπτωση η αγνόηση της μύζησης κατά τις αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας, οδηγεί τελικά σε αποτελέσματα τα οποία βρίσκονται σε βάρος της ασφάλειας, ακριβώς αντίθετα από τις περιπτώσεις ευθειών αναλύσεων ευσταθείας πρανών με μύζηση, όπου η αγνόηση της μύζησης οδηγεί σε αποτελέσματα υπέρ της ασφαλείας. Και αυτό γιατί η μύζηση που επιδρά σε μια διαμορφωμένη κατάσταση (οδηγώντας στην αυξημένη τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής, όταν δεν λαμβάνεται υπόψη η μύζηση πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα) δεν μπορεί να υποτεθεί ότι θα υπάρχει πάντα, με το ίδιο σκεπτικό που κατά τις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας πρανών με μύζηση θεωρείται λογικό να μη βασιστεί η διαστασιολόγησή τους στην παρουσία αυτής της μύζησης. Πέρα από το πρακτικό του ενδιαφέρον, το συγκεκριμένο πρόβλημα αποτελεί –σε όρους ευσταθείας πρανών- τη μοναδική ίσως περίπτωση που δεν ισχύει η γνωστή αρχή για αναλύσεις ευσταθείας κατολισθήσεων: ο συντελεστής ασφαλείας που υπολογίζεται μετά τα μέτρα είναι ο σωστός, αρκεί οι συνθήκες των ευθειών αναλύσεων ευσταθείας με τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής να είναι οι ίδιες με τις συνθήκες της αντίστροφης ανάλυσης από την οποία προέκυψε η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής.

#### 6.8.4 Ένα εργαστηριακό παράδειγμα μέτρησης της διατμητικής αντοχής παρουσία μύζησης

Στην §3.5.2.3 του Κεφ. 3 έγινε αναφορά σε ένα παράδειγμα εκτέλεσης δοκιμής άμεσης διάτμησης δοκιμίων πολύ μεγάλων διαστάσεων με μέτρηση της μύζησης του δοκιμίου και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας του στη στάθμη της επιφάνειας διάτμησης σε όμοια δοκίμια χονδρόκοκκης άμμου, ένα εκ των οποίων ήταν μη κορεσμένο και ένα πλήρως κορεσμένο με επιβεβαιωμένο μηδενισμό της μύζησης από τους τοποθετημένους αισθητήρες. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στη μεγάλη συσκευή άμεσης διάτμησης του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής ΥΦΑΝΤΙΔΗΣ. Οι αισθητήρες που τοποθετήθηκαν περιγράφηκαν ήδη στην §3.5.2.3. Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά στο στάδιο της διάτμησης μόνο, με την συσκευή να περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφ. 15 όπου και παρουσιάζεται ο κύριος όγκος των δοκιμών που εκτελέστηκαν και αφορούσε σε μετρήσεις καθιζήσεων λόγω εμποτισμού χονδρόκοκκων υλικών.

Το υλικό των δοκιμίων ήταν χονδρόκοκκη άμμος ποτάμιας προέλευσης, η οποία συμπυκνώθηκε σε ξηρό φαινόμενο βάρος  $18 \text{ kN/m}^3$  με ποσοστό υγρασίας 2% χρησιμοποιώντας ηλεκτροκίνητο κόπανο κεφαλής διαμέτρου 15cm. Η κοκκομετρική της διαβάθμιση περιγράφεται ως εξής: 50% συγκρατούμενο στο κόσκινο No. 10, 30% συγκρατούμενο στο κόσκινο No. 40 και 20% συγκρατούμενο στο κόσκινο No. 100. Επειδή ο αρχικός διαχωρισμός σε κλάσματα και η σύνθεση στη συνέχεια έγινε με τα υλικά ευρισκόμενα εν ξηρώ υπήρχε και ένα ποσοστό διερχομένου από το κόσκινο No. 200 προσκολλημένου επί των κόκκων των προαναφερθέντων κλασμάτων (υπολογίστηκε μετά τις δοκιμές σε περίπου 5%).

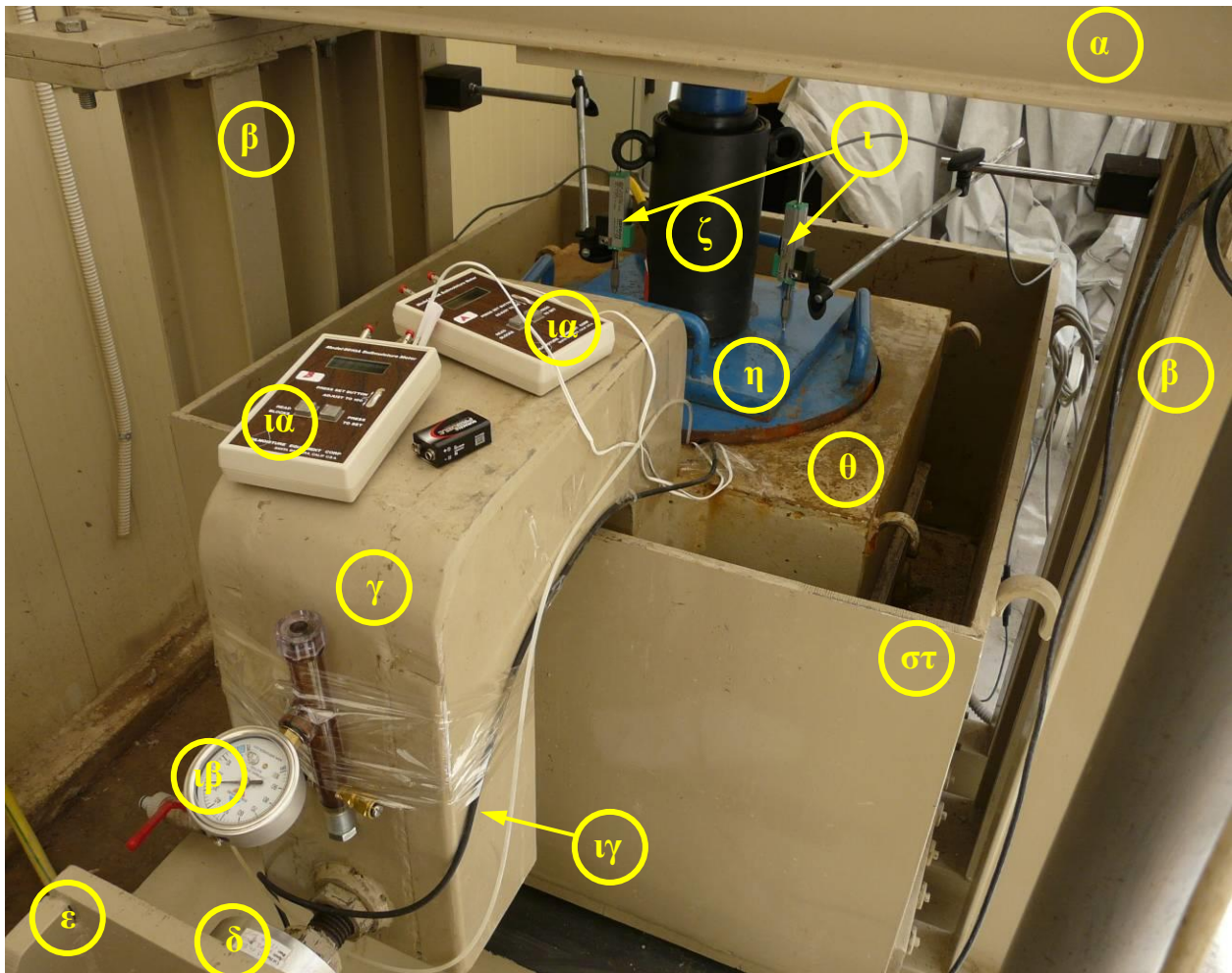
Και τα δύο δοκίμια διατμήθηκαν υπό κατακόρυφη τάση  $50 \text{ kPa}^9$ , αλλά το ένα χωρίς να πληρωθεί το φορείο της συσκευής με νερό, οπότε κατά τη διάρκεια της διάτμησης είχε μύζηση, ενώ το άλλο μετά από πλήρωση του φορείου της συσκευής με νερό και μηδενισμό της μύζησης του όπως επιδείχθηκε στην §3.5.2.3. Στην Φωτ. 6.2 παρουσιάζεται η διάταξη κατά το στάδιο της διάτμησης. Ο ρυθμός οριζόντιας μετατόπισης και για τα δύο δοκίμια ορίστηκε σε  $0.75 \text{ mm/min}$ , δηλ. ρυθμός οριζόντιας παραμόρφωσης  $0.167\%/min$ , δεδομένου ότι η διάμετρος του δοκιμίου

<sup>9</sup> Οι λόγοι για τον περιορισμό της κατακόρυφης τάσης σε τόσο χαμηλή τιμή ήταν δύο. Ο πρώτος αφορούσε στον σταδιακό έλεγχο του αισθητήρα μέτρησης ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας για τον οποίο δεν υπάρχουν στοιχεία από την βιβλιογραφία ή τον κατασκευαστή για την τοποθέτησή του σε σημαντικά βάθη και άρα λειτουργία του υπό μεγάλα υπερκείμενα. Ο δεύτερος αφορούσε στην επιλογή για διερεύνηση σε αυτό το στάδιο της επιρροής της μύζησης σε μικρές τιμές κατακόρυφων φορτίων που απαντώνται σε αβαθείς κατολισθήσεις.

είναι 450mm (το ύψος του είναι περί τα 300mm). Στο Σχ. 6.29α παρουσιάζονται οι καμπύλες διατμητικής τάσης-οριζόντιας παραμόρφωσης, στο Σχ. 6.29β οι καμπύλες εξέλιξης της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας που κατέγραψαν οι αισθητήρες στο δοκίμιο που δεν πληρώθηκε το φορτίο της συσκευής, και στο Σχ. 6.29γ οι καμπύλες κατακόρυφης παραμόρφωσης-οριζόντιας παραμόρφωσης.

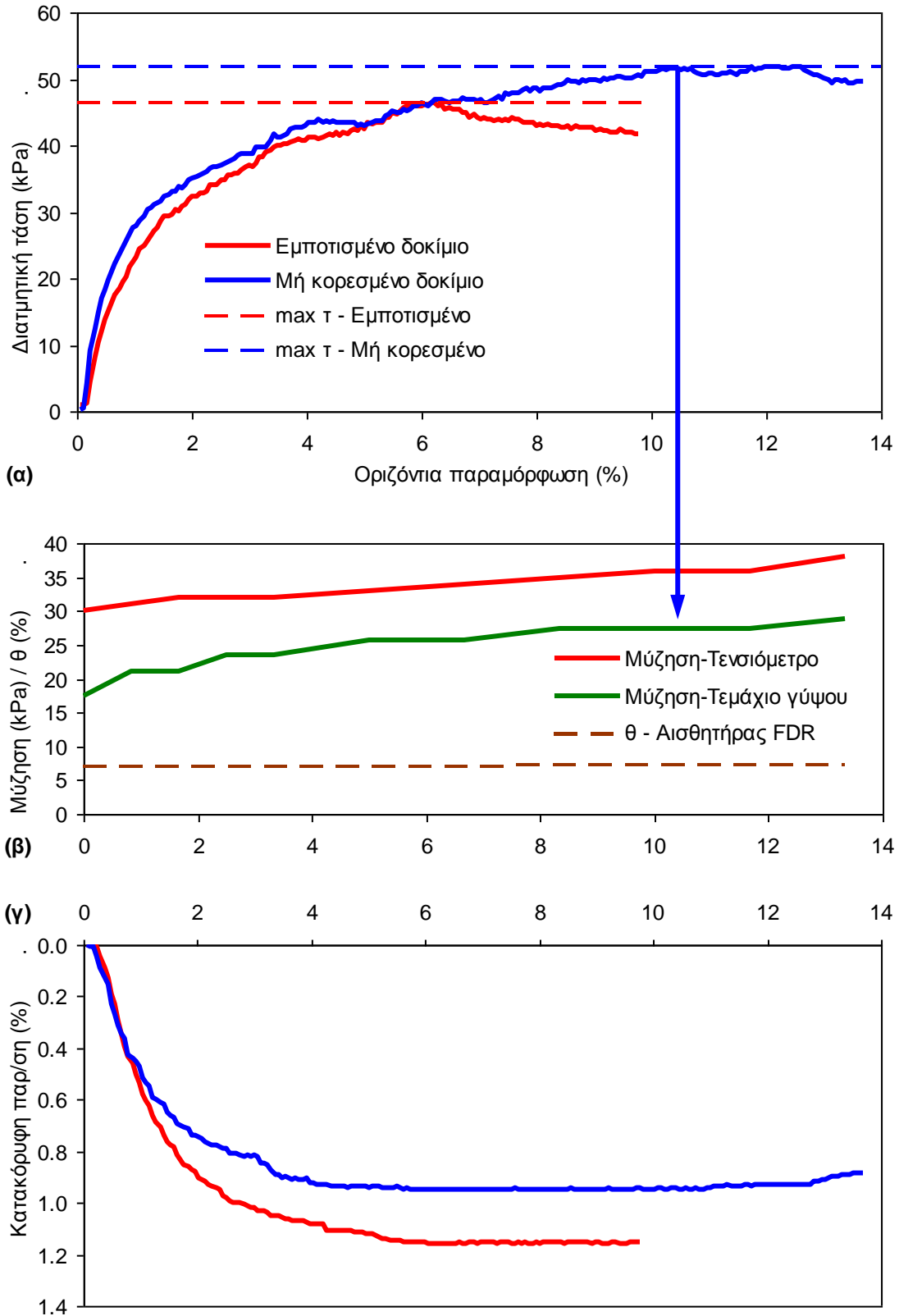
Στην §3.5.2.3 εξηγήθηκε τι συνέβη με το ένα από τα δύο τεμάχια γύψου και γιατί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μόνο από το ένα από τα δύο που τοποθετήθηκαν. Το μή κορεσμένο δοκίμιο επέδειξε μεγαλύτερη διατμητική αντοχή (52 kPa αντί για 46 kPa) έχοντας με βάση τις ενδείξεις του τενσιομέτρου, οι οποίες θεωρούνται πιο ακριβείς, 32 kPa μύζησης κατά την καταγραφή της μέγιστης διατμητικής αντοχής. Και τα δύο δοκίμια επέδειξαν συστολικότητα, το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω της μικρής του πυκνότητας, με το μή κορεσμένο δοκίμιο όμως να επιδεικνύει *λιγότερη* συστολικότητα από το πλήρως κορεσμένο λόγω εμποτισμού. Αν μάλιστα χρησιμοποιηθούν οι τιμές της διατμητικής αντοχής και της μύζησης των δύο δοκιμίων μπορεί να συνταχθεί το διάγραμμα του Σχ. 6.30 στο οποίο συσχετίζεται η διατμητική αντοχή των δύο δοκιμίων με τη μύζησή τους υπό την κατακόρυφη τάση των 50 kPa που είχαν και τα δύο. Από το Σχ. 6.30 προκύπτει τιμή της γωνίας αύξησης της διατμητικής αντοχής με την μύζηση  $\phi_b = 10^\circ$ . Η τιμή αυτή είναι πολύ μικρή για να θεωρηθεί η πραγματική τιμή για το υλικό το οποίο έχει  $\phi'$  περί τις  $43^\circ$  (αφού έχει αντοχή 46 kPa υπό 50 kPa κατακόρυφη τάση και εύλογα μπορεί να υποτεθεί απουσία συνοχής για πλήρως κορεσμένο δοκίμιο τέτοιας κοκκομετρικής διαβάθμισης). Μεγάλη όμως είναι σε σχέση με την αναμενόμενη πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού και η τιμή της μύζησης που καταγράφηκε οπότε στην πραγματικότητα μπορεί να έχει ξεπεραστεί το σημείο καμπής στην εξέλιξη της διατμητικής αντοχής με την μύζηση και η προκύπτουσα τιμή της  $\phi_b$  να προκύπτει πολύ μικρότερη ως μία τεχνητή τιμή μεταξύ  $\phi'$  και πραγματικής  $\phi_b$ .

Το παράδειγμα αυτό επιδεικνύει τη μεγαλύτερη διατμητική αντοχή που επέδειξε ένα μή κορεσμένο χονδρόκοκκο υλικό και δεν είναι ευθέως σχετιζόμενο με τα παραδείγματα των αναλύσεων ευσταθείας στις §6.8.2 και 6.8.3. Επιδεικνύει όμως την αναμενόμενη αύξηση της διατμητικής αντοχής μή κορεσμένων χονδρόκοκκων εδαφικών υλικών ακόμα και για μικρές τιμές της μύζησης (αλλά μεγάλες σε σχέση με την πίεση διείσδυσης αέρα τους όπως στο παράδειγμα που παρουσιάστηκε) και άρα τις αναμενόμενες διαφορές στην ευστάθεια πρηνών από τέτοια υλικά.



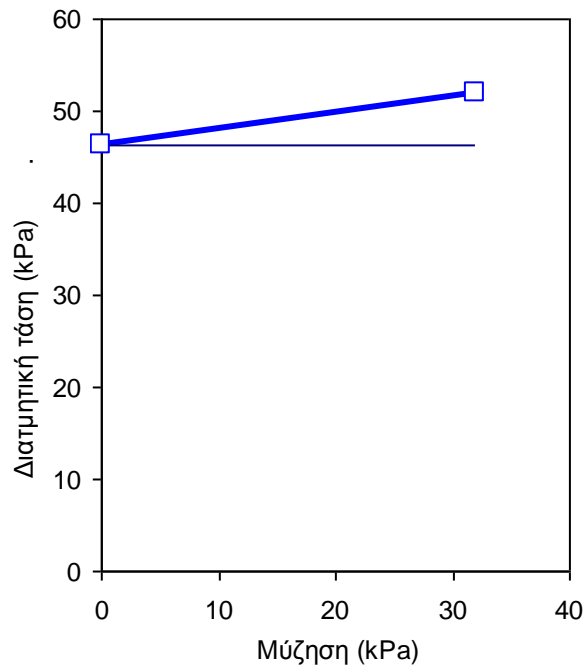
**Φωτογραφία 6.2.** Μεγάλη συσκευή άμεσης διάτμησης του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής ΥΦΑΝΤΙΔΗΣ κατά την εκτέλεση δοκιμής σε δοκίμιο χονδρόκοκκης άμμου ποτάμιας προέλευσης με μέτρηση της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας χωρίς πλήρωση του φορείου της συσκευής με νερό, δηλ. εμποτισμό του δοκιμίου. Διακρίνονται τα εξής απάρτια της συσκευής:

- |  |   |
|--|---|
| α) δοκός παραλαβής κατακόρυφου φορτίου,  | η) πλάκες μετάδοσης κατακόρυφου φορτίου,                |
| β) δοκοί μεταβίβασης κατακόρυφου φορτίου στην βάση,                                    | θ) άνω τέμαχος κυψέλης,                                 |
| γ) δοκός μεταφοράς οριζόντιας αντίδρασης εκτός φορείου,                                | ι) μηχανοσκόμμετρα μέτρησης καθίζησης,                  |
| δ) κυψέλη μέτρησης οριζόντιου φορτίου,   | ια) μετρητές/καταγραφικά τεμαχίων γύψου,                |
| ε) πρόβολος αντίδρασης στην διάτμηση,  | ιβ) μανόμετρο μέτρησης εργαστηριακού τενσιομέτρου, και  |
| στ) φορείο πλήρωσης με νερό (μέχρι στάθμη υψηλότερα από την πάνω πλευρά του δοκιμίου), | ιγ) καλώδιο αισθητήρα FDR προς μετρητή/καταγραφικό του. |
| ζ) υδραυλικός γρύλος εφαρμογής κατακόρυφου φορτίου,                                    |   |



**Σχήμα 6.29.** Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης σε δοκίμια μεγάλων διαστάσεων με μέτρηση της μύζησης και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας: α) διατηρητική τάση-οριζόντια παραμόρφωση, β) μύζηση & ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας-οριζόντια παραμόρφωση, και γ) κατακόρυφη παραμόρφωση-οριζόντια παραμόρφωση.





**Σχήμα 6.30.** Διατηρητική αντοχή με την μύζηση για το πλήρως κορεσμένο και το μη κορεσμένο δοκίμιο της χονδρόκοκκης άμμου.

## 6.9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκε η διατηρητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών και παρουσιάστηκαν παραδείγματα για την επιρροή του βαθμού κορεσμού σε αυτήν και πως επηρεάζει προβλήματα ευστάθειας πρανών καθώς και την αντοχή χονδρόκοκκων εδαφικών υλικών. Τα συμπεράσματα της παρουσίασης συνοψίζονται στα εξής:

1. Σε όλα τα εδαφικά υλικά η διατηρητική τους αντοχή αυξάνει με την αύξηση της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα των υλικών. Για αύξηση της μύζησης πέρα από την πίεση διείσδυσης αέρα των εδαφικών υλικών η διατηρητική τους αντοχή μπορεί να αυξάνει, να μένει σταθερή ή και να μειώνεται ανάλογα με την φύση τους.
2. Ακόμα και στα εδαφικά υλικά που η διατηρητική αντοχή συνεχίζει να αυξάνεται με τη μύζηση για τιμές αυτής μεγαλύτερες της πίεσης διείσδυσης αέρα του εδαφικού υλικού, ο ρυθμός αύξησης της διατηρητικής αντοχής συναρτήσει της μύζησης για τιμές μεγαλύτερες της πίεσης διείσδυσης αέρα είναι μικρότερος του ρυθμού αύξησης της διατηρητικής αντοχής

συναρτήσει της ολικής τάσης, πράγμα που σημαίνει ότι η γωνία διατμητικής αντοχής  $\phi'$  είναι μεγαλύτερη της γωνίας αύξησης της διατμητικής αντοχής συναρτήσει της μύζησης  $\phi_b$ .

3. Αυξανόμενη της μύζησης, αυξάνεται και η ψαθυρότητα και η διαστολικότητα των εδαφικών υλικών.
4. Η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης, και μάλιστα τόσο περισσότερο όσο πιο πλαστικό είναι ένα αργιλικό υλικό.
5. Μέχρι σήμερα υπάρχει διάσταση απόψεων αν πράγματι μεταβάλλεται η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης με την αύξηση της μύζησης ή όχι και η διερεύνηση αυτής της μεταβολής αποτελεί ανοικτό πεδίο έρευνας. Για τους υποστηρίζοντες ότι η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης μεταβάλλεται οι ενδείξεις για την μεταβολή της σε σχέση με την φύση των εδαφικών υλικών έχουν ως εξής: αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης προκειμένου για αργιλικά εδαφικά υλικά υψηλής και μέσης πλαστικότητας, μένει σταθερή για υλικά μέσης έως και χαμηλής πλαστικότητας και μειώνεται για ιλεις και κοκκώδη εδάφη.
6. Η απώλεια της επιπλέον συνιστώσας της διατμητικής αντοχής φαίνεται να επηρεάζει μόνο αβαθείς κατολισθήσεις με βάση τα συγκεντρωθέντα παραδείγματα από την βιβλιογραφία. Ο λόγος για αυτό δεν βρίσκεται στο ότι η μύζηση δεν επηρεάζει την ευστάθεια και βαθύτερων μαζών, αλλά στην δυσκολία της απώλειας της μύζησης σε μεγαλύτερα βάθη εφόσον αυτή έχει αναπτυχθεί εκεί, λόγω του σημαντικά μικρότερου συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό που συνοδεύει τις υψηλές τιμές της μύζησης. Η εξέλιξη της διαπερατότητας των εδαφικών υλικών ως προς το νερό και τον αέρα αποτελεί το αντικείμενο του επόμενου κεφαλαίου.
7. Παρά τη σημασία του βαθμού κορεσμού και της επιρροής αυτού στη διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών, η επιρροή του πολύ σπάνια και μόνο πρόσφατα λαμβάνεται υπόψη κατά τις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας πρανών, αφού η πιθανότητα απώλειας της συμβολής του στην διατμητική αντοχή είναι πολύ μεγάλη λόγω επεισοδίων βροχόπτωσης. Κατά συνέπεια η χρησιμοποίηση της επιπλέον αυτής συνιστώσας της αντοχής λόγω μερικού κορεσμού σε ευθείες αναλύσεις ευσταθείας είναι σε βάρος της ασφάλειας αφού θα οδηγήσει στην εκτίμηση μεγαλύτερου συντελεστή ασφαλείας από εκείνον που πολύ πιθανόν θα

υπάρχει μετά την απώλεια αυτής της επιπλέον αντοχής σε περίπτωση βροχόπτωσης. Η χρησιμοποίησή της λοιπόν πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και μόνο όταν είναι γνωστά τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής και μάλιστα έχει γίνει και παρακολούθησή τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα (συχνότητα, διάρκεια και ένταση επεισοδίων βροχόπτωσης, περίοδοι ηλιοφάνειας/νέφωσης, μεταβολές θερμοκρασίας κ.α.) και τα χαρακτηριστικά διαπερατότητας του σχηματισμού στον οποίο γίνεται ο σχεδιασμός, δηλαδή κατανομή βροχόπτωσης σε κατείδυση και επιφανειακή απορροή, εξάτμιση και διαπνοή από την επιφάνεια του σχηματισμού, μικροδιαπερατότητα και μακροδιαπερατότητα του σχηματισμού συναρτήσει του βαθμού κορεσμού του, πιεζομετρικά δεδομένα εντός αυτού και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Σε κάθε περίπτωση δε τέτοιου είδους αναλύσεις πρέπει να περιορίζονται σε έργα με μικρό χρονικό ορίζοντα (τουλάχιστον ακόμη αφού δεν υπάρχουν πολλές και μακροχρόνιες καταγραφές της μύζησης επιτόπου και της συσχέτισής της με τα μετεωρολογικά δεδομένα) αφού βασίζονται σε εκτιμήσεις της εξέλιξης μετεωρολογικών δεδομένων, η αβεβαιότητα των οποίων μεγαλώνει όσο μεγαλώνει ο χρονικός ορίζοντας των εκτιμήσεων αυτών.

8. Αντίθετα, σε αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας κατολισθήσεων με την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα χαμηλά, εάν αγνοηθεί η επιρροή της μύζησης υπερεκτιμάται η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής και άρα υποδιαστασιολογούνται τα απαιτούμενα μέτρα σταθεροποίησης της κατολίσθησης που σχεδιάζονται προς επίτευξη του επιθυμητού κατά τον σχεδιασμό συντελεστή ασφαλείας μετά την σταθεροποίηση της κατολίσθησης. Έτσι στις περιπτώσεις που δεν λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της μύζησης κατά τις αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας πρέπει να επιβεβαιώνεται από τα γεωτεχνικά δεδομένα ότι δεν έχουν αναπτυχθεί σημαντικές τιμές της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, διαφορετικά να –επιχειρείται τουλάχιστον να- εισάγονται είτε απευθείας, είτε μέσω της υιοθέτησης μη μηδενικής τιμής της συνοχής, εύλογες τιμές της μύζησης από τις οποίες να προκύπτει η κατάλληλη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής που θα χρησιμοποιηθεί στις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας για τον υπολογισμό της επιρροής των σχεδιαζόμενων μέτρων σταθεροποίησης.

Όλα τα παραπάνω καθιστούν περισσότερο από σημαντική την ανάγκη πραγματοποίησης επιτόπου μετρήσεων της μύζησης. Τα θεωρητικά προσομοιώματα για την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής των εδαφικών υλικών με την μύζηση υπάρχουν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε είδους αναλύσεις που απαιτούνται εκτιμήσεις της επιρροής της

μύζησης στη διατμητική αντοχή. Η αξιοπιστία αυτών των εκτιμήσεων ωστόσο δεν πρόκειται να είναι μεγάλη όσο δεν πραγματοποιούνται συστηματικές, μακροχρόνιες μετρήσεις της μύζησης επιτόπου και συσχετίσή τους αφενός με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού των απαντώμενων σχηματισμών και τα μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφονται στην επιφάνεια του εδάφους.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

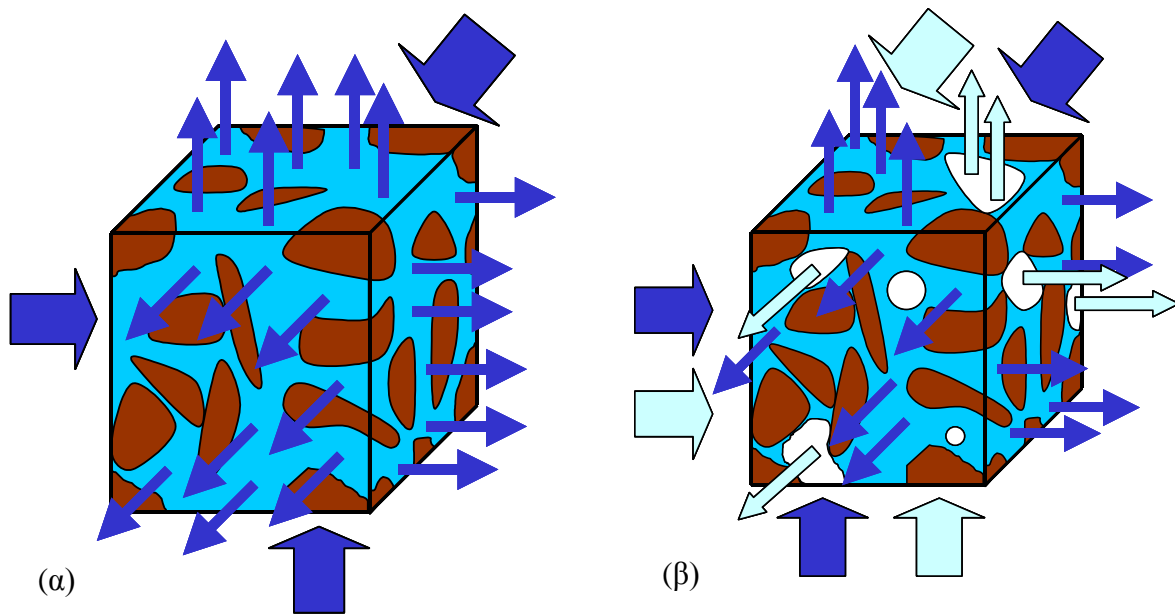
## ΡΟΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

### 7.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα προηγούμενα κεφάλαια περιγράφηκε η φύση των μη κορεσμένων εδαφών, ορίστηκε και εξηγήθηκε η μύζηση και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και παρουσιάστηκαν οι μέθοδοι μέτρησής τους, ενώ σε ό,τι αφορά τη μηχανική συμπεριφορά παρουσιάστηκε μέχρι αυτό το σημείο η επιρροή του βαθμού κορεσμού στις μεταβολές όγκου και στη διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ιδιαιτερότητες της ροής διά μέσω μη κορεσμένων εδαφών. Η πρώτη από αυτές είναι ότι στα μη κορεσμένα εδάφη υπάρχουν δύο ρευστές φάσεις, η υγρή και η αέρια, και κατά συνέπεια υφίσταται –κατ'αρχήν ταυτόχρονα- ροή διά μέσω του εδάφους και της αέριας φάσης και της υγρής, με την μία να επηρεάζει μάλιστα την άλλη (Σχ. 1). Αντίθετα λοιπόν με τα πλήρως κορεσμένα εδάφη που υπάρχει ροή μόνο της υγρής φάσης, εκφραζόμενη στην πλειοψηφία των περιπτώσεων από τον νόμο του Darcy<sup>1</sup>, στα μη κορεσμένα εδάφη υπάρχει ροή και της υγρής φάσης διά μέσω του εδάφους, εκφραζόμενη στην πλειοψηφία των περιπτώσεων από τον νόμο του Darcy, και της αέριας φάσης διά μέσω του εδάφους εκφραζόμενη από τον νόμο του Fick, και αντίστοιχα συντελεστές διαπερατότητας του εδάφους ως προς την υγρή φάση,  $k_w$ , και ως προς την αέρια φάση,  $k_a$ . Καθένας από τους συντελεστές διαπερατότητας εξαρτάται, όχι μόνο από τα συνήθως θεωρούμενα για τα πλήρως κορεσμένα εδάφη μηχανικά χαρακτηριστικά (φύση, πυκνότητα, ομοιογένεια ή ανομοιογένεια, και ισοτροπία ή ανισοτροπία), αλλά και από τον βαθμό κορεσμού και τη μύζηση, με σημαντικότερη μάλιστα επίδραση αυτών των μεγεθών στους συντελεστές διαπερατότητας από την επίδραση των προαναφερθέντων μηχανικών χαρακτηριστικών.

---

<sup>1</sup> Υπενθυμίζεται ήδη από την αρχή του κεφαλαίου αυτού ότι ο νόμος του Darcy δεν ισχύει για όλους τους τύπους των εδαφών. Εκτενής αναφορά γίνεται στην συνέχεια του κεφαλαίου.



**Σχήμα 7.1.** Ποιοτική απεικόνιση α) της ροής ύδατος διά μέσω στοιχείου πλήρως κορεσμένου εδάφους, και β) αέρα και ύδατος διά μέσω στοιχείου μή κορεσμένου εδάφους.

Έτσι στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά οι γενικευμένες εξισώσεις περιγραφής της ροής της υγρής φάσης διά μέσω των μή κορεσμένων εδαφών και η επίδραση του βαθμού κορεσμού επί του συντελεστή διαπερατότητας του εδάφους ως προς την υγρή φάση. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συσχέτιση του συντελεστή διαπερατότητας του εδάφους ως προς την υγρή φάση με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και οι εμπειρικές συσχετίσεις για την πρόβλεψη του από τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Ακολουθεί η παρουσίαση των εξισώσεων περιγραφής της ροής της αέριας φάσης διά μέσω του εδάφους (νόμος του Fick) και η επιρροή του βαθμού κορεσμού επί του συντελεστή διαπερατότητας του εδάφους ως προς την αέρια φάση. Μετά από την παρουσίαση του θεωρητικού πλαισίου, παρουσιάζονται οι εργαστηριακές μέθοδοι μέτρησης των συντελεστών διαπερατότητας ως προς την υγρή και ως προς την αέρια φάση. Όπως και στα Κεφάλαια 5 και 6, το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση εφαρμογών της εισαγωγής της επίδρασης του βαθμού κορεσμού επί του συντελεστή διαπερατότητας του εδάφους ως προς την υγρή φάση σε προβλήματα υπόγειας ροής.

## 7.2 ΡΟΗ ΤΗΣ ΥΓΡΗΣ ΦΑΣΗΣ ΔΙΑ ΜΕΣΩ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΥΖΗΣΗ

### 7.2.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου, στους πόρους των μή κορεσμένων εδαφών συνυπάρχουν δύο ρευστές φάσεις: η υγρή, η οποία στις περισσότερες των περιπτώσεων αποτελείται από νερό, και η αέρια, η οποία στις περισσότερες των περιπτώσεων αποτελείται από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Για την περιγραφή της ροής κάθε ρευστού απαιτείται ένας καταστατικός νόμος που να συνδέει την διαφορά δυναμικού που προκαλεί την ροή αυτή με την ταχύτητα ροής μέσω των κατάλληλων συντελεστών. Η αέρια φάση στα μή κορεσμένα εδάφη μπορεί να έχει την μορφή διακριτών φυσαλίδων όταν ο βαθμός κορεσμού είναι αρκετά υψηλός. Σε μικρότερες τιμές του βαθμού κορεσμού όμως αυτή γίνεται συνεχής. Η μορφή του νόμου που διέπει την ροή μεταβάλλεται ανάλογα με ποιιά από αυτές τις συνθήκες ισχύει. Εκτός αυτών (που περιγράφουν την ροή κάθε ρευστής φάσης διά μέσω του *εδάφους*) ενδέχεται να υπάρχει κίνηση της αέριας φάσης δια μέσω της υγρής φάσης, φαινόμενο το οποίο περιγράφεται ως *διάχυση της αέριας φάσης* (air diffusion) μέσω της υγρής φάσης των πόρων.

Η γνώση των διαφορών δυναμικού που προκαλούν την ροή της υγρής και της αέριας φάσης ή την διάχυση της αέριας φάσης είναι απαραίτητη για την κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν την ροή. Οι διαφορές δυναμικού που καθορίζουν την ροή και την διάχυση σε αυτό το κεφάλαιο δίνονται σε όρους υψομέτρου (heads). Η ροή της υγρής φάσης καθορίζεται από μία υδραυλική διαφορά δυναμικού, η οποία αποτελείται από μία συνιστώσα λόγω διαφοράς υψομέτρου ως προς ένα κοινό υψόμετρο αναφοράς και μία συνιστώσα λόγω διαφοράς πίεσης. Το αντίστοιχο συμβαίνει και με την ροή της αέριας φάσης. Η διάχυση της αέριας φάσης συμβαίνει υπό την επίδραση μίας διαφοράς συγκέντρωσης ή θερμοκρασίας.

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται η ροή της υγρής φάσης διά μέσω των μή κορεσμένων εδαφών και στην §7.3 η ροή της αέριας φάσης. Στην §7.4 γίνεται μία σύντομη αναφορά στην διάχυση της αέριας φάσης. Συνθήκες ροής υπό διαφορές συγκεντρώσεων σε χημικές ουσίες της υγρής φάσης των πόρων, διαφορές θερμοκρασίας και διαφορές ηλεκτρικού δυναμικού υπερβαίνουν την σκοπιμότητα παράθεσης του πρώτου μέρους της διατριβής.

## 7.2.2 Υδραυλική διαφορά δυναμικού και υδραυλική κλίση

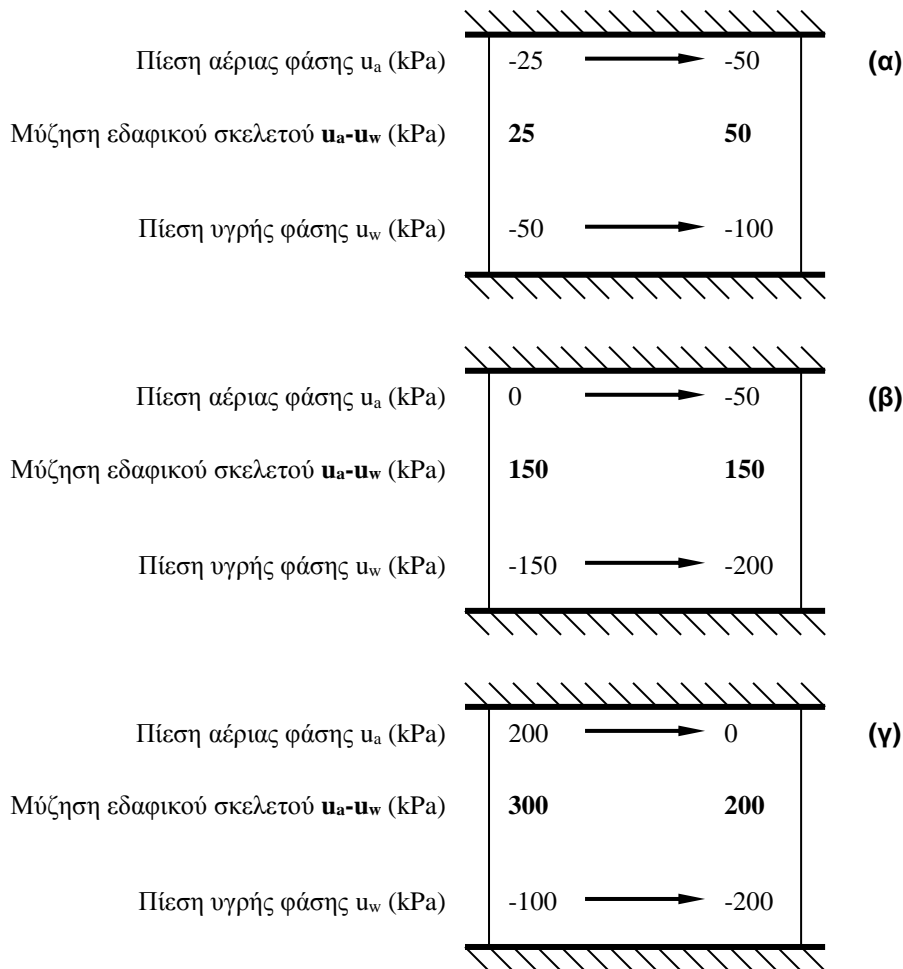
Διάφορες προτάσεις έχουν γίνει μέχρι σήμερα για την επεξήγηση της ροής της υγρής φάσης διά μέσω των μή κορεσμένων εδαφών. Ως διαφορές δυναμικού που οδηγούν στην ροή έχουν προταθεί η διαφορά στο ποσοστό υγρασίας, στην μύζηση εδαφικού σκελετού και στην διαφορά υδραυλικού δυναμικού.

Η διαφορά στο ποσοστό υγρασίας έχει χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει την κίνηση της υγρής φάσης στα μή κορεσμένα εδάφη, υποθέτοντας ότι νερό των πόρων του εδάφους ρέει από ένα σημείο υψηλότερου ποσοστού υγρασίας προς ένα σημείο χαμηλότερου ποσοστού υγρασίας. Παρά την διατύπωση τέτοιων νόμων ροής, αυτοί δεν τεκμηριώνονται γενικά, αφού ροή μπορεί να συμβεί και από σημεία χαμηλότερου ποσοστού υγρασίας προς σημεία υψηλότερου ποσοστού υγρασίας, ανάλογα με την φύση του εδάφους στην κάθε θέση, φαινόμενα υστέρησης και την ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρανσης. Ένας τέτοιος νόμος λοιπόν δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ροής της υγρής φάσης σε μή κορεσμένα εδάφη.

Για την περιγραφή της κίνησης της υγρής φάσης στα μή κορεσμένα εδάφη έχει χρησιμοποιηθεί και η μύζηση εδαφικού σκελετού, υποθέτοντας ότι νερό των πόρων του εδάφους ρέει από ένα σημείο χαμηλότερης μύζησης προς ένα σημείο υψηλότερης μύζησης. Και πάλι όμως η εμφάνιση ροής μέσα σε ένα μή κορεσμένο εδαφικό υλικό δεν εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από την διαφορά στην μύζηση εδαφικού σκελετού. Στο Σχ. 7.2 επιδεικνύονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις διαφορών μύζησης σε ένα δοκίμιο μή κορεσμένου εδάφους με διαφορετικές τιμές στις επιμέρους συνιστώσες της πίεσης σε κάθε ρευστή φάση. Στο Σχ. 7.2α η μύζηση στο αριστερό άκρο του δοκιμίου είναι μικρότερη από την μύζηση στο δεξιό άκρο, στο Σχ. 7.2β οι τιμές της μύζησης είναι οι ίδιες και στα δύο άκρα, και στο Σχ. 7.2γ η μύζηση στο δεξιό άκρο του δοκιμίου είναι μικρότερη από την μύζηση στο αριστερό άκρο. Και στις τρεις περιπτώσεις ωστόσο θα συμβεί ροή της υγρής φάσης (αλλά και της αέριας) από το αριστερό άκρο προς το δεξιό άκρο του δοκιμίου, ως αποτέλεσμα της διαφοράς στις τιμές των πιέσεων σε κάθε φάση του μή κορεσμένου εδάφους ξεχωριστά. Ακόμα και στην περίπτωση του Σχ. 7.2β, όπου η τιμή της μύζησης είναι η ίδια, θα υπάρξει ροή.

Με βάση και το προηγούμενο παράδειγμα, η ροή κάθε φάσης μπορεί να οριστεί σε όρους πίεσης επί της κάθε φάσης. Στην ειδική περίπτωση που η πίεση της αέριας φάσης είναι κοινή παντού, ίση με την ατμοσφαιρική (όπως συνήθως συμβαίνει στα περισσότερα μή κορεσμένα εδαφικά υ-





**Σχήμα 7.2.** Παραδείγματα διαφορών μύζησης εδαφικού σκελετού υπό διαφορετικές διαφορές των τιμών της πίεσης σε κάθε φάση ξεχωριστά, οι οποίες όμως οδηγούν στην ίδια εμφάνιση ροής της κάθε φάσης (με βάση τους Fredlund & Rahardjo, 1993).

λικά κοντά στην επιφάνεια του εδάφους), τότε πράγματι η διαφορά στην μύζηση είναι αριθμητικά ίση με την διαφορά υδραυλικού δυναμικού μεταξύ σημείων ιδίου υψομέτρου. Ακόμα όμως και σε αυτήν την περίπτωση, αν γίνει γενίκευση για σημεία με διαφορετικό υψόμετρο, τότε δεν έχει ληφθεί υπόψη (ειδικά για την υγρή φάση, που έχει και μεγαλύτερη σημασία λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητάς της) η επιρροή του υψομέτρου.

Πρέπει να επισημανθεί σε αυτό το σημείο ότι η διατύπωση της ροής των ρευστών φάσεων σε όρους της πίεσης σε κάθε φάση ξεχωριστά αποτελεί την μοναδική περίπτωση στην μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών που δεν χρησιμοποιείται η μύζηση, δηλ. το

συνδυασμένο αποτέλεσμα της πίεσης στην υγρή φάση και στην αέρια. Αντίστοιχα βέβαια και στα πλήρως κορεσμένα εδάφη, για την περιγραφή της ροής του νερού των πόρων δεν χρησιμοποιείται η μία και μοναδική παράμετρος τάσης, η ενεργός τάση, αλλά η πίεση στην υγρή φάση και το δυναμικό λόγω υψομέτρου, δηλ. η ενέργεια στην υγρή φάση μόνο. Ομοίως λοιπόν και στα μη κορεσμένα εδάφη δεν χρησιμοποιείται η μύζηση –η οποία είναι παράμετρος τάσης στα μη κορεσμένα εδάφη- αλλά η πίεση στην κάθε φάση για την οποία ενδιαφέρει η ροή.

Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο σημεία για την ροή του νερού εκφράζει την ενέργεια που μπορεί να «ξοδευτεί» για να παραχθεί έργο από την κίνηση του νερού από το ένα σημείο στο άλλο. Η ενέργεια σε ένα σημείο υπολογίζεται ως προς ένα επίπεδο αναφοράς, το οποίο επιλέγεται αυθαίρετα, αφού εκείνο που έχει σημασία για την περιγραφή της ροής είναι η διαφορά στην ενέργεια ανάμεσα σε δύο σημεία και όχι η απόλυτη τιμή. Κάθε σημείο μέσα στην υγρή φάση των πόρων του εδάφους έχει τρεις συνιστώσες της ενέργειας: μία λόγω του πεδίου βαρύτητας, μία λόγω του πεδίου πιέσεων και μία λόγω του πεδίου ταχυτήτων. Στο Σχ. 7.3 δείχνεται τυχαίο σημείο Α σε υψόμετρο  $y$  από αυθαίρετα επιλεγθέν επίπεδο αναφοράς. Η ολική ενέργεια στο σημείο Α δίνεται σε όρους υψομέτρων (heads) από την Εξ. 7.1 η οποία ονομάζεται και *πιεζομετρική συνάρτηση*, όπου  $h_w$  είναι το υδραυλικό δυναμικό,  $y$  η κατακόρυφη απόσταση (ύψος ή στάθμη) από τυχόν, αλλά συγκεκριμένο οριζόντιο επίπεδο αναφοράς,  $u_w$  είναι η πίεση της υγρής φάσης,  $\rho_w$  είναι η πυκνότητα του υγρού των πόρων,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας, και  $v_w$  είναι η ταχύτητα ροής του υγρού των πόρων.

$$h_w(x, y, z) = y + \frac{u_w}{\rho_w g} + \frac{v_w^2}{2g} \quad (7.1)$$

Το υδραυλικό δυναμικό αποτελείται από τρεις συνιστώσες αντίστοιχες με τις συνιστώσες της ενέργειας: το βαρυτικό δυναμικό ( $y$ ), το δυναμικό λόγω πίεσης ( $u_w/\rho_w g$ ) και το δυναμικό λόγω ταχύτητας ( $v_w^2/2g$ ). Στα περισσότερα εδαφικά υλικά η ταχύτητα είναι πολύ μικρή και κατά συνέπεια το δυναμικό λόγω ταχύτητας αμελητέο σε σύγκριση με το δυναμικό λόγω βαρύτητας και λόγω πίεσης. Η Εξ. 7.1 λοιπόν εκφυλίζεται στην Εξ. 7.2.

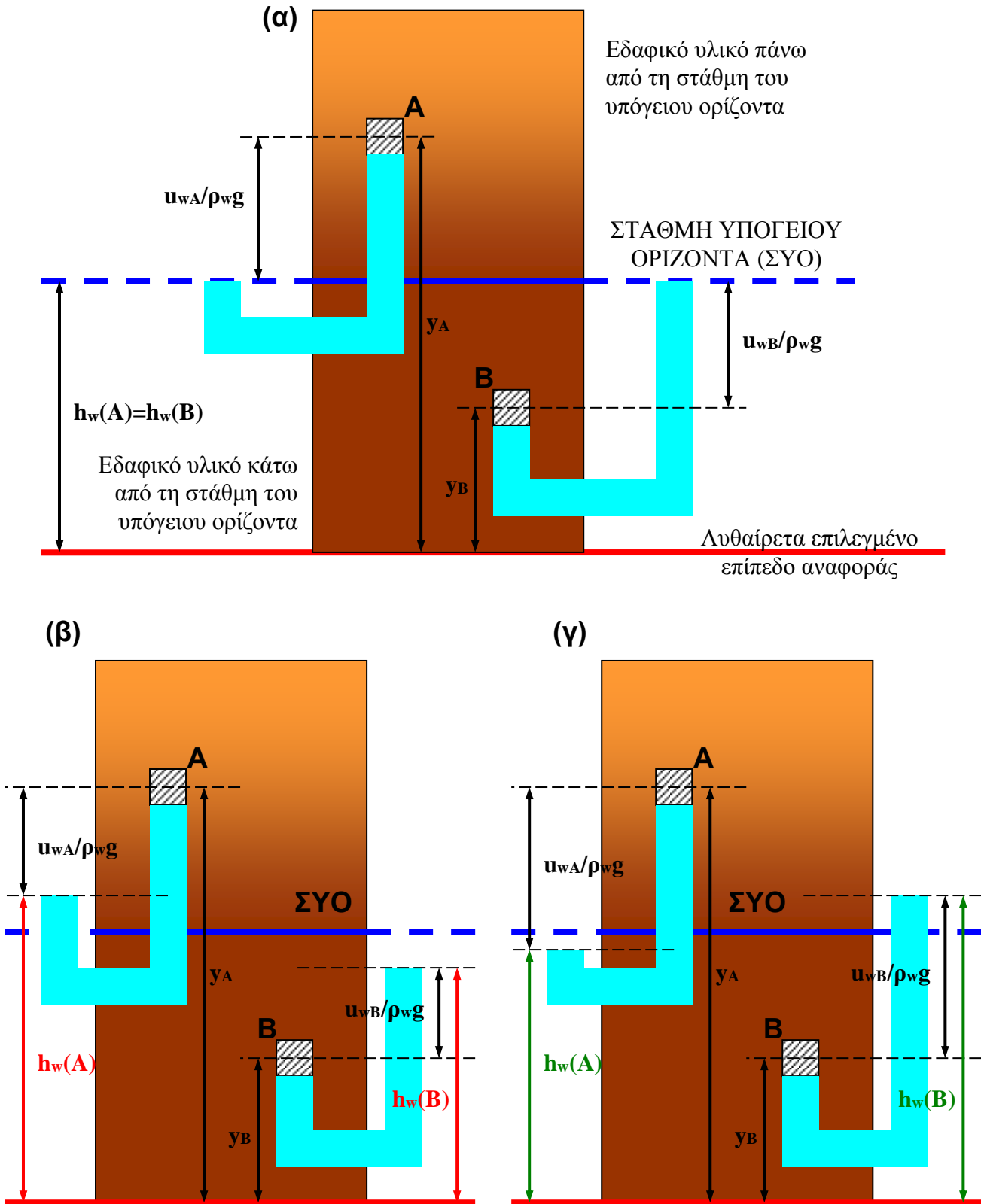
$$h_w(x, y, z) = y + \frac{u_w}{\rho_w g} \quad (7.2)$$

Το Σχ. 7.3 χρησιμοποιείται για να εξηγήσει την σημασία της διαφοράς υδραυλικού δυναμικού ως αιτίας της ροής της υγρής φάσης. Στο Σχ. 7.3α παρουσιάζεται τομή εδάφους με την Στάθμη Υπόγειου Ορίζοντα (ΣΥΟ) σε δεδομένη θέση και υδροστατική κατανομή της πίεσης των πόρων πάνω και κάτω από αυτήν, πίεση της αέριας φάσης ίση με την ατμοσφαιρική, και ισορροπία κάθε σημείου πάνω και κάτω από την ΣΥΟ με αυτήν. Έτσι, αν θεωρηθούν δύο τυχαία σημεία Α και Β, πάνω και κάτω από την ΣΥΟ αντίστοιχα και υπολογιστεί το υδραυλικό δυναμικό σε κάθε θέση από το απεικονιζόμενο, αυθαίρετα επιλεγμένο, επίπεδο αναφοράς, τότε προκύπτουν τα εξής για κάθε σημείο: το υδραυλικό δυναμικό από το απεικονιζόμενο, αυθαίρετα επιλεγμένο, επίπεδο αναφοράς είναι κοινό και για τα δύο σημεία και ισούται με  $h_w(A) = y_A - (u_{wA}/\rho_w g) = h_w(B) = y_B + (u_{wB}/\rho_w g)^2$ .

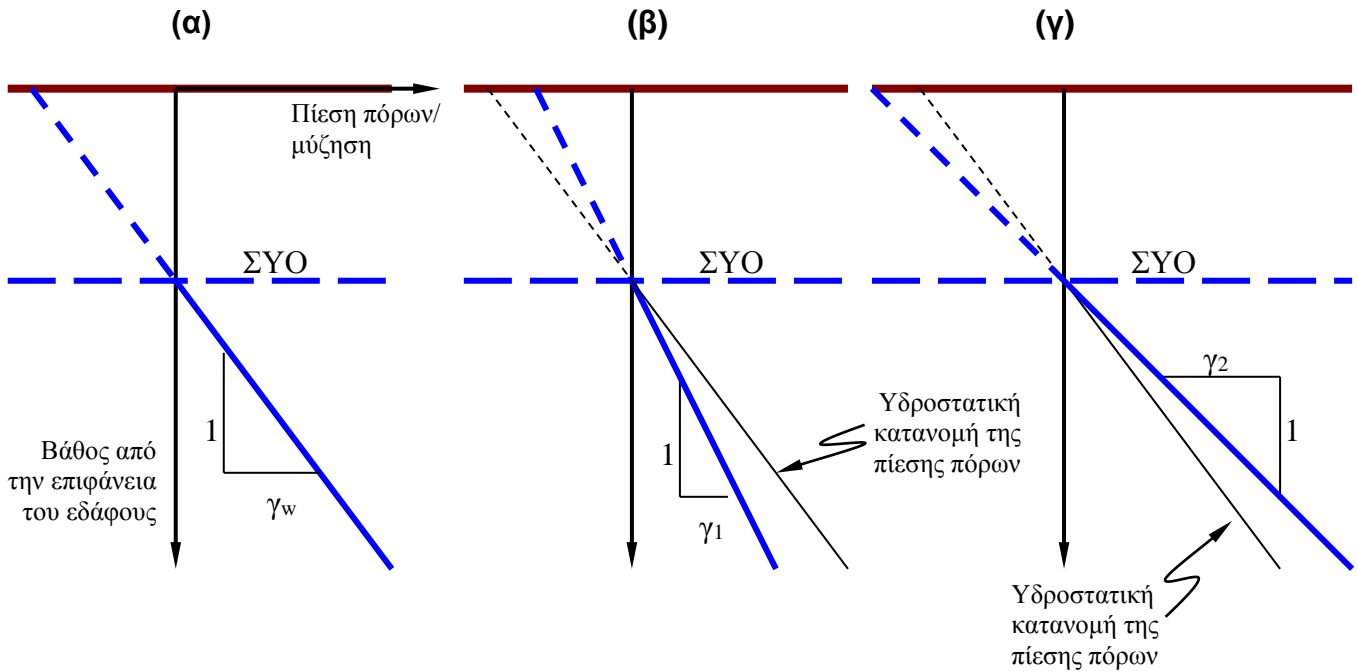
Στο Σχ. 7.3β το σημείο Α έχει αρνητική πίεση της υγρής φάσης που ισορροπεί με μία στάθμη *υψηλότερη* από την ΣΥΟ, ενώ το σημείο Β έχει θετική πίεση της υγρής φάσης που ισορροπεί με μία στάθμη *χαμηλότερη* από την ΣΥΟ. Το υδραυλικό δυναμικό λοιπόν για κάθε θέση προκύπτει αντίστοιχα  $h_w(A) = y_A - (u_{wA}/\rho_w g)$  και  $h_w(B) = y_B + (u_{wB}/\rho_w g)$ , και μάλιστα ισχύει  $h_w(A) > h_w(B)$ . Κατά συνέπεια, *παρόλο που στο σημείο Α υπάρχει αρνητική πίεση πόρων και στο σημείο Β θετική, η διαφορά του υδραυλικού δυναμικού είναι τέτοια που θα υπάρξει ροή από το σημείο Α προς το σημείο Β*. Στο Σχ. 7.3γ παρουσιάζεται η αντίστροφη κατάσταση κατά την οποία το σημείο Α έχει αρνητική πίεση της υγρής φάσης που ισορροπεί με μία στάθμη *χαμηλότερη* από την ΣΥΟ, ενώ το σημείο Β έχει θετική πίεση της υγρής φάσης που ισορροπεί με μία στάθμη *υψηλότερη* από την ΣΥΟ. Το υδραυλικό δυναμικό λοιπόν για κάθε θέση προκύπτει αντίστοιχα  $h_w(A) = y_A - (u_{wA}/\rho_w g)$  και  $h_w(B) = y_B + (u_{wB}/\rho_w g)$ , και μάλιστα ισχύει  $h_w(A) < h_w(B)$ . Έτσι σε αυτήν την περίπτωση, *παρόλο που στο σημείο Α υπάρχει αρνητική πίεση πόρων και στο σημείο Β θετική, είναι η διαφορά του υδραυλικού δυναμικού που προκαλεί την ροή από το σημείο Β προς το σημείο Α*. Κατά συνέπεια, η ροή συμβαίνει από σημεία υψηλότερου υδραυλικού δυναμικού προς σημεία χαμηλότερου υδραυλικού δυναμικού.

Οι κατανομές της πίεσης πόρων για κάθε μία από τις περιπτώσεις (α), (β) και (γ) του Σχ. 7.3 παρουσιάζονται στο Σχ. 7.4. Η περίπτωση (α) αντιστοιχεί στην υδροστατική κατανομή της πίεσης πόρων κάτω από τη ΣΥΟ με κατανομή της μύζησης/αρνητικής πίεσης πόρων πάνω από τον υπόγειο ορίζοντα με την ίδια κλίση ( $\gamma_w$ ). Η περίπτωση (β) αντιστοιχεί σε κατανομή της πίε-

<sup>2</sup> Η ισότητα αυτή δεν ισχύει λόγω της ίδιας απόστασης των σημείων Α και Β από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα. Η ισότητα αυτή ισχύει ανάμεσα σε οποιοδήποτε σημείο πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και οποιοδήποτε σημείο κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα.



**Σχήμα 7.3.** Παραδείγματα διαφορών υδραυλικού δυναμικού για κοινή θέση της στάθμης υπόγειου ορίζοντα: α) μηδενική διαφορά, πίεση στην υγρή φάση στα σημεία A και B σε ισορροπία με την στάθμη υπόγειου ορίζοντα, β) θετική διαφορά  $\Rightarrow$  ΡΟΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ A ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ B, και γ) αρνητική διαφορά  $\Rightarrow$  ΡΟΗ ΑΠΟ ΤΟ ΣΗΜΕΙΟ B ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ A.



**Σχήμα 7.4.** Κατανομές πίεσης πόρων και μύζησης που αντιστοιχούν στις περιπτώσεις (α), (β) και (γ) του Σχ. 7.3.

σης πόρων και της μύζησης/αρνητικής πίεσης πόρων με κλίση μικρότερη της υδροστατικής,  $\gamma_1 < \gamma_w$ . Τέλος, η περίπτωση (γ) αντιστοιχεί σε κατανομή της πίεσης πόρων και της μύζησης/αρνητικής πίεσης πόρων με κλίση μεγαλύτερη της υδροστατικής,  $\gamma_2 > \gamma_w$ .

Οι Bardanis & Dounias (2004), Μπαρδάνης και λοιποί (2006β) και Bardanis et al. (2009) έχουν παρουσιάσει κατανομές πίεσης πόρων όμοιες με αυτές της περίπτωσης (β), ενώ οι Μπαρδάνης και λοιποί (2006α) και Bardanis et al. (2009) παρουσιάζουν τους λόγους της εμφάνισης τέτοιων κατανομών προχωρώντας και στην σχετική αριθμητική διερεύνηση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης η απόκλιση από την υδροστατική κατανομή δεν είναι υποχρεωτικό να συμβαίνει καθ'όλο το βάθος. Στο Σχ. 6.22 στο Κεφ. 6 παρουσιάζονται μετρήσεις μύζησης πάνω από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα, όπου τοπικά γίνεται  $\gamma_2 > \gamma_w$ . Δεδομένου ότι η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί σε ξήρανση από την επιφάνεια κατά τους θερινούς μήνες, το αντίθετο φαινόμενο παρουσιάζεται κατά την ύγρανση από την επιφάνεια κατά τους χειμερινούς μήνες, οπότε γίνεται  $\gamma_1 < \gamma_w$ .

Αντίστοιχη περίπτωση με αυτήν του Σχ. 6.22 υφίσταται και στις περιπτώσεις αρτεσιανισμού με τον ορίζοντα με αρτεσιανή πίεση να υπόκειται σχηματισμών χαμηλής διαπερατότητας. Στις κατώτερες στρώσεις των σχηματισμών χαμηλής διαπερατότητας τότε εμφανίζεται τοπικά συνθήκη της μορφής  $\gamma_2 > \gamma_w^3$ . Η διατύπωση της διαφοράς υδραυλικού δυναμικού σε όλες αυτές τις περιπτώσεις είναι συμβατή με την αναμενόμενη εμφάνιση ροής σε κάθε μία από αυτές.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω λοιπόν προκύπτει ο εξής απλώς κανόνας: αποκλίσεις μετρηθεισών κατανομών πίεσης πόρων ή μύζησης από την υδροστατική κατανομή μεταφράζονται στην παρουσία ροής προς τα κάτω όταν  $\gamma_1 < \gamma_w$  (περίπτωση β στο Σχ. 7.4) και προς τα πάνω όταν  $\gamma_2 > \gamma_w$  (περίπτωση γ στο Σχ. 7.4).

Εκτός από τα παραπάνω, προκύπτει και η εξής πρακτικού χαρακτήρα παρατήρηση. Συχνά οι καταγραφόμενες πρωινές και βραδινές στάθμες υδάτων κατά την διάνοιξη γεωτρήσεων δεν χρησιμοποιούνται ως τίποτα περισσότερο από αυτό: στάθμες. Προκειμένου όμως για γεωτρήσεις τα τοιχώματα των οποίων έχουν επενδυθεί με σωλήνα μέχρι σημαντικό βάθος και επικρατούν σε αυτές συνθήκες διάτρησης που δεν επιτρέπουν μεγάλο ρυθμό προχώρησης, οι πρωινές στάθμες μπορούν να μετατραπούν σε πιέσεις πόρων που αντιστοιχούν στην στήλη νερού μεταξύ στάθμης και πυθμένα γεώτρησης για κάθε βάθος. Εάν χαραχθούν τα διαγράμματα των πιέσεων αυτών με το βάθος τότε από την βέλτιστη γραμμική προσέγγιση διά των σημείων αυτών, προεκτεταμένη μέχρι την μηδενική τιμή της πίεσης πόρων προκύπτει το βάθος του υπόγειου ορίζοντα. Ακόμα σπουδαιότερα χαράσσοντας την υδροστατική κατανομή από αυτό το βάθος, συγκρίνονται η μετρηθείσα κατανομή πίεσης πόρων με την υδροστατική. Οι Μπαρδάνης και λοιποί (2006α & 2006β) και Bardanis et al. (2009) έχουν παρουσιάσει παραδείγματα τέτοιων μετατροπών των πρωινών σταθμών και χάραξης των προκυπτουσών κατανομών πίεσης πόρων.

Εκτός των προαναφερθεισών διατυπώσεων για την πιεζομετρική συνάρτηση, υπάρχουν και διατυπώσεις κατά τις οποίες έχει προστεθεί και ένας όρος για την ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης στην διατύπωση του ολικού υδραυλικού δυναμικού. Ωστόσο, είναι γενικά προτιμότερο να χρησιμοποιείται ξεχωριστά η διαφορά στην ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης για να

---

<sup>3</sup> Γεωτεχνική έρευνα ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. για την νέα γέφυρα του αυτοκινητοδρόμου Ελευσίνα-Κόρινθος-Πάτρα-Πύργος-Τσακώνα πάνω από τον Ποταμό Νέδα στα πλαίσια της προετοιμασίας της προσφοράς της Hellenic Autoristas για την ανάληψη του έργου κατασκευής του αυτοκινητοδρόμου. Δύο γεωτρήσεις εκατέρωθεν της κοίτης του Ποταμού Νέδα διέτρησαν αρχικά υλικά κοίτης του ποταμού, στη συνέχεια μάργες και κάτω από αυτές διαπερατά υλικά με αρτεσιανή πίεση. Στο κάτω τμήμα των μαργών οι πρωινές στάθμες κατά την διάτρηση ισορροπούσαν σε απόλυτα υψόμετρα πάνω από την στάθμη του παρακείμενου ποταμού, ως αποτέλεσμα της προοδευτικής εξισορρόπησης με την αρτεσιανή πίεση στην υποκείμενη διαπερατή στρώση.

περιγράφεται το φαινόμενο της ωσμωτικής διάχυσης (osmotic diffusion) –Freeze & Cherry, 1979. Η ωσμωτική διάχυση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ιόντα ή μόρια διαλυμένων ουσιών κινούνται λόγω της διαφοράς στην συγκέντρωσή τους, η οποία καθορίζει με την σειρά της την ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης. Για παράδειγμα, *μόρια νερού* θα κινηθούν από υδατικό διάλυμα χαμηλότερης συγκέντρωσης προς υδατικό διάλυμα υψηλότερης συγκέντρωσης όταν τα δύο διαλύματα διαχωρίζονται από ημιδιαπερατή μεμβράνη (τόσο μικρών πόρων, που δεν επιτρέπει την διέλευση των μορίων της διαλυμένης ουσίας). Από την άλλη πλευρά, *διαλύτες και διαλυμένες ουσίες* μαζί (π.χ. το νερό των πόρων και τυχόν διαλυμένες ουσίες μέσα σε αυτό) θα κινηθούν διά μέσω του εδάφους λόγω της ύπαρξης διαφοράς υδραυλικού δυναμικού. Κατά συνέπεια παρουσιάζεται υπολογιστικά βολικός ο διαχωρισμός του μηχανισμού της ροής του νερού των πόρων ως διαλύματος σε τυχόν ξένες ουσίες από τον μηχανισμό της ωσμωτικής διάχυσης (Corey, 1977).

### 7.2.3 Ο νόμος του Darcy για μή κορεσμένα εδάφη

Η ροή νερού δια μέσω ενός πλήρως κορεσμένου εδάφους περιγράφεται από τον νόμο του Darcy (1856). Με βάση αυτόν η ταχύτητα ροής είναι ανάλογη της *υδραυλικής διαφοράς δυναμικού κατά μήκος συγκεκριμένης απόστασης προς την απόσταση αυτή* (ή υδραυλικής κλίσης), όπως φαίνεται στην Εξ. 7.3,

$$v_w = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \quad (7.3)$$

όπου  $v_w$  είναι η *φαινόμενη ταχύτητα ροής* του νερού των πόρων (και εκφράζει την ευθύγραμμη απόσταση που διανύεται από την ροή),  $k_w$  ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς το νερό, και  $\partial h_w / \partial y$  η διαφορά υδραυλικού δυναμικού κατά μήκος της διεύθυνσης  $y$  ή αλλιώς η υδραυλική κλίση στην διεύθυνση  $y$ ,  $i_{wy}$ .

Ο συντελεστής αναλογίας στην ταχύτητα ροής και την υδραυλική κλίση ονομάζεται συντελεστής διαπερατότητας ως προς το νερό  $k_w$ . Η υδραυλική κλίση αποτελεί την κλίση (gradient) της πιεζομετρικής συνάρτησης, η οποία ορίζεται από την Εξ. 7.4.

$$\vec{i} \equiv \vec{\nabla}h(x, y, z) \quad (7.4)$$

Η Εξ. 7.3 μπορεί να διατυπωθεί και για τις διευθύνσεις των αξόνων  $x$  και  $z$  λοιπόν, ή στην γενική τανυστική της μορφή (Εξ. 7.5), όπου μάλιστα και ο συντελεστής διαπερατότητας παρουσιάζεται στη γενική του μορφή ως ανισότροπο (τανυστικό) μέγεθος. Το αρνητικό πρόσημο στο δεξιό μέρος της Εξ. 7.3 δηλώνει ότι η ροή γίνεται στην κατεύθυνση που μειώνεται η υδραυλική κλίση.

$$\vec{v}_w = -k_w(x, y, z) \cdot \vec{i} \quad (7.5)$$

Ο νόμος του Darcy, όπως διατυπώνεται στις Εξ. 7.3 και 7.5, περιγράφει την συσχέτιση μεταξύ φαινόμενης ταχύτητας ροής και υδραυλικής κλίσης για το μεγαλύτερο εύρος κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών. Προκειμένου όμως για εδαφικά υλικά πολύ μεγάλων κόκκων ή και άλλα πορώδη υλικά εκτός των εδαφικών υλικών η συσχέτιση μεταξύ φαινόμενης ταχύτητας ροής και υδραυλικής κλίσης έχει γενικευτεί με την διατύπωση του Khristianovich (1940) –Εξ. 7.6.

$$v_w = -k_w i^m \quad (7.6)$$

Ο εμπειρικός συντελεστής  $m$  λαμβάνει τιμές από 1 έως 2 και για τα περισσότερα εδαφικά υλικά (αργίλους έως χονδρόκοκκες άμμους και λεπτούς χάλικες) λαμβάνει τιμές από 1.0 έως 1.1. Στην περίπτωση αυτή, πράγματι η γενικευμένη διατύπωση του Khristianovich (1940) εκφυλίζεται πρακτικά στον νόμο του Darcy. Για εδαφικά υλικά όμως όπως οι χονδροί χάλικες και οι λίθοι (χωρίς λεπτότερα κλάσματα), η βραχορριπή και εν γένει πορώδη μέσα τέτοιου μεγέθους κόκκων και διάταξης που να οδηγούν σε αντίστοιχα μεγάλα κενά των πόρων (π.χ. «μπλόκια» λιμενικού τύπου), ο συντελεστής  $m$  μπορεί να φτάσει ακόμα και την τιμή 2 επηρεάζοντας σημαντικά την τιμή του συντελεστή διαπερατότητας.

Ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση,  $k_w$ , αποτελεί ουσιαστικά μέτρο της επιφάνειας επί δεδομένης διατομής του εδάφους διά της οποίας μπορεί να γίνει η κίνηση της υγρής φάσης. Εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους αλλά και του υγρού από το οποίο αποτελείται η υγρή φάση. Η συσχέτιση αυτή εκφράζεται μέσω της Εξ. 7.7, όπου  $\rho_w$  είναι η



πυκνότητα του υγρού,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\mu_w$  το κινηματικό ιξώδες του υγρού των πόρων, και  $K$  η εγγενής διαπερατότητα του εδάφους (intrinsic permeability).

$$k_w = (\rho_w g / \mu_w) K \quad (7.7)$$

Η εγγενής διαπερατότητα του εδάφους<sup>4</sup> εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού και είναι ανεξάρτητη των ιδιοτήτων του υγρού που αποτελεί την υγρή φάση. Σε άλλες επιστημονικές περιοχές έχει επικρατήσει η χρήση της εγγενούς διαπερατότητας των πορωδών μέσων, αλλά ειδικά στην περιοχή της εδαφομηχανικής έχει επικρατήσει η χρήση του συντελεστή διαπερατότητας. Ο λόγος για αυτό είναι πιθανόν ότι στην συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων στην εδαφομηχανική οι ιδιότητες του υγρού (και συγκεκριμένα του νερού) των πόρων είναι πρακτικά οι ίδιες σε όλες τις δυνατές συνθήκες που μπορούν να απαντηθούν<sup>5</sup>, οπότε στην πραγματικότητα ο συντελεστής διαπερατότητας είναι ευθέως ανάλογος της εγγενούς διαπερατότητας.

Η σημασία της γενικευμένης διατύπωσης του Khristianovich (1940) έγκειται στο ότι εισάγει και την φύση της ροής εντός του πορώδους μέσου. Για αυξημένες τιμές του συντελεστή  $m$  στην Εξ. 7.6 η φαινόμενη ταχύτητα ροής προκύπτει μικρότερη για την ίδια τιμή της υδραυλικής κλίσης και του συνδυασμού υγρό των πόρων-πορώδες μέσο, σε σχέση με την τιμή που προκύπτει για  $m \cong 1$ , δηλ. την διατύπωση του νόμου του Darcy. Αυτό οφείλεται στο ότι ο νόμος του Darcy διατυπώθηκε για εδαφικά υλικά τόσο λεπτόκοκκα, δηλ. εδαφικά υλικά εντός των οποίων η ταχύτητα ροής είναι τόσο χαμηλή, ώστε η ροή είναι πράγματι *στρωτή* (laminar). Αντίθετα για εδαφικά υλικά ή άλλα πορώδη μέσα με κόκκους τόσο μεγάλων διαστάσεων ώστε να δημιουργούν μεγάλου μεγέθους κενά, η ταχύτητα ροής μπορεί να γίνει τόσο υψηλή (για το μέγεθος αυτών των πόρων), ώστε η ροή να είναι *τυρβώδης* (turbulent). Η διατύπωση του Khristianovich (1940) λοιπόν προβλέπει ορθά τη μειωμένη φαινόμενη ταχύτητα ροής λόγω *τύρβης* υπό αυτές τις συνθήκες.

<sup>4</sup> Διευκρινίζεται ότι δεν πρέπει να συγχέεται η εγγενής διαπερατότητα με τον εγγενή συντελεστή διαπερατότητας, ο οποίος παρουσιάζεται και επεξηγείται στο Κεφ.10 στο Δεύτερο Μέρος της διατριβής.

<sup>5</sup> Εξαιρουμένων των συνθηκών πολύ κοντά στην θερμοκρασία 0 °C –προφανώς για μικρότερες θερμοκρασίες δεν υφίσταται ροή νερού. Για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες πράγματι υφίστανται μεταβολές των ιδιοτήτων του νερού, αλλά η επιρροή τους στον συντελεστή διαπερατότητας για σταθερή εγγενή διαπερατότητα είναι πρακτικά αμελητέες σε σχέση με τις μεταβολές που προκαλούνται στο μέγεθος από τις μεταβολές του βαθμού κορεσμού και του λόγου κενών.

Κατά τους Goldin & Rasskazov (1992) τυρβώδης ροή εντός εδαφικών υλικών μπορεί να υπάρχει μόνο εντός ομοιόμορφων λίθων και βραχορριπής, οπότε ο συντελεστής  $m$  παίρνει την μέγιστη τιμή του. Κατά τους ίδιους η μετάβαση μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής συμβαίνει οπουδήποτε μεταξύ των τιμών του συντελεστή  $m$  1.1 και 1.85. Ενδεικτικά για τιμές του συντελεστή διαπερατότητας μεταξύ  $10^{-1}$  και  $10^{-2}$  m/s ο συντελεστής  $m$  έχει καταγραφεί από 1.05 έως 1.72 ανάλογα με την πυκνότητα και την ομοιομορφία στην κοκκομετρική διαβάθμιση των εξεταζόμενων υλικών.

Κατά τη μελέτη της ροής διά μέσω πλήρως κορεσμένου εδάφους, εφόσον ο όγκος του παραμένει σταθερός, αλλά και κάθε φορά που έχουμε συνθήκες μόνιμης ροής, όπως φαίνεται ποιοτικά και στο Σχ. 7.1α, η συνολική μάζα του νερού που εισέρχεται σε ένα στοιχείο πλήρως κορεσμένου εδάφους πρέπει να ισούται με τη μάζα του νερού που εξέρχεται από αυτό. Κατά συνέπεια ισχύει η γνωστή από την υδραυλική εξίσωση συνέχειας. Η εξίσωση συνέχειας διατυπωμένη σε τρεις διαστάσεις και καρτεσιανές συντεταγμένες εκφράζεται από την Εξ. 7.8.

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (7.8)$$

Εάν η Εξ. 7.8 συνδυαστεί με τις Εξ. 7.4 και 7.5, τότε προκύπτει η γενική μορφή της εξίσωσης Laplace (για ανισότροπο συντελεστή διαπερατότητας) η οποία εκφράζεται από την Εξ. 7.9.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = 0 \quad (7.9)$$

Αντίθετα, κατά τη μελέτη της ροής διά μέσω μη κορεσμένου εδάφους ακόμα και αν ο όγκος του εδάφους παραμένει σταθερός, όπως φαίνεται ποιοτικά και στο Σχ. 7.1β, μαζί με τη συνολική μάζα του νερού που εισέρχεται σε ένα στοιχείο μη κορεσμένου εδάφους εισέρχεται (ή εξέρχεται) και ποσότητα αέρα καθιστώντας άγνωστη τη σχέση μεταξύ των δύο αυτών ποσοτήτων κατά την έξοδο από το εδαφικό στοιχείο.

Κατά συνέπεια πρέπει να είναι γνωστή μία επιπλέον πληροφορία δηλ. η σχέση μεταξύ του όγκου που καταλαμβάνει η αέρια και η υγρή φάση των πόρων εντός του εδαφικού στοιχείου.

Η εξίσωση Laplace τότε εκφράζεται από την Εξ. 7.10, όπου  $\theta$  το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας του μη κορεσμένου εδάφους.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (7.10)$$

Από τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού όμως, το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας  $\theta$  συσχετίζεται με την μύζηση όπως φαίνεται στην Εξ. 7.11, όπου  $m_w$  η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.

$$\partial \theta = m_w \partial(u_a - u_w) = m_w \gamma_w \partial(h_w - y) \quad (7.11)$$

Επειδή το απόλυτο υψόμετρο  $y$  είναι σταθερό με το χρόνο οπότε  $\partial y / \partial t = 0$ , αντικαθιστώντας στην Εξ. 7.11 και εισάγοντας στην Εξ. 7.10 προκύπτει η Εξ. 7.12.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) = m_w \gamma_w \frac{\partial h_w}{\partial t} \quad (7.12)$$

Η Εξ. 7.12 αποτελεί την γενικευμένη μορφή της εξίσωσης Laplace για μη κορεσμένα εδάφη και συνιστά την διαφορική εξίσωση που διέπει την κίνηση της υγρής φάσης διά μέσω μη κορεσμένων εδαφών. Συνδέει την κλίση της πιεζομετρικής συνάρτησης μέσω του νόμου του Darcy με την χρονική μεταβολή της πιεζομετρικής συνάρτησης και την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Η επίλυση της εξίσωσης αυτής γίνεται συνήθως αριθμητικά με τις διάφορες μεθόδους που έχουν εισαχθεί σε διαθέσιμους κώδικες πεπερασμένων στοιχείων.

Το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας ισούται με τον λόγο του όγκου του νερού των πόρων προς τον ολικό όγκο του εδάφους (Εξ. 2.14 Κεφ. 2). Αποδεικνύεται εύκολα ότι το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας ισούται με το γινόμενο του πορώδους,  $n$ , επί τον βαθμό κορεσμού<sup>6</sup>. Η επισήμανση αυτή γίνεται για να επισημανθεί η σημασία του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας ως φυσικού μεγέθους, αφού χωρίς αυτό στην Εξ. 7.11 θα έπρεπε να εισαχθεί και η μεταβολή του πορώδους, δηλ. του λόγου κενών αφού  $n = e / (1 + e)$ , και του βαθμού κορεσμού. Τέλος, από την μορφή της Εξ. 7.12 προκύπτει η σημασία της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, αφού

<sup>6</sup>  $\theta = V_w / V_{ολ} = (V_w / V_{ολ}) \cdot (V_v / V_v) = (V_w / V_{ολ}) \cdot (V_w / V_v) = n \cdot S_r$ , όπου  $V_v$  ο όγκος των κενών του εδάφους.

η κλίση της  $m_w$  σε ένα πρόβλημα που επιλύεται αριθμητικά και είναι γνωστή η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού είναι προφανώς μεταβαλλόμενη εξαρτώμενη από το μέγεθος της μύζησης σε κάθε θέση μέσα στο εδαφικό υλικό.

#### **7.2.4 Συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση και η συσχέτισή του με τον βαθμό κορεσμού**

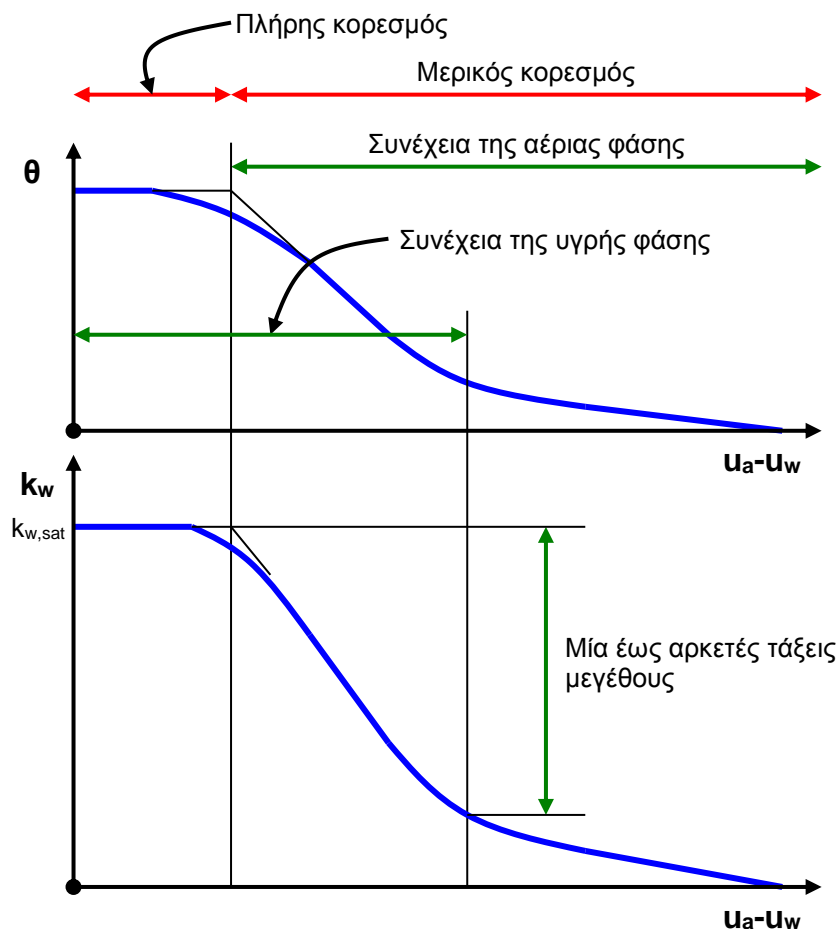
Η προηγούμενη παράγραφος κατέληξε με την επισήμανση της σημασίας της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στην διαφορική εξίσωση που διέπει την κίνηση της υγρής φάσης διά μέσω των μη κορεσμένων εδαφών. Εκτός από την άμεση επιρροή της στην διαφορική αυτή εξίσωση, η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού έχει και δευτερογενή επιρροή αφού από αυτήν εξαρτάται και ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση.

Ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση μειώνεται κατά αρκετές τάξεις μεγέθους με την μεταβολή της μύζησης (ενδεικτικά αναφέρονται τα αποτελέσματα των Chiu & Shackelford, 1998, με μετρήσεις της μεταβολής του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό με την μύζηση σε μία συμπυκνωμένη καθαρή άμμο, η οποία έφτασε τις 6 τάξεις μεγέθους από  $10^{-8}$  m/s σε  $10^{-14}$  m/s). Αυτό οφείλεται στο ότι η ροή του κάθε ρευστού στα κενά ενός μη κορεσμένου εδάφους γίνεται διά μέσω της επιφάνειας που καταλαμβάνει η κάθε φάση επί κάθε διατομής κάθετα στην οποία γίνεται η ροή. Δεδομένου λοιπόν ότι το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνεται με την μύζηση, μειώνεται αντίστοιχα και το εύρος των «διόδων» στις οποίες μπορεί να κινείται το νερό των πόρων. Η μορφή της καμπύλης που επιδεικνύει την μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό έχει μορφή ανάστροφης σιγμοειδούς όπως και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού με ακριβείς αντιστοιχίες των σημείων καμπής της κάθε καμπύλης, όπως φαίνεται στο Σχ. 7.5. Η μεταβολή δε της τιμής του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση από την τιμή του για πλήρως κορεσμένο έδαφος ( $k_{w,sat}$ ) μέχρι την τιμή που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας μπορεί να είναι από μία έως αρκετές τάξεις μεγέθους (τόσο μεγαλύτερη, όσο μικρότερης διαπερατότητας είναι το εδαφικό υλικό όταν είναι πλήρως κορεσμένο).

Με βάση τους Lloret & Alonso (1980) και τον Fredlund (1981) ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς το νερό αποτελεί συνάρτηση οποιωνδήποτε δύο από τις τρεις δυνατές βασικές ιδιότητες που συνδέουν την μάζα με τον όγκο του εδάφους και των επιμέρους φάσεών του: τον λόγο

κενών  $e$ , το ποσοστό υγρασίας  $w$  και τον βαθμό κορεσμού  $S_r$ , δηλ.  $k_w=f_1(S_r, e)$ , ή  $k_w=f_1(e, w)$ , ή  $k_w=f_1(w, S_r)$ . Προκειμένου για κοκκώδη εδαφικά υλικά όπου η μεταβολή του ολικού όγκου κατά την ξήρανση ή την ύγρανση είναι μικρή, ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς το νερό μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση μόνο του βαθμού κορεσμού ή του ποσοστού υγρασίας. Αντίθετα, σε λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά όπως οι ιλείς και οι άργιλοι όπου κατά την ξήρανση και την ύγρανση υπάρχουν και σημαντικές μεταβολές του ολικού όγκου, τέτοιες απλοποιήσεις δεν μπορούν να γίνουν, οπότε ο συντελεστής διαπερατότητας πρέπει να εκφραστεί ως μία από τις παραπάνω συναρτήσεις δύο διαφορετικών μεγεθών. Δεδομένου ότι όλα αυτά τα μεγέθη συνδέονται μέσω της πλήρους χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού με την μύζηση, ο συντελεστής διαπερατότητας μπορεί να εκφραστεί και ως συνάρτηση της μύζησης των μη κορεσμένων εδαφών. Η απεικονιζόμενη ενδεικτική συσχέτιση στο Σχ. 7.5 έχει γίνει με την μύζηση. Όσο το εδαφικό υλικό παραμένει πλήρως κορεσμένο έως την πίεση διείσδυσης αέρα, η μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας παραμένει μικρή, εξαρτώμενη μόνο από την μεταβολή του λόγου κενών έως αυτήν την μύζηση (όπως ακριβώς δηλαδή θα είχε μεταβληθεί ο συντελεστής διαπερατότητας για ισόποση μεταβολή της ενεργού τάσης). Για τιμές της μύζησης από την πίεση διείσδυσης αέρα και μετά, η μείωση του συντελεστή διαπερατότητας είναι ραγδαία και μάλιστα για αρκετές τάξεις μεγέθους. Από την μύζηση που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας και μετά ο συντελεστής διαπερατότητας συνεχίζει να μειώνεται αλλά με πάρα πολύ μικρό ρυθμό.

Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί πολλές συσχετίσεις του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό με διάφορα φυσικά μεγέθη. Αυτές διακρίνονται στις *εμπειρικές*, στις *θεωρητικές* και στις *στατιστικές* συσχετίσεις. Οι εμπειρικές συσχετίσεις συνδέουν τον συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό με την μύζηση (ή το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας). Οι παράμετροι συσχέτισης προσδιορίζονται γενικά από διαδικασίες βέλτιστης προσέγγισης πειραματικών δεδομένων. Ορισμένες από αυτές τις εξισώσεις παρουσιάζονται στον Πιν. 7.1. Η εξίσωση των Brooks & Corey (1964) θεωρείται και εμπειρική και θεωρητική καθώς για τη διατύπωσή της είχε γίνει συσχέτιση της κατανομής του μεγέθους των πόρων με τον συντελεστή διαπερατότητας.



**Σχήμα 7.5.** Ποιοτική απεικόνιση της συσχέτισης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό  $k_w$  με την μύζηση και αντιστοίχισή της με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού.

**Πίνακας 7.1.** Εμπειρικές συσχετίσεις του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό με την μύζηση.

Πηγή	Εξίσωση συσχέτισης $k_w-s$	Παρατηρήσεις
Wind (1955)	$k_w = \alpha \cdot s^{-n}$ , (7.13)	$\alpha$ και $n$ εμπειρικές παράμετροι από βέλτιστη προσέγγιση πειραματικών δεδομένων
Gardner (1958)	$k_w = k_{sat} / (\alpha \cdot s^n + 1)$ , (7.14)	$k_{sat}$ ο συντελεστής διαπερατότητας του πλήρως κορεσμένου εδάφους, $\alpha$ και $n$ εμπειρικές παράμετροι από βέλτιστη προσέγγιση πειραματικών δεδομένων
Brooks & Corey (1964)	$k_w = k_{sat}$ , για $s \leq s_{aeV}$ , (7.15α) $k_r = k_w / k_{sat} = (s / s_{aeV})^{-n}$ , για $s > s_{aeV}$ , (7.15β)	$k_r$ ο σχετικός συντελεστής διαπερατότητας ως προς το νερό, $s_{aeV}$ η πίεση διείσδυσης αέρα, $n$ εμπειρική παράμετρος από βέλτιστη προσέγγιση πειραματικών δεδομένων
Rijtema (1965)	$k_w = k_{sat}$ , για $s \leq s_{aeV}$ , (7.16α) $k_r = \exp[-\alpha \cdot (s - s_{aeV})]$ , για $s_{res} \geq s > s_{aeV}$ , (7.16β) $k_w = k_{res} \cdot (s / s_{res})^{-n}$ , για $s > s_{res}$ , (7.16γ)	$s_{res}$ η μύζηση επίτευξης παραμένοντος ποσοστού υγρασίας, $k_{res}$ ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς το νερό στην μύζηση $s_{res}$ , $\alpha$ και $n$ εμπειρικές παράμετροι από βέλτιστη προσέγγιση πειραματικών δεδομένων
Arbhabhrama & Kridakorn (1968)	$k_w = k_{sat} / [(s / s_{aeV})^n + 1]$ (7.17)	$n$ εμπειρική παράμετρος από βέλτιστη προσέγγιση

Υπάρχουν δύο ειδών θεωρητικές συσχετίσεις, αυτές που βασίζονται σε μακροσκοπικές, και αυτές που βασίζονται σε μικροσκοπικές προσεγγίσεις. Και τα δύο είδη βασίζονται σε στατιστικές παραδοχές που αφορούν στις κατανομές του μεγέθους των πόρων των εδαφικών υλικών και τον τρόπο υιοθέτησης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Οι συσχετίσεις που βασίζονται σε μακροσκοπική προσέγγιση έχουν την γενική μορφή της Εξ. 7.18, όπου  $k_r$  ο σχετικός συντελεστής διαπερατότητας,  $S_{re}$  ο ενεργός βαθμός κορεσμού όπως ορίζεται στην Εξ. 7.19 (όπου  $\theta_{sat}$  το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας του πλήρως κορεσμένου εδάφους και  $\theta_{res}$  το παραμένον ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας), και η παράμετρος προσέγγισης.

$$k_r = S_{re}^\eta \quad (7.18)$$

$$S_{re} = (\theta - \theta_{res}) / (\theta_{sat} - \theta_{res}) \quad (7.19)$$

Η τιμή της παραμέτρου προσέγγισης  $\eta$  εξαρτάται από τις παραδοχές που έγιναν για την διατύπωση της εξίσωσης για τον συντελεστή διαπερατότητας. Διάφοροι ερευνητές έχουν προτείνει τιμές για την παράμετρο αυτή (π.χ. Averjanof, 1950,  $\eta=4$ , Yuster, 1951,  $\eta=2$ , Irmay, 1954,  $\eta=3$ , Corey, 1954,  $\eta=4$ ). Άλλοι ερευνητές όπως οι Brooks & Corey (1964) και ο Mualem (1976α, β) πρότειναν συσχετίσεις για την παράμετρο  $\eta$  ανάλογα με την φύση των εδαφικών υλικών και την κατανομή των κενών των πόρων. Έτσι οι Brooks & Corey (1964) πρότειναν την γενική συσχέτιση της Εξ. 7.20 για την παράμετρο  $\eta$ , όπου  $\lambda$  δείκτης που λαμβάνει πάντα θετικές τιμές και σχετίζεται με την κατανομή των κενών των πόρων, και ο Mualem (1976α, β) πρότεινε τη συσχέτιση της Εξ. 7.21, όπου  $m$  παράμετρος που λαμβάνει θετικές τιμές για χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά και αρνητικές για λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά.

$$\eta = (2 + 3 \cdot \lambda) / \lambda \quad (7.19)$$

$$\eta = 3 - 2 \cdot m \quad (7.20)$$

Σε ό,τι αφορά τις στατιστικές συσχετίσεις, για να προκύψει μία τέτοια συσχέτιση πρέπει πρώτα να χρησιμοποιηθεί μία εξίσωση για την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Έτσι στον Πιν. 7.2 παρουσιάζονται στατιστικές συσχετίσεις που διατυπώθηκαν με βάση τα προσομοιώματα των Childs & Collis-George (1950), Burdine (1953) και Mualem (1976β). Από τις συσχετίσεις αυτές, εκείνη των Fredlund & Xing (1994) απαιτεί αριθμητική ολοκλήρωση για την επίλυσή της.

**Πίνακας 7.2.** Στατιστικές συσχετίσεις του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό με την μύζηση επί τη βάση εξισώσεων για την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και την τιμή του συντελεστή διαπερατότητας του πλήρως κορεσμένου εδάφους.

Πηγή	Εξίσωση συσχέτισης $k_w-s$	Παρατηρήσεις
Childs & Collis-George (1950)	$k_r = \frac{\int_{\ln s}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(s)}{e^y} \cdot \theta'(e^y) \cdot dy}{\int_{\ln s_w}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_{sat}}{e^y} \cdot \theta'(e^y) \cdot dy}, (7.21)$	XKEN από Fredlund & Xing (1994)
	$k_r = (s/s_{aev})^{-4/b}, (7.22)$	XKEN από Campbell (1974)
Burdine (1953)	$k_r = \{1-(a \cdot s)^{n-2} \cdot [1+(a \cdot s)^n]^{-m}\} / [1+(a \cdot s)^n]^{2-n}, \text{ όπου } m = 1-2/n (7.23)$	XKEN από van Genuchten (1980)
	$k_r = (a \cdot s)^{-2-3 \cdot \lambda}, (7.24)$	XKEN από Brooks & Corey (1964)
Mualem (1976β)	$k_r = \{1-(a \cdot s)^{n-1} \cdot [1+(a \cdot s)^n]^{-m}\}^2 / [1+(a \cdot s)^n]^{2-n}, \text{ όπου } m = 1-1/n (7.25)$	XKEN από van Genuchten (1980)

s η μύζηση,  $\theta$  το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, e η βάση των φυσικών λογαρίθμων, y βοηθητική παράμετρος για την ολοκλήρωση στην Εξ. 7.21,  $b=\ln(1000000)$ ,  $s_{aev}$  πίεση διείσδυσης αέρα, a, n,  $\lambda$  εμπειρικές παράμετροι,  $k_r = k/k_{sat}$ ,  $k_{sat}$  ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς το νερό του πλήρως κορεσμένου εδάφους,  $\theta_{sat}$  ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας του πλήρως κορεσμένου εδάφους

Κατά μήκος κλάδων ξήρανσης και ύγρανσης μπορούν να διατυπωθούν διαφορετικές συσχετίσεις για την εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας. Όλες οι διατυπωθείσες εξισώσεις προβλέπουν πρακτικά την ίδια γενική μορφή για την εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας, η οποία φαίνεται στο Σχ. 7.5, δηλ. σταθερή τιμή πρακτικά μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα και στην συνέχεια ραγδαία μείωση μέχρι την μύζηση επίτευξης παραμένουτος ποσοστού υγρασίας.

Πολύ λίγη έρευνα έχει πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα για την μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό για τιμές της μύζησης μετά την επίτευξη του παραμένουτος ποσοστού υγρασίας. Από τις προαναφερθείσες εξισώσεις, μόνο εκείνη του Rijtema (1965) προβλέπει την μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας σε αυτό το εύρος τιμών της μύζησης. Για όλες τις υπόλοιπες εξισώσεις εναπόκειται στον χρήστη να υπολογίσει την τιμή του συντελεστή διαπερατότητας που επιτυγχάνεται για την μύζηση που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας και να υποθέσει αν για μεγαλύτερες τιμές της μύζησης αυτή παραμένει σταθερή ή συνεχίζει να μειώνεται κι άλλο με την αύξηση της μύζησης. Εάν υποθεθεί το δεύτερο, τότε κατά την επίλυση προβλημάτων με αριθμητικές μεθόδους υφίσταται σοβαρό ενδεχόμενο να προκύψουν προβλήματα σύγκλισης κατά την αριθμητική επίλυση. Οι Ebrahimi-Birang, et al. (2004) έχουν πραγματοποιήσει εργαστηριακή έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο



καταλήγοντας ότι πράγματι από τη μύζηση επίτευξης παραμένουτος υγρασίας και πέρα ο συντελεστής διαπερατότητας παρουσιάζει τάσεις σταθεροποίησης, χωρίς όμως να αποκτά μία μοναδική τιμή. Αντίθετα συνεχίζει να μειώνεται αλλά με πολύ μικρότερο ρυθμό από αυτόν με τον οποίον μειώνεται στο εύρος τιμών μύζησης μεταξύ πίεσης διείσδυσης αέρα και μύζησης επίτευξης παραμένουτος ποσοστού υγρασίας. Όταν λοιπόν δεν χρησιμοποιείται η συσχέτιση του Rijtema (1965), τότε σίγουρα δεν πρέπει να θεωρείται ότι ο συντελεστής διαπερατότητας που προβλέπεται από τις άλλες συσχετίσεις συνεχίζει να μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες της μύζησης επίτευξης παραμένουτος ποσοστού υγρασίας, αλλά αντ' αυτού να υπολογίζεται η τιμή που αντιστοιχεί στην μύζηση επίτευξης παραμένουτος ποσοστού υγρασίας και να εισάγεται έστω με κάποιο αριθμητικό τέχνασμα κάποια περαιτέρω μείωση αισθητά μικρότερου ρυθμού.

### **7.2.5 Υστέρηση του συντελεστή διαπερατότητας κατά μήκος κλάδων ξήρανσης και ύγρανσης**

Ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση θεωρείται γενικά ότι έχει αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία με τον βαθμό κορεσμού και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας. Οι συσχετίσεις λοιπόν του συντελεστή διαπερατότητας με τον βαθμό κορεσμού και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας έχει βρεθεί ότι έχουν μικρή υστέρηση κατά μήκος κλάδων ξήρανσης και ύγρανσης (Nielsen & Biggar, 1961, Topp & Miller, 1966, Corey, 1977, Hillel, 1982).

Αντίθετα, δεδομένης της υστέρησης του βαθμού κορεσμού, του ποσοστού υγρασίας και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας με την μύζηση κατά μήκος κλάδων ξήρανσης και ύγρανσης (βλ. Κεφ. 4 για την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού), ο συντελεστής διαπερατότητας παρουσιάζει σημαντική υστέρηση κατά μήκος κλάδων ξήρανσης και ύγρανσης όταν συσχετίζεται με την μύζηση, όπως προαναφέρθηκε και στην §7.2.4.

### **7.3 ΡΟΗ ΤΗΣ ΑΕΡΙΑΣ ΦΑΣΗΣ ΔΙΑ ΜΕΣΩ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΜΥΖΗΣΗ**

#### **7.3.1 Εισαγωγή**

Όπως προαναφέρθηκε, η αέρια φάση εντός των πόρων των μη κορεσμένων εδαφών απαντάται με δύο μορφές: με την μορφή διακριτών μεταξύ τους φυσαλίδων και με την μορφή συνεχούς αέριας φάσης εντός του δικτύου των πόρων του εδαφικού υλικού. Κατά τον Corey (1957) η αέρια φάση αποκτά την συνέχειά της όταν ο βαθμός κορεσμού φτάσει στην τιμή 85% ή και μικρότερη. Για μικρότερες τιμές του βαθμού κορεσμού από αυτήν αρχίζει να υφίσταται συνέχεια της αέριας φάσης εντός των μη κορεσμένων εδαφών και άρα η δυνατότητα ροής της αέριας φάσης.

Σε μη κορεσμένα εδάφη που απαντώνται στο φυσικό περιβάλλον η ροή του αέρα εντός των πόρων τους μπορεί να οφείλεται σε διαφορές στην πίεση της ατμόσφαιρας, κατείδυση ομβρίων υδάτων από την επιφάνεια του εδάφους τα οποία συμπιέζουν τον αέρα των πόρων του εδάφους κοντά στην επιφάνεια και μεταβολές θερμοκρασίας. Σε συμπυκνωμένα εδάφη που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή υψηλών επιχωμάτων και χωμάτων φραγμάτων η ροή μπορεί να προκληθεί λόγω πρόσθεσης φορτίων κατά την κατασκευή. Σε εφαρμογές περιβαλλοντικής γεωτεχνικής η ροή μπορεί να προκληθεί από την εφαρμογή της μεθόδου απορρύπανσης μέσω υποπίεσης (soil vapor extraction) και της μεθόδου παροχής αέρα υπό πίεση στην πλήρως κορεσμένη ζώνη (air sparging). Στις εφαρμογές περιβαλλοντικής γεωτεχνικής μάλιστα η αναμενόμενη κλίση του δυναμικού που προκαλεί την ροή αέρα είναι η μέγιστη από τις προαναφερθείσες περιπτώσεις που προκαλείται ροή της αέριας φάσης. Σημαντικά φαινόμενα ροής της αέριας φάσης υπάρχουν επίσης και σε πεδία φυσικού αερίου.

Όταν ο βαθμός κορεσμού αυξάνεται πάνω από 90%, τότε η αέρια φάση των πόρων περιορίζεται σε διακριτές φυσαλίδες και η ροή της περιορίζεται στην διάχυση διά μέσω της υγρής φάσης (Matyas, 1967).

Η ροή της αέριας φάσης των πόρων καθορίζεται από την κλίση στο πεδίο συγκεντρώσεων ή πίεσης στην αέρια φάση. Η επιρροή του υψομέτρου είναι αμελητέα λόγω της πολύ μικρής πυκνότητας της αέριας φάσης. Συνήθως η ροή της αέριας φάσης θεωρείται ότι γίνεται υπό την

επίδραση της διαφοράς στην πίεση της αέριας φάσης. Για την περιγραφή της ροής αυτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ο νόμος του Fick και ο νόμος του Darcy όπως επιδεικνύεται στην συνέχεια.

### 7.3.2 Νόμος του Fick για τη ροή της αέριας φάσης

Ο νόμος του Fick (1855) χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει την διάχυση αερίων διά μέσω υγρών. Μία τροποποιημένη μορφή του νόμου του Fick μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της ροής της αέριας φάσης διά μέσω των εδαφικών υλικών, όταν η αέρια φάση είναι συνεχής.

Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο του Fick, ο ρυθμός μεταφοράς μάζας της αέριας φάσης κατά την διάχυσή της διά μέσω διατομής δεδομένης επιφάνειας ενός υγρού είναι ανάλογος της κλίσης της συγκέντρωσης (concentration gradient) της διαχεόμενης ουσίας. Προκειμένου για ένα μη κορεσμένο εδαφικό υλικό, το ίδιο το εδαφικό υλικό ως πορώδες μέσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατ' αντιστοιχία με την μάζα του νερού στον πρώτο νόμο του Fick. Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας αέρα που διέρχεται από δεδομένη διατομή,  $J_a$ , και η κλίση της συγκέντρωσης του αέρα στην μονάδα του όγκου,  $\partial C/\partial y$ , συνδέονται μέσω της Εξ. 7.26, όπου  $D_a$  σταθερά αναλογίας,  $C$  η συγκέντρωση αέρα εκπεφρασμένη ως ο λόγος της μάζας του αέρα στην μονάδα του όγκου του μη κορεσμένου εδάφους, και  $\partial C/\partial y$  η κλίση της συγκέντρωσης στην διεύθυνση  $y$ .

$$J_a = -D_a \frac{\partial C}{\partial y} \quad (7.26)$$

Το αρνητικό πρόσημο στο δεξιό μέρος της Εξ. 7.26 σημαίνει ότι η ροή γίνεται στην κατεύθυνση κατά την οποία μειώνεται η κλίση της συγκέντρωσης. Η Εξ. 7.26 μπορεί να διατυπωθεί και κατά μήκος των διευθύνσεων  $x$  και  $z$  ή και σε τανυστική μορφή.

Από τον ορισμό της συγκέντρωσης της αέριας φάσης μπορεί να προκύψει εύκολα η Εξ. 7.27 για την συγκέντρωση με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{m_a}{V_{o\lambda}} \Rightarrow C = \frac{m_a}{V_{o\lambda}} \cdot \frac{V_a}{V_a} \Rightarrow C = \frac{m_a}{V_a} \cdot \frac{V_a}{V_{o\lambda}} \Rightarrow \\
 &\Rightarrow C = \rho_a \cdot \left( \frac{V_v - V_w}{V_{o\lambda}} \right) \Rightarrow C = \rho_a \cdot \left( \frac{V_v}{V_{o\lambda}} - \frac{V_w}{V_{o\lambda}} \right) \Rightarrow \\
 &\Rightarrow C = \rho_a \cdot \left( \frac{V_v}{V_{o\lambda}} - \frac{V_w}{V_v} \cdot \frac{V_v}{V_{o\lambda}} \right) \Rightarrow C = \rho_a \cdot (n - S_r \cdot n) \\
 &\Rightarrow C = \rho_a \cdot (1 - S_r) \cdot n
 \end{aligned} \tag{7.27}$$

οπότε με βάση τον νόμο των ιδανικών αερίων η πυκνότητα του αέρα εξαρτάται μόνο από την πίεση της αέριας φάσης και άρα και η κλίση της συγκέντρωσης μπορεί να εκφραστεί μέσω της κλίσης στην αέρια φάση σύμφωνα με την Εξ. 7.28.

$$J_a = -D_a \cdot \frac{\partial C}{\partial u_a} \cdot \frac{\partial u_a}{\partial y} \tag{7.28}$$

Το μέγεθος  $\partial u_a / \partial y$  εκφράζει την κλίση της πίεσης στην αέρια φάση στην διεύθυνση  $y$ . Η Εξ. 7.28 μπορεί να διατυπωθεί και κατά μήκος των διευθύνσεων  $x$  και  $z$  ή και σε τανυστική μορφή.

Μπορεί να οριστεί η παράμετρος  $D_a^*$  ως ο συντελεστής μετάδοσης της ροής της αέριας φάσης (coefficient of transmission for air flow) σύμφωνα με την Εξ. 7.29 ή την Εξ. 7.30 με αντικατάσταση της Εξ. 7.27 στην Εξ. 7.29.

$$D_a^* = D_a \cdot \frac{\partial C}{\partial u_a} \tag{7.29}$$

$$D_a^* = D_a \cdot \frac{\partial [\rho_a \cdot (1 - S_r) \cdot n]}{\partial u_a} \tag{7.30}$$

Ο συντελεστής μετάδοσης της ροής της αέριας φάσης,  $D_a^*$ , είναι συνάρτηση των σχέσεων μάζας-όγκου του εδαφικού υλικού ( $n$  και  $S_r$ ) και της πυκνότητας του αέρα. Αντικαθιστώντας την παράμετρο  $D_a^*$  (Εξ. 7.30) στην Εξ. 7.28, τότε προκύπτει η Εξ. 7.31, η οποία αποτελεί την τροποποιημένη μορφή του νόμου του Fick, η οποία χρησιμοποιείται στην γεωτεχνική μηχανική για την περιγραφή της ροής της αέριας φάσης (Blight, 1971).

$$J_a = -D_a^* \cdot \frac{\partial u_a}{\partial y} \quad (7.31)$$

Ο συντελεστής μετάδοσης της ροής της αέριας φάσης,  $D_a^*$ , μπορεί να συσχετιστεί με τον συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση,  $k_a$ , ο οποίος αποτελεί την παράμετρο που μετρείται στο εργαστήριο.

Συνθήκες μόνιμης ροής της αέριας φάσης μπορούν να υλοποιηθούν σε ένα δοκίμιο μή κορεσμένου εδάφους που βρίσκεται υπό σταθερή τιμή της μύζησης ή του βαθμού κορεσμού. Το δοκίμιο του εδάφους θεωρείται ότι έχει μία μοναδική τιμή του συντελεστή διαπερατότητας ως προς τον αέρα, η οποία αντιστοιχεί στην σταθερή τιμή της μύζησης ή του βαθμού κορεσμού υπό τον οποίο βρίσκεται. Οι συνθήκες μόνιμης ροής της αέριας φάσης επιβάλλονται μέσω της εφαρμογής μίας σταθερής διαφοράς πίεσης αέρα στα άκρα του δοκιμίου. Στην έξοδο του δοκιμίου μετρείται η μάζα του εξερχόμενου αέρα στην μονάδα του χρόνου, υπό την ατμοσφαιρική πίεση που επικρατεί στην έξοδο (0 πίεση αναφοράς ή 101.3 kPa απόλυτη τιμή της πίεσης) και άρα μπορεί να υποθεθεί ότι η μάζα του εξερχόμενου αέρα μετρείται υπό σταθερή πυκνότητα του αέρα, αυτή που αντιστοιχεί στην ατμοσφαιρική πίεση. Για την ιδιαίτερη αυτή περίπτωση, η Εξ. 7.31 μπορεί να τροποποιηθεί λαμβάνοντας την μορφή της Εξ. 7.32 ή της Εξ. 7.33, όπου  $\rho_{ma}$  η σταθερή πυκνότητα του αέρα στην έξοδο της διάταξης (αντιστοιχεί στην ατμοσφαιρική πίεση που επικρατεί εκεί), και  $\partial V_a / \partial t$  ή  $v_a$  η παροχή του αέρα στην έξοδο.

$$\rho_{ma} \frac{\partial V_a}{\partial t} = -D_a^* \cdot \frac{\partial u_a}{\partial y} \quad (7.32)$$

$$v_a = -D_a^* \cdot \frac{1}{\rho_{ma}} \cdot \frac{\partial u_a}{\partial y} \quad (7.33)$$

Η πίεση της αέριας φάσης  $u_a$  στην Εξ. 7.33 μπορεί να αντικατασταθεί από το δυναμικό της αέριας φάσης  $h_a$  ( $h_a = u_a / \rho_{ma} \cdot g$ ) υπό την προϋπόθεση της σταθερής πυκνότητας της αέριας φάσης  $\rho_{ma}$ . Έτσι αν είναι  $\partial h_a / \partial y$  η κλίση του δυναμικού της αέριας φάσης στην διεύθυνση  $y$ , τότε η Εξ. 7.33 παίρνει την μορφή της Εξ. 7.34.

$$v_a = -D_a^* \cdot g \cdot \frac{\partial h_a}{\partial y} \quad (7.34)$$

Εάν οριστεί ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς τον αέρα ως το γινόμενο του συντελεστή μετάδοσης επί την επιτάχυνση της βαρύτητας (Εξ. 7.35), τότε η Εξ. 7.34 παίρνει την μορφή της Εξ. 7.36, η οποία έχει την ίδια ακριβώς μορφή με τον νόμο του Darcy, όπως αυτός διατυπώνεται στην Εξ. 7.3.

$$k_a = D_a^* \cdot g \quad (7.35)$$

$$v_a = -k_a \cdot \frac{\partial h_a}{\partial y} \quad (7.36)$$

Η Εξ. 7.36 έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του συντελεστή διαπερατότητας ως προς τον αέρα (Barden, 1965, Matyas, 1967, Langfelder, et al., 1968, Barden, et al., 1969, Barden & Pavlakis, 1971). Ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς τον αέρα μπορεί να μετρηθεί για διάφορες –σταθερές– τιμές της μύζησης ή του βαθμού κορεσμού ώστε να προσδιοριστεί πειραματικά η συσχέτισή του με το αντίστοιχο μέγεθος. Μέσω δε της Εξ. 7.35 προσδιορίζεται από την μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς τον αέρα και ο συντελεστής μετάδοσης. Και ο νόμος του Fick και ο νόμος του Darcy για την αέρια φάση (Εξ. 7.36) έχουν διερευνηθεί πειραματικά από τον Blight (1971).

### 7.3.3 Συσχέτιση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση με τη μύζηση ή τον βαθμό κορεσμού

Γενικά, όσο αυξάνεται η μύζηση ή μειώνεται ο βαθμός κορεσμού αντίστοιχα, τόσο αυξάνεται ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς τον αέρα. Συχνά μάλιστα έχει προταθεί ότι αποτελεί το αντίστροφο του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό. Οι Brooks & Corey (1964) πρότειναν την συσχέτιση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς τον αέρα που περιγράφεται από την Εξ. 7.37 (όπου  $\lambda$  εμπειρική παράμετρος,  $k_a$  ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς τον αέρα του απολύτως ξηρού εδαφικού υλικού και  $S_e$  ο ενεργός βαθμός κορεσμού,  $S_e = (S_r - S_{r,res}) / (1 - S_{r,res})$ , όπου  $S_{r,res}$  ο παραμένων βαθμός κορεσμού). Η Εξ. 7.37 ισχύει για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες της πίεσης διείδυσης αέρα. Για μικρότερες τιμές, ο συντελεστής διαπερατότητας θεωρείται 0.

$$k_a = k_d \cdot (1 - S_e)^2 \cdot (1 - S_e^{(2+\lambda)/\lambda}) \quad (7.37)$$

Η Εξ. 7.37 μπορεί να τροποποιηθεί έτσι ώστε να εκφράζει τον συντελεστή διαπερατότητας ως προς τον αέρα συναρτήσει της μύζησης, αν ο ενεργός βαθμός κορεσμού εκφραστεί ως προς την μύζηση. Προκύπτει έτσι η Εξ. 7.38, η οποία επίσης ισχύει μόνο για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες της πίεσης διείσδυσης αέρα, με τον συντελεστή διαπερατότητας ως προς τον αέρα να λαμβάνει μηδενική τιμή για μικρότερες τιμές της μύζησης.

$$k_a = k_d \cdot [1 - (s_{aev}/s)^\lambda]^2 \cdot [1 - (s_{aev}/s)^{2+\lambda}] \quad (7.38)$$

Επίσης ο van Genuchten (1980) πρότεινε την Εξ. 7.39 για την συσχέτιση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς τον αέρα με τον ενεργό βαθμό κορεσμού ( $q$  παράμετρος προσέγγισης που υπολογίζεται μέσω μεθόδων βέλτιστης προσέγγισης πειραματικών δεδομένων).

$$k_a = (1 - S_e)^2 \cdot (1 - S_e^{1/q})^q \quad (7.39)$$

Τέλος, οι Fredlund & Xing (1994) πρότειναν την Εξ. 7.40 για την συσχέτιση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς τον αέρα με την μύζηση ( $e$  η βάση των φυσικών λογαρίθμων,  $a$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $q$  εμπειρικές παράμετροι από διαδικασίες βέλτιστης προσέγγισης πειραματικών δεδομένων, και  $s_{res}$  η μύζηση στο παραμένον ποσοστό υγρασίας). Η μαθηματική πολυπλοκότητα της Εξ. 7.40 είναι περισσότερο και από προφανής.

$$k_a = k_d \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{s}{s_{res}}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{s_{res}}\right)} \right] \cdot \frac{1}{\left[ \ln\left(e + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right) \right]^m} \right\}^2 \cdot \left\{ 1 - \left[ \left( \frac{\ln\left(1 + \frac{s}{s_{res}}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{s_{res}}\right)} \right) \cdot \frac{1}{\left[ \ln\left(e + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right) \right]^m} \right]^{1/q} \right\}^q \quad (7.40)$$

Δεδομένου ότι ο συντελεστής μετάδοσης συνδέεται με τον συντελεστή διαπερατότητας ως προς τον αέρα μέσω της Εξ. 7.35, οι προταθείσες συσχετίσεις του συντελεστή διαπερατότητας ως προς τον αέρα με τον βαθμό κορεσμού ή την μύζηση, ισχύουν και για τον συντελεστή μετάδοσης.

#### 7.4 ΔΙΑΧΥΣΗ ΤΗΣ ΑΕΡΙΑΣ ΦΑΣΗΣ ΔΙΑ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΥΓΡΗΣ ΦΑΣΗΣ

Η διάχυση συμβαίνει υπό την επίδραση μίας διαφοράς στην συγκέντρωση διαλυμένων στην υγρή φάση ή μη αερίων. Η κίνηση ιόντων και μορίων συμβαίνει από θέσεις μεγάλης συγκέντρωσης προς θέσεις μικρής συγκέντρωσης ως προς τα ιόντα ή τα μόρια αυτά. Το μέσο διά του οποίου συμβαίνει εντός του εδάφους (*είτε αυτό είναι μη κορεσμένο, είτε αυτό είναι πλήρως κορεσμένο*) η διάχυση είναι η *υγρή φάση* των πόρων του εδάφους. Ο εδαφικός σκελετός στην περίπτωση αυτού του είδους κίνησης της αερίας φάσης δεν συνιστά το μέσο διά του οποίου συμβαίνει αυτή η κίνηση (όπως στην περίπτωση της ροής της υγρής φάσης –§7.2- και της ροής της αερίας φάσης –§ 7.3), αλλά απλώς καθορίζει το μήκος της διαδρομής κατά την κίνηση αυτή και την διατιθέμενη για διάχυση διατομή. Η κίνηση αερίων (συνηθέστερα αυτών που αποτελούν τον ατμοσφαιρικό αέρα ή υδρατμών) αποτελούν τυπικές μορφές διάχυσης διά της υγρής φάσης των πόρων.

Υπάρχουν δύο μηχανισμοί διάχυσης που εμφανίζονται σε μη κορεσμένα εδάφη:

- Ο πρώτος από αυτούς αφορά στην ροή του αέρα διά της υγρής φάσης σε ένα πλήρως ή μη κορεσμένο έδαφος (Barden & Sides, 1967, Matyas, 1967). Άλλο παράδειγμα διάχυσης της αερίας φάσης αφορά στην διέλευση αέρα διά πλήρως κορεσμένων κεραμικών πορολίθων υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα στα πλαίσια της εκτέλεσης δοκιμών που βασίζονται στην μέθοδο μετατόπισης άξονα (§ 4.3.2). Αυτός ο μηχανισμός κίνησης αερίων συνίσταται στην διάλυση αερίων στην υγρή φάση από την μία πλευρά του πλήρως κορεσμένου πορολίθου τα οποία επανεμφανίζονται ξανά σε αέρια μορφή στην άλλη άκρη του πορολίθου. Ο μηχανισμός αυτός περιγράφει την *διάχυση υπό την παρουσία κλίσης στο δυναμικό πίεσης* (diffusion under a pressure gradient).
- Ο δεύτερος μηχανισμός διάχυσης αφορά στην κίνηση ιόντων ή μορίων διά της υγρής φάσης λόγω της διαφοράς στην συγκέντρωση σε αυτά (ή λόγω της διαφοράς στην ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης στην οποία μεταφράζονται οι τιμές της συγκέντρωσης αυτής στην κάθε θέση). Ο μηχανισμός αυτός περιγράφει την *διάχυση υπό την παρουσία κλίσης στο δυναμικό συγκέντρωσης* (diffusion under a concentration gradient) ή *κλίσης στην ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης* (diffusion under an osmotic suction gradient).



Ο νόμος του Fick μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της διάχυσης. Η διατύπωση του νόμου του Fick περιγράφεται από την Εξ. 7.41, όπου  $\partial M/\partial t$  η μάζα των αερίων που διέρχεται από την επιφάνεια που καταλαμβάνουν τα κενά ενός εδαφικού υλικού στην μονάδα του χρόνου,  $D$  ο συντελεστής διάχυσης,  $C$  η συγκέντρωση των διαχεόμενων αερίων στην μονάδα του όγκου των κενών του εδάφους και  $\partial C/\partial y$  η κλίση της συγκέντρωσης στην διεύθυνση  $y$  (ή αντίστοιχα στην διεύθυνση  $x$  και στην διεύθυνση  $z$ ).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -D \frac{\partial C}{\partial y} \quad (7.41)$$

Η εξίσωση για την διάχυση μπορεί να διατυπωθεί σε μορφή παρόμοια με την εξίσωση για την ροή της αέριας φάσης διά μέσω του εδάφους (§ 7.3). Η κλίση της συγκέντρωσης ενός αερίου ή των υδρατμών (δηλ. το  $\partial C/\partial y$ ) μπορεί να εκφραστεί σε όρους της μερικής πίεσης του κάθε αερίου. Εάν θεωρηθεί ότι  $u_i$  είναι η μερική πίεση ενός διαχεόμενου αερίου  $i$ , τότε η Εξ. 7.41 παίρνει την μορφή της Εξ. 7.42, όπου  $\partial C/\partial u_i$  είναι η κλίση της συγκέντρωσης του αερίου  $i$  λόγω της μεταβολής της πίεσης των ατμών του  $u_i$  και  $\partial u_i/\partial y$  είναι η κλίση της πίεσης των ατμών του αερίου  $i$  στην διεύθυνση  $y$ .

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -D \frac{\partial C}{\partial u_i} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial y} \quad (7.42)$$

Η μάζα των αερίων που διέρχεται από την επιφάνεια που καταλαμβάνουν τα κενά ενός εδαφικού υλικού στην μονάδα του χρόνου  $\partial M/\partial t$  μπορεί να προσδιοριστεί και συναρτήσει του όγκου του διαχεόμενου αερίου υπό σταθερή πίεση με εφαρμογή του νόμου των ιδανικών αερίων (Εξ. 7.43, όπου  $u_{fi}$  είναι η απόλυτη τιμή της πίεσης υπό την οποία μετρείται ο όγκος του διαχεόμενου αερίου,  $\omega_i$  είναι το μοριακό βάρος του διαχεόμενου αερίου,  $R$  είναι η παγκόσμια σταθερά των ιδανικών αερίων,  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία,  $\partial V_{fi}/\partial t$  η παροχή του διαχεόμενου αερίου και  $V_{fi}$  ο όγκος του διαχεόμενου αερίου που διέρχεται από δεδομένη διατομή).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = u_{fi} \cdot \frac{\omega_i}{RT} \cdot \frac{\partial V_{fi}}{\partial t} \quad (7.43)$$

Η κλίση της συγκέντρωσης του αερίου  $i$  λόγω της μεταβολής της πίεσης των ατμών του  $u_i$ ,  $\partial C/\partial u_i$ , προσδιορίζεται από την μεταβολή της περιεκτικότητας κατά μάζα του διαχεόμενου αερίου εντός του νερού των πόρων ( $M_{di}/V_w$ ) ως προς την μερική πίεση των ατμών του αερίου  $i$ ,  $u_i$  (Εξ. 7.44). Με εφαρμογή του νόμου των ιδανικών αερίων η Εξ. 7.44 μετατρέπεται στην Εξ. 7.45, όπου  $V_{di}$  είναι ο όγκος του διαλυμένου συστατικού στο νερό των πόρων.

$$\frac{\partial C}{\partial u_i} = \frac{\partial(M_{di}/V_w)}{\partial u_i} \quad (7.44)$$

$$\frac{\partial C}{\partial u_i} = \frac{\partial\left(\frac{V_{di}}{V_w} \cdot u_i \cdot \frac{\omega_i}{RT}\right)}{\partial u_i} \quad (7.45)$$

Ο λόγος του όγκου του διαλυμένου συστατικού προς τον όγκο του νερού των πόρων (δηλ. ο λόγος  $V_{di}/V_w$ ) ονομάζεται ογκομετρικός συντελεστής διαλυτότητας,  $h$  (volumetric coefficient of solubility), και υπό ισοθεμικές συνθήκες<sup>7</sup> είναι πρακτικά σταθερός, οπότε η Εξ. 7.45 μετατρέπεται στην Εξ. 7.46, με αναδιάταξη της οποίας προκύπτει η Εξ. 7.47.

$$\frac{\partial C}{\partial u_i} = h \cdot \frac{\omega_i}{RT} \quad (7.46)$$

$$\frac{\omega_i}{RT} = \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial C}{\partial u_i} \quad (7.47)$$

Αντικαθιστώντας το αριστερό μέρος της Εξ. 7.47 με το ίσο του στην Εξ. 7.43 προκύπτει η Εξ. 7.48, και εξισώνοντας τα δεξιά μέρη των Εξ. 7.42 και 7.48, προκύπτει η Εξ. 7.49, από την οποία με αναδιάταξη προκύπτει η Εξ. 7.50

$$\frac{\partial M}{\partial t} = u_{fi} \cdot \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial C}{\partial u_i} \cdot \frac{\partial V_{fi}}{\partial t} \quad (7.48)$$

$$-D \frac{\partial C}{\partial u_i} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial y} = u_{fi} \cdot \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial C}{\partial u_i} \cdot \frac{\partial V_{fi}}{\partial t} \quad (7.49)$$

<sup>7</sup> Δηλαδή συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας.

$$\frac{\partial V_{fi}}{\partial t} = v_{fi} = -\frac{Dh}{u_{fi}} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial y} \quad (7.50)$$

Η διατύπωση της Εξ. 7.50 αποδίδεται στον van Amerongen (1946) και αποτελεί την εξίσωση περιγραφής της διάχυσης. Η μερική πίεση στην Εξ. 7.50 μπορεί να εκφραστεί σε όρους δυναμικού μερικής πίεσης ατμών,  $h_{fi}$  (όπου  $h_{fi} = u_{fi}/\rho_{fi}g$ ), οπότε προκύπτει η Εξ. 7.51. Η πυκνότητα του διαχεόμενου αερίου  $\rho_{fi}$  αντιστοιχεί στην απόλυτη πίεση  $u_{fi}$  υπό την οποία μετρείται ο όγκος του διαχεόμενου αερίου, και η οποία επιλέγεται συνήθως να είναι ίση με την ατμοσφαιρική (101.3 kPa).

$$v_{fi} = -Dh \frac{\rho_{fi}g}{u_{fi}} \cdot \frac{\partial h_{fi}}{\partial y} \quad (7.51)$$

Η Εξ. 7.51 έχει την ίδια γενική μορφή με τον νόμο του Darcy (Εξ. 7.3). Κατά συνέπεια μπορεί να θεωρηθεί ως μία τροποποιημένη μορφή του νόμου του Darcy για την διάχυση αερίων διά μέσω του νερού των πόρων του πλήρως ή του μί κορεσμένου εδάφους. Εάν μάλιστα οριστεί ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την διάχυση,  $k_{fi}$ , όπως στην Εξ. 7.52, τότε η Εξ. 7.51 παίρνει ακριβώς την μορφή του νόμου του Darcy (Εξ. 7.53).

$$k_{fi} = Dh \frac{\rho_{fi}g}{u_{fi}} \quad (7.52)$$

$$v_{fi} = -k_{fi} \cdot \frac{\partial h_{fi}}{\partial y} \quad (7.53)$$

Μάλιστα εάν αντικατασταθεί ο νόμος των ιδανικών αερίων στην Εξ. 7.52, τότε προκύπτει η Εξ. 7.54, με βάση την οποία προκύπτει ότι ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την διάχυση,  $k_{fi}$ , είναι ανάλογος του συντελεστή διάχυσης,  $D$ , υπό την προϋπόθεση ότι επικρατούν ισοθερμικές συνθήκες οπότε ο όρος  $h\omega_i g/RT$  είναι σταθερός.

$$k_{fi} = D \cdot \frac{h\omega_i g}{RT} \quad (7.54)$$

Τιμές του συντελεστή διάχυσης,  $D$ , έχουν προσδιοριστεί με βάση την Εξ. 7.53 για διάχυση αερίων διά μέσω νερού (Barden & Sides, 1967). Οι τιμές του συντελεστή διάχυσης για διάχυση αερίων διά μέσω του νερού των πόρων ενός εδαφικού υλικού προκύπτουν γενικά μικρότερες από τις προσδιοριζόμενες για νερό εκτός του σκελετού πορωδών μέσων. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι το μεγαλύτερο ιξώδες του νερού των πόρων των εδαφικών υλικών λόγω της προσκόλλησής του στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων. Κατά συνέπεια οι τιμές του συντελεστή διάχυσης μειώνονται όσο μειώνεται το ποσοστό υγρασίας στο ίδιο έδαφος και επίσης όσο πιο λεπτόκοκκο γίνεται το εδαφικό υλικό και αυξάνεται η περιεκτικότητα του σε αργιλικά ορυκτά μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας.

## 7.5 ΣΥΝΟΨΙΣΗ ΝΟΜΩΝ ΡΟΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Στον Πιν. 7.3 συνοψίζονται οι νόμοι ροής για όλους τους μηχανισμούς και όλες τις ρευστές φάσεις που περιγράφηκαν μέχρι αυτό το σημείο στο παρόν κεφάλαιο. Για λόγους πληρότητας παρατίθεται και ο νόμος που περιγράφει την διάχυση αερίων λόγω διαφοράς συγκέντρωσης, παρόλο που δεν έγινε εκτεταμένη αναφορά στο κείμενο.

**Πίνακας 7.3.** Συνοψιση νόμων ροής και διατυπώσεων τους (από τους Fredlund & Rahardjo, 1993).

Είδος ροής	Ρευστή φάση	Δυναμικό που προκαλεί την ροή	Νόμος ροής (διατυπωμένος μόνο στην διεύθυνση $y$ )	Σχόλια
Ροή του νερού των πόρων	Νερό των πόρων	$h_w = y + u_w/\rho_w g$	$v_w = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial y}$	Νόμος του Darcy
Ροή και διάχυση του αέρα των πόρων	Αέρας των πόρων	$u_a$	$\frac{\partial M}{\partial t} = -D_a^* \cdot \frac{\partial u_a}{\partial y}$	Νόμος του Fick
		$h_a = u_a/\rho_a g$	$v_a = -k_a \cdot \frac{\partial h_a}{\partial y}$	Νόμος του Darcy
	Αέρια του αέρα των πόρων και υδρατμοί διά μέσω του νερού των πόρων	$C$	$\frac{\partial M}{\partial t} = -D \frac{\partial C}{\partial y}$	Νόμος του Fick
		$h_{fi} = u_{fi}/\rho_{fi} g$	$v_{fi} = -k_{fi} \cdot \frac{\partial h_{fi}}{\partial y}$	Νόμος του Darcy
Διάχυση λόγω διαφοράς συγκέντρωσης	Καθαρό νερό λόγω διαφοράς στην οσμωτική συνιστώσα της μύζησης	$\pi$	$\frac{\partial M}{\partial t} = -D_o^* \frac{\partial \pi}{\partial y}$	Νόμος του Fick

## **7.6 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΥΓΡΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΕΡΙΑ ΦΑΣΗ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

### **7.6.1 Εισαγωγή**

Όπως και στα Κεφάλαια 5 και 6 που έγινε αναφορά στις εργαστηριακές μεθόδους προσδιορισμού της συμπίεστότητας και της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών, έτσι και σε αυτό το κεφάλαιο ακολουθεί παρουσίαση των μεθόδων προσδιορισμού του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή και την αέρια φάση των μη κορεσμένων εδαφών.

Η πρώτη προφανής διάκριση των επιμέρους μεθόδων είναι σε αυτές με τις οποίες μετρείται ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή και την αέρια φάση. Οι μέθοδοι μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση διακρίνονται στις μεθόδους μόνιμης ροής και στις μεθόδους μη μόνιμης ροής. Οι πρώτες διακρίνονται στην μέθοδο σταθερού υδραυλικού φορτίου, στην μέθοδο σταθερής παροχής και στην μέθοδο φυγοκέντρισης. Οι μέθοδοι μη μόνιμης ροής διακρίνονται στην μέθοδο οριζόντιας διείσδυσης, στην μέθοδο παρακολούθησης στραγγιζόμενου ύδατος και στην μέθοδο χρονικά σημειακής κατανομής.

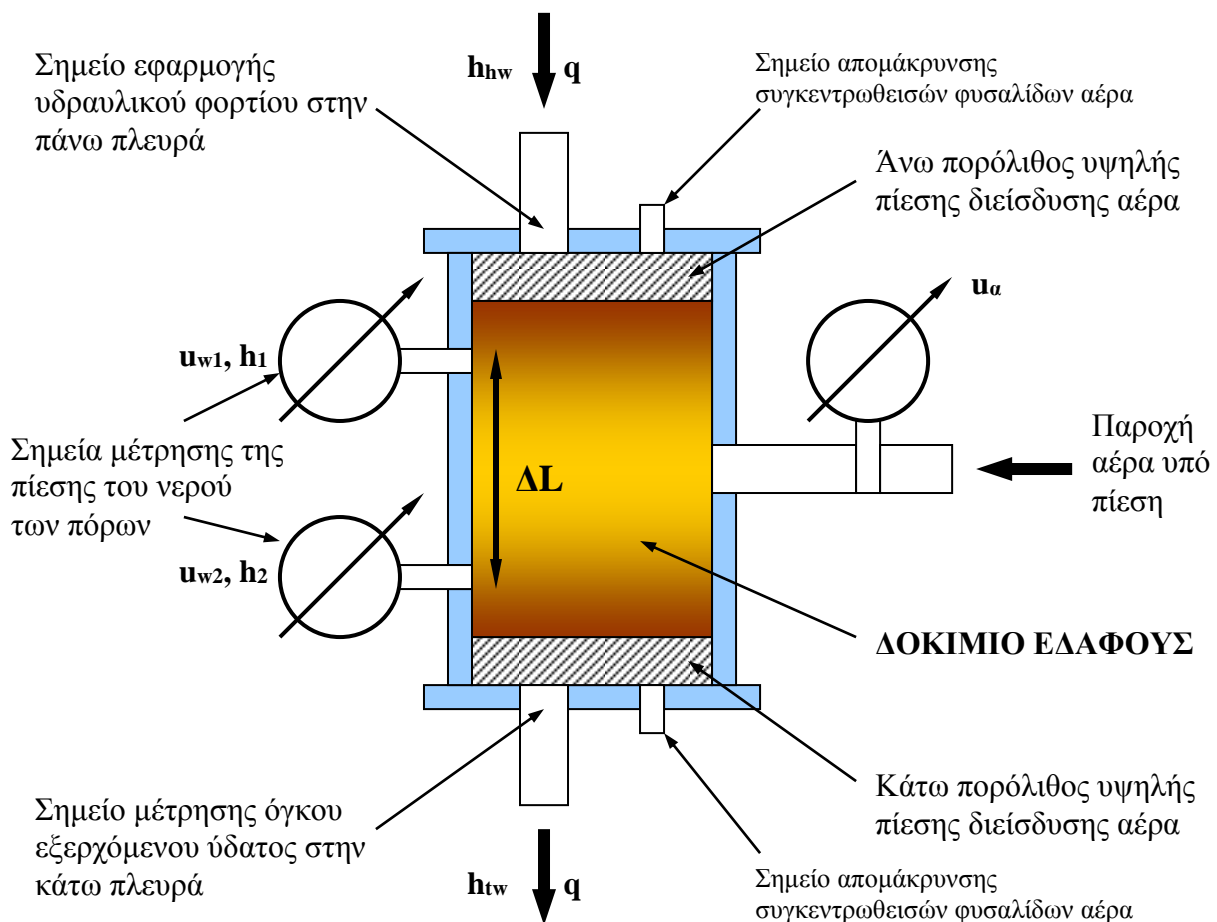
### **7.6.2 Μέθοδοι μόνιμης ροής για τη μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση**

#### *7.6.2.1 Μέθοδος σταθερού φορτίου*

Η μέθοδος αυτή αποτελεί την παλαιότερη και πιο συνηθισμένη εργαστηριακή μέθοδο μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση. Όπως και στην αντίστοιχη μέθοδο μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας στα πλήρως κορεσμένα εδάφη, διατηρείται ένα σταθερό υδραυλικό φορτίο στα άκρα ενός δοκιμίου και μετρείται η παροχή διά μέσω του δοκιμίου μέχρι την επίτευξη συνθηκών μόνιμης ροής. Η μύζηση διατηρείται σταθερή κατά την διάρκεια της δοκιμής, οπότε ο συντελεστής διαπερατότητας μετρείται για διάφορες τιμές της μύζησης και έτσι προκύπτει η καμπύλη συσχέτισης του συντελεστή διαπερατότητας με την μύζηση. Η συνηθέστερη μέθοδος ελέγχου της μύζησης που συνδυάζεται με αυτήν την μέθοδο μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας είναι η μέθοδος μετατόπισης άξονα, καθώς

προσφέρει τα περισσότερα πλεονεκτήματα όπως θα δούμε στην συνέχεια. Για τον υπολογισμό του συντελεστή διαπερατότητας προϋποτίθεται η ισχύς του νόμου του Darcy.

Μέχρι σήμερα έχουν παρουσιαστεί διάφορες παραλλαγές της βασικής μεθόδου (π.χ. Corey, 1957, Klute, 1972, Klute & Dirksen, 1986, Barden & Pavlakis, 1971, Huang, et al., 1998). Διάφορα συστήματα και διατάξεις έχουν προταθεί για την μέτρηση είτε μόνο του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση, είτε μόνο του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση, είτε και των δύο. Στο Σχ. 7.6 παρουσιάζεται ενδεικτική μορφή διάταξης για την μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση.



**Σχήμα 7.6.** Ενδεικτική διάταξη μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση με την μέθοδο σταθερού φορτίου.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 7.6 ένα σταθερό υδραυλικό φορτίο διατηρείται στα άκρα του δοκιμίου με την ικανότητα να μετρείται με επαρκή ακρίβεια η παροχή  $q$  και να διατηρούνται σταθερές οι

τιμές του υδραυλικού φορτίου στην είσοδο και την έξοδο,  $h_{hw}$  και  $h_{tw}$  αντίστοιχα. Το περατόμετρο μπορεί να είναι ανένδοτων τοιχωμάτων (όπως το εικονιζόμενο στο Σχ. 7.6), ή εύκαμπτων, οπότε και συνδυάζεται με ένα σύστημα εφαρμογής πλευρικής τάσης στην περιφέρεια του δοκιμίου, το οποίο επιτρέπει την εφαρμογή ισοτροπικών ή και ανισοτροπικών εντατικών συνθηκών στο δοκίμιο (το τελευταίο εάν συνδυάζεται και με ένα σύστημα εφαρμογής κατακόρυφης τάσης). Το δοκίμιο βρίσκεται σε καλή επαφή με δύο κεραμικούς πορολίθους υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα στα δύο του άκρα οι οποίοι είναι πλήρως κορεσμένοι με νερό (ή θεωρητικά άλλου είδους υγρό, ο συντελεστής διαπερατότητας του μή κορεσμένου εδάφους ως προς το οποίο ζητείται να μετρηθεί), ώστε να υπάρχει υδραυλική συνέχεια ανάμεσα στο υγρό των πορολίθων και την υγρή φάση του μή κορεσμένου εδάφους. Συνήθως και το δοκίμιο είναι πλήρως κορεσμένο πριν από την έναρξη της δοκιμής.

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 7.6 μία είσοδος αέρα περί το μέσο του ύψους του δοκιμίου εξασφαλίζει την παροχή αέρα υπό πίεση μεγαλύτερη από την αντιστοιχούσα στο επιβαλλόμενο υδραυλικό φορτίο τόσο ώστε να επιτευχθεί η ζητούμενη τιμή της μύζησης υπό την οποία μετρείται ο συντελεστής διαπερατότητας. Η μέγιστη τιμή της μύζησης που μπορεί να εφαρμοστεί είναι προφανώς όση και η πίεση διείσδυσης αέρα των πορολίθων. Για την εξασφάλιση της ομοιόμορφης κατανομής της πίεσης αέρα σε ένα περατόμετρο άκαμπτων τοιχωμάτων, το δοκίμιο περιβάλλεται από χαρτί φίλτρου. Προκειμένου για περατόμετρα εύκαμπτων τοιχωμάτων, τότε η διάταξη γίνεται πιο πολύπλοκη με την παροχή αέρα να συνυπάρχει με τους πορολίθους υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα στα άκρα του δοκιμίου, οπότε ο έλεγχος της πίεσης της υγρής φάσης και της αέριας φάσης γίνεται ταυτόχρονα από τα άκρα του δοκιμίου από δακτυλιοειδούς μορφής πλάκες που εφαρμόζονται στα άκρα του δοκιμίου.

Στην έξοδο της διάταξης μετρείται η παροχή της υγρής φάσης διά μέσω του δοκιμίου υπό το επιβληθέν υδραυλικό φορτίο. Για να μπορεί να μετρηθεί ο όγκος του εξερχόμενου νερού με ακρίβεια πρέπει να απομακρύνονται τακτικά οι φυσαλίδες αέρα που συγκεντρώνονται στην πίσω πλευρά των πορολίθων υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα και μάλιστα ο όγκος τους να μετρείται ώστε να διορθώνονται οι μετρούμενες τιμές του όγκου του εξερχόμενου νερού.

Η ακριβής τιμή της υδραυλικής κλίσης εντός του δοκιμίου υπολογίζεται μέσω της μέτρησης της πίεσης της υγρής φάσης των πόρων σε δύο τουλάχιστον σημεία εντός του δοκιμίου που απέχουν απόσταση  $\Delta L$  (βλ. Σχ. 7.6), οπότε η υδραυλική κλίση είναι  $(u_{w2}-u_{w1})/\Delta L$ . Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος μετατόπισης άξονα για την δημιουργία μύζησης στο δοκίμιο, τότε είναι δυνατόν και η

υγρή φάση των πόρων να διατηρεί θετική τιμή της πίεσης, οπότε η πίεση στην υγρή φάση μπορεί να μετρείται με συμβατικούς αισθητήρες όπως και στα πλήρως κορεσμένα εδάφη. Αντίθετα αν χρησιμοποιείται κάποια άλλη μέθοδος για την δημιουργία της μύζησης, οπότε η πίεση στην υγρή φάση γίνεται πραγματικά αρνητική, τότε απαιτείται η χρήση τενσιομέτρων για τον προσδιορισμό της υδραυλικής κλίσης, γεγονός το οποίο εισάγει επιπλέον πολυπλοκότητα στην διάταξη. Σε αυτήν την περίπτωση μάλιστα η τιμή της μύζησης υπό την οποία μπορεί να μετρηθεί ο συντελεστής διαπερατότητας περιορίζεται και από την ικανότητα μέτρησης των τενσιομέτρων (βλ. Κεφ. 3). Αντίθετα στην περίπτωση της χρήσης της μεθόδου μετατόπισης άξονα για την δημιουργία της μύζησης, οι περιορισμοί τίθενται από την μέγιστη τιμή της πίεσης διεύθυνσης αέρα που μπορούν να έχουν οι κεραμικοί πορόλιθοι στις άκρες του δοκιμίου, και επίσης, στην περίπτωση που η μύζηση υλοποιείται σε αυξημένη πίεση της υγρής φάσης των πόρων, από την μέγιστη πίεση υπό την οποία μπορεί να βρεθεί η κυψέλη (αφού η πίεση της αέριας φάσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την πίεση της υγρής φάσης κατά την ζητούμενη τιμή της μύζησης<sup>8</sup>).

Για την πειραματική διάταξη που απεικονίζεται στο Σχ. 7.6, ο συντελεστής διαπερατότητας της υγρής φάσης των πόρων για κάθε τιμή της μύζησης υπολογίζεται από την Εξ. 7.55.

$$k_w = q \cdot \Delta L / (h_1 - h_2) \quad (7.55)$$

Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για την μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των πόρων και κατά μήκος διαδρομών ξήρανσης (αύξησης της μύζησης) και κατά μήκος διαδρομών ύγρανσης (μείωσης της μύζησης), με την μύζηση να υλοποιείται είτε από χαμηλές τιμές της πίεσης της υγρής φάσης των πόρων με αύξηση της πίεσης της αέριας φάσης των πόρων, είτε από υψηλές τιμές της πίεσης της αέριας φάσης των πόρων με μείωση της πίεσης της υγρής φάσης των πόρων. Όπως φαίνεται και από την διάταξη του Σχ. 7.6, η πίεση της υγρής φάσης των πόρων κατά μήκος του δοκιμίου δεν είναι σταθερή. Κατά συνέπεια, ο μετρούμενος συντελεστής διαπερατότητας θεωρείται ότι αντιστοιχεί στην μύζηση που προκύπτει από την διαφορά της πίεσης της αέριας φάσης των πόρων και του μέσου όρου της πίεσης της υγρής φάσης των πόρων. Αυτό αποτελεί και το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής, αφού πρέπει να διατηρηθεί ισορροπία ανάμεσα στην απαίτηση για μικρή διαφορά της πίεσης της υγρής φάσης

<sup>8</sup> Για παράδειγμα, αν η τιμή της πίεσης της υγρής φάσης είναι 800 kPa, και ζητείται η δημιουργία της μέγιστης τιμής της μύζησης για κεραμικούς πορολίθους πίεσης διεύθυνσης αέρα 1500 kPa, τότε η πίεση της αέριας φάσης πρέπει να είναι κατά 1500 kPa μεγαλύτερη από την πίεση της υγρής φάσης, δηλ. 2300 kPa, οπότε η ίδια η κυψέλη πρέπει να έχει αντοχή σε πίεση στο εσωτερικό της 2300 kPa.



(δηλ. μικρή ανομοιογένεια εντός του δοκιμίου ως προς την μύζηση) και την απαίτηση για την παρουσία μίας επαρκώς μεγάλης υδραυλικής κλίσης ώστε να είναι μετρήσιμος ο όγκος του εξερχόμενου ύδατος από το δοκίμιο. Επίσης σε μία απλοποιημένη διάταξη όπως αυτή του Σχ. 7.6 ελέγχεται μόνο η μύζηση και μετρείται μόνο ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση. Εάν απαιτείται η συσχέτιση του συντελεστή διαπερατότητας και με το ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί στην υλοποιούμενη μύζηση, τότε είτε πρέπει να μετρηθεί ξεχωριστά για το εδαφικό υλικό η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, είτε μετά από την μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας για κάθε τιμή της μύζησης, το περατόμετρο να ανοίγεται και να μετρείται το ποσοστό υγρασίας του δοκιμίου και οι λοιπές παράμετροι που ενδιαφέρουν. Στην δεύτερη περίπτωση, προϋποτίθεται ότι η ομοιογένεια του δείγματος από το οποίο μορφώθηκαν δοκίμια για την εκτέλεση των δοκιμών είναι τέτοια που δεν αλλοιώνεται η εικόνα της εξέλιξης του συντελεστή διαπερατότητας με την μύζηση λόγω διαφορών από δοκίμιο σε δοκίμιο. Εναλλακτικά μπορούν να τοποθετηθούν σε πιο πολύπλοκες διατάξεις αισθητήρες μέτρησης του ποσοστού υγρασίας (βλ. Κεφ. 3). Ο Gardner (1986) παραθέτει μία συνοπτική αναφορά των διαθέσιμων μή καταστροφικών μεθόδων μέτρησης του ποσοστού υγρασίας σε μή κορεσμένα εδάφη, ενώ οι Topp, et al. (1980) και οι O'Connor & Dowding (1999) περιγράφουν τις διαθέσιμες τεχνολογίες TDR για εφαρμογές γεωτεχνικής μηχανικής.

Συνοψίζοντας, το πλεονέκτημα της μεθόδου σταθερού φορτίου για την μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση είναι η απλότητά της και η ευρεία της διάδοση. Επειδή η μέθοδος μπορεί να υλοποιηθεί μέσα σε κυψέλες της δοκιμής τριαξονικής φόρτισης, ο συντελεστής διαπερατότητας μπορεί να μετρηθεί όχι μόνο υπό διάφορες τιμές της μύζησης, αλλά και υπό διάφορες ισοτροπικές ή ανισοτροπικές εντατικές καταστάσεις. Η μέτρηση τιμών έως και  $10^{-11}$  m/s είναι γενικά εφικτή. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου συνοψίζονται στον μεγάλο χρόνο που απαιτείται συχνά για την εκτέλεση της δοκιμής (τον χρόνο δηλ. που απαιτείται για την επίτευξη συνθηκών μόνιμης ροής εντός του δοκιμίου υπό τις εφαρμοζόμενες πιέσεις), την απαίτηση για μέτρηση πολύ μικρών παροχών και τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με την επίτευξη (και διατήρηση κατά την διάρκεια της δοκιμής) καλής επαφής του δοκιμίου με τους κεραμικούς πορολίθους στις πλευρές του, τα σημεία μέτρησης πίεσης και τα τοιχώματα του περατομέτρου όταν αυτά είναι άκαμπτα. Ειδικά σε ό,τι αφορά τον χρόνο, όπως προαναφέρθηκε, πρέπει να διατηρηθεί ισορροπία ανάμεσα στην απαίτηση για μικρή διαφορά της πίεσης της υγρής φάσης (δηλ. μικρή ανομοιογένεια εντός του δοκιμίου ως προς την μύζηση) και την απαίτηση για την παρουσία μίας επαρκώς μεγάλης υδραυλικής κλίσης ώστε να είναι μετρήσιμος ο όγκος του εξερχόμενου ύδατος από το δοκίμιο.

#### 7.6.2.2 Μέθοδος σταθερής παροχής

Η μέθοδος σταθερής παροχής μοιάζει με την μέθοδο σταθερού φορτίου, με την διαφορά ότι η παροχή διά μέσω του δοκιμίου ελέγχεται αντί να μετρείται, όπως στην προηγούμενη μέθοδο. Η εφαρμοζόμενη παροχή μπορεί να λάβει τιμές ακόμα και  $10^{-7}$  cm<sup>3</sup>/s, οπότε τα προβλήματα που σχετίζονται με την ικανότητα μέτρησης πολύ χαμηλών τιμών παροχής στην μέθοδο σταθερού φορτίου εξαλείφονται. Αντλίες με ικανότητα ελέγχου τόσο χαμηλών παροχών είναι εύκολα διαθέσιμες για εφαρμογές γεωτεχνικής μηχανικής, ενώ εκτός από την επιβολή της ζητούμενης παροχής διά μέσω του δοκιμίου χρησιμοποιούνται και για τον έλεγχο του ποσοστού υγρασίας του μέσω της εξαγωγής ή εισαγωγής ύδατος σε αυτό. Έτσι η μύζηση υπό την οποία μετρείται ο συντελεστής διαπερατότητας μετρείται παρά επιβάλλεται, και επειδή υπάρχει και ταυτόχρονος έλεγχος του ποσοστού υγρασίας, μετρείται εκτός από την καμπύλη συντελεστή διαπερατότητας-μύζησης και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Στα περατόμετρα που υλοποιείται η μέθοδος μπορούν να εφαρμοστούν ισοτροπικές ή ανισοτροπικές εντατικές καταστάσεις αφού η μέθοδος μπορεί να υλοποιηθεί σε τροποποιημένες κυψέλες της τριαξονικής δοκιμής. Περισσότερα για την συγκεκριμένη μέθοδο μπορούν να αναζητηθούν στους Lu & Likos (2004).

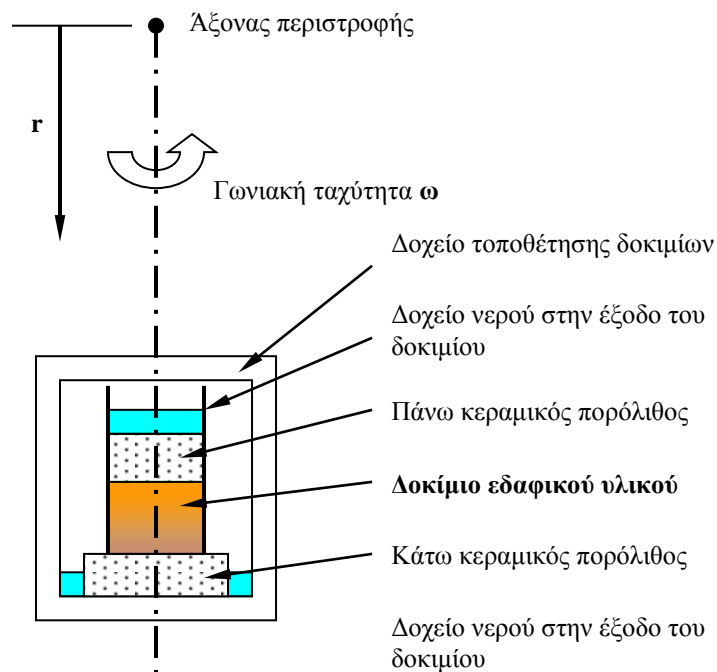
#### 7.6.2.3 Μέθοδος φυγοκέντρισης

Το βασικότερο μειονέκτημα της μεθόδου σταθερού φορτίου είναι ο μεγάλος χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη συνθηκών μόνιμης ροής. Μία μέθοδος μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό που αντιμετωπίζει το πρόβλημα αυτό είναι η μέθοδος μόνιμης ροής μέσω φυγοκέντρισης (steady-state centrifugation method: SSCM). Στη μέθοδο αυτή ο συντελεστής διαπερατότητας μετρείται κατά την κατάσταση μόνιμης ροής σε πεδίο επιταχύνσεων πολύ μεγαλύτερων της επιτάχυνσης της βαρύτητας, υπό το οποίο μειώνεται σημαντικά ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη συνθηκών μόνιμης ροής ακόμα και σε λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά πολύ χαμηλής διαπερατότητας ή πολύ χαμηλές τιμές του βαθμού κορεσμού. Η αρχή της μεθόδου και διάφορες παραλλαγές στις οποίες έχει υλοποιηθεί περιγράφονται από τους Nimmo, et al. (1987, 1992) και τους Nimmo & Akstin (1988).

Στο Σχ. 7.7 επιδεικνύεται η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου. Κυλινδρικό δοκίμιο τοποθετείται σε περιστρεφόμενο υποδοχέα στην άκρη βραχίονα φυγοκεντρητή, ο οποίος περιστρέφεται στο οριζόντιο επίπεδο με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$ . Η επιτάχυνση λόγω φυγοκέντρου

σε απόσταση  $r$  από το κέντρο της περιστροφής είναι  $\omega^2 r$ . Εάν υποτεθεί ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας είναι αμελητέα σε σύγκριση με το πεδίο επιταχύνσεων που δημιουργείται λόγω φυγοκέντρισης, τότε η ροή εντός του εδαφικού δοκιμίου μπορεί να θεωρηθεί μονοδιάστατη κατά μήκος του άξονα του κυλινδρικού δοκιμίου και να περιγραφεί από τρεις παραμέτρους: τον συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση, την κλίση της μύζησης κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου και του πεδίου επιταχύνσεων κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου. Η μονοδιάστατη αυτή ροή περιγράφεται μαθηματικά από την Εξ. 7.56, όπου  $q$  η παροχή κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου,  $k_w$  ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση,  $ds/dr$  η κλίση της μύζησης κατά μήκος του δοκιμίου και  $\rho_w$  η πυκνότητα της υγρής φάσης των πόρων.

$$q = k_w \cdot (ds/dr - \rho_w \cdot \omega^2 \cdot r) \quad (7.56)$$



**Σχήμα 7.7.** Ενδεικτική απεικόνιση διάταξης εφαρμογής της μεθόδου φυγοκέντρισης για τον προσδιορισμό του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση και επεξήγηση των μεγεθών που υπεισέρχονται στην Εξ. 7.56.

Οι Nimmo, et al. (1987) επέδειξαν ότι υπό υψηλή γωνιακή ταχύτητα η επιρροή της κλίσης της μύζησης κατά μήκος του δοκιμίου είναι πρακτικά αμελητέα και μπορεί να αγνοηθεί, οπότε η Εξ. 7.56 εκφυλίζεται στην Εξ. 7.57, η οποία αναδιατασσόμενη ως προς τον συντελεστή

διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση οδηγεί στην Εξ. 7.58 με την οποία γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των πόρων κατά την εφαρμογή της μεθόδου φυγοκέντρισης.

$$q = k_w \cdot \rho_w \cdot \omega^2 \cdot r \quad (7.57)$$

$$k_w = q / (\rho_w \cdot \omega^2 \cdot r) \quad (7.58)$$

Οι παραλλαγές της μεθόδου ξεχωρίζουν ανάλογα με τον τρόπο παροχής νερού στο δοκίμιο. Στην αρχική της μορφή, η μέθοδος ενσωμάτωνε δοχείο νερού εντός του δοχείου τοποθέτησης του δοκιμίου (εντός δηλ. του φυγοκεντρητή και περιστρεφόμενο μαζί με τον βραχίονα φυγοκέντρισης). Μία παραλλαγή της μεθόδου ενσωματώνει εξωτερικό δοχείο νερού με σύστημα σταθερής παροχής (Conca & Wright, 1998). Η μέθοδος φυγοκέντρισης σε αυτήν την παραλλαγή της περιγράφεται από το πρότυπο D 6527 της ASTM.

Γενικά ο βαθμός κορεσμού και η παροχή διά μέσω του δοκιμίου καθορίζονται από τον συντελεστή διαπερατότητας των κεραμικών πορολίθων στην άκρη του δοκιμίου, την εξωτερικά ρυθμιζόμενη παροχή και την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του βραχίονα.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η ταχύτητα εκτέλεσης της αφού, όπως αναφέρουν οι Nimmo & Akstin (1988), για σχετικά μεγάλες τιμές της διαπερατότητας η διάρκεια της δοκιμής μπορεί να περιορίζεται ακόμα και στις 8 ώρες και για μικρές τιμές της διαπερατότητας στις 24 ώρες.

Τα μειονεκτήματά της είναι το μεγάλο κόστος, το οποίο οφείλεται κυρίως στην ανάγκη προμήθειας ενός εξειδικευμένου φυγοκεντρητή, και ο περιορισμός της εφαρμογής της πρακτικά σε εδαφικά υλικά μικρής συμπίεστικότητας, όπως οι άμμοι και οι πολύ σφιχτές άργιλοι και μάργες. Για πιο συμπίεστα εδάφη θεωρείται ότι το μεγάλο πεδίο επιταχύνσεων προκαλεί τόσο μεγάλες δυνάμεις στα δοκίμια που αλλάζει η δομή τους (είναι ακριβώς σαν να υποβάλλονταν σε συμπίεση), οπότε τίθεται το ερώτημα σε ποια εντατική κατάσταση αντιστοιχεί ο μετρούμενος συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση.

### 7.6.3 Μέθοδοι μή μόνιμης ροής για τη μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση

#### 7.6.3.1 *Εισαγωγή*

Η μή μόνιμη ροή της υγρής φάσης των πόρων αποτελεί στην ουσία ένα φαινόμενο διάχυσης ελεγχόμενο από την υδραυλική διαχυτότητα (hydraulic diffusivity),  $D$ , η οποία στα μή κορεσμένα εδάφη είναι συνάρτηση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας,  $\theta$ ,  $D(\theta)$ , και ορίζεται (Εξ. 7.59) ως ο λόγος του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση  $k_w(\theta)$  προς την κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης,  $C(\theta)$  (Εξ. 7.60).

$$D(\theta) = k_w(\theta) / C(\theta) \quad (7.59)$$

$$C(\theta) = \partial\theta / \partial s \quad (7.60)$$

Αναδιατάσσοντας την Εξ. 7.59 ως προς  $k_w(\theta)$  και εισάγοντας σε αυτήν την Εξ. 7.60 προκύπτει η Εξ. 7.61 μέσω της οποίας μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση εάν είναι γνωστή η υδραυλική διαχυτότητα και η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (η οποία μπορεί να μετρηθεί ταυτόχρονα με την μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ή ανεξάρτητα).

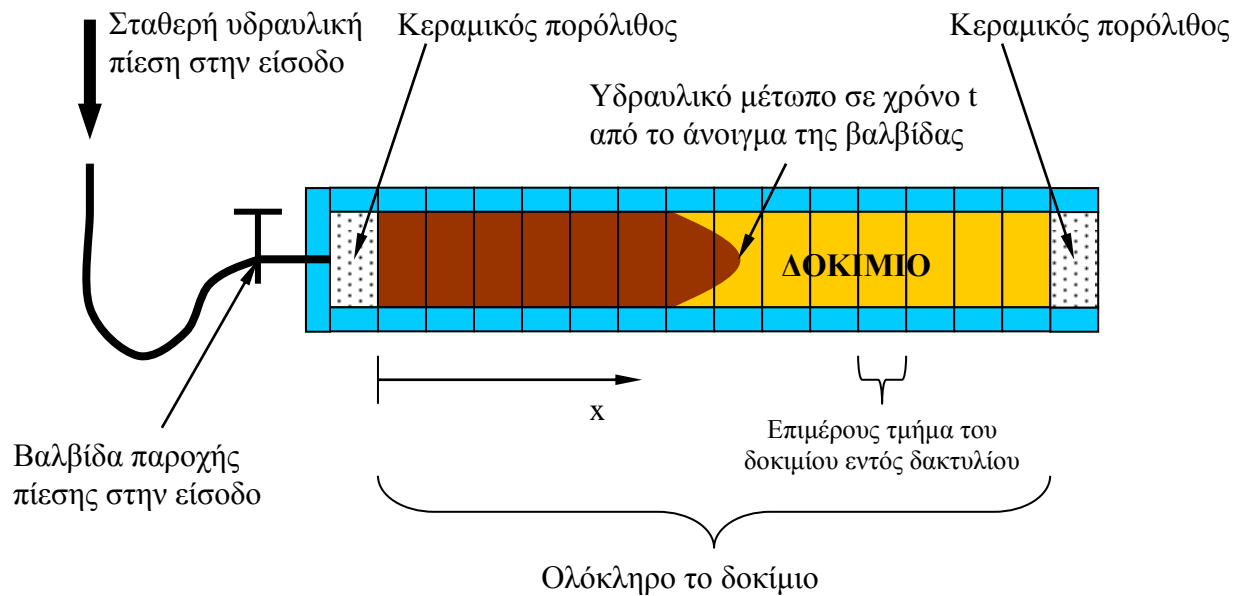
$$k_w(\theta) = D(\theta) \cdot [\partial\theta / \partial s] \quad (7.61)$$

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι που βασίζονται σε αυτή την λογική και παρουσιάζονται στην συνέχεια της παραγράφου. Οι σπουδαιότερες από αυτές είναι η μέθοδος οριζόντιας διείσδυσης ύδατος, η μέθοδος παρακολούθησης στραγγιζόμενου ύδατος από θαλάμους μύζησης και η μέθοδος χρονικά σημειακής κατανομής του ποσοστού υγρασίας και της μύζησης. Και για τις τρεις αυτές μεθόδους έχουν καταγραφεί και διάφορες επιμέρους παραλλαγές τους.

### 7.6.3.2 Μέθοδος οριζόντιας διείσδυσης ύδατος

Η μέθοδος οριζόντιας διείσδυσης ύδατος (horizontal infiltration method) αναπτύχθηκε αρχικά από τους Bruce & Klute (1956). Διάφορες παραλλαγές της μεθόδου έχουν αναπτυχθεί μεταξύ άλλων από τους Jackson (1964), Cassel, et al. (1968), Rose (1968) και τους Clothier, et al. (1983). Η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην παρακολούθηση της κατανομής του ποσοστού υγρασίας κατά μήκος ενός οριζόντιου κυλινδρικού δοκιμίου εδάφους, συνήθως σημαντικά μεγαλύτερου μήκους από την διάμετρό του, σε ορισμένο χρόνο μετά την εφαρμογή συνθηκών πλήρους κορεσμού στο ένα του άκρο ( $S_r = 100\%$  και  $\theta = \theta_{sat}$ ). Με βάση τις γνωστές αρχικές οριακές συνθήκες μπορεί να επιλυθεί η εξίσωση διάχυσης ως προς την υδραυλική διαχυτότητα και στη συνέχεια με εφαρμογή της Εξ. 7.61 να προσδιοριστεί ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση. Η μέθοδος αυτή προορίζεται κυρίως για εφαρμογή σε χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά και συνήθως απαιτεί καταστροφή του δοκιμίου μετά την εφαρμογή της για να μετρηθεί η τιμή του ποσοστού υγρασίας σε διάφορες θέσεις.

Στο Σχ. 7.8 παρουσιάζεται απλοποιημένη μορφή της διάταξης για την εφαρμογή της μεθόδου. Αρχικά παρασκευάζεται ένα μεγάλο μήκους κυλινδρικό δοκίμιο του εδάφους στις επιθυμητές αρχικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού. Συνήθως αυτό μορφώνεται εντός πλαστικών κυλίνδρων αποτελούμενων από επιμέρους δακτυλίους, όπως φαίνεται στο Σχ. 7.8, αφού αυτό διευκολύνει στη συνέχεια την τομή του δοκιμίου σε επιμέρους τμήματα για την μέτρηση του ποσοστού υγρασίας στο καθένα από αυτά. Συνήθως αρκούν 10 επιμέρους δακτύλιοι διαμέτρου 2-3 cm και μήκους 2-3cm (δηλ. συνολικό μήκος του δοκιμίου 20-30cm). Το αρχικό ποσοστό υγρασίας ολόκληρου του δοκιμίου υποτίθεται συνήθως ομοιογενές και μάλιστα μηδενικό αφού στη συνηθέστερη μορφή της δοκιμής το δοκίμιο είναι αρχικά εντελώς ξηρό. Σε μία δεδομένη χρονική στιγμή ( $t_0$ ) ανοίγεται η βαλβίδα που συνδέει το ένα άκρο του δοκιμίου με μία πηγή σταθερής υδραυλικής πίεσης προκαλώντας μία προοδευτική διείσδυση νερού εντός του δοκιμίου οπότε το αρχικό ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας,  $\theta_0$ , αυξάνει κατά μήκος του δοκιμίου και στην άκρη του προς την πηγή υδραυλικής πίεσης λαμβάνει την τιμή  $\theta_{sat}$ . Η βαλβίδα παροχής πίεσης αφήνεται ανοικτή για χρονικό διάστημα  $t$  κατά το οποίο το νερό διεισδύει εντός του δοκιμίου στην διεύθυνση  $x$  (η επιρροή της βαρύτητας θεωρείται αμελητέα για την ασκούμενη υδραυλική πίεση στο άκρο του δοκιμίου, οπότε θεωρείται ότι εντός αυτού επικρατούν μονοδιάστατες συνθήκες ροής κατά την διεύθυνση  $x$ ). Μετά το χρονικό διάστημα  $t$  η βαλβίδα παροχής πίεσης κλείνει, το δοκίμιο τεμαχίζεται αμέσως μέσω των επιμέρους δακτυλίων, και στα τμήματα του δοκιμίου εντός αυτών μετρείται το ποσοστό υγρασίας.



**Σχήμα 7.8.** Ενδεικτική απεικόνιση διάταξης εφαρμογής της μεθόδου οριζόντιας διείσδυσης ύδατος για τον προσδιορισμό του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση.

Η ροή κατά μήκος του δοκιμίου στο Σχ. 7.8 περιγράφεται από την Εξ. 7.62 και οι οριακές συνθήκες είναι για μεν τον χρόνο  $t_0$ ,  $\theta(x) = \theta_0$  σε οποιοδήποτε σημείο του δοκιμίου, για δε τον χρόνο  $t$ ,  $\theta(x=0) = \theta_{\text{sat}}$  στο άκρο του δοκιμίου προς την πηγή υδραυλικής πίεσης. Η μεταβλητή του Boltzman  $\lambda(\theta)$  χρησιμοποιείται για την μετατροπή της Εξ. 7.62 σε μία κανονική διαφορική εξίσωση (Εξ. 7.63) από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η υδραυλική διαχυτότητα (Philip, 1957). Η μεταβλητή  $\lambda(\theta)$  ορίζεται από την Εξ. 7.64.

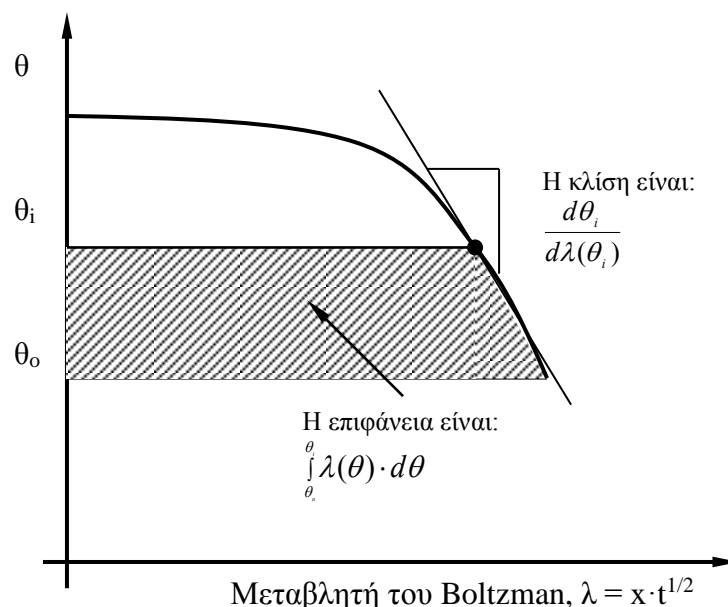
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (7.62)$$

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{d\lambda(\theta)}{d\theta} \right) \cdot \int_{\theta}^{\theta_{\text{sat}}} \lambda(\theta) \cdot d\theta \quad (7.63)$$

$$\lambda(\theta) = \frac{x}{\sqrt{t}} \quad (7.64)$$

Εάν το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας σχεδιαστεί σε ένα διάγραμμα ως προς την μεταβλητή του Boltzman, τότε προκύπτει ένα σχήμα όπως αυτό που φαίνεται ενδεικτικά στο Σχ. 7.9, και

από το οποίο μπορούν να προσδιοριστούν είτε γραφικά είτε αριθμητικά και το ολοκλήρωμα και το διαφορικό στο δεξιό μέρος της Εξ. 7.63, οπότε να γίνει ο υπολογισμός της διαχυτότητας για κάθε τιμή του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας. Εάν λοιπόν είναι γνωστή και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης, τότε χρησιμοποιώντας την Εξ. 7.61 υπολογίζεται ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς το νερό για κάθε τιμή του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας. Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού μπορεί να προσδιοριστεί ανεξάρτητα σε ένα «όμοιο» δοκίμιο του ίδιου εδαφικού υλικού, ή ακόμα και στην ίδια την διάταξη του Σχ. 7.8 εάν κατά μήκος του δοκιμίου τοποθετηθούν σε διάφορες θέσεις τενσιόμετρα για την μέτρηση της μύζησης. Τονίζεται ότι λόγω του μικρού χρόνου που διαρκεί συχνά η δοκιμή είναι κρίσιμο να χρησιμοποιηθούν όργανα μέτρησης της μύζησης ταχείας απόκρισης όπως τα τενσιόμετρα ή τα ψυχρόμετρα. Με δεδομένο δε ότι η μέθοδος εφαρμόζεται τις περισσότερες φορές σε χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά, κοινά τενσιόμετρα συνήθως επαρκούν χωρίς να χρειάζονται τα τενσιόμετρα κεραμικών πορολίθων υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα. Στην περίπτωση που η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού προσδιορίζεται ανεξάρτητα, αυτή πρέπει να είναι η καμπύλη κατά μήκος κλάδου ύγρανσης από το ίδιο αρχικό ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας με εκείνο του δοκιμίου στην διάταξη του Σχ. 7.8. Εναλλακτικά, ο Rose (1968) περιέγραψε μία διάταξη για την μέτρηση της υδραυλικής διαχυτότητας κατά μήκος κλάδων ξήρανσης του δοκιμίου.



**Σχήμα 7.9.** Ενδεικτική απεικόνιση της συσχέτισης του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας με την μεταβλητή του Boltzman από εφαρμογή της μεθόδου οριζόντιας διείσδυσης ύδατος.



### 7.6.3.3 Μέθοδοι παρακολούθησης στραγγιζόμενου ύδατος

Οι μέθοδοι παρακολούθησης στραγγιζόμενου ύδατος εφαρμόζονται σε θαλάμους μύζησης ή άλλες διατάξεις στις οποίες ενσωματώνεται η μέθοδος μετατόπισης άξονα, με το σπουδαίο πλεονέκτημα ότι επιτρέπουν ταυτόχρονο προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και της καμπύλης συντελεστή διαπερατότητας-μύζησης. Η υδραυλική διαχυτότητα προσδιορίζεται μέσω της παρακολούθησης της ποσότητας του στραγγιζόμενου ύδατος από ένα δοκίμιο εντός θαλάμου μύζησης με τον χρόνο κατά την εφαρμογή ενός σταδίου αύξησης της μύζησης ή πολλών σταδίων αύξησης της μύζησης στο ίδιο δοκίμιο. Γενικά έχουν αναπτυχθεί τέσσερις παραλλαγές της μεθόδου αυτής:

- η μέθοδος πολλαπλών βημάτων,
- η μέθοδος ενός βήματος,
- η άμεση μέθοδος πολλαπλών βημάτων, και
- η μέθοδος συνεχούς στράγγισης ύδατος.

Η μέθοδος αναπτύχθηκε για πρώτη φορά από τον Gardner (1956) στην μορφή της παραλλαγής πολλαπλών βημάτων και περιγράφεται στην παράγραφο αυτήν. Πιο λεπτομερής περιγραφή όλων των παραλλαγών της μεθόδου μπορεί να αναζητηθεί στους Benson & Gribb (1997).

Η μέθοδος μετατόπισης άξονα για τον έλεγχο της μύζησης έχει περιγραφεί διεξοδικά στην § 4.3.2 όπου παρουσιάζεται και σχήμα με την γενική διάταξή της (Σχ. 4.20). Η μέθοδος πολλαπλών βημάτων εφαρμόζεται σε δοκίμια τα οποία τοποθετούνται εντός θαλάμου μύζησης στον οποίο αυξάνεται διαδοχικά (μέχρι επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας ανά βήμα) η μύζηση και μετρείται η ποσότητα του στραγγιζόμενου ύδατος για κάθε βήμα αύξησης της μύζησης. Ο ρυθμός στράγγισης του νερού από το δοκίμιο εντός του θαλάμου μύζησης και η συνολική ποσότητα του στραγγιζόμενου ύδατος ανά βήμα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της υδραυλικής διαχυτότητας για κάθε τιμή της μύζησης. Ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση για κάθε τιμή της μύζησης υπολογίζεται μέσω της Εξ. 7.61 από την διαχυτότητα και την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Αυτή προσδιορίζεται στην συγκεκριμένη μέθοδο ταυτόχρονα με τον υπολογισμό του συντελεστή διαπερατότητας μέσω υπολογισμού του ποσοστού υγρασίας του δοκιμίου κατά την υδραυλική ισορροπία για κάθε τιμή της μύζησης από την συνολική ποσότητα του στραγγιζόμενου ύδατος για κάθε βήμα αύξησης της μύζησης.

Για την χρησιμοποίηση των δεδομένων παρακολούθησης της ποσότητας του στραγγιζόμενου ύδατος γίνονται οι εξής παραδοχές:

- θεωρείται ότι εφαρμόζονται τόσο μικρά βήματα αύξησης της μύζησης ώστε κατά μήκος τους ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση μπορεί να θεωρηθεί ότι παραμένει σταθερός,
- κατά μήκος του βήματος αύξησης της μύζησης θεωρείται ότι η μύζηση συσχετίζεται γραμμικά με το ποσοστό υγρασίας του δοκιμίου,
- η διαπερατότητα του ίδιου του κεραμικού πορολίθου του θαλάμου μύζησης δεν δυσχεραίνει την στράγγιση του νερού των πόρων του δοκιμίου,
- η ροή είναι μονοδιάστατη κατά μήκος άξονα κάθετου στην επιφάνεια του πορολίθου επί του οποίου έχει τοποθετηθεί το δοκίμιο,
- η ροή που οφείλεται στην επιτάχυνση της βαρύτητας είναι αμελητέα σε σχέση με την στράγγιση που προκαλείται λόγω αύξησης της μύζησης, και
- το δοκίμιο είναι ομοιογενές και ο όγκος του παραμένει αμετάβλητος κατά την ξήρανση.

Ειδικά σε ό,τι αφορά την παραδοχή σταθερού όγκου του δοκιμίου έχει γίνει ήδη εκτενής αναφορά στο Κεφ. 4 για τα προβλήματα που εισάγει περιορίζοντας ουσιαστικά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής (σε ό,τι αφορά τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού) σε κοκκώδη εδαφικά υλικά (βλ. σχετικά και Μπαρδάνης & Καββαδάς, 2005). Εφόσον όμως θεωρηθεί ότι οι παραδοχές αυτές ισχύουν, τότε η εξίσωση που διέπει την στράγγιση του νερού από το δοκίμιο περιγράφεται από την Εξ. 7.65, στην οποία υποτίθεται ότι η διαχυτότητα  $D$  είναι σταθερή κατά μήκος κάθε βήματος αύξησης της μύζησης.

$$\frac{\partial s}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} \quad (7.65)$$

Η μεταβλητή  $z$  περιγράφει το ύψος του δοκιμίου με  $z = 0$  στο κάτω μέρος του δοκιμίου και  $z = L$  στο πάνω μέρος του δοκιμίου, όπου  $L$  το ύψος του δοκιμίου (συνήθως 1-5 cm για εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου). Η Εξ. 7.65 είναι ανάλογη της εξίσωσης περιγραφής της αποτόνωσης υπερπίεσεων πόρων λόγω πρόσθετου φορτίου κατά την μονοδιάστατη συμπίεση αργιλικών εδαφών. Για τις αρχικές συνθήκες και τις οριακές συνθήκες κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ο Gardner (1956) διατύπωσε την λύση της Εξ. 7.65, μέσω της Εξ. 7.66, όπου  $V_\infty$  είναι ο συνολικός

όγκος του στραγγιζόμενου ύδατος για κάθε βήμα αύξησης της μύζησης και  $V_t$  ο όγκος του στραγγισθέντος ύδατος κατά τον χρόνο  $t$  από την εφαρμογή του βήματος αύξησης της μύζησης. Η καμπύλη του χρόνου  $t$  με την ποσότητα  $\ln[(V_\infty - V_t) / V_\infty]$  τέμνει τον άξονα της ποσότητας αυτής στην τιμή  $\ln(8/\pi^2)$  και έχει κλίση  $D \cdot \pi^2 / 4 \cdot L^2$ , από την οποία μπορεί να προσδιοριστεί η διαχυτότητα αν προσδιοριστεί η κλίση της καμπύλης αυτής (γραφικά ή αριθμητικά). Ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση που αντιστοιχεί στον μέσο όρο της μύζησης του δοκιμίου κατά την εφαρμογή του κάθε βήματος αύξησης της μύζησης δίδεται από την Εξ. 7.67, όπου  $s_{\mu\sigma}$  είναι ο μέσος όρος της μύζησης κατά την εφαρμογή κάθε βήματος αύξησης της  $\Delta s$ , και  $\Delta\theta$  είναι η μεταβολή του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας για το βήμα αύξησης της μύζησης.

$$\ln\left(\frac{V_\infty - V_t}{V_\infty}\right) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{D \cdot \pi^2 \cdot t}{4 \cdot L^2} \quad (7.66)$$

$$k_{s\mu\sigma} = D \cdot \Delta\theta / \Delta s \quad (7.67)$$

Η χρήση της μεθόδου πολλαπλών βημάτων περιορίζεται γενικά σε κοκκώδη εδάφη (το πολύ να εφαρμοστεί και σε ιλείς) στα οποία η στράγγιση συμβαίνει αρκετά γρήγορα και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού μπορεί να προσδιοριστεί πλήρως μέσα στο εύρος τιμών της μύζησης ως την μέγιστη πίεση διείσδυσης αέρα εμπορικά διαθέσιμων κεραμικών πορολίθων. Εάν η στράγγιση διαρκεί πολύ, τότε για να γίνεται ακριβής μέτρηση του όγκου του στραγγιζόμενου ύδατος θα πρέπει να προβλέπεται η τακτική απομάκρυνση των φυσαλίδων που συγκεντρώνονται πίσω από κεραμικούς πορολίθους. Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις η ίδια η διαπερατότητα του κεραμικού πορολίθου ενδέχεται να δυσχεραίνει την στράγγιση του νερού από το δοκίμιο και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη (π.χ. Miller & Elrick, 1958, Rijtema, 1959, Kunze & Kirkham, 1962). Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου συνίστανται στο ότι είναι αρκετά γρήγορη και επιτρέπει τον ταυτόχρονο προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού με αρκετά απλό και μάλιστα εμπορικά διαθέσιμο εξοπλισμό. Διευκρινίζεται βέβαια, ότι και η καμπύλη συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό-μύζησης και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού προσδιορίζονται κατά μήκος κλάδων ξήρανσης.

Όπως προαναφέρθηκε, πιο λεπτομερής περιγραφή όλων των παραλλαγών της μεθόδου (εκτός από αυτήν των πολλαπλών βημάτων) μπορεί να αναζητηθεί στους Benson & Gribb (1997).

Συνοπτικά, η μέθοδος ενός βήματος βασίζεται στην εφαρμογή μίας μεγάλης διαφοράς μύζησης και συσχέτιση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό με το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας που υπολογίζεται από την ποσότητα του στραγγιζόμενου ύδατος και με την μύζηση μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Η άμεση μέθοδος πολλαπλών βημάτων και η μέθοδος συνεχούς στράγγισης ύδατος βασίζονται στις μετρήσεις μύζησης από τενσιόμετρα που τοποθετούνται στα δοκίμια που υποβάλλονται σε ξήρανση μέσα στους θαλάμους μύζησης. Όλες αυτές οι παραλλαγές της μεθόδου παρακολούθησης στραγγιζόμενου ύδατος διαρκούν γενικά λιγότερο και από την μέθοδο πολλαπλών βημάτων που περιγράφηκε προηγουμένως αλλά περιορίζονται ακόμα περισσότερο σε κοκκώδη εδάφη –και μάλιστα χονδρόκοκκα.

#### 7.6.3.4 Μέθοδοι χρονικά σημειακής κατανομής

Οι μέθοδοι χρονικά σημειακής κατανομής είναι μέθοδοι μη μόνιμης ροής που μπορούν να εφαρμοστούν και στο εργαστήριο και επιτόπου για τη μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των μη κορεσμένων εδαφών. Το όνομα των μεθόδων αυτών προέρχεται από το γεγονός ότι βασίζονται στην μέτρηση της κατανομής τιμών του ποσοστού υγρασίας και της μύζησης κατά μήκος μίας «στήλης» εδάφους στο εργαστήριο ή με το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους επιτόπου για διάφορες χρονικές στιγμές κατά την διάρκεια ενός επεισοδίου μη μόνιμης ροής. Στο εργαστήριο, η «στήλη» του εδάφους είναι ένα κυλινδρικό δοκίμιο από ένα αδιατάρακτο ή διαταραγμένο δείγμα εδάφους που θεωρείται αντιπροσωπευτικό του εδαφικού σχηματισμού επιτόπου. Επιτόπου, σε διάφορα σημεία από την επιφάνεια του εδάφους μετρείται η μύζηση ή/και το ποσοστό υγρασίας και η ροή της υγρής φάσης υποτίθεται μονοδιάστατη στην διεύθυνση του βάρους από την επιφάνεια. Ο όγκος του νερού που κινείται μέσα στην μάζα του εδάφους προσδιορίζεται από τις μετρούμενες μεταβολές του ποσοστού υγρασίας σε διάφορα σημεία με τον χρόνο. Ομοίως, η υδραυλική κλίση που προκάλεσε την κίνηση αυτή του νερού προσδιορίζεται από τις μετρούμενες μεταβολές της μύζησης σε διάφορα σημεία με τον χρόνο. Εάν υποτεθεί ότι είναι γνωστή η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού για το εδαφικό δοκίμιο στο εργαστήριο ή τον εδαφικό σχηματισμό επιτόπου (και μάλιστα αυτός είναι και ομοιογενής) τότε αρκεί να μετρείται η μία μόνο από τις δύο κατανομές (ποσοστού υγρασίας ή μύζησης) και η άλλη να εκτιμάται από την μετρηθείσα, μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου, η ροή της υγρής φάσης επιτρέπεται υπό ελεγχόμενες ή γνωστές οριακές συνθήκες στην μία ή και στις δύο πλευρές του δοκιμίου στο εργαστήριο. Το επεισόδιο μη μόνιμης ροής μπορεί να είναι επεισόδιο διαβροχής ή ξήρανσης. Γίνεται η υπόθεση ότι ισχύει ο νόμος του Darcy ώστε ο συντελεστής διαπερατότητας να μπορεί να προσδιοριστεί απευθείας από μετρήσεις της παροχής του νερού που εισέρχεται ή εξέρχεται από το δοκίμιο και τις κατανομές της υδραυλικής κλίσης. Οι μετρήσεις σε διάφορα σημεία κατά μήκος του δοκιμίου και διάφορες χρονικές στιγμές παρέχουν υπερεπαρκή στοιχεία για τον προσδιορισμό της καμπύλης συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση-μύζησης.

Μέχρι σήμερα έχουν προταθεί πολλές προσεγγίσεις σε ό,τι αφορά τον έλεγχο των οριακών συνθηκών κατά μήκος ενός δοκιμίου, οι οποίες διαφέρουν κυρίως ως προς την τεχνική που εφαρμόζεται για την προσθήκη ή την αφαίρεση νερού. Παραδείγματα τέτοιων τεχνικών κατά την εργαστηριακή εφαρμογή της μεθόδου αποτελούν:

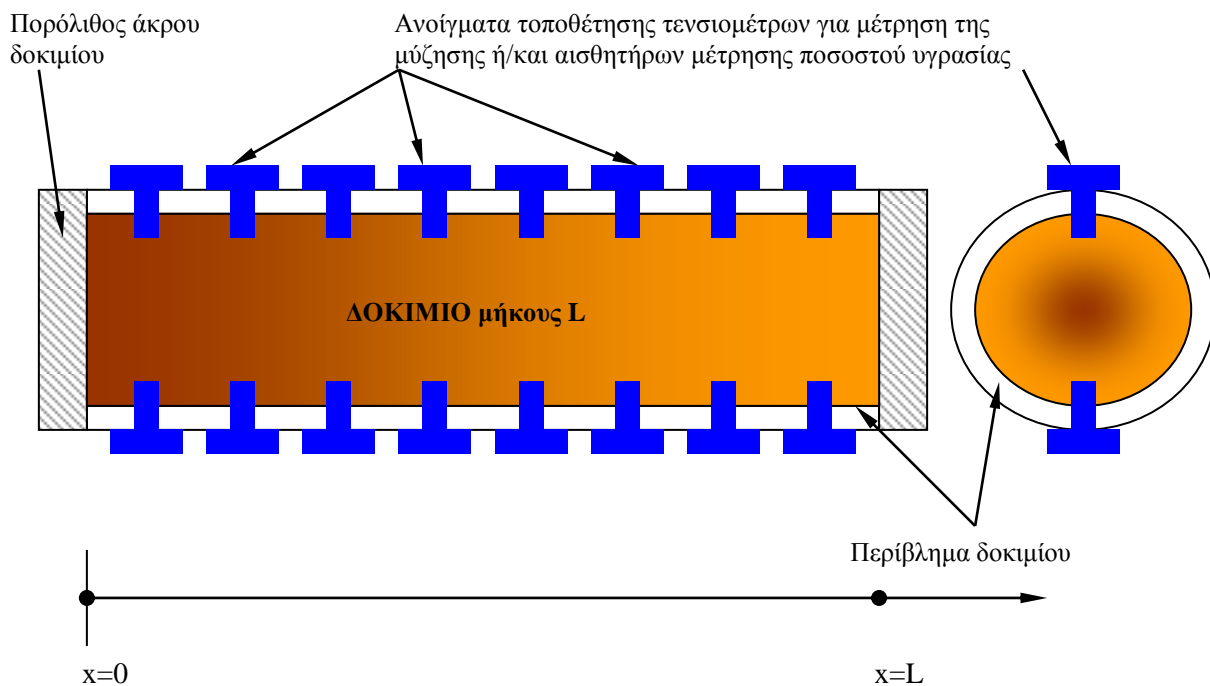
- Προσθήκη νερού από το ένα άκρο ενός κατακόρυφου ή οριζόντιου δοκιμίου με μέτρηση της ποσότητας του προστιθέμενου ύδατος. Οι τυπικές διατάξεις χρησιμοποιούν μία αντλία νερού ή ένα σύστημα ελεγχόμενης διαβροχής (στάγδην).
- Αφαίρεση νερού από το ένα άκρο του δοκιμίου με μέτρηση της ποσότητας του αφαιρούμενου ύδατος.
- Αφαίρεση νερού από το ένα άκρο του δοκιμίου μέσω της εφαρμογής μίας σταθερής τιμής της μύζησης σε αυτό το άκρο.
- Στράγγιση διά βαρύτητας ενός κατακόρυφα διατεταγμένου δοκιμίου από αρχικές συνθήκες πλήρους κορεσμού.
- Εξάτμιση της υγρής φάσης του δοκιμίου από αρχικές συνθήκες πλήρους κορεσμού.

Σε ό,τι αφορά την εφαρμογή της μεθόδου για την επιτόπου μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων εφαρμόζεται οριακή συνθήκη κατάκλυσης της επιφάνειας του εδάφους στην άμεση περιοχή των μετρήσεων.

Ειδικά σε ό,τι αφορά την εργαστηριακή εφαρμογή της μεθόδου χρονικά σημειακής κατανομής, αυτή περιγράφηκε για πρώτη φορά από τους Richards & Weeks (1953). Παραδοχές της μεθόδου έχουν αναπτυχθεί μεταξύ άλλων από τους Watson (1966), Hamilton, et al. (1981), Daniel (1983), Meerdink, et al. (1996) και Chiu & Shackelford (1998). Η μέθοδος στο εργαστήριο

μπορεί να εφαρμοστεί και σε διαταραγμένα και σε αδιατάρακτα δοκίμια. Τα δοκίμια τοποθετούνται συνήθως σε υποδοχείς άκαμπτων τοιχωμάτων μήκους ως 30 cm και διατάσσονται οριζόντια ή κατακόρυφα. Για οριζόντια διατεταγμένα δοκίμια, η συνιστώσα της ροής λόγω βαρύτητας μπορεί να αγνοηθεί κατά τους υπολογισμούς.

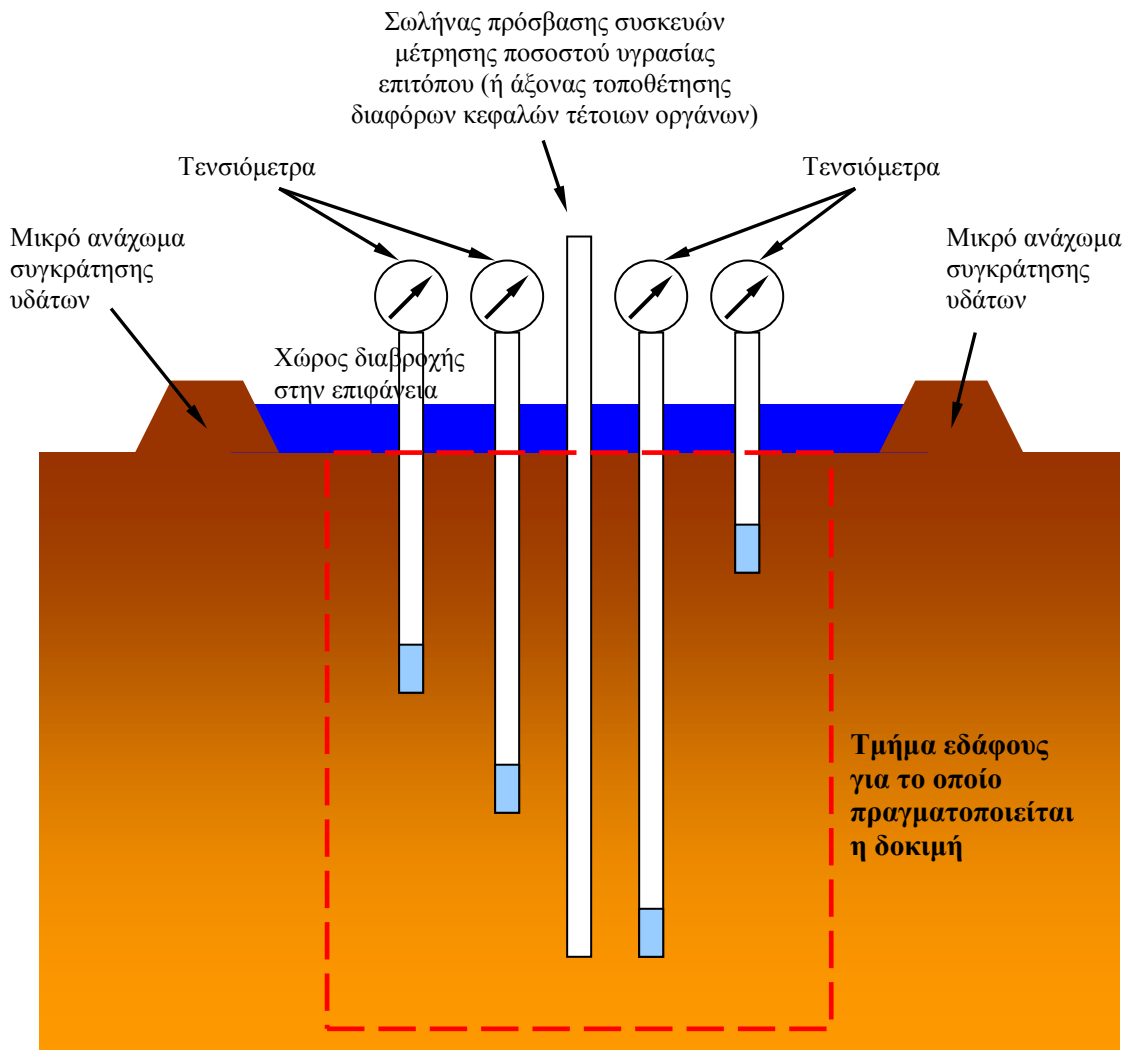
Στο Σχ. 7.10 επιδεικνύεται μία τυπική διάταξη εφαρμογής της μεθόδου χρονικά σημειακής κατανομής σε οριζόντια διατεταγμένο κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους, στα άκρα του οποίου υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου των οριακών συνθηκών και στην περιφέρειά του υπάρχουν θύρες εφαρμογής οργάνων μέτρησης της μύζησης ή του ποσοστού υγρασίας. Οι Lu & Likos (2004) παρουσιάζουν αναλυτικά τον τρόπο υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση από αυτή την διάταξη μέσω των κατανομών για διάφορες χρονικές στιγμές της μύζησης και του ποσοστού υγρασίας με το μήκος του δοκιμίου κατά μήκος του άξονα  $x$ .



**Σχήμα 7.10.** Ενδεικτική απεικόνιση εφαρμογής της μεθόδου χρονικά σημειακής κατανομής για τον υπολογισμό του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση. Στην προκειμένη περίπτωση πρόκειται για οριζόντια διατεταγμένο κυλινδρικό δοκίμιο εντός σωλήνα με ανοίγματα τοποθέτησης тенσιομέτρων για μέτρηση της μύζησης ή/και αισθητήρων μέτρησης ποσοστού υγρασίας.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου επιτόπου προσδιορίζονται μή μόνιμες (transient) κατανομές του ποσοστού υγρασίας ή/και της μύζησης με το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους κατά την διάρκεια επεισοδίων διαβροχής ή ξήρανσης υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Οι Watson (1966) και Hillel et al. (1972) περιγράφουν μία διαδικασία κατά την οποία γίνεται διαβροχή του εδάφους στην επιφάνεια μέχρι τον πλήρη κορεσμό του και στην συνέχεια παρακολουθείται η στράγγιση διά βαρύτητας. Περαιτέρω διαβροχή ή ξήρανση από την επιφάνεια αποτρέπεται μέσω της κάλυψης της έτσι ώστε σε αυτήν την φάση της δοκιμής να ελέγχεται η οριακή συνθήκη στην επιφάνεια. Αντίστοιχα οι Meerdink et al. (1996) και Nielson et al. (1964) παρουσιάζουν εναλλακτικές μορφές της δοκιμής με ξήρανση από την επιφάνεια. Αυτός ο τύπος της δοκιμής είναι πιο χρονοβόρος αλλά καταλληλότερος για πιο λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά.

Στο Σχ. 7.11 επιδεικνύεται τυπική διάταξη εφαρμογής της μεθόδου επιτόπου. Μία περιοχή στην οποία ζητείται η μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση περικλείεται από ανάχωμα ύψους μερικών δεκάδων cm και στο κέντρο της περιοχής εσωτερικά του επιχώματος τοποθετούνται τα όργανα μέτρησης μύζησης και ποσοστού υγρασίας. Αφού ληφθούν μετρήσεις για επαρκές χρονικό διάστημα ώστε να θεωρηθεί ότι έχουν ισορροπήσει οι μετρήσεις των οργάνων αρχικά και έχει παρακολουθηθεί η φυσική διακύμανση της εξέλιξης της μύζησης και του ποσοστού υγρασίας, τότε η επιφάνεια του εδάφους που περικλείεται από το ανάχωμα πλημμυρίζεται από νερό και αρχίζει η παρακολούθηση των μεταβολών στην μύζηση ή/και στο ποσοστό υγρασίας που καταγράφεται στα τοποθετημένα όργανα. Όπως και στην περίπτωση της εργαστηριακής εφαρμογής της μεθόδου μπορούν να μετρηθούν μόνο οι μεταβολές στην μύζηση εάν είναι γνωστή η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού αντιπροσωπευτικών δειγμάτων του εδαφικού υλικού στην θέση μέτρησης. Ιδανικά όλα τα όργανα παρακολούθησης πρέπει να τοποθετούνται στο κέντρο της περιοχής που πλημμυρίζει, έτσι ώστε να αποφεύγονται διαφορές που παρατηρούνται εκτός του άξονα της «στήλης» του εδάφους που ελέγχεται επιτόπου. Οι Lu & Likos (2004) παρουσιάζουν αναλυτικά τον τρόπο υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση από αυτή τη διάταξη μέσω των κατανομών για διάφορες χρονικές στιγμές της μύζησης και του ποσοστού υγρασίας με το βάθος από την επιφάνεια.



**Σχήμα 7.11.** Ενδεικτική απεικόνιση εφαρμογής της μεθόδου χρονικά σημειακής κατανομής για τον υπολογισμό του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση επιτόπου.

#### 7.6.4 Μέθοδοι μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση

Αντίθετα με τον συντελεστή διαπερατότητας των μη κορεσμένων εδαφών ως προς την υγρή φάση για τον οποίο υπάρχει πλούσια βιβλιογραφία, για τον συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση, η βιβλιογραφική ανασκόπηση αποκάλυψε ότι υπάρχουν ελάχιστες βιβλιογραφικές αναφορές γενικά για την εξέλιξή του με την μύζηση και ειδικά για την εργαστηριακή ή επιτόπου μέτρησή του. Οι Fredlund & Rahardjo (1993) αναφέρουν τη μέθοδο



μέτρησης σε κυψέλη της τριαξονικής δοκιμής (Matyas, 1967) και τη μέθοδο μέτρησης επίσης σε κυψέλη της τριαξονικής δοκιμής αλλά με δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης και του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση (Barden, et al., 1969, και Barden & Pavlakis, 1971).

Η πρώτη από τις δύο μεθόδους είναι αρκετά απλή και συνίσταται στην τοποθέτηση του δοκιμίου μέσα στην κυψέλη της τριαξονικής δοκιμής με δύο στεγνούς πορολίθους μικρής πίεσης διείσδυσης αέρα (συμβατικούς) στα δύο του άκρα και εφαρμογής μίας σταθερής πίεσης αέρα από την είσοδο στην βάση του δοκιμίου. Ο αέρας που εξέρχεται από το πάνω τμήμα του δοκιμίου συλλέγεται με σύστημα βαθμονομημένων μπιρετών που περιέχουν λάδι μεταξύ του εξερχόμενου από το δοκίμιο αέρα και του αέρα της ατμόσφαιρας (για περισσότερες λεπτομέρειες ιδέ Matyas, 1967, και Fredlund & Rahardjo, 1993). Για να εκτελεστεί η δοκιμή πρέπει να εφαρμοστεί πίεση στην κυψέλη αλλιώς δεν μπορεί να υποχρεωθεί ο αέρας που εισέρχεται από την βάση του δοκιμίου να διέλθει μέσα από το δοκίμιο (αφού τότε απλώς θα φουσκώσει η μεμβράνη που περιβάλλει το δοκίμιο και ο αέρας θα περάσει από τον χώρο που θα δημιουργηθεί ανάμεσα στην μεμβράνη και το δοκίμιο). Η απαίτηση αυτή βέβαια επιτρέπει την μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση για διάφορες τιμές της ισοτροπικής πίεσης. Οι Maciel & Jucá (2000) και Jucá & Maciel (2006) χρησιμοποίησαν την μέθοδο αυτή για να μετρήσουν τον συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση σε συμπυκνωμένα εδάφη προοριζόμενα για χρήση στην τελική κάλυψη απορριμμάτων σε ΧΥΤΑ.

Στην περίπτωση της δεύτερης μεθόδου που αναφέρουν οι Fredlund & Rahardjo (1993), η κυψέλη της τριαξονικής δοκιμής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτόχρονη μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή και ως προς την αέρια φάση. Η κυψέλη έχει τροποποιηθεί έτσι ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος της ολικής εφαρμοζόμενης τάσης, της πίεσης του αέρα των πόρων και της πίεσης του νερού των πόρων. Οι Barden & Pavlakis (1971) χρησιμοποίησαν πορολίθους πίεσης διείσδυσης αέρα 200 kPa και τους τοποθέτησαν στην βάση και το πάνω μέρος του δοκιμίου. Δοκίμιο και πορόλιθοι περικλείονται από ελαστική μεμβράνη που επιτρέπει να εφαρμοστεί η επιθυμητή πίεση στην κυψέλη (ολική ισοτροπική τάση<sup>9</sup>). Χάρη στην κατασκευή εγκοπών στην βάση της κυψέλης κάτω από τον κάτω πορόλιθο και στο πάνω μέρος και τον πάνω πορόλιθο, είναι δυνατόν υπό σταθερή πλευρική τάση και μύζηση να εφαρμοστεί διαφορά πίεσης στην υγρή φάση από την κάτω πλευρά του δοκιμίου και διαφορά

<sup>9</sup> Στην συγκεκριμένη μέθοδο είναι δυνατόν να μετρηθούν οι συντελεστές διαπερατότητας και ως προς τις δύο φάσεις και για ανισοτροπικές εντατικές καταστάσεις.

πίεσης στην αέρια φάση από την πάνω πλευρά του δοκιμίου με την ποσότητα του νερού και του αέρα που εξέρχεται να μετρούνται αντίστοιχα στην πάνω και στην κάτω πλευρά του δοκιμίου. Η μη διατάραξη της εντατικής κατάστασης του δοκιμίου (εφαρμοζόμενη ισοτροπική τάση και μύζηση) εξασφαλίζεται από τη διατήρηση της διαφοράς στην πίεση της υγρής και της αέριας φάσης και η έλλειψη επιρροής της ροής της μίας φάσης πάνω στην άλλη εξασφαλίζεται από την παρουσία μεγαλύτερης πίεσης στην αέρια φάση από αυτή στην υγρή φάση καθ'όλη την διάρκεια της δοκιμής και τον περιορισμό της πίεσης της αέριας φάσης των πόρων σε τιμές μικρότερης της πίεσης διείδυσης αέρα των πορολίθων της συσκευής. Τα πειραματικά αποτελέσματα των Barden & Pavlakis (1971) σε μία λιθομιγή άργιλο (boulder clay) έδειξαν αύξηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση κατά μία τάξη μεγέθους (από  $10^{-11}$  σε  $10^{-10}$  m/s) από αρχικές τιμές μύζησης περί τα 100 kPa και μείωσή της μέχρι τα 10-20 kPa να αντιστοιχεί σε μείωση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση κατά δύο τάξεις μεγέθους (από  $\sim 6 \cdot 10^{-6}$  m/s σε  $\sim 7 \cdot 10^{-8}$  m/s). Και στην μέθοδο αυτή πρέπει να επισημανθεί η ανάγκη απομάκρυνσης των φυσαλίδων αέρα που συγκεντρώνονται στο κάτω μέρος των πορολίθων υψηλής πίεσης διείδυσης αέρα λόγω διάχυσης της αέριας φάσης διά των πορολίθων. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας και ως προς την αέρια και ως προς την υγρή φάση στο ίδιο δοκίμιο εδαφικού υλικού. Παρόμοια διάταξη με αυτή των Barden & Pavlakis (1971) έχει χρησιμοποιηθεί από τους Romero, et al. (2005) και από τους Nishimura, et al. (2006).

Μία άλλη πειραματική διάταξη μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση έχει παρουσιαστεί από τους Kamiya, et al. (2005). Η καινοτομία της πειραματικής αυτής διάταξης έγκειται στο ότι αντί να προσπαθεί να ασκήσει και τον έλεγχο της μύζησης αλλά και την επιβολή της διαφοράς πίεσης στην αέρια φάση από το ίδιο άκρο των δοκιμίων όπως στην περίπτωση της μεθόδου των Barden & Pavlakis (1971) χρησιμοποιεί και την περιφέρεια των δοκιμίων. Κυλινδρικό δοκίμιο ύψους μικρότερου από την διάμετρό του τοποθετείται εντός κοίλου κυλινδρικού πορολίθου υψηλής πίεσης διείδυσης αέρα και στα άκρα του πάνω και κάτω τοποθετούνται συμβατικοί πορόλιθοι χαμηλής πίεσης διείδυσης αέρα. Στην διάταξη μπορεί να ελεγχθεί μόνο η κατακόρυφη τάση που ασκείται στο δοκίμιο (βασικός περιορισμός σε σχέση με τις προαναφερθείσες διατάξεις όπου μπορεί να δημιουργηθεί ισοτροπική ή ανισοτροπική εντατική κατάσταση σε δοκίμια της τριαξονικής δοκιμής), η μύζηση μέσω της εφαρμογής πίεσης κενού στην εξωτερική πλευρά του πορολίθου υψηλής πίεσης διείδυσης αέρα, και η πίεση του αέρα που εφαρμόζεται στην πάνω πλευρά του δοκιμίου μετά την αποκατάσταση ισορροπίας λόγω εφαρμογής κατακόρυφης τάσης και μύζησης. Η μέθοδος ελέγχου της μύζησης

είναι πρωτότυπη μεν αλλά περιορίζει την μέγιστη τιμή που μπορεί να εφαρμοστεί στα 90-100 kPa (οπότε για να μπορούν να προκληθούν σημαντικές μεταβολές στον βαθμό κορεσμού, η μέθοδος περιορίζεται σε χονδρόκοκκα εδάφη), ενώ η εντατική κατάσταση που μπορεί να επιβληθεί είναι μόνο η μονοδιάστατη συμπίεση. Από την άλλη πλευρά, στην διάταξη αυτή μετρείται, όχι μόνο ο όγκος του αέρα που διαπερνά το δοκίμιο του εδαφικού υλικού, αλλά και η πίεση του αέρα στην πάνω και στην κάτω πλευρά του δοκιμίου. Η παρατήρηση είναι σημαντική γιατί, παρόλο που οι Kamiya, et al. (2005) παρουσίασαν αποτελέσματα μόνο για συνθήκες μόνιμης ροής της αέριας φάσης, η παρουσία μορφοτροπέων συνεχούς μέτρησης της πίεσης στην πάνω και στην κάτω πλευρά του δοκιμίου αφήνει περιθώρια για υιοθέτηση της μεθόδου για μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση και υπό μη μόνιμες συνθήκες ροής της αέριας φάσης. Σε ό,τι αφορά αυτά καθεαυτά τα πειραματικά τους αποτελέσματα, οι Kamiya, et al. (2005) μέτρησαν την εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας με τον βαθμό κορεσμού σε τρεις άμμους και βρήκαν μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση και για τις τρεις από περίπου  $10^{-2}$  m/s (κυμαινόταν από  $5 \cdot 10^{-2}$  m/s έως  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s) στα απολύτως ξηρά υλικά σε περίπου  $10^{-5}$  m/s για βαθμό κορεσμού περί το 80%.

Οι Maciel & Jucá (2000) παρουσίασαν επίσης μία μέθοδο μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση επιτόπου. Η διάταξη αποτελείται από ένα μεταλλικό πλαίσιο με αιχμηρές πλευρές που επιτρέπουν την διείσδυση του πλαισίου μέσα στο έδαφος και μία μεμβράνη που καλύπτει αεροστεγώς την επιφάνεια του πλαισίου και έχει στο κέντρο της οπή με βαλβίδα όπου μπορεί να προσαρμοστεί σωλήνας συγκέντρωσης και απαγωγής του διερχόμενου αέρα από την επιφάνεια που καλύπτει το πλαίσιο. Η διάταξη αυτή χρησιμοποιήθηκε στην επιφάνεια συμπυκνωμένων εδαφών που είχαν χρησιμοποιηθεί για τελική κάλυψη απορριμμάτων σε ΧΥΤΑ και αποσκοπούσε αφενός στην μέτρηση του διερχόμενου δια του καλύμματος αέρα αλλά και της ανίχνευσης των περιεχόμενων σε αυτόν αερίων. Ο τρόπος εφαρμογής της μεθόδου και της διάταξης μέτρησης αφήνει περιθώρια για τον περιορισμό της μεθόδου αυτής μόνο σε περιπτώσεις εδαφών που καλύπτουν μία πηγή έκλυσης αερίων όπως στην περίπτωση του τελικού καλύμματος των ΧΥΤΑ. Δυστυχώς, εφόσον θα μπορούσε να υλοποιηθεί μία παροχή της αέριας φάσης σε βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος αυτή για την μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση γενικά. Σε κάθε περίπτωση στην συγκεκριμένη εφαρμογή μετρήθηκε συντελεστής διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση (αποτελείτο κυρίως από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα στην συγκεκριμένη περίπτωση)  $4-6 \cdot 10^{-6}$  m/s την οποία οι Maciel & Jucá (2000) θεώρησαν υψηλή και την απέδωσαν στην πτωχή συμπίκνωση του καλύμματος στο οποίο

έγιναν οι δοκιμές καθώς και τον χαμηλό βαθμό κορεσμού που είχε αυτό στην τελική του κατάσταση κατά την οποία έγιναν οι μετρήσεις.

### **7.6.5 Μέθοδοι μέτρησης του συντελεστή διάχυσης**

Η μόνη μέθοδος που βρέθηκε καταγεγραμμένη στην βιβλιογραφία είναι αυτή των Barden & Sides (1967). Η μέθοδος συνίσταται στην εφαρμογή πίεσης αέρα στην μία πλευρά κυλινδρικών δοκιμίων ύψους μικρότερου από την διάμετρό τους τοποθετημένων επί πορολίθων υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα και μέτρησης του αέρα που συγκεντρώνεται στην κάτω πλευρά του πορολίθου υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα. Βασικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η εφαρμογή πίεσης αέρα μικρότερης της πίεσης διείσδυσης αέρα εδαφικού υλικού του δοκιμίου και του πορολίθου (αλλιώς θα προκληθεί αποκορεσμός τους, οπότε θα μετρείται πλέον ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση) και η διατήρηση της πίεσης του αέρα στο ένα άκρο του δοκιμίου του εδάφους για επαρκές χρονικό διάστημα (π.χ. 48 ώρες) ώστε να δημιουργηθούν συνθήκες μόνιμης ροής σε ό,τι αφορά την διάχυση της αέριας φάσης. Η πειραματική αυτή διάταξη αποτελεί την βάση των διατάξεων που έχουν αναπτυχθεί για την μέτρηση του διαχεόμενου αέρα μέσα από κεραμικούς πορολίθους σε συσκευές ελέγχου της μύζησης με την μέθοδο μετατόπισης άξονα (ενδεικτικά αναφέρονται οι σχετικές διατάξεις των Bishop & Donald, 1961, και του Fredlund, 1975).

Η σημασία τέτοιων διατάξεων όταν απαιτούνται μετρήσεις μεταβολών του όγκου του νερού μέσα σε δοκίμια κατά την εφαρμογή της μεθόδου μετατόπισης άξονα έχει επισημανθεί στα Κεφάλαια 4, 5 και 6 ενώ μία συνοπτική και περιεκτική αναφορά επί του θέματος μπορεί να βρεθεί στους Padilla, et al. (2006).

### **7.6.6 Συνοψιση**

Στον Πιν. 7.4 συνοψίζονται οι μέθοδοι μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή και την αέρια φάση των πόρων καθώς και του συντελεστή διάχυσης.

**Πίνακας 7.4.** Σύνοψη μεθόδων μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή και την αέρια φάση των πόρων καθώς και του συντελεστή διάχυσης.

Είδος συντελεστή διαπερατότητας	Συνθήκες ροής κατά την δοκιμή	Μέθοδος	Πεδίο εφαρμογής της μεθόδου
Συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των πόρων, $k_w$	Συνθήκες μόνιμης ροής	Σταθερού υδραυλικού φορτίου	Εργαστήριο
		Σταθερής παροχής	»
		Φυγοκέντρισης	»
	Συνθήκες μη μόνιμης ροής	Οριζόντιας διείσδυσης	»
		Στραγγιζόμενου ύδατος	»
		Χρονικά σημειακής κατανομής	Και στο εργαστήριο και επί τόπου
Συντελεστής διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση των πόρων, $k_a$	Συνθήκες μόνιμης ροής	Matyas (1967)	Εργαστήριο
		Barden & Pavlakis (1971)	Εργαστήριο
	Συνθήκες μη μόνιμης ροής	Kamiya, et al. (2005) (;)	Εργαστήριο
		Maciel & Jucá (2000)	Επί τόπου
Συντελεστής διάχυσης	Συνθήκες μόνιμης ροής	Barden & Sides (1967)	Εργαστήριο

## 7.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΕ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΔΙΑ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

### 7.7.1 Εισαγωγή

Όπως και στα Κεφάλαια 5 και 6, έτσι και το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται με την παρουσίαση μίας εφαρμογής σχετικής με την υπόγεια ροή διά μέσω μή κορεσμένων εδαφών. Το παράδειγμα που επιλέχθηκε αφορά στην μεταβολή της κατανομής της πίεσης πόρων υπό μονοδιάστατες συνθήκες πάνω και κάτω από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα σε τομή εδάφους στην οποία υπάρχει κατείσδυση από την επιφάνεια λόγω εφαρμογής μίας οριακής συνθήκης πλημμύρας. Συγκρίνονται η απλοποιημένη περίπτωση κατά την οποία αγνοείται η επιρροή του βαθμού κορεσμού και της μύζησης επί του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση και η πραγματική συμπεριφορά που είναι αυτή κατά την οποία ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση μειώνεται κατά αρκετές τάξεις μεγέθους με την αύξηση της μύζησης, ειδικά μάλιστα όταν αυτή είναι μεγαλύτερη της πίεσης διείσδυσης αέρα του εδαφικού υλικού.

Ως αφετηρία για την περιγραφή της απλοποιημένης περίπτωσης κατά την οποία αγνοείται η επιρροή του βαθμού κορεσμού και της μύζησης επί του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση χρησιμοποιήθηκε το παράδειγμα που παρατίθεται στον Καββαδά (1998). Στο

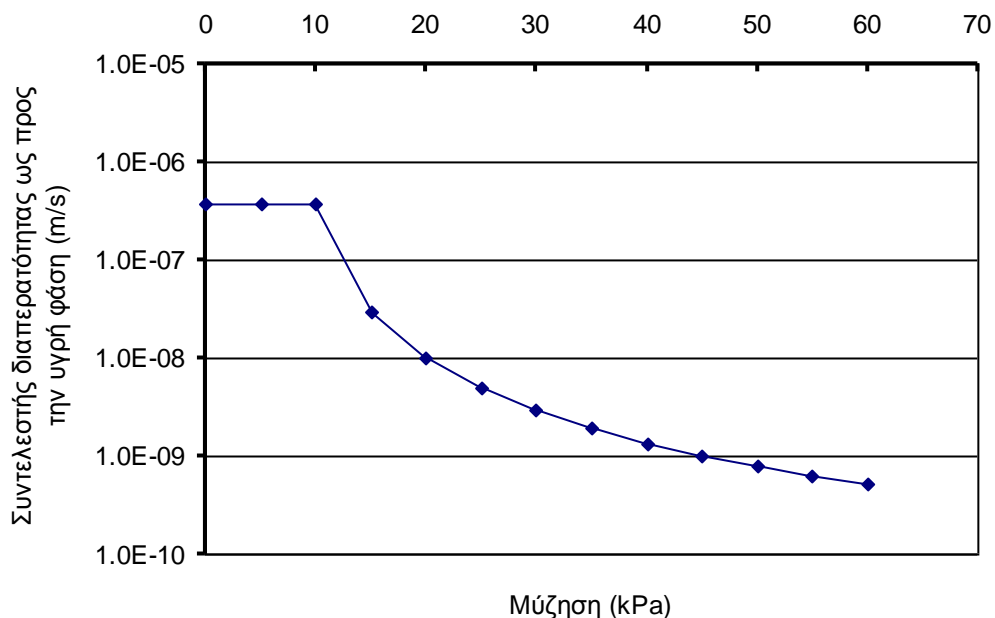
παράδειγμα αυτό χώρος απόθεσης υγρών αποβλήτων πλημμυρίζει σε ύψος μέχρι 3m. Στον εδαφικό σχηματισμό κάτω από τον χώρο αυτό η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα βρίσκεται στα 6m βάθος και υπάρχει αποκατεστημένη κατανομή αρνητικών πιέσεων πόρων κατά την προέκταση της υδροστατικής κατανομής της θετικής πίεσης πόρων. Χρησιμοποιήθηκε η τιμή του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση που παραθέτει ο Καββαδάς (1998) για τον εδαφικό σχηματισμό ( $3.75 \cdot 10^{-7}$  m/s) και επιλύθηκε με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών το πρόβλημα της εξέλιξης των κατανομών πίεσης πόρων με το βάθος για διάφορες χρονικές στιγμές μέχρι την επίτευξη της νέας κατάστασης συνθηκών μόνιμης ροής, και για την περίπτωση που ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση θεωρείται σταθερός με την μύζηση, και για την περίπτωση που μειώνεται με αυτήν.

### 7.7.2 Επίλυση με κατάστρωση φύλλου υπολογισμών

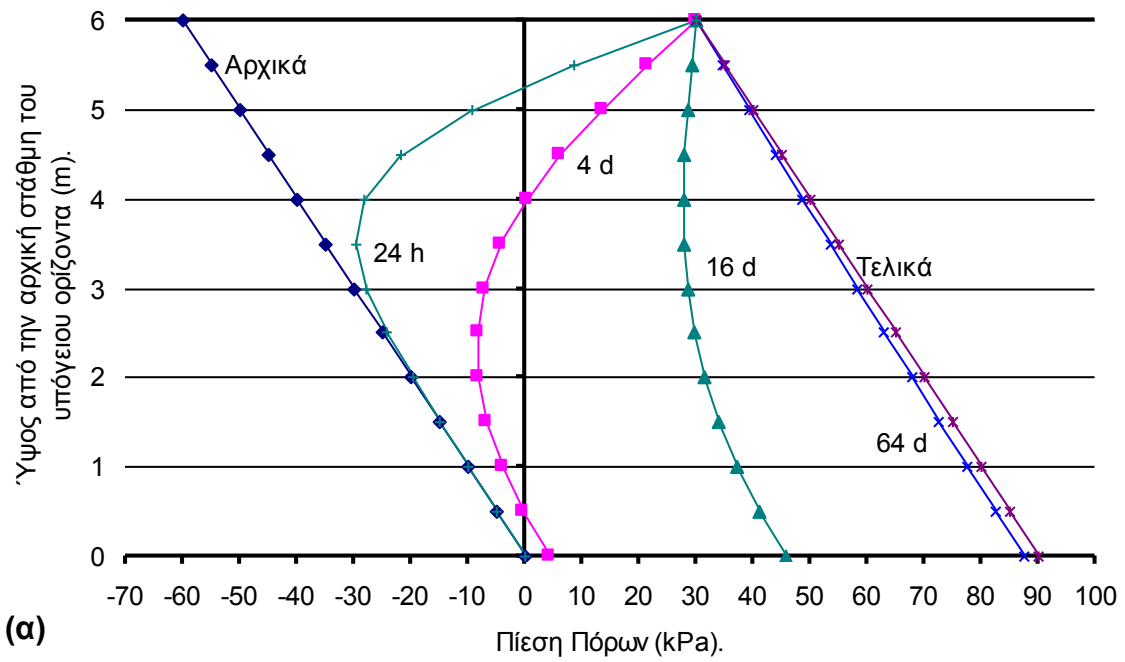
Η επίλυση του προβλήματος καταστρώθηκε αρχικά σε φύλλο υπολογισμών και η επίλυση έγινε με εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Η διακριτοποίηση σε ό,τι αφορά τον χρόνο ήταν με βήματα της 1h μέχρι τις πρώτες 24h και των 3h από εκεί και μετά. Σε ό,τι αφορά το ύψος η διακριτοποίηση ήταν ανά 0.5m. Για την περίπτωση της μεταβολής του συντελεστή διαπερατότητας με την αρνητική πίεση πόρων/μύζηση χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη που παρουσιάζεται στο Σχ. 7.12. Υποτέθηκε πίεση διείσδυσης αέρα 10 kPa, δεν θεωρήθηκαν σημαντικές μεταβολές του συντελεστή διαπερατότητας μέχρι αυτήν την τιμή της μύζησης, ενώ από την πίεση διείσδυσης αέρα και μετά μέχρι την μύζηση των 60 kPa θεωρήθηκε ότι έχει επέλθει μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση κατά τρεις τάξεις μεγέθους. Η έλλειψη σημαντικών μεταβολών του συντελεστή διαπερατότητας που εισήχθη μέχρι τα 10 kPa, τεκμηριώνεται λόγω της ούτως ή άλλως μικρής τιμής της πίεσης διείσδυσης αέρα (άρα μικρό το βήμα από 0 έως 10 kPa για να θεωρηθεί ότι συμβαίνουν σημαντικές ογκομετρικές μεταβολές που θα προκαλούσαν μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας παρόλο που το έδαφος παραμένει πλήρως κορεσμένο), ενώ ο συντελεστής διαπερατότητας του πλήρως κορεσμένου εδάφους είναι αρκετά μεγάλος και αντιστοιχεί σε μάλλον σχετικά ασυμπίεστο έδαφος για να αναμένονται μεταβολές του συντελεστή διαπερατότητας λόγω ογκομετρικών μεταβολών γενικά.

Στο Σχ. 7.13α παρουσιάζεται η κατανομή της εξέλιξης της αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης με το βάθος αγνοώντας την εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των

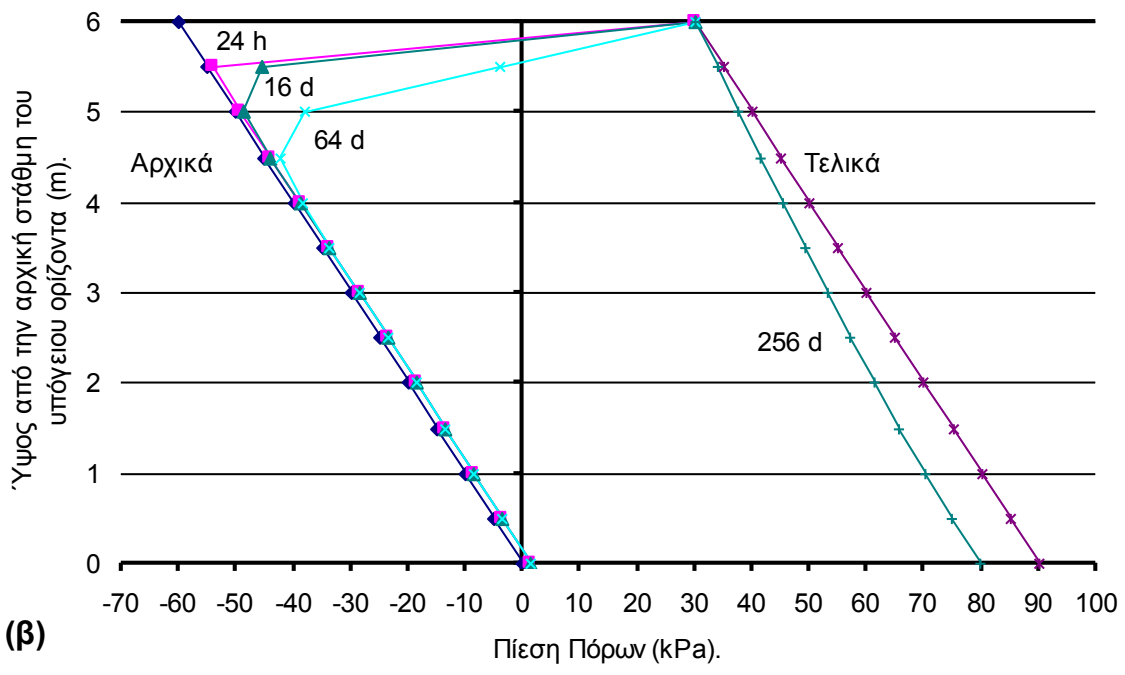
πόρων με την μύζηση, και στο Σχ. 7.13β η κατανομή της εξέλιξης της αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης με το βάθος λαμβάνοντας υπόψη την εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των πόρων με την μύζηση. Η εφαρμογή της οριακής συνθήκης στην επιφάνεια θεωρήθηκε χρονικά ακαριαία. Όπως προκύπτει από την σύγκριση των κατανομών για διάφορα χρονικά διαστήματα στα Σχ. 7.13α και 7.13β, εάν αγνοηθεί η εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας με την μύζηση η επίτευξη των συνθηκών μόνιμης ροής που αντιστοιχούν στην νέα οριακή συνθήκη στην επιφάνεια του εδάφους γίνεται πρακτικά μέσα σε 64 ημέρες, ενώ εάν ληφθεί υπόψη η εξέλιξη αυτή τότε ο απαιτούμενος χρόνος αυξάνεται 4 φορές, στις 256 ημέρες. Όταν λαμβάνεται υπόψη η εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας με την μύζηση, σε 64 ημέρες πρακτικά δεν έχει επέλθει καμιά αλλαγή κάτω από το 1.5m βάθος εντός τους εδαφικού σχηματισμού, ενώ αντίθετα όταν αγνοείται η εξέλιξη αυτή, μέσα σε χρονικό διάστημα 5-6 ημερών ουσιαστικά έχουν εξαλειφθεί οι αρνητικές πιέσεις πόρων/μυζήσεις. Κατά συνέπεια, εάν αγνοηθεί η επιρροή της μύζησης επί του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό, υποτιμάται σημαντικότερα ο χρόνος ολοκλήρωσης των φαινομένων που σχετίζονται με μεταβολές στο καθεστώς των πιέσεων πόρων, ενώ υπερτιμώνται και οι πιέσεις πόρων που αναπτύσσονται ως αποτέλεσμα της εμφάνισης μία οριακής συνθήκης πλημμύρας όπως στο παράδειγμα, ή διαβροχής.



**Σχήμα 7.12.** Εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των πόρων με την αρνητική πίεση πόρων/μύζηση για τον εδαφικό σχηματισμό στο παράδειγμα που παρατίθεται.



(α)



(β)

**Σχήμα 7.13.** α) Κατανομή της εξέλιξης της αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης με το βάθος *αγνοώντας* την εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των πόρων με την μύζηση, και β) κατανομή της εξέλιξης της αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης με το βάθος *λαμβάνοντας υπόψη* την εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση των πόρων με την μύζηση.



### 7.7.3 Επέκταση των συμπερασμάτων από το παράδειγμα

Πολύ συχνά στην καθημερινή γεωτεχνική πράξη απαντώνται προβλήματα που σχετίζονται με επικρεμάμενους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Το παράδειγμα που παρουσιάστηκε στην παράγραφο αυτή επιδεικνύει πως ουσιαστικά ένας τέτοιος υπόγειος ορίζοντας μπορεί να προκύψει πρόσκαιρα ή και για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα απλώς και μόνο λόγω της παρουσίας μή κορεσμένης ζώνης μέχρι σημαντικό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Προκειμένου ένα τέτοιο φαινόμενο να προσομοιωθεί, απαιτείται η γνώση της εξέλιξης του συντελεστή διαπερατότητας με την μύζηση, αλλά και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης. Ειδικά το δεύτερο τονίζεται ιδιαίτερα αφού σήμερα κυκλοφορούν κώδικες πεπερασμένων στοιχείων οι δημιουργοί των οποίων διατείνονται ότι κάνουν αναλύσεις υπόγειας ροής και στην μή κορεσμένη του εδάφους χωρίς να ζητούν ως δεδομένο εισαγωγής την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Οι χρήστες τέτοιων κωδίκων οφείλουν να είναι ιδιαίτερα επιφυλακτικοί, καθώς είτε έχει εισαχθεί κάποια χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, η οποία είναι κοινή για κάθε ανάλυση και δεν είναι γνωστή στους χρήστες του κώδικα, είτε ακόμα χειρότερα, ο μη μηδενικός όρος στην εξίσωση Laplace για την ροή στην μή κορεσμένη ζώνη (Εξ. 7.12) έχει αγνοηθεί εντελώς και το μόνο που κάνουν οι συγκεκριμένοι κώδικες είναι να χρησιμοποιούν την εξίσωση Laplace για την ροή σε πλήρως κορεσμένο έδαφος (Εξ. 7.10) απλώς εισάγοντας την μειωμένη τιμή του συντελεστή διαπερατότητας. Στις περιπτώσεις τέτοιων κωδίκων, οι χρήστες καλό θα είναι είτε να αποφεύγουν συνολικά την χρήση τους, είτε να περιορίζουν την χρήση τους μόνο για αναλύσεις μόνιμης ροής (αποφεύγοντας παντελώς τα αποτελέσματα μή μόνιμης ροής από αυτούς τους κώδικες και τις προβλέψεις τους για το χρονικό διάστημα επίτευξης συνθηκών μόνιμης ροής μετά από μία αλλαγή στις οριακές συνθήκες), και σε κάθε περίπτωση να αποφεύγουν οπωσδήποτε την χρήση αυτών των αποτελεσμάτων για τον συνδυασμό με αναλύσεις τάσεων-παραμορφώσεων, ειδικά σε έντονα παραμορφώσιμα κατά τις μεταβολές της μύζησης εδαφικά υλικά, αφού δεν είναι δυνατή η πρόβλεψη των μεταβολών στην μακροδιαπερατότητα των υλικών (λόγω αδυναμίας πρόβλεψης της επιρροής της συρρίκνωσης).

## 7.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκε η διαπερατότητα των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών ως προς το νερό και ως προς τον αέρα και παρουσιάστηκε ένα παράδειγμα για την επιρροή του βαθμού κορεσμού σε αυτήν και πως επηρεάζει πραγματικά προβλήματα κίνησης του νερού των πόρων σε μη κορεσμένα εδαφικά υλικά. Τα συμπεράσματα του κεφαλαίου αυτού συνοψίζονται στα εξής:

1. Η ροή των ρευστών φάσεων μέσα στα μη κορεσμένα εδάφη έχει τρεις μορφές:
  - α) την μορφή της **κίνησης της υγρής φάσης διά μέσω του εδάφους**, δηλαδή διά του στερεού σκελετού του εδάφους,
  - β) την μορφή της **κίνησης της αέριας φάσης διά μέσω του εδάφους**, δηλαδή διά του στερεού σκελετού του εδάφους, και
  - γ) την μορφή της **κίνησης της αέριας φάσης δια μέσω της υγρής φάσης**, φαινόμενο το οποίο περιγράφεται ως διάχυση της αέριας φάσης (air diffusion) μέσω της υγρής φάσης των πόρων του εδάφους.
2. Η κίνηση της υγρής φάσης των πόρων περιγράφεται από τον νόμο του Darcy (εφόσον πληρούνται οι προϋποθέσεις που αναφέρονται στην §7.2.3) και την τροποποιημένη εξίσωση Laplace για να λαμβάνεται υπόψη ότι μπορεί να μεταβληθεί ο όγκος του νερού μέσα στον στοιχειώδη αντιπροσωπευτικό όγκο που μελετάται η ροή. Η τελευταία παρατήρηση είναι πολύ σημαντική για την αξιολόγηση από τους υποψήφιους χρήστες κωδίκων πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της υπόγειας ροής της υγρής φάσης στην μη κορεσμένη ζώνη του εδάφους.
3. Η κίνηση της αέριας φάσης των πόρων διά μέσω του εδάφους περιγράφεται από τον νόμο του Fick, ο οποίος μέσω των μαθηματικών μετασχηματισμών που παρατίθενται στην §7.3.2 μπορεί και αυτός να πάρει την μαθηματική μορφή του νόμου του Darcy και έτσι να οριστεί και ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση  $k_a$ .
4. Η κίνηση της αέριας φάσης διά μέσω της υγρής φάσης, δηλαδή η διάχυση της αέριας φάσης (air diffusion) μέσω της υγρής φάσης των πόρων περιγράφεται επίσης από τον νόμο του Fick, ο οποίος μέσω των μαθηματικών μετασχηματισμών που παρατίθενται στην §7.4

μπορεί και στην περίπτωση αυτή να πάρει την μαθηματική μορφή του νόμου του Darcy και έτσι να οριστεί και ο συντελεστής διάχυσης της αέριας φάσης.

5. Ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση μειώνεται με την αύξηση της μύζησης (και την συνεπαγόμενη μείωση του βαθμού κορεσμού), τόσο περισσότερο μάλιστα όσο πιο αδιαπέρατο είναι το υλικό όταν είναι πλήρως κορεσμένο. Η παρατήρηση αυτή ισχύει για όλα τα εδαφικά υλικά. Η μοναδική εξαίρεση μπορεί να είναι πολύ λεπτόκοκκα πλαστικά υλικά τα οποία κατά την ξήρανση συρρικνώνονται κατά τρόπο που να εμφανίζονται ρωγμές λόγω συρρίκνωσης. Στην περίπτωση αυτών των υλικών, ο συντελεστής διαπερατότητας σε αέρια τεμάχια τους έχει μειωθεί κατά την γενική παρατήρηση, αλλά στο επίπεδο του εδαφικού σχηματισμού η μακροδιαπερατότητα έχει αυξηθεί εντυπωσιακά λόγω της ανάπτυξης ενός δικτύου ρωγμών λόγω συρρίκνωσης. Επιπλέον ενδιαφέρον σημείο για τα υλικά αυτά είναι και η εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας κατά την διαβροχή, αφού αρχικά θα υπάρξει σημαντική ροή καθοριζόμενη από το δίκτυο των ρωγμών συρρίκνωσης αλλά πολύ γρήγορα το δίκτυο αυτό θα αρχίσει να κλείνει λόγω της διόγκωσης του υλικού στις επιφάνειες αυτών των ρωγμών, οπότε η ροή θα αρχίσει να ορίζεται και πάλι από τον συντελεστή διαπερατότητας στο επίπεδο του στοιχειώδους αντιπροσωπευτικού όγκου.
6. Ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση ακολουθεί την αντίστροφη πορεία από αυτήν του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση, δηλαδή αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης (και την συνεπαγόμενη μείωση του βαθμού κορεσμού).
7. Ο συντελεστής διάχυσης μειώνεται όσο μειώνεται το ποσοστό υγρασίας στο ίδιο έδαφος και επίσης όσο πιο λεπτόκοκκο γίνεται το εδαφικό υλικό και αυξάνεται η περιεκτικότητα του σε αργιλικά ορυκτά μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας. Κατά συνέπεια ο συντελεστής διάχυσης μειώνεται όσο αυξάνεται η μύζηση (και άρα μειώνεται ο βαθμός κορεσμού και το ποσοστό υγρασίας).
8. Όλοι οι συντελεστές διαπερατότητας παρουσιάζουν έντονη υστέρηση με την μύζηση κατά μήκος κύκλων ξήρανσης-ύγρυνσης.
9. Στο κεφάλαιο κατεγράφησαν διάφορες μέθοδοι μέτρησης των συντελεστών διαπερατότητας ως προς την υγρή και την αέρια φάση αλλά και του συντελεστή διάχυσης. Οι μέθοδοι

μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση διακρίνονται γενικά σε μεθόδους μόνιμης και μη μόνιμης ροής, όπως μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβαίνει (με κάποιες επιφυλάξεις) και για τις μεθόδους μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση. Για τον συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση υπάρχουν πολλές μέθοδοι οι οποίες επιτρέπουν την μέτρησή του και στο εργαστήριο και επιτόπου. Αντίθετα για τον συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση υπάρχουν πολύ λίγες μέθοδοι και από αυτές μόνο μία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρησή του επιτόπου. Μία κοινή παρατήρηση για όλες τις μεθόδους μέτρησης των διαφόρων συντελεστών διαπερατότητας είναι ότι όλες τους είναι γενικά χρονοβόρες (με εξαίρεση ίσως κάποιες από τις μεθόδους μη μόνιμης ροής που έχουν αναπτυχθεί για την μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση σε κοκκώδη εδάφη), ενώ απαιτούν για την εφαρμογή τους εξαιρετικά εξειδικευμένες συσκευές, μεθόδους και προσωπικό, αναλογικά ίσως πολύ περισσότερο από τις αντίστοιχες απαιτήσεις των εργαστηριακών μεθόδων που εφαρμόζονται στα μη κορεσμένα εδάφη για την μελέτη της συμπίεστότητάς τους ή της διατμητικής τους αντοχής.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

## ΣΥΝΟΨΙΣΗ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

### 8.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πρώτο μέρος της διατριβής παρουσιάστηκε η φύση των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών (και μέσα από την παρουσίαση και επεξήγηση των μεθόδων μέτρησης της μύζησης), η βασική έννοια για την κατάταξη και κατανόηση της συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών που είναι η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, και η μηχανική τους συμπεριφορά, ειδικά σε ό,τι αφορά τη συμπιεστότητά τους, τη διατμητική τους αντοχή και τη διαπερατότητα τους ως προς το νερό και τον αέρα αντίστοιχα. Στο παρόν κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα των κεφαλαίων που προηγήθηκαν στο πρώτο μέρος της διατριβής.

### 8.2 ΣΥΝΟΨΙΣΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ

#### 8.2.1 Η φύση των μη κορεσμένων εδαφών

Σε ό,τι αφορά την φύση των μη κορεσμένων εδαφών προέκυψαν τα εξής:

1. Στα μη κορεσμένα εδαφικά υλικά συνυπάρχει η υγρή και η αέρια φάση ακόμα και στο επίπεδο του στοιχειώδους αντιπροσωπευτικού όγκου. Η πίεση σε κάθε μία από αυτές τις φάσεις και η ολική τάση καθορίζουν την μηχανική συμπεριφορά του μη κορεσμένου εδαφικού υλικού. Η πίεση του νερού μπορεί να γίνει πραγματικά αρνητική (μικρότερη όχι απλώς της ατμοσφαιρικής αλλά του 0) δηλαδή εφελκυστική και μάλιστα να φτάσει μέχρι πολύ χαμηλές τιμές μέχρι να συμβεί πραγματική σπηλαίωση, δηλαδή μόρια νερού να περάσουν από την υγρή φάση στην αέρια λόγω μείωσης της πίεσης υπό σταθερή

θερμοκρασία. Τα παρατηρούμενα φαινόμενα κατά τα οποία «σπηλαιώση» συμβαίνει σε πολύ υψηλότερες τιμές της πίεσης (χωρίς μάλιστα να γίνει πραγματικά αρνητική η πίεση) σχετίζονται με την παρουσία αερίων σε διάλυση μέσα στο νερό και την παρουσία μικροφουσαλίδων αερίων μέσα στο νερό αλλά και τον χώρο που αυτό βρίσκεται. Απαερωμένο, απιονισμένο, απεσταγμένο νερό σε μικρό όγκο εντός δοχείου πολύ υψηλής αντοχής, εξαιρετικά λείας και προσεκτικά κατεργασμένης εσωτερικής επιφάνειας, με προηγούμενη φόρτιση σε υψηλές τιμές της πίεσης (3-4 MPa), μετά από αρκετούς κύκλους τέτοιων φορτίσεων, μπορεί να παραλάβει πολύ μικρές τιμές της αρνητικής πίεσης (υψηλές τιμές εφελκυστικής πίεσης) που αγγίζουν και κάποιες φορές ξεπερνούν τα 2 MPa. Αυτές είναι οι τιμές της πίεσης που συμβαίνει πραγματική σπηλαιώση. Αντίθετα το φαινόμενο κατά το οποίο φυσαλίδες αερίων εμφανίζονται μέσα σε νερό που δεν πληρεί τις παραπάνω προϋποθέσεις πρέπει να αναφέρεται ως φαινόμενη σπηλαιώση (αποδίδοντας τον αγγλικό όρο nucleisation). Η κατανόηση αυτών των φαινομένων εξηγεί την εξέλιξη της συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης ενός μή κορεσμένου εδαφικού υλικού με την μείωση του βαθμού κορεσμού, την κατανόηση της πίεσης διείσδυσης αέρα (και του ύψους τριχοειδούς ανυψώσεως), όπως και την διαφορά αρνητικής πίεσης πόρων και μύζησης, της εμφάνισης της κάθε μιας καθώς και την εισαγωγή στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Η αρνητική πίεση της υγρής φάσης των πόρων προϋποθέτει παρουσία μέσα στο εδαφικό υλικό μόνο της μίας ρευστής φάσης των πόρων, της υγρής, η οποία τυγχάνει να βρίσκεται υπό πίεση μικρότερη της ατμοσφαιρικής ή και πραγματικό εφελκυστικό καθεστώς. Τέτοια κατάσταση μπορεί να απαντηθεί σε πλήρως κορεσμένα εδάφη πάνω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα και κάτω από το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης, αλλά και σε πλήρως κορεσμένα εδάφη κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα ευρισκόμενα υπό καθεστώς διαστολικότητας. Η μύζηση αντίθετα προϋποθέτει την παρουσία και των δύο ρευστών φάσεων, υγρής και αέριας, και εκφράζει τον συνδυασμό της εντατικής κατάστασης στις δυο τους, απλά διατυπούμενη ως η διαφορά της πίεσης στην υγρή και την αέρια φάση. Δεν προϋποθέτει μάλιστα καν ότι η πίεση στην υγρή φάση είναι αρνητική, όπως άλλωστε συμβαίνει στην μέθοδο ελέγχου της μύζησης με μετατόπιση άξονα (ιδέ Κεφ. 3 και 4).

2. Η αρχή των ενεργών τάσεων στα μή κορεσμένα εδάφη ισχύει όσο τα εδαφικά υλικά διατηρούνται πλήρως κορεσμένα ακόμα και αν βρίσκονται υπό αρνητική πίεση πόρων. Ισχύει επίσης υπό περιορισμούς όταν έχει εμφανιστεί αέρας σε μορφή φυσαλίδων με την θεώρηση της υγρής φάσης ως συμπιεστής. Στην περίπτωση που η αέρια φάση έχει πλέον αποκτήσει την συνέχεια της και συνυπάρχει με την συνεχή υγρή φάση (πολλώ δε μάλλον όταν η υγρή

φάση έχει χάσει την δική της συνέχεια) οι υπάρχουσες διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων για τις καταστάσεις αυτές φαίνεται να εξαρτώνται από την τασική διαδρομή χωρίς να έχει αποδειχτεί η καθολική ισχύς κάποιας από αυτές ανεξαρτήτως τασικής διαδρομής και μεταβολών των επιμέρους εντατικών μεγεθών στην κάθε ρευστή φάση. Ταυτόχρονα η παρουσία σε όλες τις σχετικές διατυπώσεις τουλάχιστον ενός όρου ο οποίος κατ' ουσίαν εκφράζει την κατάσταση στην οποία βρίσκονται σχετικά μεταξύ τους η υγρή και η αέρια φάση καθιστά τις σχέσεις αυτές καταστατικούς νόμους περισσότερο, παρά διατυπώσεις της αρχής των ενεργών τάσεων.

3. Καλύπτοντας το κενό που αφήνει η έλλειψη μίας σαφούς και καθολικά αποδεκτής διατύπωσης της αρχής των ενεργών τάσεων για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά, ιδίως στην κρίσιμη εκείνη περιοχή που συνυπάρχει η συνέχεια της υγρής και της αέριας φάσης των εδαφικών υλικών, χρησιμοποιούνται δύο παράμετροι τάσης προκειμένου να περιγραφεί η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Οι παράμετροι αυτές μπορεί να είναι δύο οποιοδήποτε συνδυασμοί των τριών τάσεων/πίεσεων<sup>1</sup> των αντίστοιχων φάσεων δηλαδή της τάσης  $\sigma$  της στερεάς φάσης, της πίεσης στην υγρή φάση  $u_w$  και της πίεσης στην αέρια φάση  $u_a$ . Οι συνδυασμοί που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι η ολική τάση ανηγμένη ως προς την πίεση της αέριας φάσης των πόρων,  $\sigma - u_a$  και η μύζηση  $u_a - u_w$ . Προκειμένου για συνεχή αέρια φάση, η τιμή της  $u_a$  είναι αυτή της πίεσης της ατμόσφαιρας. Ο προσδιορισμός της ολικής τάσης αποτελεί μάλλον εύκολη διαδικασία αλλά η μέτρηση και ο έλεγχος της μύζησης παραμένουν αρκετά επίπονες, λεπτεπίλεπτες και χρονοβόρες, απαιτώντας ειδικό και ακριβό εξοπλισμό.
4. Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού αποτελεί την κεντρική έννοια για την κατανόηση και την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Είναι η καμπύλη μεταβολής του ποσοστού υγρασίας ή του βαθμού κορεσμού με την μύζηση, δείχνοντας τον τρόπο με τον οποίο ένα εδαφικό υλικό χάνει νερό όσο η μύζηση αυξάνεται (όσο δηλαδή γίνεται πιο ξηρό) και τον τρόπο με τον οποίο προσροφά νερό όσο η μύζηση μειώνεται (όσο δηλαδή το υλικό επανυγραίνεται). Ο προσδιορισμός της είναι μία επίπονη διαδικασία αλλά έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι πρόβλεψής της από τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών. Η γνώση της για κάθε συγκεκριμένο υλικό επιτρέπει την πρόβλεψη

<sup>1</sup> Δεδομένου ότι μόνο η στερεά φάση μπορεί να παραλάβει διατμητικές τάσεις, το εντατικό μέγεθος που αφορά σε αυτήν είναι τάση. Αντίθετα ούτε η υγρή ούτε η αέρια φάση μπορεί να παραλάβει διατμητικές τάσεις οπότε το εντατικό μέγεθος που αφορά σε αυτές είναι πίεση.

της εξέλιξης της συμπεστότητάς του, της διατμητικής του αντοχής και της διαπερατότητάς του ως προς την υγρή και την αέρια φάση συναρτήσει του βαθμού κορεσμού του.

### 8.2.2 Οι μέθοδοι μέτρησης της μύζησης

Στο Κεφάλαιο 3 έγινε μία ανασκόπηση των υπάρχουσών μεθόδων μέτρησης της μύζησης των εδαφικών υλικών. Βασικά κριτήρια κατάταξης των διαφόρων μεθόδων είναι το είδος της μύζησης που μετρούν (ολική, εδαφικού σκελετού ή ωσμωτική), ο χώρος διεξαγωγής της μέτρησης (στο εργαστήριο ή επιτόπου), το εύρος των τιμών της μύζησης που μπορούν να μετρήσουν και ο χρόνος επίτευξης της μέτρησης. Τα ίδια αυτά κριτήρια κατάταξης αποτελούν και τους παράγοντες για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την μέτρηση της μύζησης για κάθε εφαρμογή. Το κόστος εφαρμογής της κάθε μεθόδου, η διαθεσιμότητα των χρησιμοποιούμενων οργάνων και η αξιοπιστία αποτελούν επίσης παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Η παρουσίαση στο Κεφάλαιο 3 αποτελεί πληρέστατη παρουσίαση και αξιολόγηση των μεθόδων μέτρησης της μύζησης αποτελώντας την παρουσίαση της υπάρχουσας κατάστασης της γνώσης (state of the art review) για το συγκεκριμένο αντικείμενο.

Η μέθοδος μεμβράνης ή πορολίθου και η εξέλιξη αυτής στη μέθοδο μετατόπισης άξονα απετέλεσαν την πρώτη μέθοδο μέτρησης της μύζησης που αναπτύχθηκε και επί δεκαετίες τη μόνη διαθέσιμη μέθοδο μέτρησης της μύζησης στο κρίσιμο για προβλήματα πολιτικού μηχανικού εύρος 0 - 1500 kPa<sup>2</sup>. Η μέθοδος δεν επιτρέπει τη μέτρηση της μύζησης επιτόπου αλλά μόνο στο εργαστήριο απαιτώντας μέτριο ύψους οικονομικές επενδύσεις σε εργαστηριακό εξοπλισμό και χαμηλού ύψους λειτουργικά έξοδα. Μετρήσεις της μύζησης επιτόπου μπορούν να γίνουν με τα τενσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διείσδυσης αέρα που αποτελούν κατ' ουσίαν παραλλαγή της μεθόδου πορολίθου αλλά μόνο για το εύρος τιμών της μύζησης 0 – 100 kPa (στην πράξη 0 – 90 kPa). Η μετρούμενη μύζηση είναι η μύζηση εδαφικού σκελετού. Ο χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας είναι της τάξης των ωρών στο εργαστήριο προκειμένου για τη μέθοδο μετατόπισης άξονα και τη μέθοδο μεμβράνης ή πορολίθου και της τάξης λεπτών της ώρας για το απλό τενσιόμετρο (εξαίρεση αποτελεί το τενσιόμετρο τύπου Quickdraw το οποίο επιτρέπει την επίτευξη μέτρησης εντός 1-2 λεπτών). Η ακρίβεια μέτρησης είναι συνήθως πολύ υψηλή (από ±0.05 kPa έως ±1 kPa). Στα μειονεκτήματα της μεθόδου

---

<sup>2</sup> Υπάρχουν μεμβράνες σελουλόζης με πίεση διείσδυσης αέρα 100 Bar, οπότε επιτρέπουν τη μέτρηση της μύζησης μέχρι τόσο υψηλές τιμές, αλλά αυτά τα συστήματα αποτελούν την εξαίρεση παρά τον κανόνα.



περιλαμβάνονται η έλλειψη διερεύνησης της επιρροής της αύξησης της πίεσης της αέριας φάσης προκειμένου για τη μέθοδο μετατόπισης άξονα και το μικρό εύρος μέτρησης μύζησης για τη μέθοδο μεμβράνης ή πορολίθου και τα τενσιόμετρα πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης διεΐσδυσης αέρα. Η μέθοδος μετατόπισης άξονα έχει ωστόσο περισσότερο ενδιαφέρον ως μέθοδος ελέγχου της μύζησης (βλ. Κεφ. 4), ενώ με την επένδυση στη μέθοδο αυτή εξασφαλίζονται ταυτόχρονα και μία μέθοδος μέτρησης της μύζησης και μία μέθοδος ελέγχου της μύζησης (σε σημαντικό μάλιστα εύρος τιμών της μύζησης που να επιτρέπει τη βαθμονόμηση άλλων έμμεσων μεθόδων μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού στο ίδιο εύρος τιμών, οι οποίες καλύπτουν το κενό του απλού τενσιόμετρου για τη μέτρηση της μύζησης σε αυτό το εύρος τιμών στο ύπαιθρο).

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με χαρτί φίλτρου επιτρέπει τη μέτρηση είτε της μύζησης εδαφικού σκελετού είτε της ολικής μύζησης, απαιτεί ελάχιστες πρόσθετες οικονομικές επενδύσεις σε ένα εργαστήριο εδαφομηχανικής (με εξαίρεση μία ζυγαριά ακριβείας 0.0001 g), έχει ελάχιστα λειτουργικά έξοδα και μεγάλο εύρος τιμών μέτρησης της μύζησης. Αυτό είναι 0 – 500000 kPa (ακριβέστερα 30 – 3000 kPa) προκειμένου για τη μύζηση εδαφικού σκελετού, και 1000 – 500000 kPa (ακριβέστερα 1000 – 30000 kPa) προκειμένου για την ολική μύζηση. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται η πολύ μεγάλη διακύμανση στα αποτελέσματα των μετρήσεων της μύζησης (η οποία για να μειωθεί πρέπει να γίνονται συχνές βαθμονομήσεις οι οποίες απαιτούν αφενός επένδυση σε κάποια μέθοδο ελέγχου της μύζησης –συνήθως την μέθοδο μετατόπισης άξονα- και αφετέρου υψηλά λειτουργικά έξοδα), η απαίτηση λεπτών χειρισμών για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου, ο μεγάλος χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας και ο περιορισμός ουσιαστικά της χρήσης της μεθόδου σε μετρήσεις εργαστηρίου (χρήση της μεθόδου επιτόπου έχει αναφερθεί μεν, με αμφίβολα αποτελέσματα δε).

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με τεμάχια γύψου απετέλεσε επί δεκαετίες τη μόνη διαθέσιμη μέθοδο μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού επιτόπου στο κρίσιμο εύρος τιμών της μύζησης 30 – 3000 kPa με δυνατότητα μακροχρόνιας παρακολούθησης και ταυτόχρονη χρήση της μεθόδου για μέτρηση της μύζησης και στο εργαστήριο. Συνιστά μέθοδο χαμηλού κόστους, το οποίο αυξάνεται μόνο από την απαίτηση βαθμονομήσεων και άρα επενδύσεων σε μία μέθοδο ελέγχου της μύζησης (όπως επιδείχθηκε στο παρόν κεφάλαιο). Η ακρίβειά της είναι σχετικά υψηλή (μετά από βαθμονόμηση) και ο χρόνος επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας μάλλον μικρός (όπως προέκυψε κατά την χρήση των οργάνων από τον γράφοντα). Στα μειονεκτήματά της περιλαμβάνεται και η φθορά των τεμαχίων γύψου μετά από μέσης διάρκειας παραμονή στη θέση

μέτρησης (η οποία επιταχύνεται εντυπωσιακά σε περιβάλλον με νερό υψηλής περιεκτικότητας σε άλατα). Η παρεμφερής μέθοδος των τεμαχίων κοκκώδους υλικού επιτρέπει την πιο αξιόπιστη μέτρηση της μύζησης σε κοκκώδη εδάφη, με αντοχή στο χρόνο μάλιστα περίπου διπλάσια εκείνης των τεμαχίων γύψου, με τίμημα όμως το μικρότερο εύρος μέτρησης της μύζησης (κατά την βιβλιογραφία).

Οι αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας επιτρέπουν τη μέτρηση της μύζησης επιτόπου και στο εργαστήριο σε μεγάλο εύρος τιμών (5 – 1500 kPa) με τον ίδιο πρακτικά χρόνο απόκρισης των τεμαχίων γύψου, με το σημαντικό πλεονέκτημα έναντι αυτών ότι οι μετρήσεις τους δεν επηρεάζονται από την παρουσία διαλυμένων ουσιών στο νερό των πόρων. Και αυτή η μέθοδος είναι χαμηλού κόστους, το οποίο αυξάνεται μόνο από την απαίτηση βαθμονομήσεων και άρα επενδύσεων σε μία μέθοδο ελέγχου της μύζησης. Η ακρίβειά της μεθόδου είναι παραπλήσια των τεμαχίων γύψου και η υστέρηση των καμπυλών βαθμονόμησης και η επιρροή της θερμοκρασίας, αν και μπορούν να διορθωθούν, ουσιαστικά αυξάνουν το λειτουργικό κόστος λόγω της ανάγκης επιμελούς βαθμονόμησης των αισθητήρων υπό τις αντίστοιχες συνθήκες. Και αυτή η μέθοδος είναι ακατάλληλη για μέτρηση της μύζησης σε περιβάλλον ραγδαίων και μη μονοτονικών μεταβολών της μύζησης.

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με κάποιον από τους αναπτυχθέντες τύπους ψυχρομέτρου επιτρέπει τη μέτρηση της ολικής μύζησης επιτόπου και στο ύπαιθρο με μεγάλη ακρίβεια και με πολύ μικρό χρόνο απόκρισης. Επειδή ωστόσο μετρείται η ολική μύζηση, αντί για τη μύζηση εδαφικού σκελετού, θα πρέπει πάντοτε να επιδιώκεται η ταυτόχρονη μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού, ή τουλάχιστον να γίνεται μία εκτίμηση της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης στο επίπεδο μύζησης που αντιστοιχεί στη μετρούμενη τιμή της ολικής μύζησης, και σε κάθε περίπτωση κατά την αξιολόγηση τέτοιων μετρήσεων να υπάρχει επίγνωση ότι πρόκειται για τιμές της ολικής μύζησης. Από την άλλη πλευρά, στο εύρος τιμών της μύζησης για το οποίο υπάρχουν και όργανα ή μέθοδοι που μπορούν να μετρούν τη μύζηση εδαφικού σκελετού, τα ψυχρόμετρα προσφέρουν έναν εναλλακτικό τρόπο μέτρησης της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης, από τη διαφορά ολικής μύζησης και μύζησης εδαφικού σκελετού. Επειδή τα ψυχρόμετρα βασίζονται στη μέτρηση της σχετικής υγρασίας για τον προσδιορισμό της μύζησης των εδαφικών υλικών, είναι πολύ ευαίσθητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Γι' αυτό συνιστάται ο έλεγχος της θερμοκρασίας στο χώρο πραγματοποίησης της μέτρησης. Εναλλακτικά, όταν δεν είναι δυνατός ο έλεγχος της θερμοκρασίας (π.χ. σε επιτόπου μετρήσεις) θα πρέπει να μετρείται και να καταγράφεται και η θερμοκρασία κατά το χρόνο μέτρησης, ώστε,

μέσω της κατάλληλης βαθμονόμησης του οργάνου για διάφορες θερμοκρασίες, να μπορεί να γίνει διόρθωση των μετρήσεων ως προς τη θερμοκρασία. Αν και τα ψυχρόμετρα καθεαυτά δεν είναι ιδιαίτερα ακριβά, είναι ακριβοί οι μετρητές που χρησιμοποιούνται για τη διέγερσή τους και την ανάγνωση των μετρήσεων, ενώ το κόστος αυξάνεται ραγδαία και από τις απαιτήσεις ελέγχου της θερμοκρασίας, ή εναλλακτικά της βαθμονόμησης για διάφορες τιμές της, και της ανάγκης τακτικής βαθμονόμησης των οργάνων λόγω συστηματικής μεταβολής των καμπυλών βαθμονόμησής τους με το χρόνο.

Η μέθοδος μέτρησης της μύζησης με тенσιόμετρο με πορώδες άκρο υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα αποτελεί την πιο πρόσφατη μέθοδο μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού και τη μοναδική μέχρι σήμερα μέθοδο άμεσης μέτρησης της μύζησης στο εύρος τιμών της μύζησης 0-2 MPa. Επιτρέπει τη μέτρηση της μύζησης στο εργαστήριο και επιτόπου ακόμα και σε περιβάλλον ραγδαίων μη μονοτονικών μεταβολών της μύζησης και με αναλογικά μικρό χρόνο επίτευξης υδραυλικής ισορροπίας (λεπτά ως ώρες). Προσφέρεται επίσης και για μακροχρόνια παρακολούθηση, ενώ ταυτόχρονα το тенσιόμετρο αυτό αποτελεί το μόνο όργανο που μπορεί να ενσωματωθεί με σχετική ευκολία σε άλλες εργαστηριακές συσκευές για τη μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού στα δοκίμια εντός αυτών και μάλιστα για το εύρος τιμών της μύζησης 0 – 2 MPa. Στα μειονεκτήματά της περιλαμβάνονται οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό προετοιμασίας των тенσιομέτρων (ικανότητα εφαρμογής πολύ υψηλής θετικής πίεσης και πίεσης κενού), αλλά και το υψηλό κόστος των ίδιων των тенσιομέτρων, η αδυναμία κορεσμού του тенσιομέτρου όταν ο πορόλιθος του αποκορεστεί διαρκούσης της μέτρησης, και η απαίτηση για λεπτούς και προσεκτικούς χειρισμούς κατά την εφαρμογή της μεθόδου (και κατά την προετοιμασία του οργάνου για μέτρηση και κατά τη μέτρηση αυτή καθεαυτή).

Προκειμένου λοιπόν για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου μέτρησης της μύζησης αποφασιστικοί παράγοντες που πρέπει να αποσαφηνιστούν πρώτα είναι το είδος των συνθηκών μέτρησης:

- α) εύρος τιμών μύζησης (μικρές ή μεγάλες τιμές ή ταυτοχρόνως και μικρές και μεγάλες τιμές),
- β) ταχύτητα, μέγεθος και φορά μεταβολών της μύζησης (υπάρχουν σημαντικές μεταβολές ή όχι, αν υπάρχουν, είναι ραγδαίες ή αργές, και τέλος είναι μονοτονικές ή ανακυκλικές)
- γ) περιβάλλον μέτρησης της μύζησης (υπάρχουν παράγοντες στο νερό των πόρων που μπορούν να προσβάλλουν το όργανο μέτρησης ή όχι).

Μόλις αποσαφηνιστούν οι παράγοντες αυτοί, πρέπει να καθοριστούν λειτουργικού χαρακτήρα παράγοντες όπως:

- α) το κόστος απόκτησης της δυνατότητας εφαρμογής της κάθε μεθόδου,
- β) το λειτουργικό της κόστος,
- γ) η διαθεσιμότητα εξειδικευμένου προσωπικού για την εφαρμογή της, προκειμένου για μέθοδο που απαιτεί λεπτεπίλεπτους χειρισμούς, και
- δ) οι απαιτήσεις σε συμπληρωματικό εξοπλισμό που χρειάζεται για την πλήρη εκμετάλλευσή της.

Οι απαιτήσεις σε συμπληρωματικό εξοπλισμό μάλιστα συχνά παραγνωρίζονται αλλά αυτός μπορεί να είναι ιδιαίτερα ακριβός (εξοπλισμός κορεσμού πορολίθων υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα, ικανότητα εφαρμογής υψηλής πίεσης αέρα προκειμένου για τη μέθοδο μετατόπισης άξονα, ζυγαριές ακριβείας 0.0001 g προκειμένου για τη μέθοδο χαρτιού φίλτρου, ύπαρξη κάποιων μεθόδων ελέγχου της μύζησης προκειμένου για μεθόδους που απαιτούν τακτική βαθμονόμηση κλπ.).

### **8.2.3 Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού**

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού αποτελεί κεντρική έννοια στην εδαφομηχανική μή κορεσμένων εδαφών. Αποτελεί την κύρια παράμετρο που πρέπει να προσδιοριστεί εργαστηριακά ή έστω να εκτιμηθεί προκειμένου να μελετηθεί η μηχανική συμπεριφορά των μή κορεσμένων εδαφών. Η σημασία της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού έγκειται στο ότι επιτρέπει οι διάφορες τιμές του βαθμού κορεσμού από 0 έως 100% να συσχετιστούν με συγκεκριμένες φυσικές καταστάσεις συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης εντός των εδαφικών υλικών, οπότε να αναζητηθεί η αντίστοιχη μηχανική συμπεριφορά για την περιγραφή των μή κορεσμένων εδαφών, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια του πρώτου μέρους. Έτσι, η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού αποτελεί τη βασική έννοια για την ποιοτική περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών και της κατάταξής τους ως προς το βαθμό κορεσμού. Απαντά δηλαδή στο ερώτημα που συχνά διατυπώνεται «πως κατατάσσεται ένα έδαφος ως προς ένα μέγεθος (μή κορεσμένο), όταν το μέγεθος που χρησιμοποιείται για την κατάταξη λαμβάνει τόσο εκτεταμένο εύρος τιμών;». Μή κορεσμένο δηλαδή είναι και το έδαφος εκείνο με βαθμό κορεσμού 99.99% και εκείνο με βαθμό κορεσμού 50% και εκείνο με βαθμό

κορεσμού 0.001%. Μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού λοιπόν γίνεται αντιληπτή η κατάσταση συνύπαρξης της στερεάς, της υγρής και της αέριας φάσης στην οποία αντιστοιχεί κάθε μία από αυτές τις τιμές, και άρα η αντίστοιχη μηχανική συμπεριφορά, με διαφορετικό τρόπο μάλιστα για κάθε εδαφικό υλικό ανάλογα με τη δική του χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, η οποία συνιστά χαρακτηριστική ιδιότητα κάθε εδαφικού υλικού και καθορίζεται από τις φυσικές του ιδιότητες και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται.

Τα σημεία καμπής επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού περιγράφουν τα σημεία κατά τα οποία έχουμε ραγδαίες αλλαγές της συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης των πόρων και συνακόλουθα της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών. Το συνηθισμένο σχήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι αυτό της ανάστροφης «σιγμοειδούς» καμπύλης με τα δύο σημεία καμπής της να αντιστοιχούν σε δύο χαρακτηριστικά φυσικά μεγέθη και να οριοθετούν τρεις περιοχές μεταξύ των ακραίων καταστάσεων που αντιστοιχούν στα πλήρως κορεσμένα και στα απολύτως ξηρά εδάφη. Το πρώτο σημείο καμπής αντιστοιχεί στην πίεση διείδυσης αέρα και το δεύτερο στο παραμένον ποσοστό υγρασίας (residual water content). Στην περιοχή που ορίζεται μεταξύ πλήρους κορεσμού ( $u_a - u_w = 0$ ) και πίεσης διείδυσης αέρα (Περιοχή I), το έδαφος είναι πρακτικά πλήρως κορεσμένο, έχουμε αρνητική πίεση πόρων ασκούμενη ολόπλευρα στο στερεό σκελετό και ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων. Στην περιοχή περί την πίεση διείδυσης αέρα, ο αέρας των πόρων βρίσκεται υπό τη μορφή διακριτών φυσαλίδων, ενώ αμέσως μετά από αυτό το στάδιο η αέρια φάση των πόρων γίνεται συνεχής, συνυπάρχοντας με τη συνεχή υγρή φάση των πόρων ως τη μύζηση που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας (Περιοχή II). Από την τιμή αυτή της μύζησης και μετά η υγρή φάση του εδαφικού υλικού χάνει τη συνέχειά της και η κίνηση του νερού εντός των πόρων γίνεται με αυτό σε μορφή υδρατιμών (Περιοχή III). Εκτός από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με το συνηθισμένο σχήμα της ανάστροφης σιγμοειδούς καμπύλης υπάρχουν και χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με περισσότερα των δύο σημεία καμπής, οι οποίες αντιστοιχούν σε εδαφικά υλικά με δύο κυρίαρχα μεγέθη πόρων.

Το κοινό χαρακτηριστικό που προκύπτει για την μεταβολή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και των μεγεθών που την περιγράφουν είναι ότι όσο μειώνεται ο λόγος κενών του εδαφικού υλικού κατά την έναρξη της ξήρανσης, τόσο αυξάνεται η ικανότητα συγκράτησης ύδατος του εδαφικού υλικού, η οποία εκδηλώνεται με την ικανότητα διατήρησης μεγαλύτερης τιμής του βαθμού κορεσμού υπό την ίδια τιμή της μύζησης. Αυτό εκδηλώνεται σαφώς με την αύξηση της τάσης προστερεοποίησης στο ίδιο υλικό, αλλά και την αύξηση της τάσης υπό την

οποία γίνεται ο κορεσμός συμπτυκνωμένων εδαφών, αφού και οι δύο αυτοί παράγοντες προκαλούν μείωση του αρχικού λόγου κενών. Ειδικά σε ό,τι αφορά τα συμπτυκνωμένα εδάφη, η ικανότητα συγκράτησης ύδατος αυξάνεται με την αύξηση της υγρασίας συμπτώκνωσης, ακόμα και για αύξηση πέραν της βέλτιστης, επειδή με την αύξηση της υγρασίας συμπτώκνωσης οι πόροι των εδαφικών υλικών μεταξύ συσσωματωμάτων αργιλικών πλακιδίων και κόκκων μειώνονται σε μέγεθος, παύουν να συνδέονται, και κυριαρχεί πλέον το μέγεθος των πόρων εντός και όχι μεταξύ των συσσωματωμάτων στον καθορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του υλικού. Τέλος, σε ό,τι αφορά τα φυσικά εδαφικά υλικά, εκεί κυρίαρχη παράμετρος στον καθορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού καθίσταται αυτή καθαυτή η δομή τους παρά το μέγεθος των πόρων τους και τα συνολικά κενά τους όπως επιδείχθηκε στην περίπτωση της Μάργας Κορίνθου, για την οποία το φυσικό εδαφικό υλικό βρέθηκε να διατηρεί μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης ύδατος από το αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο υλικό στον ίδιο αρχικό λόγο κενών με το φυσικό υλικό πριν την έναρξη της ξήρανσης. Σε ό,τι αφορά τους κλάδους ύγρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, εκτιμάται ότι ακολουθούν την αντίστροφη εξέλιξη των κλάδων ξήρανσης. Όπως δηλαδή οι κλάδοι ξήρανσης απομακρύνονται από μία αρχική θέση τόσο περισσότερο, όσο αυξάνεται η τάση προστερεοποίησης, ή η υγρασία συμπτώκνωσης, ή η δομή του φυσικού υλικού, έτσι αναμένεται ότι οι κλάδοι ύγρανσης απομακρύνονται από μία αρχική θέση κατά την ύγρανση όσο αυξάνονται τα ίδια μεγέθη, αλλά από την αντίθετη πλευρά.

Η κατάστρωση της κατάλληλης εργαστηριακής διάταξης για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι ιδιαίτερης σημασίας αφού πρακτικά όλες οι μέθοδοι προσδιορισμού είναι αρκετά πολύπλοκες και οδηγούν σε σημαντική διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων. Η προσπάθεια ελαχιστοποίησης αυτής είναι ιδιαίτερης σημασίας αφού όπως επισημάνθηκε υπάρχουν εδαφικά υλικά με χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με περισσότερα από δύο σημεία καμπής. Τυχόν μεγάλες αποκλίσεις λοιπόν στα πειραματικά αποτελέσματα κατά τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού μπορεί να οδηγήσουν στη λανθασμένη αναγνώριση της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Προκειμένου να αποφευχθούν τέτοιου είδους σφάλματα είναι σκόπιμη η συνεκτίμηση όλων των διαθέσιμων στοιχείων για το εδαφικό υλικό (για παράδειγμα της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισής του) και η επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων, είτε μέσω της επανάληψης του προσδιορισμού διαφόρων σημείων της καμπύλης, είτε μέσω της πύκνωσης των σημείων της καμπύλης, ώστε να διαφανούν τυχόν σημεία αυτής που αποκλίνουν σημαντικά της γενικότερης μορφής της καμπύλης.

Η επιλογή του κατάλληλου μαθηματικού προσομοιώματος για την καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι επίσης ιδιαίτερης σημασίας. Εφόσον τα πειραματικά αποτελέσματα περιορίζονται σε μικρό εύρος τιμών μύζησης, συνήθως μικρές τιμές που μόλις ξεπερνούν την πίεση διείσδυσης αέρα του εδαφικού υλικού, τα περισσότερα μαθηματικά προσομοιώματα επαρκούν για την επίτευξη καλής προσέγγισης. Αν αντίθετα τα πειραματικά αποτελέσματα εκτείνονται σε μεγαλύτερο εύρος τιμών μύζησης (ως προς τα χαρακτηριστικά σημεία της καμπύλης), τότε πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή του μαθηματικού προσομοιώματος που θα χρησιμοποιηθεί. Προτείνεται γενικά η χρήση μαθηματικών προσομοιωμάτων με τρεις παραμέτρους και κατά προτίμηση με διορθωτικό παράγοντα ως προς την τιμή της μύζησης για μηδενικό ποσοστό υγρασίας. Στην περίπτωση χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού με περισσότερα των δύο σημεία καμπής μόνο το μαθηματικό προσομοίωμα των Fredlund & Xing (1994), επεκτεταμένο όπως επέδειξαν οι Fredlund et al. (2000) μπορεί να εξασφαλίσει ικανοποιητική προσέγγιση για όλο το εύρος τιμών μύζησης. Τέλος, γενικά προτιμάται η χρήση προσομοιωμάτων με παραμέτρους που έχουν φυσικό νόημα. Μεταξύ παραμέτρων με δύο και τρεις παραμέτρους δεν συμβαίνει πάντα να προσδιορίζονται ευκολότερα οι τιμές των παραμέτρων των προσομοιωμάτων με δύο παραμέτρους, αφού αυτά είναι λιγότερο ευέλικτα στην προσομοίωση χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού με μη συμμετρική καμπύλη κατανομής κενών των εδαφικών υλικών, ενώ υφίσταται ακόμα και το ενδεχόμενο δυσκολίας ανεύρεσης μοναδικού ζεύγους τιμών προσομοίωσης. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για την αποφυγή επιλογής τιμών παραμέτρων που οδηγούν σε μη ρεαλιστικές τιμές του βαθμού κορεσμού (μικρότερες του 100% για πολύ μικρές τιμές της μύζησης και σημαντικά μεγαλύτερες του 0 για πολύ μεγάλες τιμές της μύζησης, ακόμα και 1000000 kPa).

#### **8.2.4 Η συμπίεστικότητα των μή κορεσμένων εδαφών**

Στο Κεφάλαιο 5 επιδείχθηκε ότι υπάρχει καταρρεύσιμη και διογκώσιμη συμπεριφορά των μή κορεσμένων εδαφών, η οποία είναι δυνατόν να εμφανιστεί στο ίδιο εδαφικό υλικό ανάλογα με την εντατική κατάσταση στην οποία βρίσκεται, τη δομή του και την ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρανσης, και όχι γενικώς καταρρεύσιμα και διογκώσιμα εδάφη. Παρατέθηκαν πειραματικά αποτελέσματα που επιδεικνύουν την επιρροή της εντατικής κατάστασης υπό την οποία βρίσκεται ένα μή κορεσμένο έδαφος καθώς και της ιστορίας φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρανσης και ο τρόπος που η επιρροή αυτή έχει

ενσωματωθεί στις προβλέψεις του καταστατικού προσομοιώματος των Alonso, et al. (1990). Ο δείκτης συμπίεσης των εδαφικών υλικών μειώνεται όταν συμπιέζονται υπό σταθερή μύζηση, και μάλιστα τόσο περισσότερο όσο αυξάνεται η μύζηση (μέχρι σταθεροποίησης σε μια ελάχιστη τιμή για τιμές της μύζησης περί την μύζηση επίτευξης παραμένοντος ποσοστού υγρασίας και μετά). Αντίστοιχα, η τάση διαρροής επί των καμπυλών συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης υπό την οποία γίνεται η συμπίεση. Το θεωρητικό αυτό πλαίσιο εξηγεί τις διαφορές που παρατηρήθηκαν στην επιρροή του βαθμού κορεσμού επί του δείκτη συμπίεσης από δοκιμές από εμπορικά εργαστήρια σε εδάφη από τον ελλαδικό χώρο. Δεδομένου ότι οι δοκιμές αυτές είχαν εκτελεστεί μέχρι μέγιστη κατακόρυφη τάση 800 kPa, παρατηρήθηκε ότι για εδαφικά υλικά στην περιοχή του διαγράμματος πλαστικότητας του Casagrande  $0 < w_L < 38 \%$  και  $0 < I_p < 18 \%$  πρέπει να αναμένεται ότι ο δείκτης συμπίεσης αρχικά πλήρως κορεσμένων εδαφών θα είναι μικρότερος εκείνου των αρχικά μη κορεσμένων, ενώ στην περιοχή για  $w_L > 38 \%$  και  $I_p > 18 \%$ , πρέπει να αναμένεται το αντίθετο. Συνοψίζοντας δηλαδή, αρχικά μη κορεσμένα εδάφη χαμηλής πλαστικότητας είναι πιο συμπιεστά από αρχικά πλήρως κορεσμένα εδάφη ίδιας πλαστικότητας, ενώ το αντίθετο ισχύει για τα εδάφη υψηλής πλαστικότητας. Επίσης αρχικά μη κορεσμένα εδάφη είναι συστηματικά πιο συμπιεστά από αρχικά πλήρως κορεσμένα εδάφη με το ίδιο ποσοστό φυσικής υγρασίας, γεγονός το οποίο συνιστά ένδειξη ότι η παράμετρος που εκφράζει τη σχέση μεταξύ της δομής των εδαφών και του δείκτη συμπίεσης είναι ο λόγος κενών, το οποίο άλλωστε τεκμηριώθηκε από το γεγονός ότι προβλέπεται ίδια τιμή του δείκτη συμπίεσης για τον ίδιο αρχικό λόγο κενών και για αρχικά πλήρως κορεσμένα εδάφη και για αρχικά μη κορεσμένα εδάφη. Τέλος ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης για κάθε παράμετρο συσχέτισης ήταν συστηματικά αυξημένος για τα αρχικά πλήρως κορεσμένα εδάφη σε σχέση με τα αρχικά μη κορεσμένα. Αυτό συνιστά ένδειξη ότι η σχέση αιτίου-αιτιατού μεταξύ φυσικών χαρακτηριστικών και δείκτη συμπίεσης που διατυπώνεται από τις εμπειρικές συσχετίσεις ισχύει μάλλον για πλήρως κορεσμένα εδάφη.

### 8.2.5 Η διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών

Στο Κεφάλαιο 6 μελετήθηκε η διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών και παρουσιάστηκαν παραδείγματα για την επιρροή του βαθμού κορεσμού σε αυτήν και πως επηρεάζει προβλήματα ευστάθειας πρανών. Τα συμπεράσματα του κεφαλαίου συνοψίζονται στα εξής:



1. Σε όλα τα εδαφικά υλικά η διατμητική τους αντοχή αυξάνει με την αύξηση της μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα των υλικών. Για αύξηση της μύζησης πέρα από την πίεση διείσδυσης αέρα των εδαφικών υλικών η διατμητική τους αντοχή μπορεί να αυξάνει, να μένει σταθερή ή και να μειώνεται ανάλογα με την φύση τους.
2. Ακόμα και στα εδαφικά υλικά που η διατμητική αντοχή συνεχίζει να αυξάνεται με την μύζηση για τιμές αυτής μεγαλύτερες της πίεσης διείσδυσης αέρα του εδαφικού υλικού, ο ρυθμός αύξησης της διατμητικής αντοχής συναρτήσει της μύζησης για τιμές μεγαλύτερες της πίεσης διείσδυσης αέρα είναι μικρότερος του ρυθμού αύξησης της διατμητικής αντοχής συναρτήσει της ολικής τάσης, πράγμα που σημαίνει ότι η γωνία διατμητικής αντοχής  $\phi'$  είναι μεγαλύτερη της γωνίας αύξησης της διατμητικής αντοχής συναρτήσει της μύζησης  $\phi_b$ .
3. Αυξανόμενη της μύζησης, αυξάνεται και η ψαθυρότητα και η διαστολικότητα των εδαφικών υλικών.
4. Η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης, και μάλιστα τόσο περισσότερο όσο πιο πλαστικό είναι ένα αργιλικό υλικό.
5. Η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης προκειμένου για αργιλικά εδαφικά υλικά υψηλής και μέσης πλαστικότητας, μένει σταθερή για υλικά μέσης έως και χαμηλής πλαστικότητας και μειώνεται για ιλείς και κοκκώδη εδάφη.
6. Η απώλεια της επιπλέον συνιστώσας της διατμητικής αντοχής φαίνεται να επηρεάζει μόνο αβαθείς κατολισθήσεις με βάση τα συγκεντρωθέντα παραδείγματα από την βιβλιογραφία. Ο λόγος για αυτό δεν βρίσκεται στο ότι η μύζηση δεν επηρεάζει την ευστάθεια και βαθύτερων μαζών, αλλά στην δυσκολία της απώλειας της μύζησης σε μεγαλύτερα βάθη εφόσον αυτή έχει αναπτυχθεί εκεί, λόγω του σημαντικά μικρότερου συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό που συνοδεύει τις υψηλές τιμές της μύζησης.
7. Παρά την σημασία του βαθμού κορεσμού και της επιρροής αυτού στην διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών, η επιρροή του πολύ σπάνια και μόνο πρόσφατα λαμβάνεται υπόψη κατά τις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας πρανών, αφού η πιθανότητα απώλειας της συμβολής του στην διατμητική αντοχή είναι πολύ μεγάλη λόγω επεισοδίων βροχόπτωσης. Κατά

συνέπεια η χρησιμοποίηση της επιπλέον αυτής συνιστώσας της αντοχής λόγω μερικού κορεσμού σε ευθείες αναλύσεις ευσταθείας είναι σε βάρος της ασφάλειας αφού θα οδηγήσει στην εκτίμηση μεγαλύτερου συντελεστή ασφαλείας από εκείνον που πολύ πιθανόν θα υπάρχει μετά την απώλεια αυτής της επιπλέον αντοχής σε περίπτωση βροχόπτωσης. Η χρησιμοποίησή της λοιπόν πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και μόνο όταν είναι γνωστά τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής και μάλιστα έχει γίνει και παρακολούθησή τους για μεγάλα χρονικά διαστήματα (συχνότητα, διάρκεια και ένταση επεισοδίων βροχόπτωσης, περίοδοι ηλιοφάνειας/νέφωσης, μεταβολές θερμοκρασίας κ.α.) και τα χαρακτηριστικά διαπερατότητας του σχηματισμού στον οποίο γίνεται ο σχεδιασμός, δηλαδή κατανομή βροχόπτωσης σε κατεύθυνση και επιφανειακή απορροή, εξάτμιση και διαπνοή από την επιφάνεια του σχηματισμού, μικροδιαπερατότητα και μακροδιαπερατότητα του σχηματισμού συναρτήσει του βαθμού κορεσμού του, πιεζομετρικά δεδομένα εντός αυτού και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Σε κάθε περίπτωση δε τέτοιου είδους αναλύσεις πρέπει να περιορίζονται σε έργα με μικρό χρονικό ορίζοντα (τουλάχιστον ακόμη αφού δεν υπάρχουν πολλές και μακροχρόνιες καταγραφές της μύζησης επιτόπου και της συσχέτισής της με τα μετεωρολογικά δεδομένα) αφού βασίζονται σε εκτιμήσεις της εξέλιξης μετεωρολογικών δεδομένων, η αβεβαιότητα των οποίων μεγαλώνει όσο μεγαλώνει ο χρονικός ορίζοντας των εκτιμήσεων αυτών.

8. Αντίθετα, σε αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας κατολισθήσεων με την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα χαμηλά, εάν αγνοηθεί η επιρροή της μύζησης υπερεκτιμάται η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής και άρα υποδιαστασιολογούνται τα απαιτούμενα μέτρα σταθεροποίησης της κατολίσθησης που σχεδιάζονται προς επίτευξη του επιθυμητού κατά τον σχεδιασμό συντελεστή ασφαλείας μετά την σταθεροποίηση της κατολίσθησης. Έτσι στις περιπτώσεις που δεν λαμβάνεται υπόψη η επιρροή της μύζησης κατά τις αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας πρέπει να επιβεβαιώνεται από τα γεωτεχνικά δεδομένα ότι δεν έχουν αναπτυχθεί σημαντικές τιμές της μύζησης κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, διαφορετικά να –επιχειρείται τουλάχιστον να- εισάγονται είτε απευθείας, είτε μέσω της υιοθέτησης μη μηδενικής τιμής της συνοχής, εύλογες τιμές της μύζησης από τις οποίες να προκύπτει η κατάλληλη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής που θα χρησιμοποιηθεί στις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας για τον υπολογισμό της επιρροής των σχεδιαζόμενων μέτρων σταθεροποίησης.

Όλα τα παραπάνω καθιστούν περισσότερο από σημαντική την ανάγκη πραγματοποίησης επιτόπου μετρήσεων της μύζησης. Τα θεωρητικά προσομοιώματα για την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής των εδαφικών υλικών με την μύζηση υπάρχουν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε είδους αναλύσεις που απαιτούνται εκτιμήσεις τις επιρροής της μύζησης στην διατμητική αντοχή. Η αξιοπιστία αυτών των εκτιμήσεων ωστόσο δεν πρόκειται να είναι μεγάλη όσο δεν πραγματοποιούνται συστηματικές, μακροχρόνιες μετρήσεις της μύζησης επιτόπου και συσχετίσή τους αφενός με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού των απαντώμενων σχηματισμών και τα μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφονται στην επιφάνεια του εδάφους.

### **8.2.6 Η διαπερατότητα των μή κορεσμένων εδαφών ως προς την υγρή και την αέρια φάση των πόρων**

Στο Κεφάλαιο 7 μελετήθηκε η διαπερατότητα των μή κορεσμένων εδαφικών υλικών ως προς το νερό και ως προς τον αέρα και παρουσιάστηκε ένα παράδειγμα για την επιρροή του βαθμού κορεσμού σε αυτήν και πως επηρεάζει πραγματικά προβλήματα κίνησης του νερού των πόρων σε μή κορεσμένα εδαφικά υλικά. Τα συμπεράσματα του κεφαλαίου αυτού συνοψίζονται στα εξής:

1. Η ροή των ρευστών φάσεων μέσα στα μη κορεσμένα εδάφη έχει τρεις μορφές:
  - α) την μορφή της **κίνησης της υγρής φάσης διά μέσω του εδάφους**, δηλαδή διά του στερεού σκελετού του εδάφους,
  - β) την μορφή της **κίνησης της αέριας φάσης διά μέσω του εδάφους**, δηλαδή διά του στερεού σκελετού του εδάφους, και
  - γ) την μορφή της **κίνησης της αέριας φάσης δια μέσω της υγρής φάσης**, φαινόμενο το οποίο περιγράφεται ως διάχυση της αέριας φάσης (air diffusion) μέσω της υγρής φάσης των πόρων του εδάφους.
2. Η κίνηση της υγρής φάσης των πόρων περιγράφεται από τον νόμο του Darcy (εφόσον πληρούνται οι προϋποθέσεις που αναφέρονται στην §7.2.3) και την τροποποιημένη εξίσωση Laplace για να λαμβάνεται υπόψη ότι μπορεί να μεταβληθεί ο όγκος του νερού μέσα στον στοιχειώδη αντιπροσωπευτικό όγκο που μελετάται η ροή. Η τελευταία παρατήρηση είναι

πολύ σημαντική για την αξιολόγηση από τους υποψήφιους χρήστες κωδίκων πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της υπόγειας ροής της υγρής φάσης στην μή κορεσμένη ζώνη του εδάφους.

3. Η κίνηση της αέριας φάσης των πόρων διά μέσω του εδάφους περιγράφεται από τον νόμο του Fick, ο οποίος μέσω των μαθηματικών μετασχηματισμών που παρατίθενται στην §7.3.2 μπορεί και αυτός να πάρει την μαθηματική μορφή του νόμου του Darcy και έτσι να οριστεί και ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση  $k_a$ .
4. Η κίνηση της αέριας φάσης διά μέσω της υγρής φάσης, δηλαδή η διάχυση της αέριας φάσης (air diffusion) μέσω της υγρής φάσης των πόρων περιγράφεται επίσης από τον νόμο του Fick, ο οποίος μέσω των μαθηματικών μετασχηματισμών που παρατίθενται στην §7.4 μπορεί και στην περίπτωση αυτή να πάρει την μαθηματική μορφή του νόμου του Darcy και έτσι να οριστεί και ο συντελεστής διάχυσης της αέριας φάσης.
5. Ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση μειώνεται με την αύξηση της μύζησης (και την συνεπαγόμενη μείωση του βαθμού κορεσμού), τόσο περισσότερο μάλιστα όσο πιο αδιαπέρατο είναι το υλικό όταν είναι πλήρως κορεσμένο. Η παρατήρηση αυτή ισχύει για όλα τα εδαφικά υλικά. Η μοναδική εξαίρεση μπορεί να είναι πολύ λεπτόκοκκα πλαστικά υλικά τα οποία κατά την ξήρανση συρρικνώνονται κατά τρόπο που να εμφανίζονται ρωγμές λόγω συρρίκνωσης. Στην περίπτωση αυτών των υλικών, ο συντελεστής διαπερατότητας σε αέραια τεμάχια τους έχει μειωθεί κατά την γενική παρατήρηση, αλλά στο επίπεδο του εδαφικού σχηματισμού η μακροδιαπερατότητα έχει αυξηθεί εντυπωσιακά λόγω της ανάπτυξης ενός δικτύου ρωγμών λόγω συρρίκνωσης. Επιπλέον ενδιαφέρον σημείο για τα υλικά αυτά είναι και η εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας κατά την διαβροχή, αφού αρχικά θα υπάρξει σημαντική ροή καθοριζόμενη από το δίκτυο των ρωγμών συρρίκνωσης αλλά πολύ γρήγορα το δίκτυο αυτό θα αρχίσει να κλείνει λόγω της διόγκωσης του υλικού στις επιφάνειες αυτών των ρωγμών, οπότε η ροή θα αρχίσει να ορίζεται και πάλι από τον συντελεστή διαπερατότητας στο επίπεδο του στοιχειώδους αντιπροσωπευτικού όγκου.
6. Ο συντελεστής διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση ακολουθεί την αντίστροφη πορεία από αυτήν του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση, δηλαδή αυξάνεται με την αύξηση της μύζησης (και την συνεπαγόμενη μείωση του βαθμού κορεσμού).

7. Ο συντελεστής διάχυσης μειώνεται όσο μειώνεται το ποσοστό υγρασίας στο ίδιο έδαφος και επίσης όσο πιο λεπτόκοκκο γίνεται το εδαφικό υλικό και αυξάνεται η περιεκτικότητα του σε αργιλικά ορυκτά μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας. Κατά συνέπεια ο συντελεστής διάχυσης μειώνεται όσο αυξάνεται η μύζηση (και άρα μειώνεται ο βαθμός κορεσμού και το ποσοστό υγρασίας).
8. Όλοι οι συντελεστές διαπερατότητας παρουσιάζουν έντονη υστέρηση με την μύζηση κατά μήκος κύκλων ξήρανσης-ύγρυνσης.
9. Στο κεφάλαιο κατεγράφησαν διάφορες μέθοδοι μέτρησης των συντελεστών διαπερατότητας ως προς την υγρή και την αέρια φάση αλλά και του συντελεστή διάχυσης. Οι μέθοδοι μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση διακρίνονται γενικά σε μεθόδους μόνιμης και μη μόνιμης ροής, όπως μπορεί να θεωρηθεί ότι συμβαίνει (με κάποιες επιφυλάξεις) και για τις μεθόδους μέτρησης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση. Για τον συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση υπάρχουν πολλές μέθοδοι οι οποίες επιτρέπουν την μέτρησή του και στο εργαστήριο και επιτόπου. Αντίθετα για τον συντελεστή διαπερατότητας ως προς την αέρια φάση υπάρχουν πολύ λίγες μέθοδοι και από αυτές μόνο μία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρησή του επιτόπου. Μία κοινή παρατήρηση για όλες τις μεθόδους μέτρησης των διαφόρων συντελεστών διαπερατότητας είναι ότι όλες τους είναι γενικά χρονοβόρες (με εξαίρεση ίσως κάποιες από τις μεθόδους μη μόνιμης ροής που έχουν αναπτυχθεί για την μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή φάση σε κοκκώδη εδάφη), ενώ απαιτούν για την εφαρμογή τους εξαιρετικά εξειδικευμένες συσκευές, μεθόδους και προσωπικό, αναλογικά ίσως πολύ περισσότερο από τις αντίστοιχες απαιτήσεις των εργαστηριακών μεθόδων που εφαρμόζονται στα μη κορεσμένα εδάφη για την μελέτη της συμπεριστατότητάς τους ή της διατμητικής τους αντοχής.

### **8.3 Η ΑΞΙΑ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΤΗΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

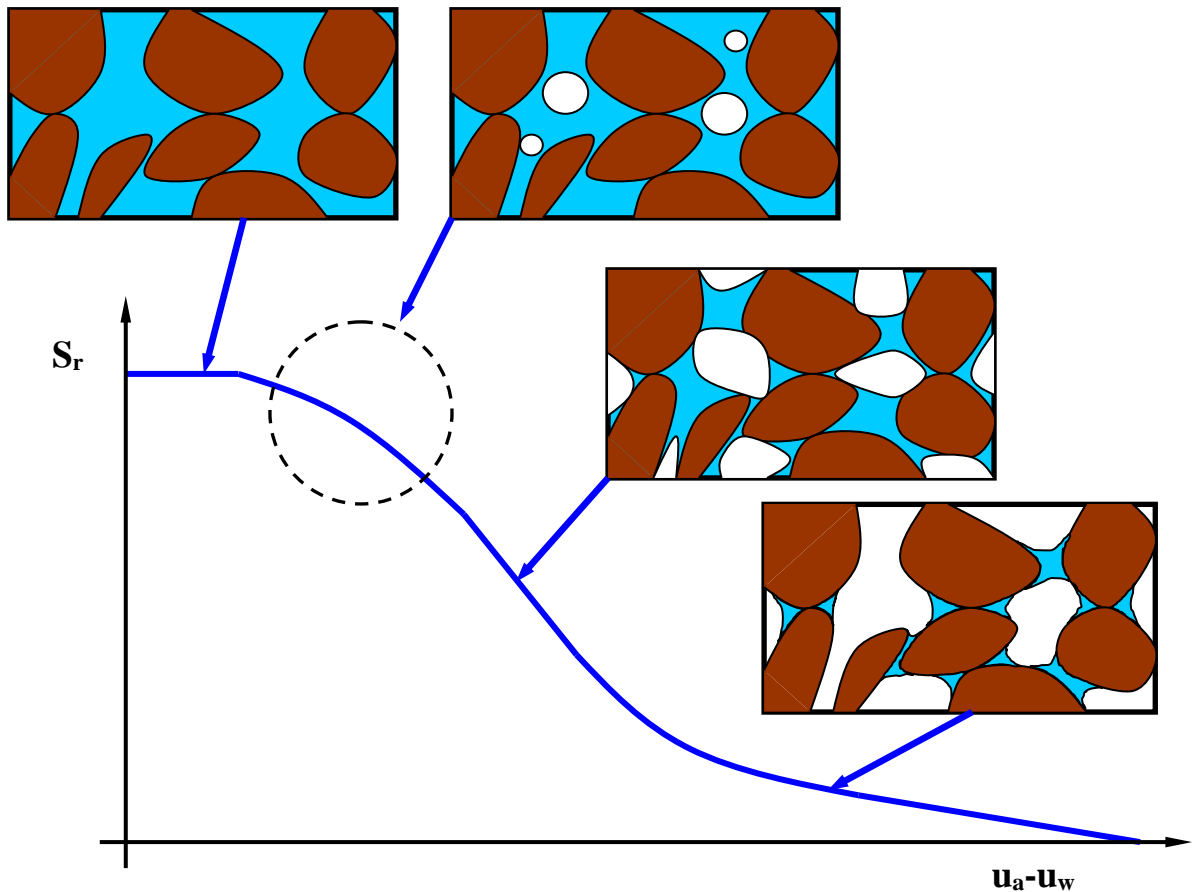
Το πρώτο μέρος της διδακτορικής διατριβής περιέχει ελάχιστα από τα συμπεράσματα των πρωτότυπων πειραματικών και αναλυτικών διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της εκπόνησης της διατριβής. Αποτελεί ωστόσο το σπουδαιότερο τμήμα της και αυτό για δύο λόγους.

Ο πρώτος από αυτούς είναι η διδακτική του αξία. Αποτελεί το πρώτο, ιδιαίτερα εκτεταμένο μάλιστα, κείμενο στην ελληνική γλώσσα όπου παρουσιάζεται και επεξηγείται διεξοδικά η φύση και η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Μάλιστα, επεκτείνεται τόσο πολύ ώστε συστηματικά να παρουσιάζει τις εργαστηριακές μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό κάθε είδους τιμών παραμέτρων στα μη κορεσμένα εδάφη, επιδεικνύοντας κατά συνέπεια πως θα μπορούσε να ζητηθεί να μετρηθούν οι παράμετροι για κάθε τι που παρουσιάστηκε θεωρητικά, και όταν καταπιάνεται με την μηχανική συμπεριφορά καταλήγει πάντοτε σε ένα πρακτικό παράδειγμα από το οποίο προκύπτουν γενικότερα συμπεράσματα και για τον τρόπο που ο μερικός κορεσμός υπεισέρχεται σε καθημερινά προβλήματα της γεωτεχνικής πράξης αλλά και πως μπορεί να ληφθεί υπόψη η σημασία του.

Ο δεύτερος λόγος είναι ότι αποτελεί την βάση πάνω στην οποία μπορεί να κριθεί η πειραματική και η αναλυτική διερεύνηση που εκπονήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και παρατίθεται αντίστοιχα στο δεύτερο και στο τρίτο της μέρος. Η παρουσίαση των δοκιμών που παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 14 και 15 θα ήταν απολύτως χωρίς νόημα αν πρώτα δεν είχε επεξηγηθεί αναλυτικά η συμπίεστικότητα και η διαπερατότητα των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών, οπότε ουσιαστικά οι δοκιμές αυτές να τοποθετηθούν στο σωστό ερευνητικό πλαίσιο. Η σημασία των μαθηματικών διατυπώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της αναλυτικής διερεύνησης θα ήταν επίσης πολύ δύσκολο να εξηγηθεί εάν δεν είχε προηγηθεί η παρουσίαση της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών αλλά και της συμπίεστικότητάς τους.

Το πρώτο μέρος της διατριβής λοιπόν αποτελεί αυτό στο οποίο θα μπορεί κάθε ενδιαφερόμενος για την μελέτη των μη κορεσμένων εδαφών να ανατρέχει στο μέλλον, αλλά και το εργαλείο για να εκτιμηθεί –όσο και να κριθεί- η κατεξοχήν ερευνητική εργασία αυτής της διδακτορικής διατριβής που είναι η πειραματική και η αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών που πραγματοποιήθηκε και παρουσιάζεται στην συνέχεια στο δεύτερο και στο τρίτο μέρος αντίστοιχα.

## ΜΕΡΟΣ ΙΙ



**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΛΑΦΩΝ**

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE  
MECHANICAL BEHAVIOUR OF UNSATURATED SOILS**

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΜΕΡΟΥΣ II

### 9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το δεύτερο μέρος της διδακτορικής διατριβής αποτελεί το κείμενο στο οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκαν. Έχει ήδη προηγηθεί το πρώτο μέρος στο οποίο παρουσιάζεται η φύση και η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών και ακολουθεί το τρίτο μέρος στο οποίο παρουσιάζονται τα ήδη διατυπωμένα καταστατικά προσομοιώματα και το νέο θεωρητικό πλαίσιο για μη κορεσμένα εδάφη. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η σκοπιμότητα πραγματοποίησης των εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής, το περίγραμμα των περιεχομένων του δεύτερου μέρους και η κατάληξή του.

### 9.2 ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΕΙΣΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

Στα πλαίσια της ανάπτυξης ενός νέου θεωρητικού πλαισίου για μη κορεσμένα εδάφη ανέκυψαν ερωτήματα που αφορούσαν στα εξής:

- Το εύρος ισχύος του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων και της χρήσης του για την αξιολόγηση της δομής των φυσικών, πλήρως κορεσμένων, εδαφικών υλικών. Η έλλειψη πειραματικών δεδομένων τα οποία να διερευνούν το εύρος της ισχύος των μέχρι σήμερα γνωστών στοιχείων για τις εγγενείς ιδιότητες των αργιλικών εδαφών, κυρίως ως προς την κοκκομετρική διαβάθμιση, την πλαστικότητα και την ορυκτολογική σύσταση, πειραματικών δεδομένων που να επιδεικνύουν τη χρήση των εγγενών ιδιοτήτων για την αξιολόγηση της



δομής των φυσικών πλήρως κορεσμένων εδαφών, και τέλος αξιόπιστων πειραματικών δεδομένων μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι υψηλές τιμές τάσης και για μεγάλο εύρος κοκκομετρικής διαβάθμισης, πλαστικότητας και ορυκτολογικής σύστασης σε εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο, επέβαλαν τη σχετική εργαστηριακή διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε.

- Τη μηχανική συμπεριφορά μη κορεσμένων εδαφών, ιδίως κατά την ξήρανση από κατάσταση πλήρους κορεσμού (και όχι μόνο). Η έλλειψη πειραματικών δεδομένων σε εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο και γενικότερα πειραματικών δεδομένων στα οποία να είναι γνωστές οι ογκομετρικές μεταβολές κατά την ξήρανση από κατάσταση πλήρους κορεσμού και η εξέλιξη αυτών συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων, επέβαλαν την πραγματοποίηση των σχετικών δοκιμών. Για την πραγματοποίηση των δοκιμών αυτών μάλιστα χρειάστηκε η προμήθεια ειδικών εργαστηριακών συσκευών από το Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π καθώς και η χρήση αντίστοιχης συσκευής του Εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. Επίσης υλοποιήθηκε από τον γράφοντα για πρώτη φορά στον ελλαδικό χώρο η μέθοδος ελέγχου της μύζησης με υδατικά διαλύματα. Η σχετική πειραματική διάταξη υλοποιήθηκε στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.
- Τέλος, η γενικότερη ανάγκη για αξιόπιστα πειραματικά δεδομένα προκειμένου να διατυπωθεί και να ελεγχθεί το νέο θεωρητικό πλαίσιο επέβαλε τη δημιουργία μίας βάσης πειραματικών δεδομένων σε εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο που χρησιμοποιήθηκε για το θεωρητικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλα προσομοιώματα στο μέλλον.

Οι δοκιμές που παρουσιάζονται στο δεύτερο μέρος της διατριβής πραγματοποιήθηκαν από τον γράφοντα στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε.

### **9.3 ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΜΕΡΟΥΣ**

Το δεύτερο μέρος της διδακτορικής διατριβής αποτελείται από οκτώ κεφάλαια (συμπεριλαμβανομένης και της παρούσας εισαγωγής) και τα παραρτήματα στα οποία γίνεται παραπομπή. Τα κεφάλαια που ακολουθούν είναι:

- Κεφάλαιο 10. Το θεωρητικό πλαίσιο των εγγενών ιδιοτήτων.

- Κεφάλαιο 11. Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές.
- Κεφάλαιο 12. Το πρόγραμμα των εργαστηριακών δοκιμών.
- Κεφάλαιο 13. Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης.
- Κεφάλαιο 14. Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού.
- Κεφάλαιο 15. Ειδικές δοκιμές.
- Κεφάλαιο 16. Συνόψιση και συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω εργαστηριακή διερεύνηση.

Στο Κεφάλαιο 10 παρουσιάζεται και επεξηγείται το θεωρητικό πλαίσιο των εγγενών ιδιοτήτων των αργιλικών εδαφικών υλικών καταλήγοντας στη διατύπωση της Γενικευμένης Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης (Generalised Intrinsic Compression Line). Η παράθεση του εδώ κρίθηκε σκόπιμη προκειμένου να αποσαφηνιστούν θέματα που αφορούν στη σκοπιμότητα εκτέλεσης των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε αναζυμωμένα αργιλικά εδάφη, να διευκρινιστούν θέματα ορολογίας που χρησιμοποιείται στη συνέχεια και να αποτελέσει την απαιτούμενη θεωρητική εισαγωγή του τρίτου μέρους, όπου παρουσιάζεται το νέο θεωρητικό πλαίσιο, από κοινού με το πρώτο μέρος, όπου περιγράφεται η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών. Αποφεύχθηκε η παράθεσή του στο πρώτο μέρος αφού εκείνο αναφέρεται αποκλειστικά στη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών.

Στο Κεφάλαιο 11 παρουσιάζονται τα εδαφικά υλικά στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι εργαστηριακές δοκιμές. Αναφέρεται η σκοπιμότητα πραγματοποίησης δοκιμών στα συγκεκριμένα εδάφη, η προέλευσή τους, το είδος των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, στοιχεία της γεωλογικής τους ιστορίας, τα φυσικά και ορυκτολογικά τους χαρακτηριστικά (για όσα από τα εδαφικά υλικά ήταν γνωστά ή υπήρχε η δυνατότητα προσδιορισμού τους).

Στο Κεφάλαιο 12 παρουσιάζεται το πρόγραμμα των εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων που πραγματοποιήθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 13 παρουσιάζεται η διερεύνηση της συμπιεστότητας των αναζυμωμένων και των φυσικών εδαφικών υλικών που πραγματοποιήθηκε. Η συμπιεστότητα των αναζυμωμένων εδαφικών υλικών διερευνήθηκε ως προς την επιρροή του αρχικού ποσοστού υγρασίας των πολτών και του αρχικού βαθμού κορεσμού, καθώς και την πλαστικότητά τους, την κοκκομετρική τους διαβάθμιση και την ορυκτολογική τους σύσταση, οι δύο τελευταίοι

παράγοντες μάλιστα και μέσω μειγμάτων καολίνη-άμμου και μπεντονίτη-άμμου. Η συμπεριφορά των φυσικών και των αναζυμωμένων εδαφικών υλικών διερευνήθηκε ως προς το μέγεθος της κατακόρυφης τάσης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τη συγκέντρωση των επιμέρους συμπερασμάτων και τη διατύπωση εμπειρικών συσχετίσεων με βάση τις προσδιορισθείσες τιμές παραμέτρων.

Στο Κεφάλαιο 14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορισμού του κλάδου παρθένας ξήρανσης (virgin drying) της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που πραγματοποιήθηκαν. Παρουσιάζονται οι προσδιορισθέντες κλάδοι ξήρανσης των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού, οι εργαστηριακές διατάξεις προσδιορισμού τους (θάλαμοι μύζησης, θάλαμοι διατήρησης υδατικών διαλυμάτων και υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου), οι συμπληρωματικές δοκιμές παρακολούθησης του ποσοστού υγρασίας κατά την ξήρανση στην ατμόσφαιρα ή τον εργαστηριακό φούρνο θερμοκρασίας 110 °C και τα συμπεράσματα από τις δοκιμές αυτές μαζί με τις εμπειρικές συσχετίσεις που διατυπώθηκαν επί τη βάση των προσδιορισθεισών τιμών παραμέτρων, ιδίως σε ό,τι αφορά την εξέλιξη του παραμένοντος λόγου κενών συναρτήσει της ιστορίας φόρτισης-αποφόρτισης των εδαφικών υλικών. Διατυπώθηκε μάλιστα μία οικογένεια εμπειρικών συσχετίσεων που επιτρέπουν την πρόβλεψη του παραμένοντος λόγου κενών των εδαφικών υλικών μετά από ξήρανση από την αρχική τους κατάσταση (όπως εκφράζεται από τον αρχικό λόγο κενών), τη φύση τους (όπως εκφράζεται από το όριο υδαρότητας ή το όριο πλαστικότητας και την ανηγμένη πυκνότητα στερεάς φάσης) και τη δομή τους. Η σημασία της εμπειρικής αυτής συσχέτισης έγκειται στο ότι ο παραμένων λόγος κενών αποτελεί παράμετρο μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών (βλ. πρώτο μέρος), άμεσα χρησιμοποιούμενη σε καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη (βλ. τρίτο μέρος).

Στο Κεφάλαιο 15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ειδικών δοκιμών που εκτελέστηκαν. Αυτές περιελάμβαναν δοκιμές προσδιορισμού διόγκωσης/κατάρρευσης σε συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά καθώς και τις δοκιμές προσδιορισμού των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού τους. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και τα λιγοστά αποτελέσματα προσδιορισμού κλάδων επανύγρυνσης μετά από ξήρανση πέραν του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας. Τέλος παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα που πραγματοποιήθηκαν σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά που είχαν υποστεί ξήρανση. Ο συνδυασμός των αποτελεσμάτων αυτών των δύο ειδών δοκιμών επέτρεψε την εκτίμηση της συνοχής που ανέπτυξαν τα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά κατά την ξήρανσή τους. Η εξέλιξη

αυτής της συνοχής με τη μύζηση αποτελεί παράμετρο καταστατικής προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε στο τρίτο μέρος της διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 16 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της πειραματικής διερεύνησης και παρατίθενται οι προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση. Το δεύτερο μέρος ολοκληρώνεται με τη βιβλιογραφία και τα παραρτήματα που παρατίθενται στο τέλος της διατριβής.

#### 9.4 ΚΑΤΑΛΗΞΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

Με την πειραματική διερεύνηση, τα αποτελέσματα της οποίας παρατίθενται στο δεύτερο μέρος της διατριβής διερευνήθηκαν τα εξής:

- Το εύρος ισχύος του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά των αργιλικών εδαφών, κυρίως την κοκκομετρική διαβάθμιση, την πλαστικότητα και τον αρχικό βαθμό κορεσμού. Αντιστοίχως διερευνήθηκε η επίδραση των χαρακτηριστικών της εργαστηριακής μεθόδου καθεαυτής, κυρίως της ταχύτητας επιβολής του φορτίου, του μεγέθους των δοκιμίων και του τρόπου προετοιμασίας τους. Κατάληξη της διερεύνησης αυτής υπήρξε η διατύπωση και εργαστηριακή τεκμηρίωση της Γενικευμένης Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης.
- Η δυνατότητα αξιολόγησης της δομής των φυσικών αργιλικών εδαφικών υλικών μέσα από τη σύγκριση των ιδιοτήτων τους κατά τη μονοδιάστατη συμπίεσή τους από τη φυσική τους κατάσταση με τις εγγενείς τους ιδιότητες, αλλά και η δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς αυτών των υλικών υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως με χρήση της Γενικευμένης Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης.
- Τα χαρακτηριστικά ξήρανσης των αργιλικών εδαφών συναρτήσει της κοκκομετρικής τους διαβάθμισης, της πλαστικότητάς τους και του ποσοστού υγρασίας τους ως προς τη βέλτιστη υγρασία προκειμένου για συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά. Διερευνήθηκε ιδιαίτερα η εξέλιξη του παραμένοντος λόγου κενών των αργιλικών εδαφικών υλικών συναρτήσει της ιστορίας φόρτισης-αποφόρτισής τους καταλήγοντας σε μία οικογένεια εμπειρικών συσχετίσεων που επιτρέπουν την πρόβλεψη του παραμένοντος λόγου κενών των εδαφικών υλικών μετά από ξήρανση από την αρχική τους κατάσταση (όπως εκφράζεται από τον αρχικό λόγο κενών), τη φύση τους (όπως εκφράζεται από το όριο υδαρότητας ή το όριο πλαστικότητας και την ανηγμένη πυκνότητα στερεάς φάσης) και τη δομή τους.

- Τα χαρακτηριστικά διόγκωσης/συρρίκνωσης συμπυκνωμένων εδαφών κατά τη διαβροχή τους υπό σταθερή κατακόρυφη τάση στη δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης.
- Ως ένα βαθμό διερευνήθηκε και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού κατά μήκος κλάδων επανύγρυνσης από ξήρανση πέραν του παραμένου ποσοστού υγρασίας.
- Η εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη και θλίψη κατά γενέτειρα και διά του συνδυασμού αυτών των δοκιμών η εξέλιξη της φαινόμενης συνοχής των μη κορεσμένων εδαφών.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

## ΤΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΩΝ ΕΓΓΕΝΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

### 10.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο Burland (1990) εισήγαγε και θεμελίωσε τη χρήση των ιδιοτήτων των αναζυμωμένων αργίλων (εγγενών ιδιοτήτων) ως πλαίσιο αναφοράς για την κατανόηση και αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς των φυσικών αργίλων. Έκτοτε η χρήση αυτού του θεωρητικού πλαισίου καθιερώθηκε και επεκτάθηκε καθιστώντας το ένα από τα πιο διαδεδομένα «εργαλεία» για τη μελέτη της «δομής» των φυσικών αργίλων. *Δομή* (structure) καλείται ο συνδυασμός της διάταξης των μεμονωμένων σωματιδίων -κόκκων και πλακιδίων- των εδαφικών υλικών (fabric) και των «δεσμών» (bonding), δηλαδή των κάθε είδους δυνάμεων μεταξύ των σωματιδίων των εδαφικών υλικών που δεν οφείλονται στην τριβή μεταξύ τους (Burland, 1990, και Chandler, 2000). Η ενσωμάτωση χαρακτηριστικών του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων όπως η Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης σε σύγχρονα καταστατικά προσομοιώματα, χρησιμοποιούμενη μαζί με την τιμή του λόγου κενών των φυσικών αργίλων στην αρχική τους κατάσταση και στην τάση διαρροής τους, αντικατέστησε παραδοσιακές μεθόδους πρόβλεψης των ογκομετρικών παραμορφώσεων αργιλικών εδαφών από καταστατικά προσομοιώματα βασισμένα στη Θεωρία Κρίσιμης Κατάστασης (Critical State Theory), διευρύνοντας ακόμα περισσότερο τη σημασία του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων και στον τομέα της πρόβλεψης πλέον και όχι μόνο της αξιολόγησης της συμπεριφοράς των φυσικών αργίλων (Liu & Carter, 1999 και 2000).

Εν όψει αυτών, στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο των εγγενών ιδιοτήτων των αργιλικών εδαφών και γίνεται αναλυτική επεξεργασία του. Αν και κεφάλαιο θεωρίας δεν παρατέθηκε στο πρώτο μέρος αφού σε αυτό παρουσιάζεται η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών. Η παράθεση του κεφαλαίου αυτού κρίθηκε σκόπιμη σε αυτό το σημείο πριν από την παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων, προκειμένου αυτά αλλά και η

σκοπιμότητα της πειραματικής διερεύνησης να γίνουν καλύτερα κατανοητά. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά οι διαφορές μεταξύ φυσικών και αναζυμωμένων αργίλων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο των εγγενών ιδιοτήτων και οι Γραμμές Εγγενούς Συμπύεσης και Συμπύεσης κατά την Ιζηματογένεση και ακολουθεί η αναλυτική επεξεργασία του με την εισαγωγή και τεκμηρίωση της Θεωρητικής Γραμμής Εγγενούς Συμπύεσης και της Γενικευμένης Γραμμής Εγγενούς Συμπύεσης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την επέκταση του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων, τις προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και τα συμπεράσματα.

## 10.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΕΣ ΑΡΓΙΛΟΙ

Κατά την καθημερινή επαγγελματική ή ερευνητική πρακτική, χρησιμοποιούνται δοκίμια από φυσικές (natural) ή αναζυμωμένες (reconstituted) αργίλους. Τα δοκίμια από φυσικές αργίλους μπορεί να είναι αδιατάρακτα ή διαταραγμένα και ανάλογα με το πόσο έχουν διαταραχθεί αντικατοπτρίζουν τις ιδιότητες του αργιλικού υλικού επί τόπου ή όχι. Τα δοκίμια αναζυμωμένης αργίλου παρασκευάζονται στο εργαστήριο με την ανάμειξη αργίλου φυσικής ή τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης με νερό και τη μηχανική διάσπαση των συσσωματωμάτων των κόκκων και των πλακιδίων αυτής κατά τη διαδικασία της ανάμειξης. Αυτή η ανάμειξη καταλήγει στη δημιουργία ενός πολτού (slurry) υψηλού ποσοστού υγρασίας σε σχέση με το όριο υδαρότητας του υλικού στον οποίο έχουν διασπαστεί εντελώς τα συσσωματώματα των κόκκων και των πλακιδίων. Ο πολτός αυτός προσομοιάζει στο ίζημα από το οποίο προήλθαν φυσικές ιζηματογενείς άργιλοι και οι ιδιότητές του είναι αυτές που εξαρτώνται μόνο από τα εγγενή (intrinsic) χαρακτηριστικά των αργίλων αυτών, δηλ. την κοκκομετρική διαβάθμιση και την ορυκτολογική σύσταση, και όχι την κάθε είδους δομή που αυτές αποκτούν κατά τη γεωλογική τους ιστορία από τη δημιουργία του ιζήματος και μετά. Ως σημείο αφετηρίας της γεωλογικής ιστορίας μιας ιζηματογενούς αργίλου θεωρείται η «δημιουργία» και όχι η «απόθεση» του ιζήματος, καθώς κατά τον Burland (1990), ο τρόπος της απόθεσης παίζει ρόλο στην ιστορία των μηχανικών χαρακτηριστικών ενός ιζηματογενούς υλικού. Ως «δημιουργία» του ιζήματος εδώ, νοείται η ανάμειξη του εδαφικού υλικού με περίσσεια νερού εντός μιας λεκάνης ιζηματογένεσης ως την έναρξη της καθίζησης αυτού (θεωρώντας ότι η καθίζηση αφορά στην «απόθεση» του ιζήματος) και όχι οι διαδικασίες διάβρωσης μέσω των οποίων το εδαφικό υλικό καταλήγει στις λεκάνες ιζηματογένεσης. Στη Φωτ. 10.1 φαίνονται πολτοί τριών αναζυμωμένων υλικών.





**Φωτογραφία 10.1.** Αναζυμωμένα αργιλικά εδάφη. Παρασκευάζονται μέσα σε δοχεία όπως οι κάψες της φωτογραφίας καθώς βρίσκονται σε ημίρευστη ως ρευστή κατάσταση. Πρόκειται για Άργιλο Χανίων (πάνω αριστερά), Μάργα Κορίνθου (πάνω δεξιά) και Καολίνη τύπου Speswhite (κάτω).

### 10.3 ΤΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΩΝ ΕΓΓΕΝΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ. Η ΓΡΑΜΜΗ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ Η ΓΡΑΜΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΕΣΗ

Μετά τη διάκριση των αργίλων σε φυσικές και αναζυμωμένες στην §10.2, στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο των εγγενών ιδιοτήτων όπως διατυπώθηκε από τον Burland (1990). Ο όρος «εγγενής» (intrinsic) χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις ιδιότητες των αναζυμωμένων αργίλων. Αυτές ορίζονται τυπικά ως άργιλοι αναζυμωμένες σε υψηλό ποσοστό υγρασίας, συνήθως μεταξύ 1.0 και 1.5 φορές το όριο υδαρότητας του υλικού, με αφητηρία προσθήκης επιπλέον νερού (για αργίλους φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης) την κατάσταση κατά την οποία βρίσκονται στο ποσοστό φυσικής υγρασίας χωρίς να έχει προηγηθεί ξήρανση στον αέρα ή σε εργαστηριακό φούρνο. Ιδανικά, η περιεκτικότητα σε ξένες ουσίες του νερού με το οποίο γίνεται η ανάμειξη, πρέπει να είναι η ίδια με εκείνη του νερού των πόρων του

υλικού στη φυσική του κατάσταση. Αυτό συνήθως είναι ιδιαίτερα δύσκολο, ενώ οι Tavenas, et al. (1983) έχουν επιδείξει ότι η χρήση απεσταγμένου νερού ή νερού της ίδιας περιεκτικότητας σε ξένες ουσίες με το νερό των πόρων δεν προκαλεί διαφορές στην παρατηρούμενη συμπεριφορά (οι παρατηρήσεις τους δεν περιλαμβάνουν αργιλικά υλικά με θαλασσινό νερό στους πόρους τους). Για λόγους απλότητας λοιπόν χρησιμοποιείται απεσταγμένο ή απιονισμένο νερό για την παρασκευή των αναζυμωμένων αργίλων. Συνήθως χρησιμοποιείται ένας αστερίσκος δίπλα από ένα σύμβολο μιας ιδιότητας για να δηλώσει ότι πρόκειται για εγγενή ιδιότητα (π.χ.  $e^*$  είναι ο εγγενής λόγος κενών,  $C_c^*$  είναι ο δείκτης εγγενούς συμπίεσης κλπ).

Όταν σχεδιάζουμε τα αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης στο χώρο λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης<sup>1</sup>, οι καμπύλες που προκύπτουν ονομάζονται Καμπύλες Μονοδιάστατης Συμπίεσης (One-dimensional Compression Curves). Όταν σχεδιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένα αργιλικά εδάφη στο χώρο αυτό, τότε οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης που προκύπτουν ονομάζονται Καμπύλες Εγγενούς Συμπίεσης (Intrinsic Compression Curves). Ο Burland (1990) χρησιμοποίησε δύο παραμέτρους που προκύπτουν από τις καμπύλες εγγενούς συμπίεσης. Αυτές ήταν οι τιμές του εγγενούς λόγου κενών στα 100 kPa και στα 1000 kPa κατακόρυφης τάσης,  $e^*_{100}$  και  $e^*_{1000}$  αντίστοιχα. Δεδομένου ότι οι καμπύλες αυτές είναι πρακτικά ευθείες (με την κατακόρυφη ενεργό τάση σε λογαριθμική κλίμακα) ο δείκτης εγγενούς συμπίεσης ορίζεται ως η διαφορά των δύο αυτών τιμών του εγγενούς λόγου κενών,  $C_c^* = e^*_{100} - e^*_{1000}$  (αφού  $\log 1000 - \log 100 = 1$ ). Οι παράμετροι  $C_c^*$  και  $e^*_{100}$  ονομάζονται (Burland, 1990, και Terzaghi, 1925) Σταθερές Εγγενούς Συμπιεστότητας (Constants of Intrinsic Compressibility). Οι Καμπύλες Εγγενούς Συμπίεσης, με βάση παρουσιασμένα στη βιβλιογραφία στοιχεία, έχουν γενικά το ίδιο ελαφρά καμπύλο (με τα κοίλα προς τα πάνω) σχήμα, αλλά πρακτικά μπορούν να θεωρηθούν ευθείες. Ανεξάρτητα από αυτό, ο Burland (1990) επιχειρώντας να τις κανονικοποιήσει εισήγαγε μια παράμετρο που ονόμασε Δείκτη Κενών<sup>2</sup>  $I_v$  (Void Index) και η οποία ορίζεται ως εξής:

$$I_v = \frac{e - e^*_{100}}{e^*_{100} - e^*_{1000}} = \frac{e - e^*_{100}}{C_c^*} \quad (10.1)$$

<sup>1</sup> Στο παρόν κεφάλαιο ο άξονας της ενεργού κατακόρυφης τάσης είναι σε δεκαδική λογαριθμική κλίμακα εκτός αν διευκρινίζεται διαφορετικά.

<sup>2</sup> Λόγω της εκτεταμένης χρήσης της παραμέτρου αυτής, αποφεύγεται η χρήση του ίδιου όρου ή του όρου δείκτης πόρων για το  $e$ , για το οποίο χρησιμοποιείται σε όλο το κείμενο της παρούσας διατριβής ο όρος «λόγος κενών».

Όταν κανονικοποιηθούν οι Καμπύλες Μονοδιάστατης Συμπίεσης μέσω του Δείκτη Κενών και σχεδιαστούν στον χώρο Δείκτη Κενών-Κατακόρυφης Τάσης πρακτικά συμπίπτουν σε μία μοναδική καμπύλη την οποία ο Burland (1990) ονόμασε Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Intrinsic Compression Line, ICL). Ο ίδιος επεξεργάστηκε αποτελέσματα από δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αργίλους αναζυμωμένες σε ποσοστό υγρασίας μεταξύ 1.0 και 1.5 φορές το όριο υδαρότητάς τους και κατέληξε μετά από στατιστική επεξεργασία των δεδομένων στην παρακάτω εμπειρική συσχέτιση για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης:

$$I_v = 2.45 - 1.285x + 0.015x^3 \quad (10.2)$$

όπου  $x = \log \sigma'_v$  ( $\sigma'_v$  σε kPa).

Έχοντας πλέον μία μοναδική γραμμή μετά την κανονικοποίηση των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης, είναι δυνατή η χρησιμοποίησή της ως γραμμής αναφοράς για τη σύγκριση με επί τόπου τιμές του δείκτη κενών επιτρέποντας τη μελέτη της δομής των φυσικών ιζηματογενών αργίλων. Η σημασία της έγκειται στο ότι αφορά σε μία συγκεκριμένη, τυποποιημένη κατάσταση των αργιλικών εδαφών (δημιουργία πολλών μετά από αναζύμωση), στην οποία δεν υπάρχουν πλέον ίχνη από τη δομή του υλικού στη φυσική του κατάσταση που δυσχεραίνουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων (όπως για παράδειγμα η Γραμμή Συμπίεσης Αναφοράς –Reference Compression Line- των Matsui & Sakagami, 1995, που την όρισαν για το ευθύγραμμο τμήμα των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης φυσικών αργίλων μετά την τάση διαρροής). Περισσότερα για τη σημασία των αναζυμωμένων εδαφών ως υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βάσεις αναφοράς για τη μελέτη της δομής των φυσικών εδαφών, καθώς και τον τρόπο παρασκευής τους, μπορούν να βρεθούν στους Fearon & Coop (2000) που μελέτησαν την επίδραση διαφόρων μεθόδων αναζύμωσης αλλά και στο Κεφ. 13. Τονίζεται ότι τα πειραματικά δεδομένα που επεξεργάστηκε ο Burland (1990) για να καταλήξει στην Εξ. 10.2 προέρχονται από δοκιμές σε αργιλικά εδάφη με μικρό ποσοστό σε ανθρακικά ορυκτά και όρια Atterberg τέτοια, ώστε συστηματικά να βρίσκονται πάνω από τη «Γραμμή A» στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande (εκτός από ένα μόνο εδαφικό υλικό). Για αργιλικά εδάφη με αυτά τα φυσικά χαρακτηριστικά ισχύει και η παρατήρηση περί καμπυλών εγγενούς συμπίεσης με τα κοίλα στραμμένα προς τα πάνω (καμπυλότητα την οποία εκφράζει η μή γραμμικότητα της Εξ. 10.2).

Στην αρχική εργασία του Burland (1990), η Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης είχε διερευνηθεί, και ως εκ τούτου οριστεί, σε εύρος τιμών κατακόρυφης τάσης από 10 kPa ως 4 MPa. Επεκτείνοντας

τον ορισμό της Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης για τιμές της κατακόρυφης τάσης εκτός αυτών των ορίων, ο Chandler (2000) κατέληξε μετά από στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι κατακόρυφη τάση 20 MPa στην Εξ. 10.3 για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης ( $x = \log \sigma'_v, \sigma'_v$  σε kPa).

$$I_v = 2.6 - 1.475x + 0.075x^2 + 0.0055x^3 \quad (10.3)$$

Οι δοκιμές που χρησιμοποιήθηκαν για να προκύψει η Εξ. 10.3 έγιναν σε άργιλο από την περιοχή Papadaí στην Ιταλία φτάνοντας μέχρι κατακόρυφη τάση 20 MPa (Cotecchia & Chandler, 1997) και σε άργιλο Λονδίνου φτάνοντας μέχρι κατακόρυφη τάση 10 και 20 MPa (Chandler, 2000). Και αυτά τα πειραματικά δεδομένα προέρχονται από δοκιμές σε εδαφικά υλικά με όρια Atterberg ευρισκόμενα πάνω από τη «Γραμμή Α» στο Διάγραμμα Πλαστικότητας του Casagrande. Η διερεύνηση και επέκταση της Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης από τον Chandler (2000) για μεγαλύτερες τιμές της τάσης κάλυψε την απαίτηση που είχε διαπιστώσει και ο ίδιος ο Burland (1990) αφού συχνά δεν ήταν προφανή τα συμπεράσματα από τη σύγκριση καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης σε υπερστερεοποιημένα ή ακόμα και κανονικά στερεοποιημένα φυσικά αργιλικά εδάφη λόγω του μικρού εύρους τιμών τάσης που η Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης ήταν αρχικά ορισμένη.

Η γραμμή εγγενούς συμπίεσης προσδιορίστηκε με βάση την εξέλιξη του λόγου κενών αναζυμωμένων αργιλικών εδαφών με την κατακόρυφη τάση σε δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης. Ο Skempton (1970) είχε συγκεντρώσει τιμές λόγου κενών με το βάθος/κατακόρυφη τάση για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους (με ποσοστό οργανικών μικρότερο από 5% και ποσοστό ανθρακικών ορυκτών μικρότερο από 25%). Οι παρατηρήσεις από αυτά τα στοιχεία υποδεικνύουν ότι η σχέση που συνδέει τον επιτόπου λόγο κενών με τον λογάριθμο της τάσης (κατά τον Terzaghi, 1941, Καμπύλη Καθίζησης κατά την Ιζηματογένεση, Sedimentation Compression Curve) είναι περίπου γραμμική και οι σχετικές καμπύλες συγκλίνουν μεταξύ τους όσο αυξάνεται η τάση. Μετατρέποντας δε τα στοιχεία του λόγου κενών σε αντίστοιχο ποσοστό υγρασίας μέσω της ανηγμένης πυκνότητας στερεάς φάσης  $G_s$  και κανονικοποιώντας μέσω του δείκτη υδαρότητας (Liquidity index) πρακτικά μετατρέπονται σε μία ευθεία. Ορίζοντας τη γραμμή εγγενούς συμπίεσης και την παράμετρο κανονικοποίησης με βάση τα  $e^*_{100}$  και  $e^*_{1000}$ , ο Burland (1990) κανονικοποίησε μέσω του δείκτη κενών τα στοιχεία του Skempton (1970). Κανονικοποιούμενα τα στοιχεία αυτά βρέθηκαν σε μία πολύ στενή ζώνη (στενότερη εκείνης που προέκυψε μετά την κανονικοποίηση με βάση τον δείκτη υδαρότητας από τον Skempton, 1970) διατασσόμενη πρακτικά πα-

ράλληλα της γραμμής εγγενούς συμπίεσης. Μετά από στατιστική επεξεργασία των κανονικοποιημένων αυτών στοιχείων (επιτόπου δείκτης κενών–κατακόρυφη τάση) ο Burland (1990) κατέληξε στην καλύτερη προσέγγιση για τα στοιχεία αυτά, την οποία και ονόμασε Γραμμή Καθίζησης κατά την Ιζηματογένεση (Sedimentation Compression Line). Για τη γραμμή αυτή δεν έδωσε εξίσωση όπως για τη γραμμή εγγενούς συμπίεσης αλλά μόνο συντεταγμένες στο χώρο δείκτη κενών–κατακόρυφης τάσης. Χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες αυτές κανείς ωστόσο μπορεί να αναζητήσει την πολυωνυμική εξίσωση του ελάχιστου βαθμού, έτσι ώστε ο συντελεστής συσχέτισης για αυτές να είναι ίσος με 1. Πράγματι με αυτή τη διαδικασία προκύπτει η Εξ. 10.4 για τη Γραμμή Συμπίεσης κατά την Ιζηματογένεση με βάση τα στοιχεία που επεξεργάστηκε ο Burland (1990) -όπου  $x = \log \sigma'_v$ ,  $\sigma'_v$  σε kPa.

$$I_v = 3.24 - 1.437x + 0.129x^2 - 0.015x^3 \quad (10.4)$$

Όπως παρατηρείται και αυτή η καμπύλη στρέφει ελαφρώς τα κοίλα προς τα πάνω και φαίνεται ότι για μεγάλες τιμές της τάσης ( $> 5$  MPa) αρχίζει σύγκλιση μεταξύ Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης (ΓΕΣ) και Γραμμής Συμπίεσης κατά την Ιζηματογένεση (ΓΣΙ). Δυστυχώς ο συγγραφέας δεν παραθέτει στατιστικούς ελέγχους υπόθεσης για την παραλληλία των δύο καμπυλών (ΓΕΣ και ΓΣΙ) για κάποιο εύρος έστω τιμών της τάσης. Καταλήγοντας ο Burland (1990) συγκρίνει καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης και συμπίεσης κατά την ιζηματογένεση με τις ΓΕΣ και ΓΣΙ στις οποίες κατέληξε, και αποφάνθηκε ότι εκεί που η καθίζηση του ιζήματος για τη δημιουργία του εδαφικού σχηματισμού υπήρξε ταχεία, ο δείκτης κενών για το ίδιο επίπεδο τάσης είναι μικρότερος από εκείνον στην περίπτωση που η καθίζηση υπήρξε αργή, αφού όπως υπέδειξαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε κανονικά στερεοποιημένες αργίλους που βρίσκονταν επί της ΓΣΙ, ο ταχύς ρυθμός της φόρτισης στις δοκιμές συμπιεσομέτρου (σε σχέση με τη φόρτιση κατά την απόθεση του ιζήματος) οδηγούσε τις καμπύλες λόγου κενών–κατακόρυφης τάσης εγγύτερα στη ΓΕΣ. Αντίθετα, αργός ρυθμός φόρτισης σε εργαστηριακές δοκιμές προσομοίωσης ιζηματογένεσης τα οδηγούσε σε υψηλότερες τιμές του δείκτη κενών για την ίδια τάση και διατήρησή τους με την αύξηση της τάσης. Κατά συνέπεια (και γι' αυτό δεν έχει νόημα και η ακριβής εξίσωση για τη ΓΣΙ) η γραμμή συμπίεσης κατά την ιζηματογένεση δεν φαίνεται να είναι μοναδική, σε αντίθεση με τη γραμμή εγγενούς συμπίεσης, αλλά πιθανότατα παράλληλη αυτής σε απόσταση τόση, όση επιβάλλει πιθανότατα η ταχύτητα καθίζησης του ιζήματος κατά τη δημιουργία του εδαφικού σχηματισμού. Η συσχέτιση αυτή μεταξύ ταχύτητας καθίζησης ιζήματος κατά την ιζηματογένεση και θέσης της καμπύλης συμπίεσης κατά την ιζηματογένεση ως προς την καμπύλη εγγενούς συμπίεσης είχε επισημανθεί νωρίτερα και από τους Skempton (1970) και Terza-

ghi (1941) για τις αντίστοιχες καμπύλες σε όρους ποσοστού υγρασίας-βάθους/κατακόρυφης τάσης. Περισσότερα για την παράλληλη μετάθεση της γραμμής συμπίεσης κατά την ιζηματογένεση ως προς τη γραμμή εγγενούς συμπίεσης και την ενσωμάτωσή της στην περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των φυσικών ιζηματογενών αργίλων μπορούν να βρεθούν και στους Cotecchia & Chandler (2000).

Παρά την πρόοδο που επιτεύχθηκε με την επέκταση του Chandler (2000) παρέμεναν ερωτήματα σε ό,τι αφορά τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης ως προς την αναλυτική επεξεργασία του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων και τη συμπεριφορά αναζυμωμένων λεπτόκοκκων εδαφών διαφορετικών από εκείνα που χρησιμοποίησαν οι Burland (1990) και Chandler (2000). Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναλυτική επεξεργασία του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων και στο Κεφάλαιο 13 παρατίθενται τα αποτελέσματα της εργαστηριακής διερεύνησης της Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης ως προς το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών αναζυμωμένων εδαφών, την πλαστικότητα φυσικών εδαφών και τη θέση των ορίων Atterberg αυτών επί του Διαγράμματος Πλαστικότητας του Casagrande (πάνω ή κάτω από τη «Γραμμή Α») καθώς και την κοκκομετρική διαβάθμιση και την ορυκτολογική σύσταση. Ο συνδυασμός δε της χρήσης της Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης και της Γραμμής Συμπίεσης κατά την Ιζηματογένεση (ει δυνατόν ορισμένης αυτής για το συγκεκριμένο εδαφικό υλικό) συνιστά εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη των φυσικών αργίλων και την αξιολόγηση της δομής τους ή την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους από καταστατικά προσομοιώματα.

Στο Παράρτημα Α συγκεντρώνονται οι εξισώσεις για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης, τη Γραμμή Συμπίεσης κατά την Ιζηματογένεση και το θεωρητικό πλαίσιο των εγγενών ιδιοτήτων, όπως παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο παρόν κεφάλαιο.

## **10.4 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΩΝ ΕΓΓΕΝΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ**

### **10.4.1 Η Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης**

Όπως προαναφέρθηκε, η σημασία της Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης, και γενικότερα του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων, είναι ότι αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γραμμή αναφοράς για τη μελέτη της συμπεριφοράς φυσικών ιζηματογενών αργίλων. Θα ήταν σκόπιμη

λοιπόν η κατάληξη σε μία αναλυτική σχέση για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης σε αντίθεση με τις εμπειρικές σχέσεις των Burland (1990) και Chandler (2000). Και αυτό γιατί αποκλίσεις πραγματικών αποτελεσμάτων από μια αναλυτική σχέση δηλώνουν την διαφορά της πραγματικής συμπεριφοράς από το θεωρητικό πλαίσιο (και ως εκ τούτου τυχόν μειονεκτήματα αυτού), ενώ αποκλίσεις πραγματικών αποτελεσμάτων από μια εμπειρική συσχέτιση δηλώνουν απλώς τις διαφορές μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στη μία και στην άλλη περίπτωση.

Ο Bardanis (1999) διατύπωσε την σημασία της κατάληξης σε μία αναλυτική σχέση για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης και επέδειξε ότι για οποιαδήποτε γραμμική συσχέτιση μεταξύ μιας παραμέτρου και του δεκαδικού λογαρίθμου μιας άλλης παραμέτρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια αναλυτική σχέση στην οποία κατέληξε για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης, όταν κανονικοποιείται η γραμμική αυτή συσχέτιση με μία παράμετρο παρόμοια με τον Δείκτη Κενών. Η διατύπωση αυτή έγινε όπως ακολουθεί.

Ας θεωρήσουμε προς στιγμήν μία γραμμική σχέση με τη μορφή της Εξ. 10.5

$$y = a \cdot \log x + b \quad (10.5)$$

όπου τα  $a$  και  $b$  είναι σταθερές. Αυτή είναι η μορφή της εξίσωσης που χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε τη σχέση μεταξύ του λόγου κενών μιας φυσικής ή αναζυμωμένης αργίλου και της κατακόρυφης τάσης που εξασκείται υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως, για τιμές της τάσης μεγαλύτερες εκείνης που αντιστοιχεί στην θεωρούμενη αρχική τιμή του λόγου κενών (του  $b$  δηλαδή στη γενική μορφή, οπότε το  $a$  είναι το  $C_c$  ή το  $C_r$  ανάλογα αν έχουμε περάσει την τάση φαινόμενης προφορτίσεως<sup>3</sup> ή όχι αντίστοιχα). Εισάγοντας μία παράμετρο κανονικοποίησης όμοια με τον Δείκτη Κενών  $I_v$  έχουμε:

$$\begin{aligned} I_v(x) &= \frac{y(x) - y(x=100)}{y(x=100) - y(x=1000)} = \\ &= \frac{(a \cdot \log x + b) - (a \cdot \log 100 + b)}{(a \cdot \log 100 + b) - (a \cdot \log 1000 + b)} = \end{aligned}$$

<sup>3</sup> Ο όρος «τάση φαινόμενης προφορτίσεως» (Bardanis & Kanvadas, 2003b) χρησιμοποιείται για να δηλώσει την τάση διαρροής (yield stress) που παρατηρείται στις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης για λόγους συνέπειας με γενικότερη ερμηνεία της δομής των εδαφικών υλικών από την απλή προφόρτιση. Ο όρος «προφόρτιση» δε, αντί του όρου «προστερεοποίηση» χρησιμοποιείται για να συμπεριλάβει και φαινόμενα σε εδαφικά υλικά που δεν υπάρχει (ή συμβαίνει πρακτικά «ακαριαία») η στερεοποίηση, όπως οι άμμοι.

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\log x - \log 100}{\log 100 - \log 1000} = \\
 &= \frac{\log x - 2}{2 - 3} = \\
 &= 2 - \log x
 \end{aligned}$$

Κατά συνέπεια όποιο και αν είναι το εύρος των τιμών της παραμέτρου  $y$  και οποιουδήποτε είδους παράμετρος και αν είναι αυτή, εφόσον συνιστά γραμμικό συνδυασμό του δεκαδικού λογάριθμου της παραμέτρου  $x$ , η εξίσωση που συνδέει την παράμετρο κανονικοποίησης με τη μορφή του Δείκτη Κενών  $I_v$  που εισήγαγε ο Burland (1990) με το δεκαδικό λογάριθμο της παραμέτρου  $x$  είναι:

$$I_v(x) = 2 - \log_{10} x \quad (10.6)$$

και ως εκ τούτου η σχέση που ισχύει στην περίπτωση των κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης είναι:

$$I_v = 2 - \log_{10} \sigma'_v \quad (10.7)$$

Η γραφική παράσταση της Εξ. 10.7 για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 10.1 μαζί με τις γραφικές παραστάσεις των εμπειρικών συσχετίσεων για αυτήν των Burland (1990) και Chandler (2000) (Εξ. 10.2 και 10.3 αντίστοιχα) και τη γραφική παράσταση της Γραμμής Συμπίεσης κατά την Ιζηματογένεση (Εξ. 10.4) για σύγκριση. Για καλύτερη σύγκριση των καμπυλών μεταξύ τους παρουσιάζονται δύο διαγράμματα, το πρώτο για το εύρος τιμών κατακόρυφης τάσης 1 έως 100.000 kPa και το δεύτερο για το εύρος τιμών κατακόρυφης τάσης 100 έως 1.000 kPa.

Η ίδια εξίσωση με την Εξ. 10.7 για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης έχει προταθεί και από τον Dineen (1997) χωρίς όμως να παρατίθεται αναλυτική απόδειξη για αυτήν. Όπως διευκρινίζει ο ίδιος (Dineen, 1998), η εξίσωση αυτή προέκυψε μετά από στατιστική επεξεργασία των δικών του αποτελεσμάτων μονοδιάστατης συμπίεσης σε δύο αργίλους υψηλής πλαστικότητας από την Αφρική (με μεγάλη περιεκτικότητα σε οργανικά), σε Καολίνη τύπου Speswhite και σε Άργιλο Λονδίνου. Έχει σημασία να τονιστεί ότι ο Dineen (1997) κατέληξε στην ίδια εξίσωση με την Εξ. 10.7 μετά από στατιστική επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων μονοδιάστατης συμπίεσης σε αργιλικά εδάφη όπως ο καολίνης και η άργιλος Λονδίνου (όμοιων χαρακτηριστικών με αυτά



του δείγματος των Burland, 1990, και Chandler, 2000) αλλά και αργιλικά εδάφη με όρια Atterberg ευρισκόμενα κάτω από την «Γραμμή Α» του διαγράμματος πλαστικότητας του Casagrande.

Η ουσία της Εξ. 10.7, προταθείσας ως αναλυτικής σχέσης, είναι ότι εάν όλα τα αναζυμωμένα αργιλικά εδάφη ιζηματογενούς προελεύσεως όταν συμπιέζονταν υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως κατέληγαν σε καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης που ήταν πράγματι ευθείες (το οποίο αποτελεί τη βασική παραδοχή όταν χρησιμοποιούνται σχέσεις της γενικής μορφής της Εξ. 10.5 για να περιγράψουμε τη μεταβολή του λόγου κενών με το λογάριθμο της κατακόρυφης τάσης και όταν εισάγουμε παραμέτρους που αντιστοιχούν στη συμπεριφορά αυτή σε καταστατικά προσομοιώματα), τότε, όταν αυτές κανονικοποιούνται μέσω μιας παραμέτρου κανονικοποίησης όπως ο Δείκτης Κενών, θα έπρεπε όλες να συμπίπτουν με τη μία και μοναδική ευθεία στο χώρο Δείκτη Κενών-Κατακόρυφης Τάσης που περιγράφεται από την Εξ. 10.7. Η γραμμή που περιγράφεται από αυτήν την εξίσωση (θεωρούμενη ως αποτέλεσμα αναλυτικής απόδειξης) θα αναφέρεται πλέον ως *Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης* (Theoretical Intrinsic Compression Line).

Τα εδαφικά υλικά ωστόσο είναι φυσικά υλικά και ενώ μπορούν να περιγραφούν γενικά από μία μαθηματική θεωρία πρέπει να αναμένονται και αποκλίσεις από αυτήν. Στην περίπτωση αυτή, η απόκλιση από τη μαθηματική θεωρία εκφράζεται με την καμπυλότητα των Καμπυλών Μονοδιάστατης Συμπίεσης, οι οποίες σπάνια προκύπτουν ευθείες. Αυτό έχει παρατηρηθεί από πολλούς ερευνητές οι οποίοι αναφέρουν ότι οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης είναι ελαφρά καμπύλες με τα κοίλα προς τα πάνω (Skempton, 1944 & 1970, Burland, 1990, Chandler, 2000) υπό την προϋπόθεση ότι τα δοκίμια των υλικών ήταν αρχικά πλήρως κορεσμένα (όπου προηγουμένως και επιπλέον Bardanis, 1998 & 1999, Μπαρδάνης & Καβουνίδης, 2001β, Bardanis & Kanvadas, 2003b) και τα χρησιμοποιηθέντα αργιλικά εδάφη είχαν όρια Atterberg πάνω από τη «Γραμμή Α» στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande. Αν κάποια από αυτές τις προϋποθέσεις δεν ισχύει, δηλαδή ο αρχικός βαθμός κορεσμού είναι μικρότερος του 100% (Burland, 1990, Μπαρδάνης & Καβουνίδης, 2001β, Bardanis & Kanvadas, 2003b) ή τα χρησιμοποιηθέντα αργιλικά εδάφη είχαν όρια Atterberg κάτω από τη «Γραμμή Α» στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande (Dineen, 1997, αλλά και πειραματικά δεδομένα των Anagnostopoulos, et al., 1991, και Kanvadas, et al., 1993), τότε οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης είναι ελαφρά καμπύλες με τα κοίλα προς τα κάτω. Από τα μέχρι σήμερα δημοσιευμένα στοιχεία λοιπόν φαίνεται ότι παρά τις αρχικές εξισώσεις που προτάθηκαν από τους Burland (1990) και Chandler (2000) και υποδεί-

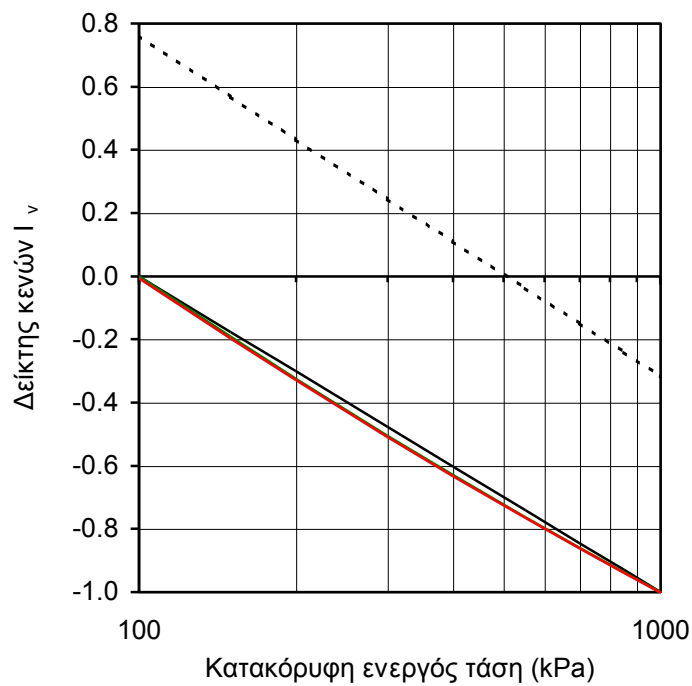
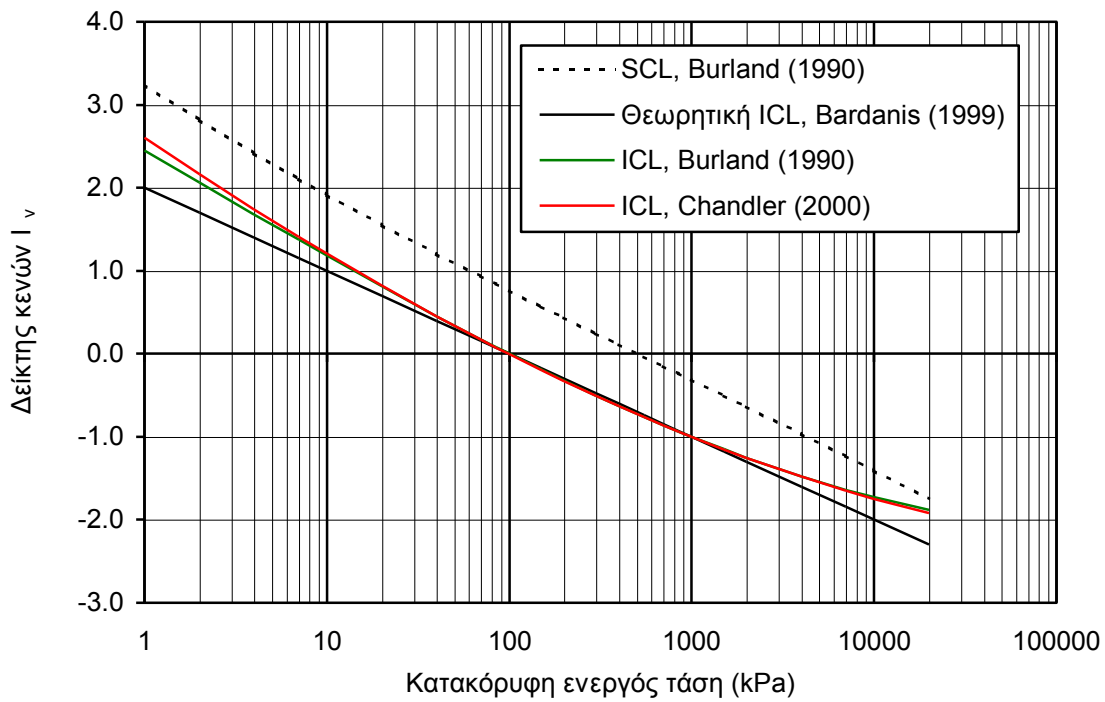
κνυαν ότι οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης δεν είναι ευθείες αλλά καμπύλες με τα κοίλα στραμμένα προς τα πάνω, άλλα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι μπορεί να είναι και καμπύλες με τα κοίλα στραμμένα προς τα κάτω ανάλογα με τη φύση των αργιλικών εδαφών, όπως αυτή εκφράζεται από τα όρια Atterberg. Αργιλικά εδάφη με όρια Atterberg πάνω από τη «Γραμμή Α» του διαγράμματος πλαστικότητας του Casagrande φαίνεται να έχουν καμπύλες εγγενούς συμπίεσης με τα κοίλα στραμμένα προς τα πάνω (Burland, 1990, και Chandler, 2000), ενώ αργιλικά εδάφη με όρια Atterberg κάτω από τη «Γραμμή Α» φαίνεται να έχουν καμπύλες εγγενούς συμπίεσης με τα κοίλα στραμμένα προς τα κάτω (Anagnostopoulos, et al., 1991, Kavadas, et al., 1993, και Dineen, 1997). Η μοναδική μέχρι σήμερα προσπάθεια στατιστικής επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων με όρια Atterberg και πάνω και κάτω από τη «Γραμμή Α» (Dineen, 1997) οδήγησε σε εμπειρική συσχέτιση για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης όμοια με την αναλυτικά αποδειχθείσα σχέση για αυτήν. Κατά συνέπεια διαφαίνεται ότι η μαθηματική σχέση που φαίνεται να ισχύει γενικά για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης είναι η Εξ. 10.7 (ως αναλυτικά αποδειχθείσα μαθηματική σχέση) και οι αποκλίσεις από αυτήν είναι συνάρτηση της φύσης των εδαφών με την καμπυλότητα των κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης να σχετίζεται με τα όρια Atterberg. Η εξάρτηση της καμπυλότητας των κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης από τα φυσικά χαρακτηριστικά των αργιλικών εδαφών διερευνήθηκε πειραματικά και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 13 του δεύτερου μέρους.

Η σημασία της Θεωρητικής Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης (ΘΓΕΣ) εκφράζεται καλύτερα και ως εξής. Αν θεωρήσουμε μία αναζυμωμένη άργιλο που υποβάλλεται σε μονοδιάστατη συμπίεση και η προκύπτουσα καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης κανονικοποιείται μέσω του Δείκτη Κενών, τότε ανακύπτουν ερωτήματα σχετικά με την ερμηνεία της σύγκρισής της με τη ΘΓΕΣ. Αν η κανονικοποιημένη καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης συγκριθεί με τη ΘΓΕΣ τότε τυχόν αποκλίσεις της από αυτήν δηλώνουν ότι η καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης δεν είναι ευθεία ή ενδεχομένως ότι έχει μεσολαβήσει και σημαντική δευτερεύουσα στερεοποίηση. Αν η κανονικοποιημένη καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης συγκριθεί με τη ΓΕΣ όπως αυτή εκφράζεται από μια εμπειρική συσχέτιση, τότε τυχόν αποκλίσεις της από αυτήν δηλώνουν την απόκλιση της συγκεκριμένης κανονικοποιημένης καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης από τα χαρακτηριστικά μονοδιάστατης συμπίεσης των εδαφών που χρησιμοποίησαν οι ερευνητές που κατέληξαν στη συγκεκριμένη εμπειρική συσχέτιση με την οποία γίνεται η σύγκριση. Καταλήγοντας λοιπόν, κάθε νέα κανονικοποιημένη καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης μπορεί απλώς να συγκριθεί με τη ΘΓΕΣ και να προκύψουν συμπεράσματα. Αντίθετα σε σχέση με οποιαδήποτε εμπειρική συσχέτιση για τη ΓΕΣ, κάθε καινούργια κανονικοποιημένη καμπύλη

μονοδιάστατης συμπίεσης δεν θα έπρεπε απλώς και μόνο να συγκρίνεται με αυτήν αλλά ταυτόχρονα να προστίθεται και στα δεδομένα από τα οποία προέκυψε η εμπειρική αυτή συσχέτιση. Κατά συνέπεια η ΘΓΕΣ δεν χρησιμεύει απλώς ως μία γραμμή αναφοράς για την αξιολόγηση της επίδρασης της δομής των αργιλικών εδαφών αλλά και ως γραμμή αναφοράς για την αξιολόγηση της γραμμικότητας των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης. Η σημασία των παραπάνω επιδεικνύεται στο Κεφάλαιο 13 εν όψει των αποτελεσμάτων των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Από την άλλη πλευρά βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι οι υπάρχουσες εμπειρικές συσχετίσεις για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης προβλέπουν με επιτυχία την καμπύλωση των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης προς τα πάνω για πολύ υψηλές τιμές της τάσης, η οποία παρατηρείται ανεξαρτήτως φυσικών χαρακτηριστικών των αργιλικών εδαφών. Αυτό ωστόσο δεν συνιστά αδυναμία της Θεωρητικής Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης αλλά αποτέλεσμα της έλλειψης γραμμικότητας μεταξύ λόγου κενών και λογαρίθμου της τάσης για τόσο υψηλές τιμές της τάσης.

Καταλήγοντας λοιπόν, η Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης, όπως εισήχθη ως έννοια από τον Burland (1990), είναι μία σημαντική γραμμή αναφοράς για τη μελέτη της δομής φυσικών ιζηματογενών αργίλων (σε συνδυασμό και με τη Γραμμή Συμπίεσης κατά την Ιζηματογένεση). Κάθε νέα κανονικοποιημένη καμπύλη εγγενούς συμπίεσης ωστόσο, συγκρινόμενη με οποιαδήποτε από τις εμπειρικές συσχετίσεις που εκφράζουν τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης, δεν είναι απλώς ένα σύνολο δεδομένων προς σύγκριση με αυτή μόνο, αλλά και ένα σύνολο δεδομένων που θα έπρεπε να προστεθεί σε εκείνα βάσει των οποίων προέκυψε η εμπειρική συσχέτιση. Από την άλλη πλευρά η Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γραμμή αναφοράς για τη μελέτη της δομής των φυσικών ιζηματογενών αργίλων και ως γραμμή αναφοράς για τη συμπεριφορά των ίδιων των αναζυμωμένων αργίλων. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των εμπειρικών συσχετίσεων που εκφράζουν την Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης είναι η πρόβλεψη της καμπυλότητας προς τα πάνω των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης για πολύ μεγάλες τιμές της κατακόρυφης τάσης. Η Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης αντίθετα αδυνατεί να το προβλέψει αυτό αφού βασίζεται στη θεώρηση σταθερής τιμής του Δείκτη Συμπίεσης (το οποίο όμως άλλωστε είναι και κεντρική παραδοχή ως προς την οποία απαιτείται συνέπεια). Για τιμές κατακόρυφης τάσης μέχρι 7 MPa περίπου (όπως επιδεικνύεται από τα πειραματικά αποτελέσματα που παρατίθενται στο Κεφάλαιο 13) η Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης συνιστά σαφώς πιο ελκυστικό εργαλείο για τη μελέτη της συμπεριφοράς τόσο των φυσικών όσο και των αναζυμωμένων ιζηματογενών αργίλων.



**Σχήμα 10.1.** Γραφική απεικόνιση των συσχετίσεων που περιγράφουν τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (ΓΕΣ) και την Γραμμή Συμπίεσης κατά την Ιζηματογένεση (SCL) για τιμές της κατακόρυφης τάσης από 1 έως 100000 kPa και σε μεγέθυνση από 100 έως 1000 kPa.

### 10.4.2 Η Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης

Με βάση τα στοιχεία από τη βιβλιογραφία που αναφέρθηκαν, δηλαδή τις καταγραφείσες αποκλίσεις των κανονικοποιημένων καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης από τη θεωρητική γραμμή εγγενούς συμπίεσης ανάλογα με το αν έχουν όρια Atterberg πάνω από τη «Γραμμή Α» στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande (οπότε στρέφουν τα κοίλα προς τα πάνω) ή κάτω από αυτήν (οπότε στρέφουν τα κοίλα προς τα κάτω) στη συνέχεια της παραγράφου διατυπώνεται μία γενική σχέση για τη γραμμή εγγενούς συμπίεσης. Η σχέση αυτή ανάλογα με την παρατηρούμενη καμπυλότητα των κανονικοποιημένων καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης στο διάστημα μεταξύ 100 και 1000 kPa και την αρχική τιμή του λόγου κενών των αναζυμωμένων εδαφών επιτρέπει την πρόβλεψη ολόκληρης της κανονικοποιημένης καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης, δηλαδή της γραμμής εγγενούς συμπίεσης ως συνάρτηση του είδους του εδάφους, κατά τρόπο που για εδαφικά υλικά με ευθείες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης να εκφυλίζεται στην Εξ. 10.7. Για την περιγραφή της γραμμής εγγενούς συμπίεσης με αυτά τα χαρακτηριστικά θα χρησιμοποιείται ο όρος *Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης* (Generalised Intrinsic Compression Line).

Στο Σχ. 10.2α παρουσιάζεται η Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.7) και η κάθετη σε αυτήν που διέρχεται από σημείο επί της Θεωρητικής Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης για τιμή της τάσης ίση με το λογαριθμικό μέσο μεταξύ 100 και 1000 kPa κατακόρυφης τάσης ( $= 10^{[\log 100 + \log 1000]/2} = 10^{2.5} = 316.23 \text{ kPa}$ ). Από τη συνθήκη καθετότητας δύο ευθειών (γινόμενο παραγώγων ίσο με -1) και την απαίτηση διέλευσης της καθέτου στη Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης από το σημείο ( $\sigma'_v = 10^{2.5}$ ,  $I_v = -0.5$ ), εύκολα προκύπτει ότι η εξίσωση για την κάθετο δίνεται από την Εξ. 10.8.

$$I_v = \log_{10} \sigma'_v - 3 \quad (10.8)$$

Έχοντας ορίσει την εξίσωση της καθέτου στη Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης, στο Σχ. 10.2β ορίζεται η *Εγγενής Παράμετρος Απόστασης*  $d^*$  (Intrinsic Distance Parameter). Το μέγεθος αυτό χρησιμοποιείται για να εκφράσει την καμπυλότητα των κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης και ορίζεται ως η απόσταση τους από το σημείο ( $\log \sigma'_v = 2.5$ ,  $I_v = -0.5$ ) επί της Θεωρητικής Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης. Η παράμετρος απόστασης  $d^*$  λοιπόν μετρείται επί της καθέτου στη Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης και έχει θετικό πρόσημο εάν η κανονικοποιημένη καμπύλη εγγενούς συμπίεσης στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω ή αρνητικό εάν η κανονικοποιημένη καμπύλη εγγενούς συμπίεσης στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω. Πρέπει να

τονιστεί ότι η Εγγενής Παράμετρος Απόστασης  $d^*$  εκφράζει την παρατηρούμενη καμπυλότητα κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης (δηλαδή καμπυλών συμπίεσης αναζυμωμένων υλικών) και όχι την παρατηρούμενη καμπυλότητα καμπυλών συμπίεσης φυσικών εδαφών.

Για τον υπολογισμό της εγγενούς παραμέτρου απόστασης χρησιμοποιούνται οι τιμές του δείκτη κενών για τιμές της κατακόρυφης τάσης εκατέρωθεν του λογαριθμικού μέσου μεταξύ 100 και 1000 kPa κατακόρυφης τάσης συν ή πλην την τιμή της εγγενούς παραμέτρου απόστασης διά της τετραγωνικής ρίζας του 2 (αφού η κλίση της καθέτου στη Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης είναι ίση με 1, ιδέ Σχ. 10.2β) ανάλογα με το αν η κανονικοποιημένη καμπύλη στρέφεται κοίλα προς τα κάτω ή προς τα πάνω αντίστοιχα. Πράγματι αν θεωρήσουμε τιμές της κατακόρυφης τάσης  $a$  και  $b$ , τέτοιες ώστε  $a < 10^\Delta < b$  ( $\Delta = 2.5 + d^*/\sqrt{2}$ ) και υποθέσουμε προς το παρόν γραμμική παρεμβολή μεταξύ  $I_{v,a}$  και  $I_{v,b}$ , τότε πρέπει να ισχύει:

$$\begin{aligned} \frac{I_{v,10^\Delta} - I_{v,a}}{\log 10^\Delta - \log a} &= \frac{I_{v,b} - I_{v,a}}{\log b - \log a} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{I_{v,10^\Delta} - I_{v,a}}{I_{v,b} - I_{v,a}} &= \frac{\log 10^\Delta - \log a}{\log b - \log a} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{I_{v,10^\Delta} - I_{v,a}}{I_{v,b} - I_{v,a}} &= \frac{\Delta \log 10 - \log a}{\log b - \log a} \Rightarrow \\ \frac{I_{v,10^\Delta} - I_{v,a}}{I_{v,b} - I_{v,a}} &= \frac{\Delta - \log a}{\log b - \log a} \end{aligned}$$

αλλά εξ ορισμού είναι:

$$I_{v,10^\Delta} = -0.5 + d^*/\sqrt{2} = -0.5 - 2.5 + 2.5 + d^*/\sqrt{2} = -3 + \Delta$$

οπότε αντικαθιστώντας, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta - 3 - I_{v,a}}{I_{v,b} - I_{v,a}} &= \frac{\Delta - \log a}{\log b - \log a} \Rightarrow \\ \Rightarrow \log \frac{b}{a} \cdot \Delta - \log \frac{b}{a} \cdot (I_{v,a} + 3) &= (I_{v,b} - I_{v,a}) \cdot \Delta - (I_{v,b} - I_{v,a}) \cdot \log a \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow (\log \frac{b}{a} - I_{v,b} + I_{v,a}) \cdot \Delta &= \log \frac{b}{a} \cdot (I_{v,a} + 3) - (I_{v,b} - I_{v,a}) \cdot \log a \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta &= \frac{\log \frac{b}{a} \cdot (I_{v,a} + 3) - (I_{v,b} - I_{v,a}) \cdot \log a}{\log \frac{b}{a} - I_{v,b} + I_{v,a}} \end{aligned}$$

στην οποία αντικαθιστώντας το  $\Delta$  προκύπτει η Εξ. 10.9 για την εγγενή παράμετρο απόστασης.

$$d^* = \sqrt{2} \cdot \left( \frac{\log \frac{b}{a} \cdot (I_{v,a} + 3) - (I_{v,b} - I_{v,a}) \cdot \log a}{\log \frac{b}{a} - I_{v,b} + I_{v,a}} - 2.5 \right) \quad (10.9)$$

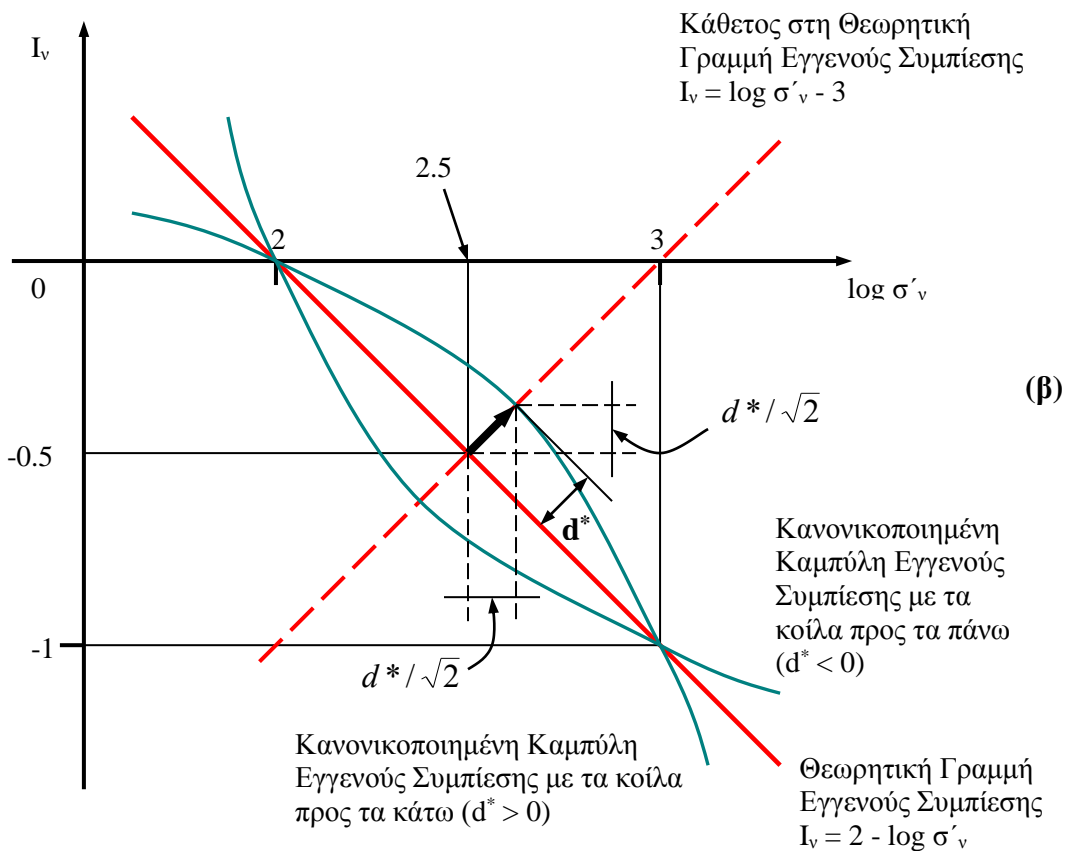
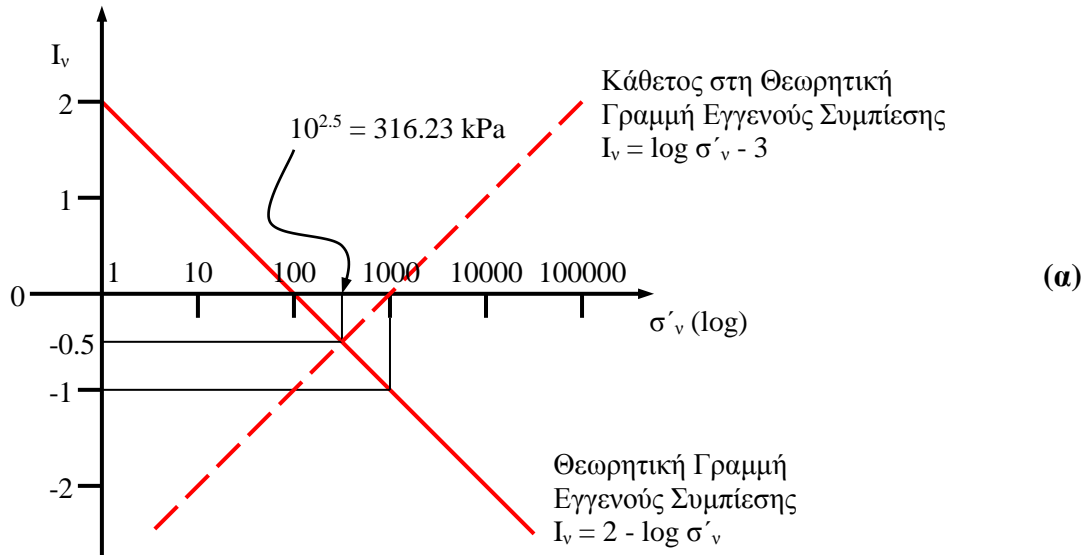
Η διατύπωση της Εξ. 10.9 έχει βασιστεί στην παραδοχή γραμμικής μεταβολής του λόγου (και άρα και του δείκτη) κενών μεταξύ των τιμών της κατακόρυφης τάσης  $a$  και  $b$ . Αυτό φαίνεται καταρχήν αντιφατικό όταν η διατύπωση της γενικευμένης καμπύλης εγγενούς συμπίεσης βασίζεται στην έλλειψη γραμμικότητας των κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης. Αν όμως τα  $a$  και  $b$  είναι πολύ κοντά στην τάση  $10^A$  τότε πράγματι η υπόθεση γραμμικής μεταβολής του λόγου κενών μεταξύ των τιμών τους είναι λογική. Επειδή στην πράξη ωστόσο δεν είναι δυνατός ο περιορισμός της διαφοράς μεταξύ των  $a$  και  $b$  τόσο πολύ, αλλά αντίθετα θα χρησιμοποιηθούν κάποιες τιμές που θα έχουν απόσταση από την τάση  $10^A$  (συνηθέστερα οι τιμές 200 και 400 kPa) είναι σκόπιμο οι προσδιοριζόμενες τιμές της εγγενούς παραμέτρου απόστασης που υπολογίζονται με την Εξ. 10.9, να διορθώνονται λόγω καμπυλότητας των κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης (βλ. Κεφάλαιο 13). Προφανώς η προσαύξηση αυτή είναι τόσο πιο μεγάλη όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του  $d^*$  (δηλαδή όσο πιο μεγάλη είναι η καμπυλότητα).

Έχοντας ορίσει την εγγενή παράμετρο απόστασης  $d^*$  επιχειρείται η διατύπωση μιας εξίσωσης για τη Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης. Θα χρησιμοποιηθεί μία πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού της μορφής

$$I_v(x) = \alpha + \beta x + \gamma x^2 + \delta x^3 \quad (10.10)$$

όπου  $x = \log \sigma'_v$ . Ο λόγος για τον οποίο υιοθετήθηκε πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού για τη διατύπωση της ημιεμπειρικής γενικευμένης γραμμής εγγενούς συμπίεσης είναι καθαρά για

λόγους συμβατότητας με τις αμιγώς εμπειρικές εξισώσεις των Burland (1990) και Chandler (2000) για τη γραμμή εγγενούς συμπίεσης.



**Σχήμα 10.2.** α) Ορισμός της καθέτου στη θεωρητική γραμμή εγγενούς συμπίεσης, και β) ορισμός της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$ .



Η Εξ. 10.10 πρέπει να ικανοποιεί τις εξής απαιτήσεις σε ό,τι αφορά τα σημεία από τα οποία διέρχεται στο χώρο δείκτη κενών-κατακόρυφης τάσης:

1. Όταν  $\sigma'_v = 100 \text{ kPa}$  ( $x = 2$ ) πρέπει εξ ορισμού του δείκτη κενών  $I_v$ ,  $I_v = 0$ . Άρα:

$$I_v(x=2) = \alpha + 2\beta + 2^2\gamma + 2^3\delta = 0 \quad (10.11)$$

2. Όταν  $\sigma'_v = 1000 \text{ kPa}$  ( $x = 3$ ) πρέπει εξ ορισμού του δείκτη κενών  $I_v$ ,  $I_v = -1$ . Άρα:

$$I_v(x=3) = \alpha + 3\beta + 3^2\gamma + 3^3\delta = -1 \quad (10.12)$$

3. Όταν  $\sigma'_v = 10^\Delta \text{ kPa}$  ( $x = \Delta$ ), όπου  $\Delta = 2.5 \pm d^*/\sqrt{2}$  πρέπει εξ ορισμού της παραμέτρου απόστασης  $d^*$ ,  $I_v = -0.5 \pm d^*/\sqrt{2} = -0.5 - 2.5 + 2.5 \pm d^*/\sqrt{2} = -3 + \Delta$ . Άρα:

$$I_v(x=\Delta) = \alpha + \Delta\beta + \Delta^2\gamma + \Delta^3\delta = \Delta - 3 \quad (10.13)$$

4. Όταν  $\sigma'_v = 1 \text{ kPa}$  ( $x = 0$ ) πρέπει εξ ορισμού του δείκτη κενών  $I_v$ ,  $I_v = \frac{e^*_{100} - e^*_{1000}}{e^*_{100} - e^*_{1000}}$ . Άρα:

$$I_v(x=0) = \alpha = \frac{e^*_{100} - e^*_{1000}}{e^*_{100} - e^*_{1000}} \quad (10.14)$$

Από την Εξ. 10.14 είναι προφανές ότι η τιμή της σταθεράς  $\alpha$  είναι η τιμή του δείκτη κενών όταν γίνει  $x = \log \sigma'_v = 0$ , δηλαδή  $\sigma'_v = 1 \text{ kPa}$ . Όπως επιδεικνύεται στο Κεφάλαιο 13, η τιμή αυτή μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα από εμπειρικές συσχετίσεις με τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών, αλλά αποτελεί μάλλον συνάρτηση του αρχικού ποσοστού υγρασίας εκτός από τη φύση του ίδιου του υλικού.

5. Επίσης η παράγωγος του δείκτη κενών με βάση την Εξ. 10.10 είναι:

$$I_v'(x) = \beta + 2\gamma x + 3\delta x^2 \quad (10.15)$$

η οποία εκφράζει την κλίση της συνάρτησης του δείκτη κενών με τον λογάριθμο της κατακόρυφης τάσης. Αυτή η κλίση με δεδομένο τον ορισμό της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$

και της καθέτου στη Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης καθώς και τη διαφαινόμενη τάση καμπύλωσης των κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης παλινδρομικά ως προς τη Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης πρέπει να είναι η ίδια με την κλίση της Θεωρητικής Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης για τιμή του λογαρίθμου της τάσης ίση με  $\Delta = 2.5 \pm d^*/\sqrt{2}$ , δηλαδή ίση με  $-1$  (συμμετρία των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης ως προς την κάθετο στη θεωρητική γραμμή εγγενούς συμπίεσης). Από το συλλογισμό αυτό και την Εξ. 10.15 προκύπτει:

$$\begin{aligned} I_V' = -1 &= \beta + 2 \gamma \Delta + 3 \delta \Delta^2 \Rightarrow \\ \Rightarrow \beta + 2 \Delta \gamma + 3 \Delta^2 \delta &= -1 \end{aligned} \quad (10.16)$$

Εκτός από τις παραπάνω απαιτήσεις που μεταφράζονται σε εξισώσεις, οι τιμές των  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  πρέπει να συνιστούν τέτοιες συναρτήσεις της παραμέτρου απόστασης  $d^*$ , ώστε όταν η παράμετρος απόστασης μηδενίζεται, οπότε βρισκόμαστε επί της Θεωρητικής Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης) οι τιμές αυτές να γίνονται:

$$\alpha = 2, \quad \beta = -1, \quad \gamma = \delta = 0 \quad (10.17)$$

ώστε η εξίσωση της Γενικευμένης Καμπύλης Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.10) να εκφωλίζεται στην εξίσωση για τη Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.7).

Οι Εξ. 10.11 έως 10.13 και 10.16 σχηματίζουν σύστημα τεσσάρων εξισώσεων με τέσσερις αγνώστους τις τέσσερις σταθερές της Εξ. 10.10,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$ . Επιλύοντας το σύστημα αυτό<sup>4</sup> ως προς  $\Delta$  (όπου  $\Delta = 2.5 \pm d^*/\sqrt{2}$ ), προκύπτουν οι εξής τιμές για τις σταθερές  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$ :

$$\alpha = 2 (\Delta^4 + 8 \Delta^3 - 68 \Delta^2 + 126 \Delta - 54) / M \quad (10.18)$$

$$\beta = - (\Delta^4 + 20 \Delta^3 - 114 \Delta^2 + 130 \Delta + 36) / M \quad (10.19)$$

$$\gamma = (6 \Delta^3 - 15 \Delta^2 - 38 \Delta + 95) / M \quad (10.20)$$

$$\delta = - (4 \Delta^2 - 20 \Delta + 25) / M \quad (10.21)$$

<sup>4</sup> Με χρήση του Mathcad 7 Professional της MathSoft. Η επίλυση παρατίθεται στο Παράρτημα Β.

όπου

$$M = (\Delta^2 - 5\Delta + 6)^2 \quad (10.22)$$

Για να ικανοποιείται η συνθήκη για τις σταθερές της Εξ. 10.10 όταν γίνεται  $d^* = 0$  ( $\Delta = 2.5$ ), οπότε η Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης εκφυλίζεται στη Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης, πρέπει πρώτα να ελεγχθεί ότι η τιμή  $M$  δεν μηδενίζεται για  $\Delta = 2.5$  και άρα δεν απειρίζονται οι τιμές των  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , και  $\delta$ . Πράγματι οι λύσεις της εξίσωσης  $M = 0$  είναι οι  $M = 2$  και  $M = 3$ , και οι δύο διάφορες της τιμής 2.5. Κατά συνέπεια για  $\Delta = 2.5$  η τιμή  $M$  δεν μηδενίζεται.

Με εξασφαλισμένο ότι δεν γίνεται  $M = 0$  για  $\Delta = 2.5$ , προκύπτει πράγματι για  $\Delta = 2.5$  ότι  $\alpha = 2$ ,  $\beta = -1$ ,  $\gamma = 0$  και  $\delta = 0$ .

Κατά συνέπεια οι λύσεις για τις σταθερές  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  από τις Εξ. 10.18 έως 10.21 ικανοποιούν και την απαίτηση για εκφυλισμό της Γενικευμένης Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης, όπως εκφράζεται από την Εξ. 10.10, στη Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης, όπως εκφράζεται από την Εξ. 10.7, για τιμή της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^* = 0$ . Έτσι προκύπτει ότι αν έχουν προσδιοριστεί οι τιμές του εγγενούς λόγου κενών στα 100 και στα 1000 kPa κατακόρυφης τάσης και η εγγενής παράμετρος απόστασης  $d^*$ , είτε από απευθείας μέτρηση, είτε από πρόβλεψη μέσω εμπειρικών συσχετίσεων, τότε μπορεί να προβλεφθεί η Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης ( $I_v - \log \sigma'_v$ ) και από αυτήν η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης ( $e - \sigma'_v$ ) που αντιστοιχεί στο εδαφικό υλικό, για οποιαδήποτε εδαφικά υλικά.

Η αναλυτική αυτή προσέγγιση για τη Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης έχει δύο προβλήματα. Πρώτον, οι Εξ. 10.18 έως 10.21 είναι αρκετά πολύπλοκες για να επιλύονται κάθε φορά για την υπολογισθείσα τιμή της  $d^*$ . Αυτό το πρόβλημα επιλύεται εύκολα μέσω της σχεδίασης των τιμών των σταθερών  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$ , απευθείας μάλιστα με την εγγενή παράμετρο απόστασης  $d^*$ , και όχι την ενδιάμεση παράμετρο  $\Delta = 2.5 \pm d^*/\sqrt{2}$  που χρησιμοποιήθηκε χάριν απλοποίησης της μορφής των εξισώσεων (Σχ. 10.3). Το Σχ. 10.3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γραφικό υπολογισμό της τιμής των σταθερών  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$ , ή αντιστοίχως ο Πίν. 10.1 στον οποίο υπάρχουν πινακοποιημένες οι τιμές των σταθερών για δεδομένες τιμές του  $d^*$  (γίνεται γραμμική παρεμβολή για τιμές του  $d^*$  ενδιάμεσες των τιμών του πίνακα).

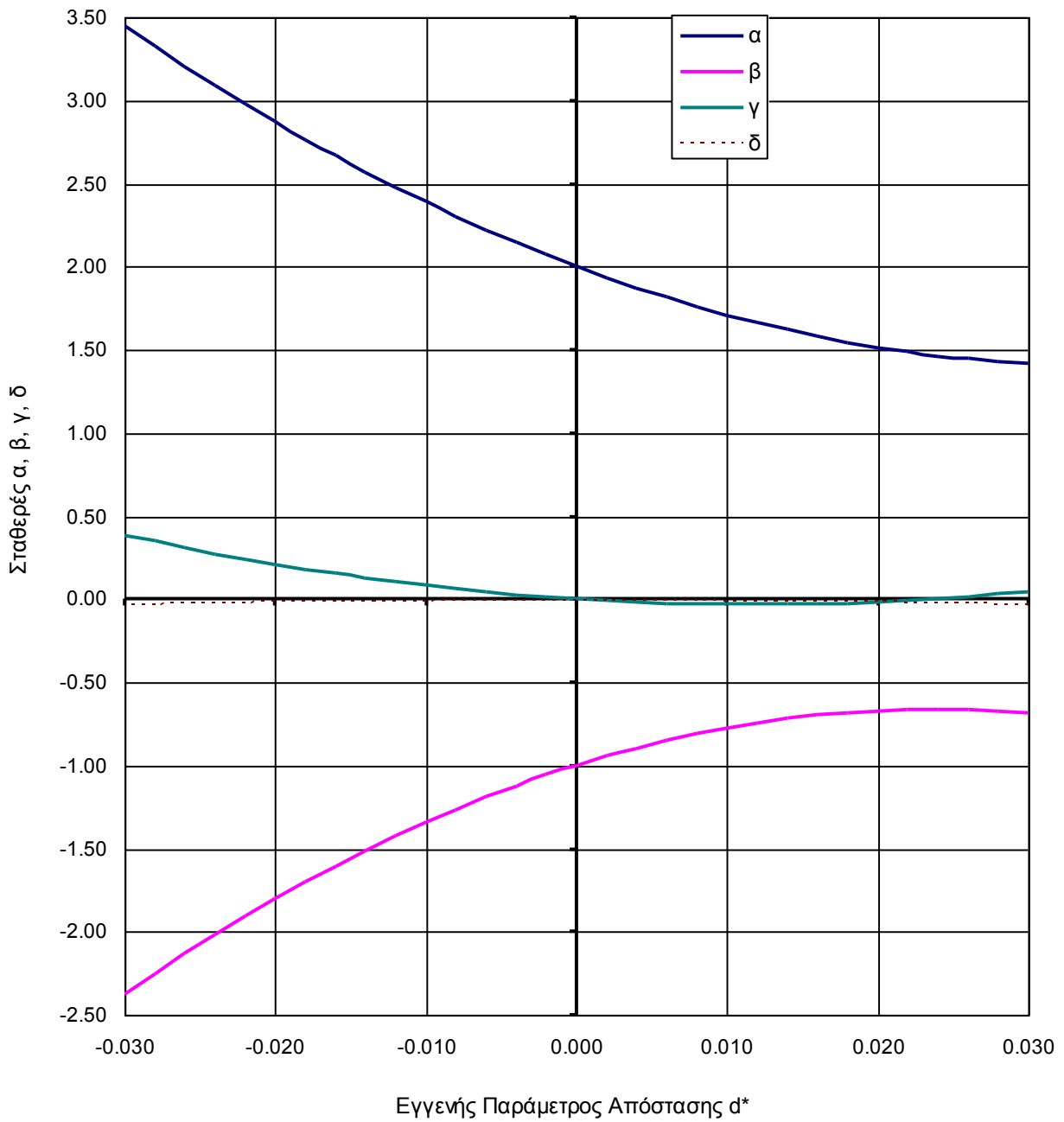
Το δεύτερο πρόβλημα είναι η απόδειξη της συσχέτισης  $e^*_1$  και  $d^*$ , μέσω των Εξ. 10.14 και 10.18 με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα στις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης που πραγματοποιήθηκαν, όπως άλλωστε και η απευθείας συσχέτιση των σταθερών  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  με φυσικά χαρακτηριστικά των υλικών και πως οι συσχετίσεις αυτές συγκρίνονται με τις Εξ. 10.18 έως 10.21, εάν αντικατασταθεί σε αυτές το ισοδύναμο της τιμής  $\Delta$  από τη συσχέτιση της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$  με τα φυσικά χαρακτηριστικά. Οι συγκρίσεις μεταξύ των αναλυτικών σχέσεων και των αποτελεσμάτων της εργαστηριακής διερεύνησης παρατίθενται στο Κεφάλαιο 13.

Στο κεφάλαιο αυτό αναζητήθηκε ενδεικτικά η τιμή της εγγενούς παραμέτρου απόστασης για την οποία προκύπτουν οι τιμές των  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  που δίνουν τις καλύτερες προσεγγίσεις της Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης όπως δίδεται από τις εξισώσεις των Burland, 1990 (Εξ. 10.2) και Chandler, 2000 (Εξ. 10.3). Όπως φαίνεται και στον Πίν. 10.2 οι τιμές της εγγενούς παραμέτρου απόστασης είναι αντίστοιχα  $-0.0133$  kPa και  $-0.0157$  kPa. Μεταξύ τους φαίνονται συνεπίς, δηλαδή η τιμή του  $d^*$  προέκυψε μικρότερη για την εξίσωση του Chandler (2000) από την τιμή για την εξίσωση του Burland (1990), όπως αναμενόταν με δεδομένο ότι η εξίσωση του Chandler (2000) περιγράφει καμπύλη μεγαλύτερης καμπυλότητας από εκείνη του Burland (1990). Σε ό,τι αφορά την πρόβλεψη των τιμών των σταθερών ωστόσο, οι προκύπτουσες τιμές βρίσκονται αρκετά μακριά και όπως φαίνεται από τα Σχ. 10.4 και 10.5 και στις δύο περιπτώσεις, ο δείκτης κενών υποεκτιμάται για τιμές της κατακόρυφης τάσης μικρότερες των 100 kPa και μεγαλύτερες των 1000 kPa και υπερεκτιμάται για τιμές της κατακόρυφης τάσης μεταξύ 100 και 1000 kPa. Η σύγκριση όμως μεταξύ των καμπυλών φαίνεται αρκετά καλή για το εύρος τιμών της κατακόρυφης τάσης από 10 έως 3000 kPa. Τέλος, στο Σχ. 10.6 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις για τη γενικευμένη γραμμή εγγενούς συμπίεσης όπως προκύπτουν από την Εξ. 10.10 για τις τιμές των σταθερών  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  όπως αυτές προκύπτουν για τιμές της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $-0.006$ ,  $0.006$ ,  $-0.03$  και  $0.03$  kPa.

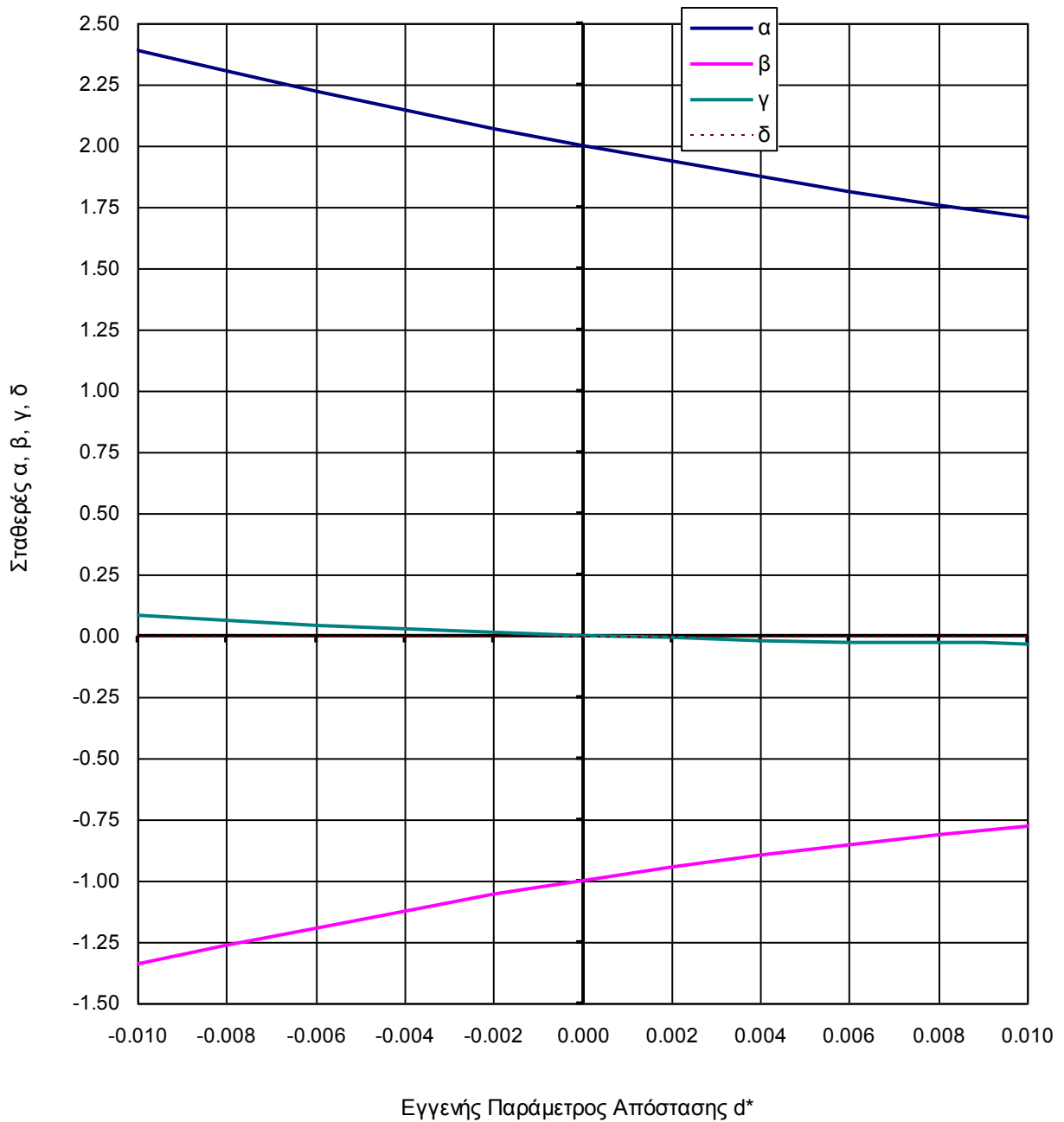
Έτσι προκύπτει λοιπόν ότι αν έχουν προσδιοριστεί οι τιμές του εγγενούς λόγου κενών στα 100 και στα 1000 kPa κατακόρυφης τάσης και η εγγενής παράμετρος απόστασης  $d^*$ , είτε από απευθείας μέτρηση, είτε από πρόβλεψη μέσω εμπειρικών συσχετίσεων, τότε μπορεί να προβλεφθεί η Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης ( $I_v - \log \sigma'_v$ ) και από αυτήν η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης ( $e - \sigma'_v$ ) που αντιστοιχεί στο εδαφικό υλικό, για οποιαδήποτε εδαφικά υλικά.

**Πίνακας 10.1.** Σταθερές της τριτοβάθμιας πολυωνυμικής εξίσωσης για τη Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.10) συναρτήσει της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$ .

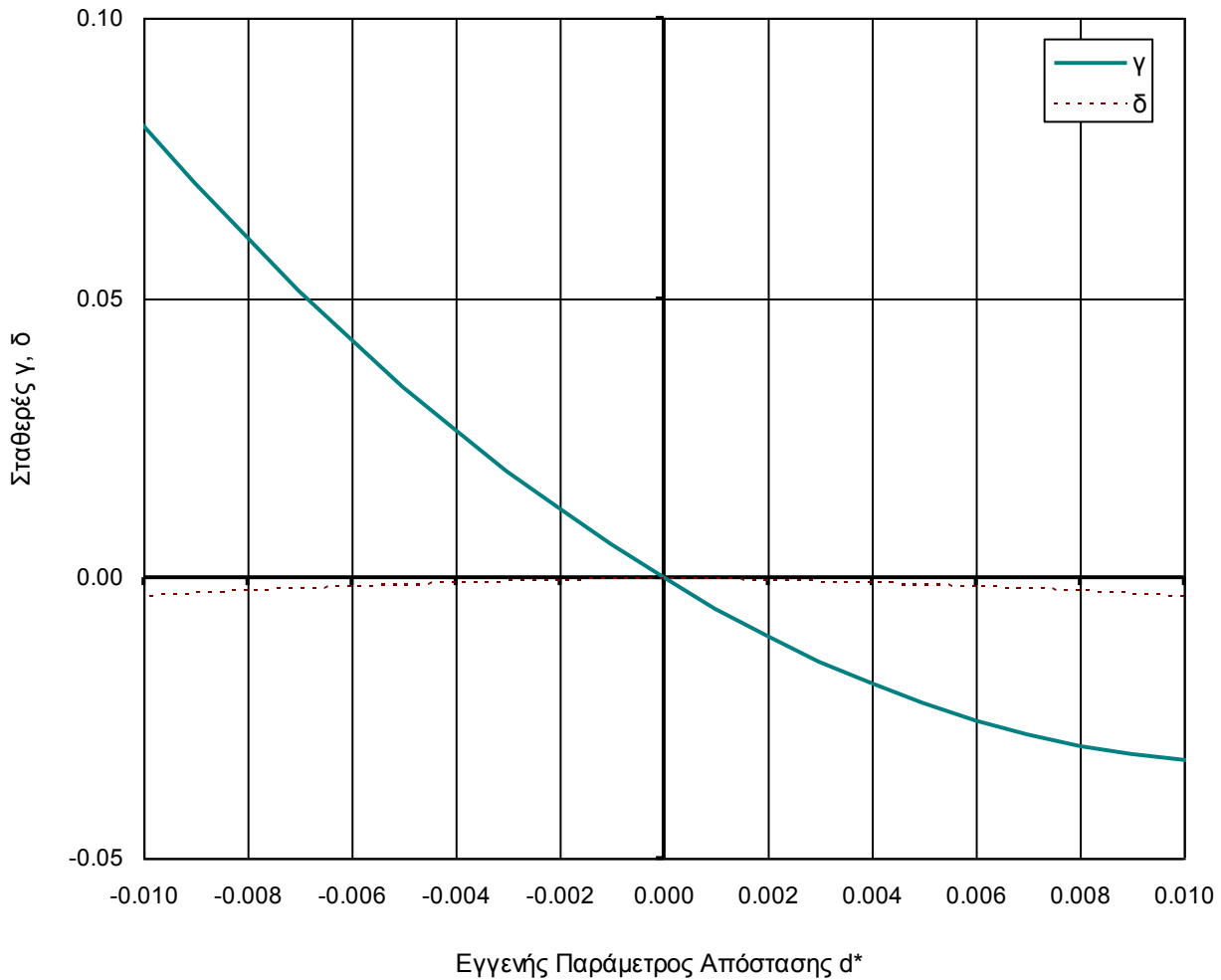
$d^*$	$\Delta$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
0.030	2.521	1.417	-0.688	0.047	-0.029
0.028	2.520	1.429	-0.675	0.031	-0.025
0.026	2.518	1.444	-0.667	0.016	-0.022
0.024	2.517	1.463	-0.664	0.003	-0.018
0.022	2.516	1.487	-0.665	-0.008	-0.016
0.020	2.514	1.514	-0.672	-0.017	-0.013
0.018	2.513	1.545	-0.683	-0.024	-0.010
0.016	2.511	1.580	-0.699	-0.029	-0.008
0.014	2.510	1.619	-0.720	-0.032	-0.006
0.012	2.508	1.662	-0.746	-0.033	-0.005
0.010	2.507	1.709	-0.776	-0.033	-0.003
0.008	2.506	1.759	-0.812	-0.030	-0.002
0.006	2.504	1.814	-0.852	-0.025	-0.001
0.004	2.503	1.872	-0.896	-0.019	-0.001
0.002	2.501	1.934	-0.946	-0.010	0.000
0.000	2.500	2.000	-1.000	0.000	0.000
-0.002	2.499	2.070	-1.059	0.012	0.000
-0.004	2.497	2.143	-1.123	0.026	-0.001
-0.006	2.496	2.221	-1.191	0.043	-0.001
-0.008	2.494	2.302	-1.264	0.061	-0.002
-0.010	2.493	2.387	-1.342	0.081	-0.003
-0.012	2.492	2.476	-1.425	0.102	-0.005
-0.014	2.490	2.569	-1.512	0.126	-0.006
-0.016	2.489	2.666	-1.604	0.152	-0.008
-0.018	2.487	2.766	-1.701	0.180	-0.010
-0.020	2.486	2.871	-1.802	0.209	-0.013
-0.022	2.484	2.979	-1.909	0.241	-0.016
-0.024	2.483	3.091	-2.020	0.274	-0.018
-0.026	2.482	3.207	-2.136	0.310	-0.022
-0.028	2.480	3.326	-2.256	0.347	-0.025
-0.030	2.479	3.450	-2.382	0.386	-0.029



**Σχήμα 10.3α.** Σταθερές της τριτοβάθμιας πολωνυμικής εξίσωσης για τη Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.10) συναρτήσει της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$  για εύρος τιμών της παραμέτρου εγγενούς συμπίεσης από  $-0.03$  έως  $0.03$ .



**Σχήμα 10.3β.** Σταθερές της τριτοβάθμιας πολυωνμικής εξίσωσης για τη Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.10) συναρτήσει της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$  για εύρος τιμών της παραμέτρου εγγενούς συμπίεσης από  $-0.01$  έως  $0.01$ .

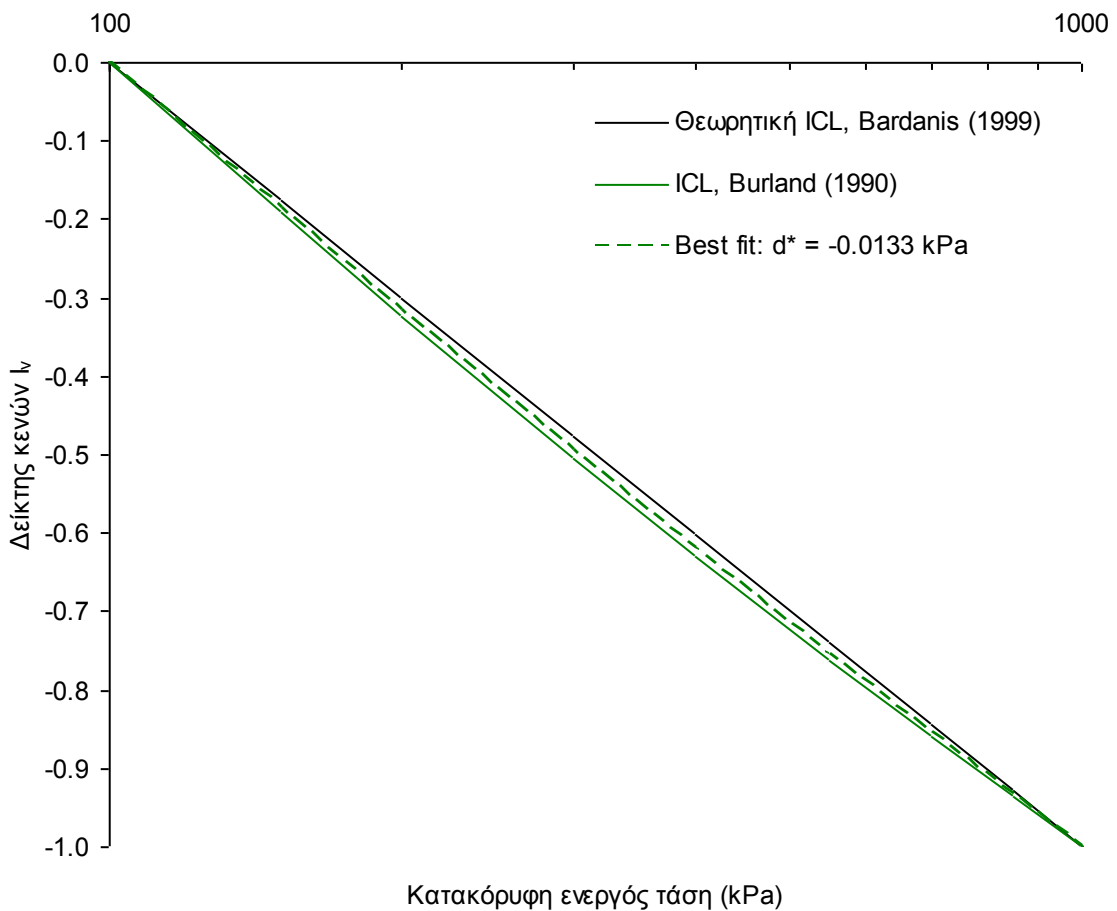
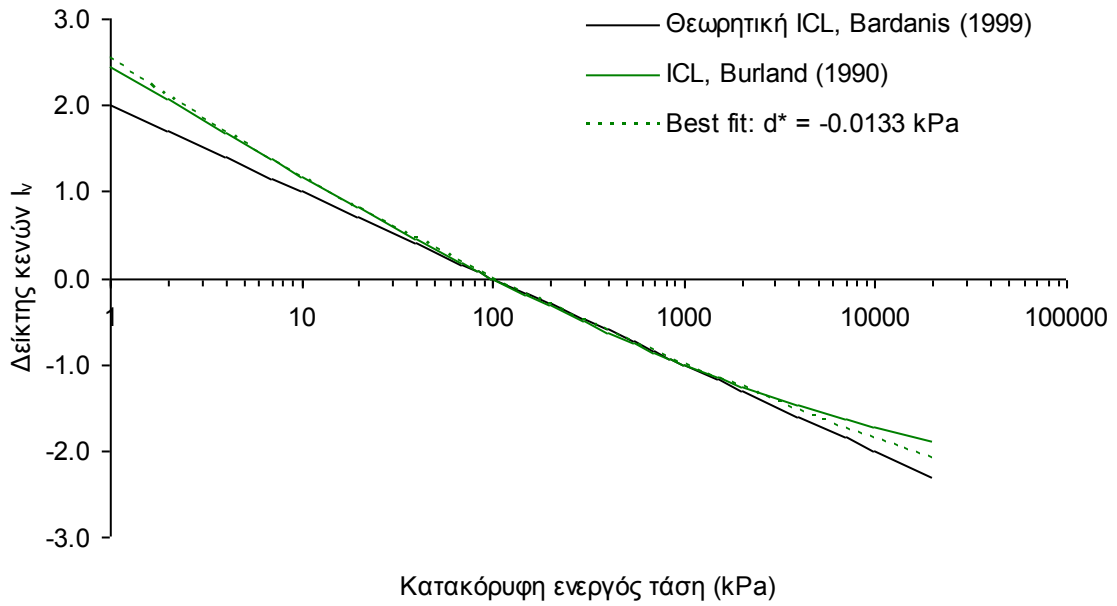


**Σχήμα 10.3γ.** Σταθερές της τριτοβάθμιας πολωνομικής εξίσωσης για τη Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.10)  $\gamma$  και  $\delta$  συναρτήσει της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$  για εύρος τιμών της παραμέτρου εγγενούς συμπίεσης από  $-0.0002$  έως  $0.0002$  (και εύρος τιμών  $\gamma$  και  $\delta$  από  $-0.05$  έως  $0.25$  για μεγέθυνση).

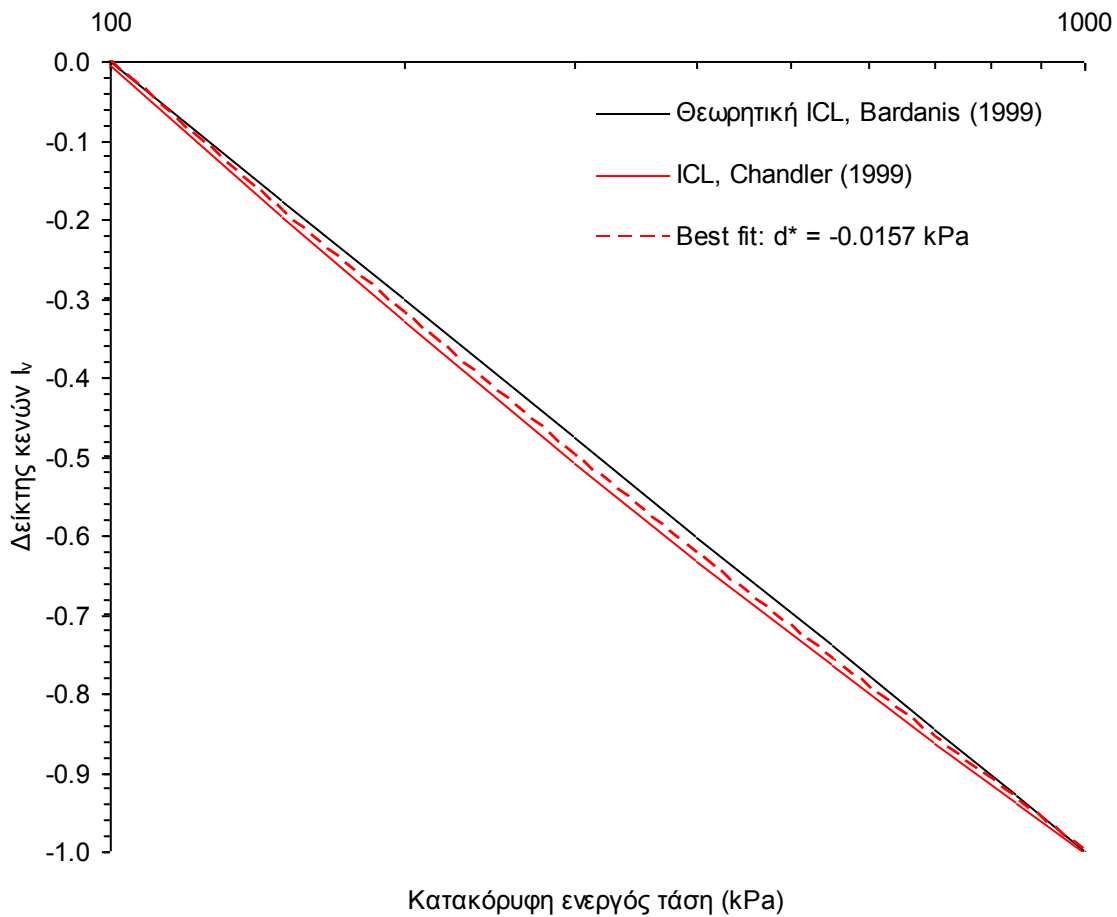
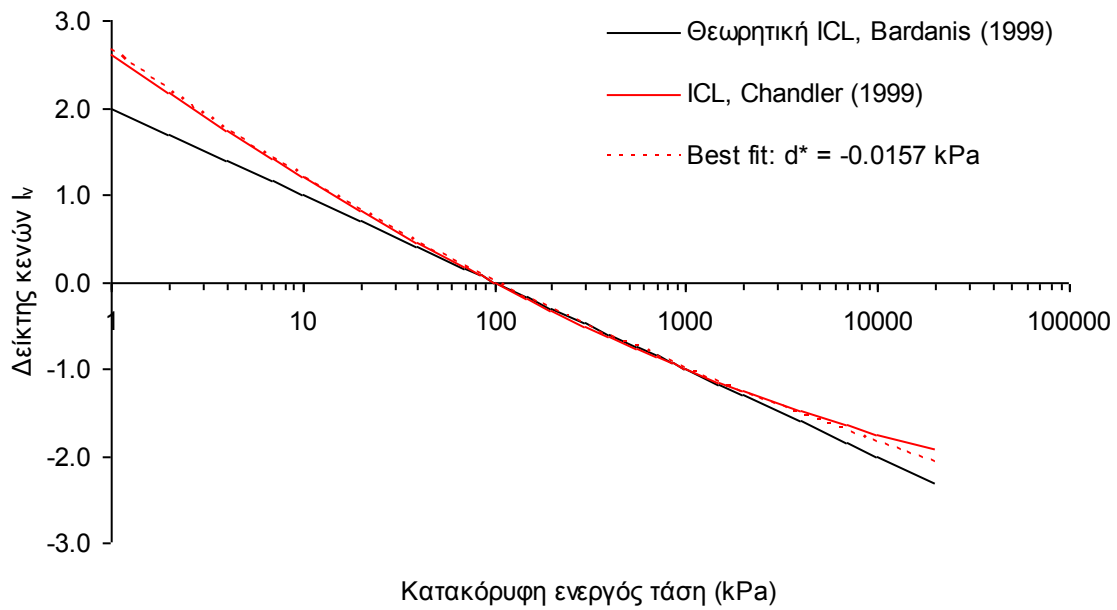
**Πίνακας 10.2.** Σταθερές της τριτοβάθμιας πολωνομικής εξίσωσης για τη Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.10) συναρτήσει της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$ .

Σταθερά	Burland, 1990	Βέλτιστη προσέγγιση της εξίσωσης για $d^* = -0.0133$ kPa	Chandler, 2000	Βέλτιστη προσέγγιση της εξίσωσης για $d^* = -0.0157$ kPa
$\alpha$	2.450	2.536	2.600	2.652
$\beta$	-1.285	-1.481	-1.475	-1.590
$\gamma$	0.000	0.118	0.075	0.148
$\delta$	0.015	-0.006	0.006	-0.008

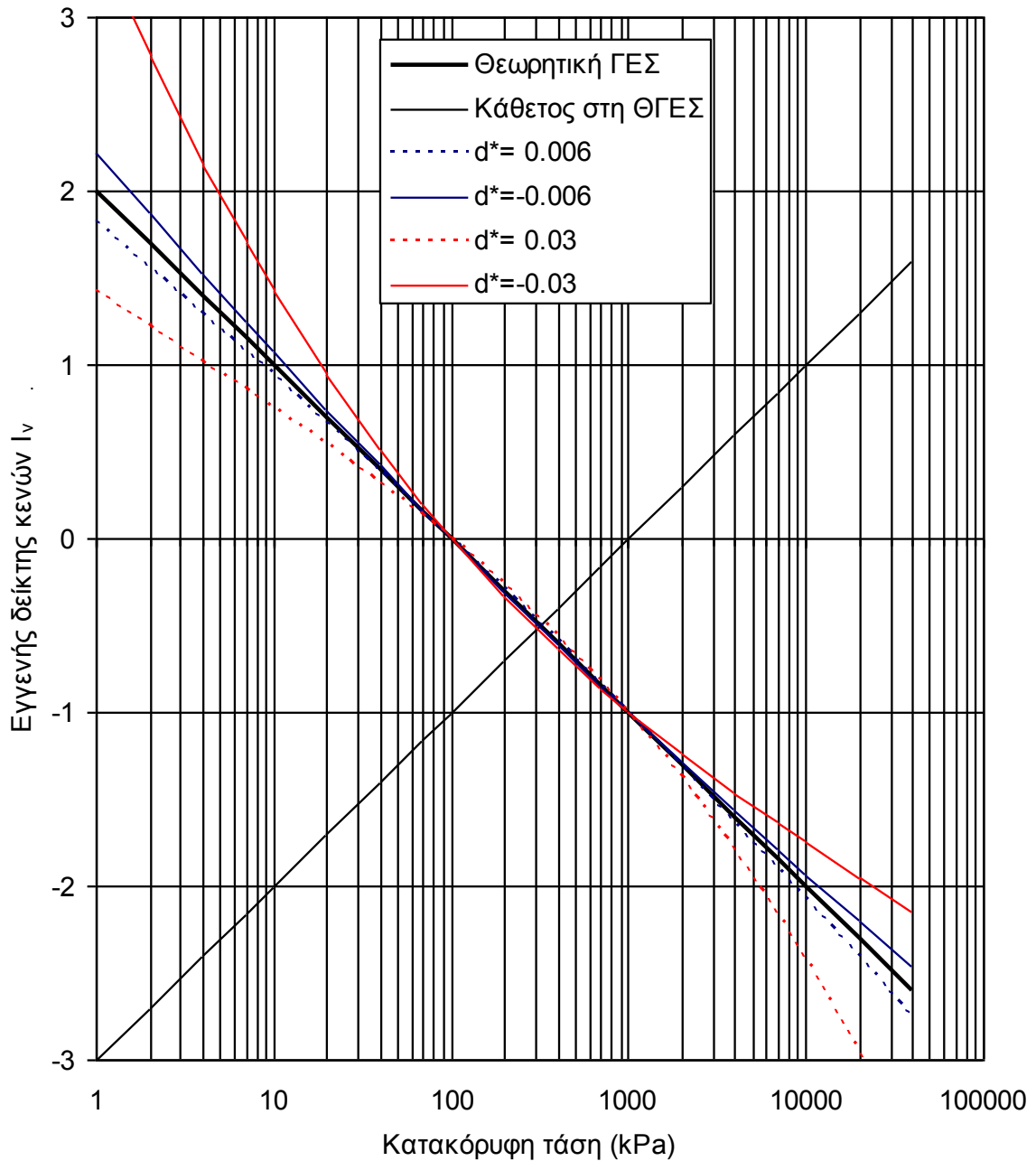




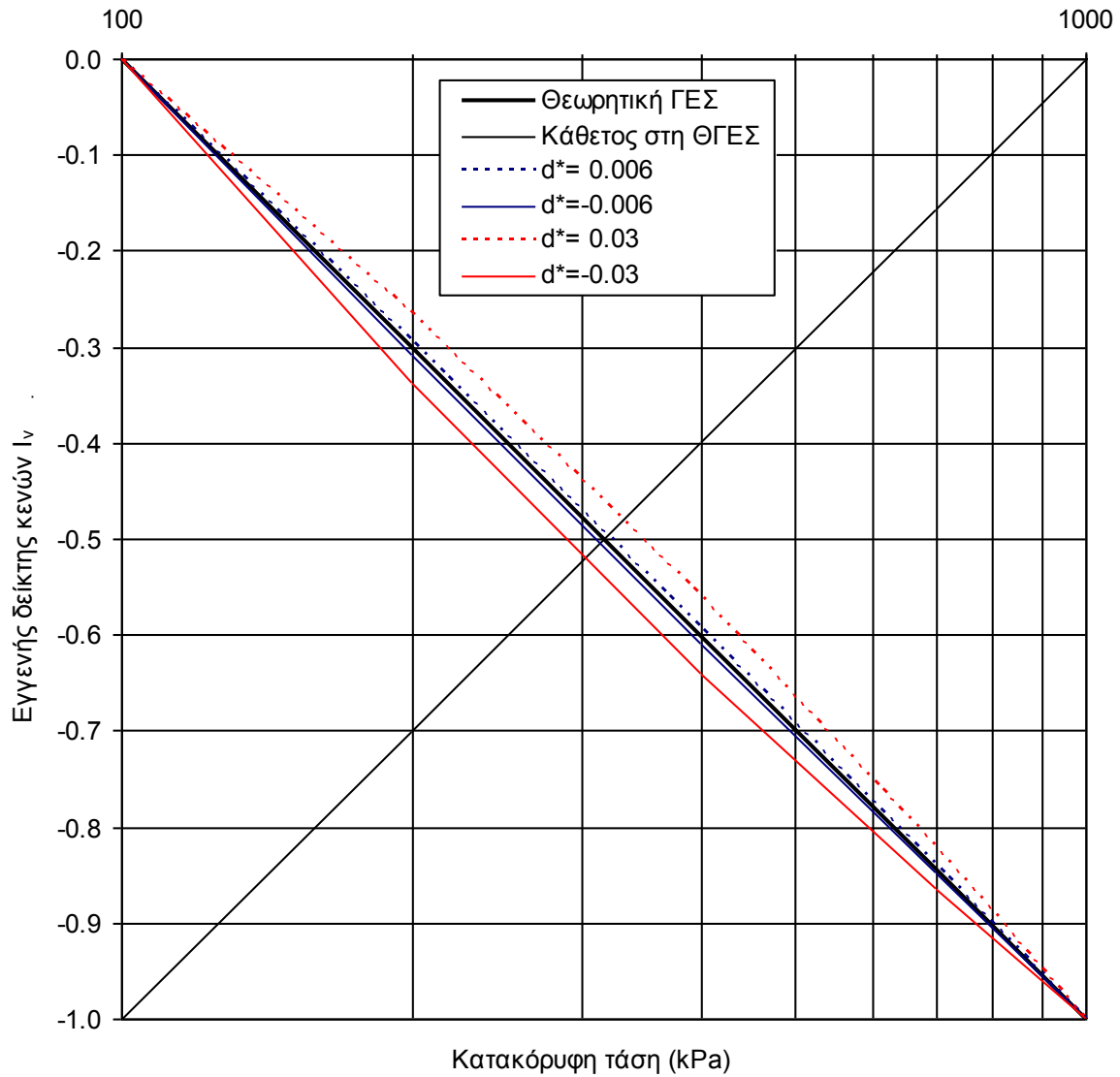
**Σχήμα 10.4.** Βέλτιστη προσέγγιση της εξίσωσης του Burland (1990) για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.2) με τη Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.10) για τιμή της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^* = -0.0133$  kPa.



**Σχήμα 10.5.** Βέλτιστη προσέγγιση της εξίσωσης του Chandler (2000) για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.3) με τη Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.10) για τιμή της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^* = -0.0157$  kPa.



**Σχήμα 10.6α.** Γραφικές παραστάσεις γενικευμένων γραμμών εγγενούς συμπίεσης όπως προβλέπονται από την Εξ. 10.10 για διάφορες τιμές της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$  στο εύρος τιμών τάσης από 1 έως 100000 kPa.



**Σχήμα 10.6β.** Γραφικές παραστάσεις γενικευμένων γραμμών εγγενούς συμπίεσης όπως προβλέπονται από την Εξ. 10.10 για διάφορες τιμές της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$  στο εύρος τιμών τάσης από 100 έως 1000 kPa.

### 10.4.3 Σχόλια επί των παραμέτρων κανονικοποίησης

Ο Burland (1990) χρησιμοποίησε τις εγγενείς τιμές του λόγου κενών στις τιμές της κατακόρυφης τάσης 100 kPa και 1000 kPa,  $e^*_{100}$  και  $e^*_{1000}$  αντίστοιχα, καθώς και την τιμή του Δείκτη Εγγενούς Συμπίεσης  $C_c^*$  για να κανονικοποιήσει τις καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, συνδυάζοντας τις προαναφερθείσες παραμέτρους στην παράμετρο κανονικοποίησης που ονόμασε Δείκτη Κενών. Τα πλεονεκτήματα της επιλογής των προαναφερθεισών παραμέτρων είναι προφανή:

- Στα 100 kPa κατακόρυφης τάσης έχουν πλέον εξαφανιστεί τυχόν δυσεξήγητα χαρακτηριστικά της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης που οφείλονται στην επιρροή διαφόρων παραγόντων όπως η αδυναμία εξασφάλισης πλήρους κορεσμού του πολτού λόγω ελλειπούς απαέρωσης (deaeration) ή παρέλευσης μικρού χρονικού διαστήματος από την παρασκευή του πολτού μέχρι την ολοκλήρωση της ύγρανσης (hydration) του υλικού ή ανεπαρκούς ανάμειξης και μηχανικής διάσπασης των συσσωματωμάτων των κόκκων και των πλακιδίων του φυσικού υλικού, ή ακόμα και αδυναμιών της εργαστηριακής μεθόδου ή του χειριστή (λανθασμένη τοποθέτηση δοκιμίου στην κυψέλη και της κυψέλης στη συσκευή, λάθος χειριστή κλπ).
- Μέχρι 1000 kPa κατακόρυφης τάσης δεν έχουν αρχίσει να εμφανίζονται φαινόμενα έντονης καμπύλωσης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης προς τα πάνω λόγω υψηλής τιμής τάσης.
- Μεταξύ 100 και 1000 kPa οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης είναι πρακτικά ευθείες και χρησιμοποιώντας τις εγγενείς τιμές του λόγου κενών σε αυτές τις τιμές της τάσης για την κανονικοποίηση των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης εξασφαλίζεται ότι σε ένα εύρος τιμών της τάσης μεταξύ 50 και 2000 kPa οι αποκλίσεις θα είναι πολύ μικρές οπότε καλύπτεται με επάρκεια το εύρος των τιμών τάσης που ενδιαφέρουν σε συνήθη προβλήματα μηχανικού.
- Επειδή μεταξύ 100 και 1000 kPa οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης είναι πρακτικά ευθείες<sup>5</sup>, τότε ο Εγγενής Δείκτης Συμπίεσης μπορεί να οριστεί αβίαστα μεταξύ αυτών των τιμών. Επειδή ο λόγος αυτών των τιμών της τάσης είναι 10 τότε εύκολα προκύπτει ότι  $C_c^* = e^*_{100} - e^*_{1000}$  (αφού  $\log_{10}1000 - \log_{10}100 = 1$ ).

Από την άλλη πλευρά η επιλογή αυτών των παραμέτρων παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα και πιο συγκεκριμένα τα εξής:

<sup>5</sup> Η και αν δεν είναι ακριβώς αυτή η τιμή του δείκτη συμπίεσης εκφράζει έναν καλό «μέσο όρο» για την καμπύλη.

- Ιδανικά πρέπει να χρησιμοποιούνται τιμές του εγγενούς λόγου κενών σε τιμές της κατακόρυφης τάσης που υλοποιήθηκαν στις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης που πραγματοποιήθηκαν (και για τις οποίες υπάρχουν καταγεγραμμένες ενδείξεις της μεταβολής του ύψους των δοκιμίων) και να αποφεύγονται οι –σχεδόν πάντα γραμμικές– παρεμβολές μεταξύ των τιμών του εγγενούς λόγου κενών σε τιμές της τάσης που υλοποιήθηκαν στο πείραμα για να προκύψει η τιμή του εγγενούς λόγου κενών στην τιμή 100 ή 1000 kPa.
- Σε αυτήν την περίπτωση προκειμένου να υλοποιηθούν με φορτία και οι δύο αυτές τιμές της τάσης στο ίδιο πείραμα θα πρέπει ή να αλλάξει ο λόγος αύξησης της φόρτισης  $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v$  σε κάποιο σημείο της δοκιμής ή να είναι πολύ μεγάλος (και συγκεκριμένα 9 με αρχικό επιβαλλόμενο φορτίο τα 10 kPa) για να παραμένει σταθερός σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής.
- Ιδανικά και οι δύο επιλογές προτιμάται να αποφεύγονται καθώς δημιουργούν προβλήματα (στην πρώτη περίπτωση αναξιόπιστα συμπεράσματα και προβλήματα κατά τη σύγκριση με δοκιμές που ο λόγος αύξησης της φόρτισης παραμένει σταθερός και στη δεύτερη πολύ ελλιπή αποτελέσματα λόγω του μεγάλου διαστήματος από τη μία τιμή στην άλλη τιμή της τάσης αν όχι παντελή αδυναμία εκτέλεσης της δοκιμής στην περίπτωση πολύ μαλακών δοκιμίων όπως συνήθως είναι οι αναζυμωμένες άργιλοι καθώς χύνεται υλικό εκτός της κυψέλης του συμπιεσομέτρου). Απαιτείται τότε η εκτέλεση δύο δοκιμών σχεδιασμένων με τέτοιες αλληλουχίες φορτίων έτσι ώστε να περάσει η μία δοκιμή από την τιμή 100 kPa (π.χ. για  $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v=1$ , 12.5 kPa – 25 kPa – 50 kPa – **100** kPa – 200 kPa – 400 kPa – 800 kPa – 1600 kPa ...) και η άλλη από την τιμή 1000 kPa (π.χ. για  $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v=1$ , 15.75 kPa – 31.25 kPa – 62.5 kPa – 125 kPa – 250 kPa – 500 kPa – **1000** kPa – 2000 kPa ...) με την προφανή επιπρόσθετη δυσκολία της δημιουργίας των τιμών της τάσης που απαιτούν ασυνήθιστες αλληλουχίες τιμών τάσης για τα συνήθως διατιθέμενα βάρη συμβατικών συμπιεσομέτρων (προφανώς γίνονται στρογγυλεύσεις οι οποίες όμως εισάγουν επιπλέον αβεβαιότητες και δυσκολίες σύγκρισης με άλλες δοκιμές)<sup>6</sup>.
- Σε ορισμένες δοκιμές μπορεί η κατακόρυφη τάση των 100 kPa να είναι μικρή σε σύγκριση με την τάση που πράγματι εξαλείφονται όλες οι ατέλειες της συγκεκριμένης δοκιμής και αρχίζουν να ακολουθούν τα αποτελέσματα τη συνηθισμένη μορφή των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης (Bardanis & Kavvas, 2003b). Σε αυτές τις περιπτώσεις σκόπιμη είναι η χρησιμοποίηση μίας τιμής του λόγου κενών που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη τιμή της κατακόρυφης τάσης. Επειδή αυτά τα προβλήματα είναι συνήθως αποτέλεσμα κακής προετοιμασίας του πολτού, τονίζεται για μια ακόμη φορά η σημασία της επιμελούς προετοιμασίας του πολτού.

---

<sup>6</sup> Η αλήθεια είναι ότι η διάδοση αυτόματων συμπιεσομέτρων (χωρίς βάρη) αίρει πολλά από αυτά τα προβλήματα.

Έχοντας λάβει υπόψη όλα αυτά διατυπώθηκε η συσχέτιση μεταξύ του δείκτη κενών  $I_v$  όπως ορίστηκε από τον Burland (1990) και της τιμής της ίδιας παραμέτρου κανονικοποίησης όταν για την κανονικοποίηση αυτή δεν χρησιμοποιούνται οι τιμές του λόγου κενών στις τιμές της κατακόρυφης τάσης 100 και 1000 kPa αλλά οι εγγενείς τιμές του λόγου κενών σε δύο τυχαίες τιμές της τάσης  $a$  και  $b$  (και οι δύο σε kPa) τέτοιες ώστε  $a < b$  και  $C_c^* = (e^*_b - e^*_a) / (\log_{10} a - \log_{10} b)$ .

Η εν λόγω παράμετρος κανονικοποίησης  $I_v'$  λοιπόν θα είναι της μορφής:

$$I_v' = \frac{e - e^*_a}{e^*_a - e^*_b} \quad (10.23)$$

Αντικαθιστώντας στην Εξ. 10.23 τις τιμές των λόγων κενών έχουμε:

$$\begin{aligned} I_v' &= \frac{e - e_a}{e_a - e_b} = \\ &= \frac{(e_o - C_c \log \sigma'_v / \sigma'_{v,c}) - (e_o - C_c \log a / \sigma'_{v,c})}{(e_o - C_c \log a / \sigma'_{v,c}) - (e_o - C_c \log b / \sigma'_{v,c})} = \\ &= \frac{-\log \sigma'_v + \log a}{-\log a + \log b} = \\ &= \frac{-\log \sigma'_v + \log a}{\log (b/a)} \end{aligned}$$

και αναδιατάσσοντας προκύπτει

$$-\log \sigma'_v = I_v' \log (b/a) - \log a \quad (10.24)$$

οπότε αντικαθιστώντας το λογάριθμο της κατακόρυφης τάσης με το ίσο του στην Εξ. 10.6:

$$I_v = 2 + I_v' \log (b/a) - \log a \quad (10.25)$$

Με χρήση της Εξ. 10.25 λοιπόν αντιμετωπίζονται όλα τα προβλήματα που επισημάνθηκαν παραπάνω και από την κανονικοποίηση μέσω του  $I_v'$  (δηλαδή των εγγενών τιμών του λόγου κενών σε δύο τυχούσες τιμές της κατακόρυφης τάσης) υπολογίζεται ο Δείκτης Κενών  $I_v$  όπως διατυπώθηκε από τον Burland (1990) και σχεδιάζονται και πάλι τα αποτελέσματα των κανονικοποιημένων καμπυλών στο χώρο  $I_v - \sigma'_v$ .

## 10.5 ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΩΝ ΕΓΓΕΝΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

### 10.5.1 Αστράγγιστη διατμητική αντοχή

Τα πλεονεκτήματα της κανονικοποίησης την οποία εισήγαγε η Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης οδήγησαν τον Chandler (2000) στην επέκταση του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων και στην αστράγγιστη διατμητική αντοχή. Με τρόπο παρόμοιο με τον Burland (1990), ο Chandler (2000) όρισε την Γραμμή Εγγενούς Αστράγγιστης Διατμητικής Αντοχής (Intrinsic Undrained Strength Line:  $IS_{uL}$ ). Η γραμμή αυτή εκφράζει τη σχέση μεταξύ της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής μίας αργίλου όπως αυτή προκύπτει μετά από τη στερεοποίησή της υπό συνθήκες  $K_0$  σε μία τιμή του λόγου κενών  $e$ . Πρόκειται κατά συνέπεια για μια μοναδική γραμμή στο χώρο  $I_v - S^*_{kou}$ , όπου  $S^*_{kou} = 0.33 \sigma^*_{ve}$  ( $\sigma^*_{ve}$  είναι η τιμή της  $\sigma'_v$  που αντιστοιχεί μέσω της ICL).

Υπάρχει μία διαφορά στη μαθηματική συσχέτιση που χρησιμοποιεί ο Chandler (2000) και ο Burland (1990) για να εκτιμήσουν την δομή των φυσικών εδαφών σε όρους της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής τους και της ιστορίας φόρτισής τους όπως αυτή εκφράζεται από το λόγο κενών αντίστοιχα. Ο Burland (1990) χρησιμοποίησε μία σχέση με την οποία συνέδεσε το δείκτη κενών  $I_v$  με την κατακόρυφη τάση  $\sigma'_v$ , ενώ ο Chandler (2000) χρησιμοποίησε μία σχέση με την οποία συνέδεσε το δείκτη κενών  $I_v$  με το  $S^*_{kou}$  ( $I_v = 2 - \log \sigma'_v = 2 - \log (3 S^*_{kou}) = (2 - \log 3) - \log S^*_{kou}$ ). Ωστόσο, δεδομένου ότι η σχέση μεταξύ  $S^*_{kou}$  και  $\sigma^*_{ve}$  είναι γραμμική, τότε, εάν εισάγουμε μία κανονικοποίηση όμοια με αυτή που εισάγεται με τον δείκτη κενών,  $IS_{kou} = (S_{kou} - S^*_{kou,100}) / (S^*_{kou,100} - S^*_{kou,1000})$ , προκύπτει η ίδια σχέση για την παράμετρο κανονικοποίησης  $IS_{kou}$  όπως και για το Δείκτη Κενών  $I_v$ .

$$IS_{kou} = I_v = 2 - \log_{10} \sigma'_v \quad (10.26)$$

### 10.5.2 Διαπερατότητα

Επί τη βάσει των προαναφερθέντων επιχειρείται στην παρούσα παράγραφο να επιδειχθεί η δυνατότητα επέκτασης του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων και ως προς τη διαπερατότητα των ιζηματογενών αργίλων μέσω του συντελεστή διαπερατότητας  $k$  πλήρως κορεσμένων εδαφών.



Πρώτος ο Hazen (1892 & 1911) πρότεινε μία εμπειρική συσχέτιση για την πρόβλεψη του συντελεστή διαπερατότητας  $k$  κοκκωδών εδαφικών υλικών (Εξ. 10.27).

$$k = C_H D_{10}^2 \quad (10.27)$$

όπου  $C_H$ , εμπειρικός συντελεστής του Hazen και  $D_{10}$ , διάμετρος κόκκων για την οποία το 10% των μικρότερου μεγέθους κόκκων μέσα στο εδαφικό υλικό έχουν μικρότερη διάμετρο. Η συσχέτιση αυτή αναπτύχθηκε για χαλαρές, καθαρές άμμους με συντελεστή ομοιομορφίας  $D_{60}/D_{10}$  μικρότερο του 2 (Terzaghi & Peck, 1964). Περισσότερα για την τιμή του συντελεστή του Hazen, τις τιμές του  $D_{10}$  για τις οποίες έχει ισχύ η συσχέτιση αλλά και την πολύ μικρή αξιοπιστία της παρατίθενται στον Carrier (2003).

Οι Kozeny (1927) και Carman (1956) ανέπτυξαν για άμμους την γνωστή εμπειρική σχέση μεταξύ συντελεστή διαπερατότητας και πορώδους  $n$  (Εξ. 10.28).

$$k = \frac{1}{K_o T^2 S_o^2} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (10.28)$$

όπου  $k$ , ο συντελεστής διαπερατότητας,  $K_o$ , ο συντελεστής μεγέθους πόρων (pore shape factor),  $T$ , η μαιανδρικότητα (tortuosity) της διαδρομής ροής,  $S_o$ , η ειδική επιφάνεια των κόκκων του εδάφους,  $n$ , το πορώδες του εδάφους,  $\gamma$ , το ειδικό βάρος του υγρού που ρέει διά μέσω του εδάφους και  $\mu$ , το ιξώδες του υγρού που ρέει διά μέσω του εδάφους. Αντικαθιστώντας την τιμή του πορώδους του εδάφους με τη σχέση που το συνδέει με τον λόγο κενών  $e$  ( $n = e / [1+e]$ ), ο Carrier (2003) κατέληξε εύκολα στην τροποποιημένη σχέση των Kozeny-Carman όπου συσχετίζεται ο συντελεστής διαπερατότητας απευθείας με τον λόγο κενών (Εξ. 10.29).

$$k = \frac{1}{K_o T^2 S_o^2} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1+e} \quad (10.29)$$

Η Εξ. 10.29 προβλέπει με επιτυχία τον συντελεστή διαπερατότητας κοκκωδών εδαφικών υλικών αγνοώντας ωστόσο την επιρροή ηλεκτροχημικών αντιδράσεων μεταξύ υγρού και σωματιδίων του εδάφους, γεγονός που την καθιστά ακατάλληλη για την πρόβλεψη του συντελεστή διαπερατότητας αργιλικών εδαφών (αν και προβλέπει με επιτυχία τον συντελεστή διαπερατότητας

μη πλαστικών ιλύων), προϋποθέτοντας την ισχύ του Νόμου του Darcy<sup>7</sup>, γεγονός που την καθιστά ακατάλληλη για την πρόβλεψη του συντελεστή διαπερατότητας πιο διαπερατών εδαφών από χαλικώδεις άμμους (Carrier, 2003) ή το πολύ συμπυκνωμένους χάλικες (Goldin & Rasskazov, 1992) και υπό την προϋπόθεση ισοτροπίας, απουσίας φακοειδών κόκκων (ακατάλληλη για μίκα), καλής διαβάθμισης (ακατάλληλη για εδάφη με μεγάλο ποσοστό μεγάλου μεγέθους κόκκων με ταυτόχρονη παρουσία ενός μικρού ποσοστού λεπτοκόκκων). Περισσότερα για την συσχέτιση αυτή μπορούν να αναζητηθούν στον Carrier (2003) αλλά και τους Goldin & Rasskazov (1992), οι οποίοι άλλωστε παραθέτουν και τροποποιημένη την εξίσωση των Kozeny-Carman ώστε να συνεκτιμά και το ποσοστό των λεπτοκόκκων εκτός από τον λόγο κενών (Εξ. 10.30).

$$k = \frac{4 \cdot S_F}{\nu} \cdot \sqrt[3]{\eta} \cdot \frac{e^3}{1+e} \cdot d_{17}^2 \cdot \frac{g}{1000} \quad (10.30)$$

όπου  $\nu$ , το κινηματικό ιξώδες του νερού,  $d_{17}$ , διάμετρος κόκκων για την οποία το 17% των μικρότερου μεγέθους κόκκων μέσα στο εδαφικό υλικό έχουν μικρότερη διάμετρο,  $\eta$ , ο συντελεστής ομοιομορφίας,  $e$ , ο λόγος κενών,  $g$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας, και  $S_F$ , συντελεστής ανάλογος του εδάφους (1 για άμμους και χάλικες, 0.35-0.40 για βότσαλα).

Οι Εξ. 10.27 έως 10.30 έχουν διατυπωθεί για κοκκώδη εδάφη αν και οι Samarasinghe, et al. (1982) επανήλθαν με μία εξίσωση παρόμοια με την Εξ. 10.29 για την οποία επέδειξαν ότι προβλέπει με επιτυχία το συντελεστή διαπερατότητας κανονικά στερεοποιημένων αργίλων (Εξ. 10.31, όπου  $C$  είναι μία τιμή αναφοράς του συντελεστή διαπερατότητας και  $n$  ένας συντελεστής τυπικά μεταξύ 4 και 5).

$$k = C \frac{e^n}{1+e} \quad (10.31)$$

Ο Taylor (1948) επέδειξε ότι η Εξ. 10.28 έχει ισχύ μόνο για άμμους και όχι για αργίλους και πρότεινε μία εμπειρική συσχέτιση ανάμεσα στον λογάριθμο του συντελεστή διαπερατότητας και τον λόγο κενών των αργιλικών εδαφών (Εξ. 10.32).

<sup>7</sup> Ιδέ και Κεφάλαιο 7 του πρώτου μέρους.

$$\log k = \log k_0 - \frac{e_0 - e}{C_k} \quad (10.32)$$

όπου  $C_k$  είναι ένας δείκτης μεταβολής του συντελεστή διαπερατότητας και  $k_0$  και  $e_0$  είναι οι επιτόπου (in-situ) τιμές του συντελεστή διαπερατότητας και του λόγου κενών αντίστοιχα. Η Εξ. 10.32 έχει γνωρίσει ευρύτατη χρήση και οι Mesri & Rokhsar (1974) παρατήρησαν ότι ισχύει γενικά για το εύρος τιμών του λόγου κενών που απαντάται συχνότερα σε προβλήματα μηχανικού.

Οι Mesri & Olson (1971) ωστόσο επέδειξαν ότι για μεγάλο εύρος τιμών του λόγου κενών η Εξ. 10.32 μπορεί να μην ισχύει και πρότειναν αντ' αυτής μία γραμμική συσχέτιση μεταξύ του λογαρίθμου του συντελεστή διαπερατότητας και του λογαρίθμου του λόγου κενών (Εξ. 10.33, όπου  $A$  και  $B$  εμπειρικές παράμετροι).

$$\log k = A \log e + B \quad (10.33)$$

Οι Tavenas, et al. (1983) αξιολόγησαν τις Εξ. 10.28 και 10.31 έως 10.33 με βάση εργαστηριακές δοκιμές σε μεγάλο αριθμό μαλακών φυσικών αδιατάρακτων канаδικών αργίλων και κατέληξαν ότι καμμία από αυτές δεν έχει καθολική ισχύ ανεξάρτητα από το είδος της αργίλου, την αρχική τιμή του λόγου κενών και το εύρος εντός του οποίου μεταβάλλεται ο λόγος κενών. Από την άλλη πλευρά ωστόσο κατέληξαν ότι για τιμές του λόγου κενών μικρότερες του 2.5 και το εύρος των ογκομετρικών παραμορφώσεων με πρακτική σημασία σε προβλήματα μηχανικού η Εξ. 10.32 παρουσιάζεται ως η πιο ελκυστική απαιτώντας μόνο την εκτίμηση της τιμής του συντελεστή διαπερατότητας και του λόγου κενών επιτόπου και την εκτίμηση του δείκτη μεταβολής  $C_k$ . Ο τελευταίος ορίζεται ως:

$$C_k = \Delta \log k / \Delta e \quad (10.34)$$

κατά τους Mesri & Rokhsar (1974), ή προσεγγιστικά κατά τους Tavenas et al (1983) ως:

$$C_k = 0.5 e_0 \quad (10.35)$$

Εν όψει όλων αυτών παρατηρείται ότι μέχρι σήμερα για τον συντελεστή διαπερατότητας έχουν διατυπωθεί εξισώσεις που τον συσχετίζουν είτε απευθείας και γραμμικά με τον λόγο κενών υψωμένο σε μία δύναμη (Εξ. 10.28 έως 10.31), είτε τον λογάριθμό του γραμμικά με τον λόγο

κενών ή με τον λογάριθμο του λόγου κενών (Εξ. 10.32 και 10.33). Οι πρώτες έχουν διατυπωθεί γενικά για άμμους και οι δεύτερες για αργίλους. Εκτιμάται ότι στο μεταβατικό στάδιο των ιλύων πιθανόν ο συντελεστής διαπερατότητας συσχετίζεται γραμμικά με τον λόγο κενών στην πρώτη δύναμη και με δεδομένη τη γραμμική συσχέτιση του λόγου κενών με τον λογάριθμο της τάσης προκειμένου για αναζυμωμένα εδάφη μπορεί να γραφεί για τον εγγενή συντελεστή διαπερατότητας  $k^*$  καθ' όμοιο τρόπο με την εξίσωση για το εγγενή λόγο κενών  $e^*$ :

$$k^* = k_o^* - C_k^* \log_{10} \sigma'_v \quad (10.36)$$

όπου  $k_o^*$  είναι η τιμή του εγγενούς συντελεστή διαπερατότητας που αντιστοιχεί στην τιμή της κατακόρυφης ενεργού τάσης  $\sigma'_v = 1$  kPa και  $C_k^*$  είναι ο δείκτης μεταβολής του συντελεστή διαπερατότητας σε ακριβή αντιστοιχία με τον δείκτη συμπίεσης  $C_c^*$  (και μάλιστα ανάλογος προς αυτόν με την παραδοχή ότι το  $k^*$  είναι ανάλογο του  $e^*$ ).

Επί τη βάση των μαθηματικών μετασχηματισμών που επιδείχθηκαν στην §10.4.3 για οποιαδήποτε σχέση με τη μορφή της Εξ. 10.36, προκύπτει εύκολα ότι εάν εισάγουμε για το συντελεστή διαπερατότητας μία παράμετρο κανονικοποίησης όμοια με αυτή που εισήγαγε ο Burland (1990) για το λόγο κενών ( $I_k = \frac{k - k_{100}^*}{k_{100}^* - k_{1000}^*}$ ) έχουμε:

$$I_k = I_v = 2 - \log_{10} \sigma'_v \quad (10.37)$$

το οποίο επιδεικνύει ότι η ίδια αναλυτικά αποδεδειγμένη γραμμή αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για τη συμπίεστικότητα υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γραμμή αναφοράς και για το συντελεστή διαπερατότητας υπό τις ίδιες συνθήκες φορτίσεως.

Αν πάλι η γραμμική συσχέτιση βρίσκεται ανάμεσα στον λογάριθμο του συντελεστή διαπερατότητας και τον λόγο κενών, τότε με δεδομένη τη γραμμική συσχέτιση του λόγου κενών με τον λογάριθμο της τάσης προκειμένου για αναζυμωμένα εδάφη μπορεί να γραφεί για τον λογάριθμο του εγγενούς συντελεστή διαπερατότητας  $k^*$  καθ' όμοιο τρόπο με την εξίσωση για τον εγγενή λόγο κενών  $e^*$ :

$$\log k^* = \log k_o^* - C_k^* \log_{10} \sigma'_v \quad (10.38)$$

όπου  $k^*_o$  είναι η τιμή του εγγενούς συντελεστή διαπερατότητας που αντιστοιχεί στην τιμή της κατακόρυφης ενεργού τάσης  $\sigma'_v = 1$  kPa και  $C^*_k$  είναι ο δείκτης μεταβολής του λογαρίθμου του συντελεστή διαπερατότητας σε ακριβή αντιστοιχία με τον δείκτη συμπίεσης  $C^*_c$ .

Επί τη βάση των μαθηματικών μετασχηματισμών που επιδείχθηκαν στην §10.4.3 για οποιαδήποτε σχέση με τη μορφή της Εξ. 10.38, προκύπτει εύκολα ότι εάν εισάγουμε για το συντελεστή διαπερατότητας μία παράμετρο κανονικοποίησης όμοια με αυτή που εισήγαγε ο

Burland (1990) για τον λόγο κενών ( $I_{k,\log} = \frac{\log k - \log k^*_{100}}{\log k^*_{100} - \log k^*_{1000}}$ ) έχουμε:

$$I_{k,\log} = I_v = 2 - \log_{10} \sigma'_v \quad (10.39)$$

το οποίο επιδεικνύει ότι η ίδια αναλυτικά αποδεδειγμένη γραμμή αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για τη συμπίεστικότητα υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γραμμή αναφοράς και για τον λογάριθμο του συντελεστή διαπερατότητας υπό τις ίδιες συνθήκες φορτίσεως.

Κατά συνέπεια μέσω της ίδιας γραμμής αναφοράς είναι δυνατόν να αναζητηθεί η επιρροή της δομής των εδαφικών υλικών στην κατάσταση (state) του εδάφους όπως εκφράζεται αυτή από το λόγο κενών και στις υδραυλικές ιδιότητες όπως εκφράζονται από το συντελεστή διαπερατότητας, είτε η γραμμική σχέση βρίσκεται ανάμεσα στον λογάριθμο του συντελεστή διαπερατότητας και τον λόγο κενών, είτε ανάμεσα στον συντελεστή διαπερατότητας και τον λόγο κενών.

Επίσης σε ό,τι αφορά τον δείκτη κενών σχετικά με τον συντελεστή διαπερατότητας, με τρόπο όμοιο με αυτόν που επιδείχθηκε στην §10.4.3, αν χρησιμοποιηθούν δύο άλλες τιμές της τάσης  $a$  και  $b$ , αντί των τιμών 100 και 1000 kPa, τότε το  $I_k$  ή το  $I_{k,\log}$  μπορεί να δοθεί από την Εξ. 10.40:

$$I_k \text{ ή } I_{k,\log} = 2 + I_k' \log (b/a) - \log a \quad (10.40)$$

όπου  $I_k' = (k - k^*_x) / (k^*_x - k^*_y)$  προκειμένου για το  $I_k$  ή  $I_k' = (\log k - \log k^*_x) / (\log k^*_x - \log k^*_y)$  προκειμένου για το  $I_{k,\log}$ .

Η Εξ. 10.40 είναι ιδιαίτερης σημασίας στην περίπτωση του συντελεστή διαπερατότητας καθώς για ιδιαίτερα χαμηλής διαπερατότητας αργίλους μπορεί να είναι ιδιαίτερα δύσκολη ή χρονοβόρα η απευθείας μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας  $k$ . Μπορεί βέβαια κάποιος να βασιστεί

στην πρόβλεψη από δεδομένα στερεοποίησης της τιμής του συντελεστή διαπερατότητας σε μεγάλες τιμές της κατακόρυφης ενεργού τάσης αν και είναι προφανές το πλεονέκτημα της χρήσης απευθείας μετρηθεισών τιμών του συντελεστή διαπερατότητας. Η ικανότητα πρόβλεψης μέσω των μαθηματικών σχέσεων που προαναφέρθηκαν είναι ένα ακόμα πλεονέκτημα αυτών.

### 10.5.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Επιδείχθηκε ότι η γραμμή εγγενούς αστράγγιστης διατμητικής αντοχής (Chandler, 2000) και η γραμμή εγγενούς διαπερατότητας (στην οποία κατέληξε η §10.5.2) εκφράζονται με μία εξίσωση όμοια με την εξίσωση για τη Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης, η οποία προέκυψε από αναλυτικούς υπολογισμούς. Προφανώς οι ίδιες γραμμές είναι ανοικτές σε γενικεύσεις όπως αυτή που διατυπώθηκε για τη Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης σε περίπτωση συστηματικά παρατηρούμενων μεταβολών της καμπυλότητας των κανονικοποιημένων καμπυλών. Ολοκληρώνοντας, είναι πλέον προφανές ότι σήμερα, αντίθετα από τα πρώτα χρόνια μετά την εισαγωγή του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων και της Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης, υπάρχει ένας χώρος, αυτός του Δείκτη Κενών  $I_v$  – Κατακόρυφης Ενεργού Τάσης  $\sigma'_v$  στον οποίο ο εγγενής λόγος κενών  $e^*$ , η εγγενής αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $S_u^*$  και ο εγγενής συντελεστής διαπερατότητας  $k^*$  (απευθείας ή ο λογάριθμός του, είναι ερώτημα που συνιστά αντικείμενο πειραματικής διερεύνησης) συμπίπτουν εάν κανονικοποιηθούν μέσω μίας παραμέτρου παρόμοιας με τον δείκτη κενών  $I_v$ . Η ταύτιση αυτή των παραμέτρων που εκφράζουν τα τρία συστατικά της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών (συμπιεστότητα, διατμητική αντοχή και διαπερατότητα) για αναζυμωμένες αργίλους εκφράζει την έλλειψη δομής σε τέτοια εδάφη (εξαιρουμένης μόνο εκείνης που αφορά στην διάταξη των κόκκων και των πλακιδίων των εδαφικών υλικών, η οποία όμως μπορεί να θεωρηθεί εύλογα ίδια για όλα τα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά για *τυποποιημένες συνθήκες αναζύμωσης*, ιδέ Παράρτημα Α). Ταυτόχρονα ανακύπτουν και τα εξής σημαντικά ερωτήματα: α) κατά πόσο η εισαγωγή των διαφορών ειδών δομής απεικονίζεται με τον ίδιο τρόπο για όλα τα συστατικά της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών και β) ποια είναι τα όρια του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών. Το δεύτερο ερώτημα απαντάται διεξοδικά με την εργαστηριακή διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής (ιδέ Κεφάλαιο 13) σε ό,τι αφορά το αρχικό ποσοστό υγρασίας, τον αρχικό βαθμό κορεσμού, την πλαστικότητα, την ορυκτολογική σύσταση, την κοκκομετρική διαβάθμιση και χαρακτηριστικά της εκτέλεσης των δοκιμών όπως τον λόγο αύξησης τάσης προς την υπάρχουσα τάση, τη διάμετρο των δοκιμίων

και τον χρονικό διαχωρισμό μεταξύ φορτίσεων. Το πρώτο ερώτημα οφείλει να αποτελέσει ιδιαίτερο αντικείμενο μελλοντικής εργαστηριακής και αναλυτικής διερεύνησης.

## 10.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε το θεωρητικό πλαίσιο των εγγενών ιδιοτήτων των αργιλικών εδαφικών υλικών, η Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης όπως εισήχθη ως έννοια από τον Burland (1990) και όπως επεκτάθηκε από τον Chandler (2000) σε ό,τι αφορά το εύρος κατακόρυφης τάσης κατά την φόρτιση υπό συνθήκες  $K_0$  και την αστράγγιστη διατμητική αντοχή των αναζυμωμένων αργιλικών εδαφών μετά από φόρτιση υπό τις ίδιες συνθήκες (Γραμμή Εγγενούς Αστράγγιστης Διατμητικής Αντοχής). Πραγματοποιήθηκε αναλυτική επεξεργασία του θεωρητικού αυτού πλαισίου και αποδείχθηκε αναλυτικά ότι με την υπόθεση ευθειών καμπυλών εγγενούς συμπίεσης (δηλαδή για σταθερή τιμή του εγγενούς δείκτη συμπίεσης  $C^*_c$  με την κατακόρυφη τάση) η γραμμή εγγενούς συμπίεσης εκφράζεται από μία και μοναδική εξίσωση (Εξ. 10.6), η οποία αποδίδει την Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης και είναι ευθεία γραμμή στο χώρο δείκτη κενών – κατακόρυφης τάσης. Αν οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης δεν είναι ευθείες, δηλαδή ο εγγενής δείκτης συμπίεσης δεν είναι σταθερός με την κατακόρυφη τάση, τότε η γραμμή εγγενούς συμπίεσης αποκλίνει από την ευθεία της Θεωρητικής Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης στρέφοντας τα κοίλα προς τα πάνω προκειμένου για αργιλικά εδαφικά υλικά με όρια Atterberg ευρισκόμενα πάνω από τη «Γραμμή Α» στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande (πειραματικά δεδομένα και προταθείσες με βάση αυτά εμπειρικές εξισώσεις των Burland, 1990, και Chandler, 2000). Προκειμένου αντίθετα για εδαφικά υλικά με όρια Atterberg ευρισκόμενα κάτω από τη «Γραμμή Α» στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande, η γραμμή εγγενούς συμπίεσης αποκλίνει από την ευθεία της Θεωρητικής Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης στρέφοντας τα κοίλα προς τα κάτω (πειραματικά δεδομένα των Anagnostopoulos, et al., 1991, Kavvasas, et al., 1993, και Dineen, 1997). Εν όψει των πειραματικών αυτών δεδομένων διατυπώθηκε η ημιεμπειρική εξίσωση για τη Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Εξ. 10.10), η οποία είναι πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού. Για τον προσδιορισμό της απαιτούνται οι τιμές του εγγενούς λόγου κενών στα 100 και 1000 kPa κατακόρυφης τάσης,  $e^*_{100}$  και  $e^*_{1000}$  αντίστοιχα, η τιμή της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$  και ο αρχικός λόγος κενών του πολτού του αναζυμωμένου αργιλικού υλικού για τον προσδιορισμό της σταθεράς της πολυωνυμικής εξίσωσης  $A^*$ . Οι παράμετροι αυτές μπορούν να μετρηθούν απευθείας ή να εκτιμηθούν εμπειρικά από τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών όπως επιδεικνύεται στο Κεφάλαιο 13 του παρόντος τό-

μου, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διερεύνησης της εγγενούς συμπίεστος των εδαφικών υλικών και επιδεικνύεται η σημασία της Γενικευμένης Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης ως γραμμής αναφοράς για τη μελέτη της δομής όλων των φυσικών εδαφών και όχι μόνο των φυσικών αργίλων (και μάλιστα εκείνων μόνο με τα ιδιαίτερα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών που χρησιμοποίησαν οι Burland, 1990, και Chandler, 2000). Ολοκληρώνοντας το Κεφάλαιο 10 επιδείχθηκε η δυνατότητα κατάληξης στην ίδια γραμμή αναφοράς για την εγγενή αστράγγιστη διατμητική αντοχή και την εγγενή διαπερατότητα και διατυπώθηκε η ανάγκη μελλοντικής διερεύνησης του τρόπου με τον οποίο αποτυπώνεται η δομή των φυσικών υλικών ως προς τη διαφαινόμενη κοινή γραμμή αναφοράς για κάθε ένα από τα τρία χαρακτηριστικά της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών: συμπίεστος, διατμητική αντοχή και διαπερατότητα.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

## ΤΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

### 11.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών σε δεκαεπτά διαφορετικά εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και εννέα εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης ήταν τα εξής<sup>1</sup>:

1. Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων
2. Άργιλος Χανίων
3. Άργιλος Κορίνθου
4. Άργιλος Λιβαδερού Δράμας
5. Άργιλος Κηφισιάς
6. Άργιλος Μελίτης Φλώρινας
7. Άργιλος Αμαρουσίου
8. Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου
9. Άργιλος Λονδίνου
10. Άργιλος Αμφιλοχίας
11. Μάργα Κορίνθου (διακρίνεται σε χαμηλής και υψηλής πλαστικότητας)
12. Μάργα Κηφισιάς
13. Μάργα Πατρών

---

<sup>1</sup> Οι ονομασίες των εδαφών που ακολουθούν, αποτελούν τις ονομασίες με τις οποίες οι σχηματισμοί είναι ευρύτερα γνωστοί στην βιβλιογραφία (είτε αυτή αφορά σε επιστημονικά άρθρα και βιβλία είτε σε εκπονηθείσες γεωτεχνικές μελέτες στην περιοχή εμφάνισης των σχηματισμών) και δεν ανταποκρίνονται κατ' ανάγκη στην κατάταξή τους με βάση τα κοκκομετρικά ή ορυκτολογικά/πετρογραφικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

14. Μάργα Χαλκουτσίου
15. Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου
16. Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου
17. Αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας

Σκοπός της πραγματοποίησης δοκιμών στα εδαφικά αυτά υλικά ήταν η επαρκής κάλυψη όλου του εύρους κοκκομετρικής διαβάθμισης και πλαστικότητας προκειμένου για λεπτόκοκκα (αργιλικά) εδαφικά υλικά. Όπως φαίνεται και από την περιγραφή των φυσικών χαρακτηριστικών των συγκεκριμένων εδαφικών υλικών που ακολουθεί στο παρόν κεφάλαιο, η κάλυψη του συχνότερα απαντώμενου εύρους αυτών των παραμέτρων επιτεύχθηκε. Η επιλογή των συγκεκριμένων εδαφικών υλικών έγινε με βάση τη διαθεσιμότητά τους κατά το χρόνο εκτέλεσης των πειραμάτων και η προέλευσή τους ποικίλλει όπως περιγράφεται στην §11.2. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται εκτός από την προέλευση των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές, πληροφορίες για τη γεωλογική τους ιστορία, τα φυσικά τους χαρακτηριστικά όπως προέκυψαν από τις πραγματοποιηθείσες δοκιμές προσδιορισμού φυσικών χαρακτηριστικών και τα ορυκτολογικά τους χαρακτηριστικά.

Εκτός όμως από τα προαναφερθέντα εδαφικά υλικά και παρά την επαρκή κάλυψη όλου του εύρους κοκκομετρικής διαβάθμισης και πλαστικότητας, προκειμένου για λεπτόκοκκα (αργιλικά) εδάφη φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, επιλέχθηκε η δημιουργία εδαφικών υλικών τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης, προκειμένου να διερευνηθούν:

- ακραίες καταστάσεις ως προς την πλαστικότητα, την κοκκομετρική διαβάθμιση και την ορυκτολογική σύσταση,
- καταστάσεις ενδιάμεσες εκείνων που αντιστοιχούσαν στα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης,
- η μεταβολή της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της ορυκτολογικής σύστασης υπό ελεγχόμενες συνθήκες, και
- η δυνατότητα αναπαραγωγής υπό ελεγχόμενες συνθήκες των φαινομένων που παρατηρήθηκαν κατά τη μελέτη των εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης.

Τα εδαφικά αυτά υλικά ήταν τα εξής:

1. Θραυστή χονδρόκοκκη άμμος («ρυζάκι»)
2. Καολίνη Speswhite (άργιλος που περιέχει πρακτικά μόνο καολινίτη)
3. Αμιγής Πολύ Λεπτόκοκκη Άμμος (πρόκειται για το διερχόμενο από το κόσκινο Νο 100 και συγκρατούμενο στο κόσκινο Νο 200 μετά από καλό πλύσιμο της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων)
4. Ιλύς (πρόκειται για το διερχόμενο από το Νο 200 της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων)
5. Μείγμα Καολίνη Speswhite – Πολύ Λεπτόκοκκης Άμμου (5% - 95%): SK-05
6. Μείγμα Καολίνη Speswhite – Πολύ Λεπτόκοκκης Άμμου (10% - 90%): SK-10
7. Μείγμα Καολίνη Speswhite – Πολύ Λεπτόκοκκης Άμμου (20% - 80%): SK-20
8. Μείγμα Καολίνη Speswhite – Πολύ Λεπτόκοκκης Άμμου (35% - 65%): SK-35
9. Μείγμα Καολίνη Speswhite – Πολύ Λεπτόκοκκης Άμμου (50% - 50%): SK-50

Εκτός από τα αποτελέσματα δοκιμών σε αυτά τα υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης του Αναστασίου (2004) σε μείγματα μπεντονίτη-άμμου. Τα εδαφικά αυτά υλικά ήταν τα εξής:

1. Μείγμα Μπεντονίτη – Πολύ Λεπτόκοκκης Άμμου (2% - 98%): SB-02
2. Μείγμα Μπεντονίτη – Πολύ Λεπτόκοκκης Άμμου (4% - 96%): SB-04
3. Μείγμα Μπεντονίτη – Πολύ Λεπτόκοκκης Άμμου (7% - 93%): SB-07
4. Μείγμα Μπεντονίτη – Πολύ Λεπτόκοκκης Άμμου (10% - 90%): SB-10
5. Μείγμα Μπεντονίτη – Πολύ Λεπτόκοκκης Άμμου (15% - 85%): SB-15

Στις παραγράφους που ακολουθούν γίνεται αναφορά στην προέλευση των δειγμάτων των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, τα φυσικά και τα ορυκτολογικά τους χαρακτηριστικά.

## 11.2 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΤΟΥΣ ΙΣΤΟΡΙΑΣ

### 11.2.1 Γενικά – Προέλευση των εδαφικών υλικών της πειραματικής διερεύνησης

Από τα προαναφερθέντα εδαφικά υλικά, δείγματα ορισμένων προέρχονται από γεωτρήσεις, δείγματα άλλων από προϊόντα εκσκαφών και τέλος δείγματα μόνο τριών από προσεκτική απόσπαση τεμαχών του εδαφικού υλικού στη φυσική του κατάσταση με σκοπό την πρόκληση της ελάχιστης διατάραξης. Από γεωτρήσεις<sup>2</sup> προέρχονται τα δείγματα:

1. Άργιλος Χανίων
2. Άργιλος Κορίνθου
3. Άργιλος Κηφισιάς
4. Άργιλος Μελίτης Φλώρινας
5. Άργιλος Αμαρουσίου
6. Άργιλος Αμφιλοχίας
7. Μάργα Κηφισιάς

Από προϊόντα εκσκαφής σήραγγας προέρχονται τα δείγματα της Μάργας Πατρών. Από προϊόντα εκσκαφής κατασκευής κτιριακού συγκροτήματος προέρχονται τα δείγματα της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων, ενώ τα δείγματα της Αργίλου Λιβαδερού Δράμας, της Αργίλου Ορεστιάδας Έβρου και της Αργίλου Λονδίνου προέρχονται από τα προϊόντα εκσκαφής δοκιμαστικών φρεάτων.

Τα δείγματα της Μάργας Κορίνθου είναι αδιατάρακτα και αποκόπηκαν από το βόρειο πρηνές της Διώρυγας της Κορίνθου. Ομοίως, αδιατάρακτα είναι τα δείγματα της Μάργας Χαλκουτσίου τα οποία αποκόπηκαν από φυσικό πρηνές ακτογραμμής στην περιοχή του Χαλκουτσίου, καθώς και τα δείγματα του αργιλοποιημένου Ιλυόλιθου Πάρνηθας που αποκόπηκαν από φυσικό πρηνές πλησίον μικρής τεχνητής λίμνης στην Ιπποκράτειο Πολιτεία.

---

<sup>2</sup> Πρόκειται για γεωτρήσεις της εταιρείας «ΕΔΑΦΟΣ – Σύμβουλοι Μηχανικοί» Α.Ε. που διανοίχθηκαν στα πλαίσια γεωτεχνικών ερευνών, αξιολογήσεων και μελετών.

Τα δείγματα αποσαθρωμένου Σερπεντινίτη Σκύρου προέρχονται από εκσκαφή στο Φράγμα Φερεκάμπου Σκύρου και τα δείγματα αποσαθρωμένου Φυλλίτη Σκύρου από εκσκαφή σε χαμηλό πρανές ορύγματος οδού στο βόρειο τμήμα του νησιού. Και τα δύο δείγματα ήταν διαταραγμένα.

Τα δείγματα του Καολίνη Speswhite προέρχονται από το Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Πανεπιστημίου Imperial College του Λονδίνου όπου το υλικό αγοράζεται σακευμένο σε μεγάλες ποσότητες μετά την βιομηχανική παρασκευή του και τα δείγματα μπεντονίτη προέρχονται από το Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων (Μπεντονίτης Μήλου παραγωγής «Αργυρομεταλλευμάτων και Βαρυτίνης»). Από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων προέρχεται η πολύ λεπτόκοκκη άμμος<sup>3</sup> που παρασκευάστηκε και αποτελεί το διερχόμενο από το κόσκινο Νο 100 και συγκρατούμενο στο Νο 200 μετά από πολύ καλό πλύσιμο αυτής και η ιλύς που αποτελεί το διερχόμενο από το κόσκινο Νο 200 αυτής. Η ιλύς περιέχει και ένα μικρό μέρος υλικού μεγέθους αργίλου όπως έδειξε και η κοκκομετρική διαβάθμιση της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων.

Στην παράγραφο που ακολουθεί παρατίθενται στοιχεία της γεωλογικής προέλευσης και ιστορίας των εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης που χρησιμοποιήθηκαν και στον Πίν. 11.1 συγκεντρώνονται τα κύρια γεωλογικά χαρακτηριστικά τους.

### **11.2.2 Στοιχεία της γεωλογικής ιστορίας των εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης της πειραματικής διερεύνησης**

Η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων απαντάται κατά μήκος της όχθης της Λίμνης των Ιωαννίνων. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τα προϊόντα της εκσκαφής για την ανέγερση του Παραλίμιου Πάρκου Αναψυχής στη θέση Βοτανικός Ιωαννίνων<sup>4</sup>. Δεδομένου ότι τα δείγματα ήταν διαταραγμένα χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την παρασκευή δοκιμών από αναζυμωμένο υλικό. Σύμφωνα με τον Γεωλογικό Χάρτη της Ελλάδας (Φύλλο «Ιωάννινα», ΠΓΕΥ) η περιοχή κοντά στην όχθη της Λίμνης των Ιωαννίνων καλύπτεται από σύγχρονες αποθέσεις κοιλάδων (Τεταρτογενές) στις οποίες ανήκει και το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές. Στην περιοχή δεν υπήρχαν σημαντικά υπερκείμενα που να διαβρώθηκαν.

<sup>3</sup> Η λεπτόκοκκη αυτή άμμος αναφέρεται στο κείμενο ως «πολύ λεπτόκοκκη» αφού αποτελεί το διερχόμενο από το κόσκινο Νο 100 και συγκρατούμενο στο κόσκινο Νο 200. «Λεπτόκοκκη» -κατά USCS- είναι η άμμος που διέρχεται από το κόσκινο Νο 40 και συγκρατείται στο κόσκινο Νο 200.

<sup>4</sup> Κατασκευή ΤΕΡΝΑ Α.Ε.

Η Άργιλος Χανίων απαντάται στην ευρύτερη περιοχή των Χανίων και προέρχεται από πυρήνες γεωτρήσεων που έγιναν στα πλαίσια γεωτεχνικής έρευνας και αξιολόγησης για την κατασκευή των Νέων Κτιρίων της ANEK στη Λεωφόρο Σούδας. Τα δείγματα ελήφθησαν με «φραγμό» (κοπή του δείγματος με περιστροφή της κοπτικής κεφαλής και διακοπή της κυκλοφορίας νερού), πρόκειται δηλαδή για ημιδιαταραγμένα δείγματα με το ποσοστό υγρασίας που έχει το εδαφικό υλικό επιτόπου, αλλά κατά το χρόνο που ελήφθησαν από τα κιβώτια αποθήκευσής τους ήταν αρκετά ταλαιπωρημένα με ενδείξεις ότι είχαν αρχίσει να ξηραίνονται. Γι' αυτόν το λόγο και χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την παρασκευή δοκιμίων από αναζυμωμένο υλικό. Σύμφωνα με τον Γεωλογικό Χάρτη της Ελλάδας (Φύλλο «Χανιά», ΙΓΕΥ) η ευρύτερη περιοχή από την οποία προήλθε η άργιλος αυτή καλύπτεται από ολοκαινικές αλλουβιακές προσχώσεις που αποτελούνται κυρίως από πηλούς, αργίλους, άμμους και χάλικες σχετικά μικρού πάχους. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τους πηλούς της περιοχής ενώ ούτε και σε αυτή την περιοχή φαίνεται να υπήρχαν σημαντικά υπερκείμενα που να διαβρώθηκαν.

Η Άργιλος Κορίνθου απαντάται στην πόλη της Κορίνθου και προέρχεται από πυρήνες γεωτρήσεων που έγιναν στα πλαίσια γεωτεχνικής έρευνας και αξιολόγησης για την κατασκευή προσθήκης στο Χημείο Κορίνθου. Και τα δείγματα αυτά ελήφθησαν με «φραγμό» και κατά το χρόνο που ελήφθησαν από τα κιβώτια αποθήκευσής τους ήταν αρκετά ταλαιπωρημένα με ενδείξεις ότι είχαν αρχίσει να ξηραίνονται. Γι' αυτό το λόγο και αυτά χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την παρασκευή δοκιμίων από αναζυμωμένο υλικό. Σύμφωνα με τον Γεωλογικό Χάρτη της Ελλάδας (Φύλλο «Κόρινθος», ΙΓΕΥ) στην περιοχή απαντώνται σε βάθος μάργες Πλειοκαινικής ηλικίας με χρώμα υποκίτρινο έως λευκό και κάποιες φορές ανοικτότεφρες ή κυανίζουσες οι οποίες αποτέθηκαν σε λιμναίο ή υφάλμυρο περιβάλλον με τη λιμναία φάση τους να απαντάται στα ανώτερα στρώματα της σειράς. Επί αυτών βρίσκονται οι μαργαϊκοί σχηματισμοί του Βιλλαφράγκιου (Μέσο Πλειόκαινο) και αυτών υπέρκεινται οι θαλάσσιες και παράκτιες αποθέσεις του Τυρρηνίου (Τεταρτογενές-Ανώτερο Πλειστόκαινο) αποτελούμενες επίσης από κροκαλοπαγή, μάργες και μαργαϊκούς ασβεστολίθους. Πάνω από τους σχηματισμούς του Τυρρηνίου βρίσκονται ερυθρές αργιλομιγείς άμμοι αποσαθρωμένες κοντά στην επιφάνεια (Πλειστοκαινικής ηλικίας) και επί αυτών βρίσκονται ολοκαινικοί ελλουβιακοί σχηματισμοί αποτελούμενοι από προϊόντα εξαλλοιώσεως των σχηματισμών του Πλειοκαίνου ή του Τυρρηνίου. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν κατατάσσονται ως μάργες με βάση την ορυκτολογική ανάλυση που έγινε σε αυτά και όχι ως άργιλοι, αφού περιέχουν μεγάλο ποσοστό ασβεστιτικού υλικού. Η ορυκτολογική τους σύσταση μάλιστα παρουσιάζει πολύ μεγάλη ομοιότητα με εκείνη των δειγμάτων της Μάργας Κορίνθου από τα πρηνή της διώρυγας που

επίσης χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος εργαστηριακών δοκιμών της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Κατά συνέπεια συμπεραίνεται ότι μάλλον πρόκειται για την Πλειοκαινική Μάργα που απαντάται και στην περιοχή της διώρυγας αλλά στην περιοχή του Χημείου Κορίνθου, υπέρκειται αυτής μόνο πλειστοκαινικές άμμοι ή άμμοι των σύγχρονων προσχώσεων του Ολόκαινου.

Η Άργιλος Λιβαδερού Δράμας προέρχεται από ερευνητικό φρέαρ για τη διερεύνηση πιθανού δανειοθαλάμου λήψης υλικού για την κατασκευή του πυρήνα του αντιπλημμυρικού φράγματος Μυλορέμματος στον νομό Δράμας. Ανήκει στους νεώτερους σχηματισμούς λιμνοχερσαίων άνω πλειοκαινικών έως μεσοπλειστοκαινικών ιζημάτων της περιοχής. Στην περιοχή δεν υπήρχαν σημαντικά υπερκείμενα που να διαβρώθηκαν.

Η Άργιλος και η Μάργα Κηφισιάς προέρχονται από την Κάτω Κηφισιά Αττικής και συγκεκριμένα την έκταση που στεγάζεται το Γενικό Ογκολογικό Νοσοκομείο «Αγ. Ανάργυροι». Προέρχονται από πυρήνες γεωτρήσεων που έγιναν στη θέση αυτή στα πλαίσια γεωτεχνικής έρευνας και αξιολόγησης για την κατασκευή των νέων κτιρίων του νοσοκομείου. Η Άργιλος Αμαρουσίου προέρχεται από το Μαρούσι Αττικής και συγκεκριμένα τον παλιό χώρο στάθμευσης του Ολυμπιακού Σταδίου επί της Λεωφόρου Σπύρου Λούη όπου κατασκευάστηκε το Διεθνές Κέντρο Ραδιοτηλεόρασης των ολυμπιακών εγκαταστάσεων<sup>5</sup>. Προέρχεται από πυρήνες γεωτρήσεων που έγιναν στην θέση αυτή στα πλαίσια γεωτεχνικής έρευνας και αξιολόγησης για την κατασκευή του Διεθνούς Κέντρου Ραδιοτηλεόρασης. Τα δείγματα και των τριών υλικών ελήφθησαν με «φραγμό» και κατά τον χρόνο που ελήφθησαν από τα κιβώτια αποθήκευσής τους ήταν σε ικανοποιητική κατάσταση ώστε να μορφωθούν από αυτά δοκίμια για τη μελέτη της επιτόπου συμπεριφοράς του υλικού εκτός από αναζυμωμένα. Τα δείγματα της Άργιλου και της Μάργας Κηφισιάς προέρχονται από την ίδια γεώτρηση σε διαφορετικά βάθη. Στη γεώτρηση από την οποία ελήφθησαν η μάργα βρισκόταν κάτω από την άργιλο. Στην περιοχή της μετάβασης από τον ένα σχηματισμό στον άλλο εμφανίζονται τμήματα πυρήνων με διαδοχικές στρώσεις του ενός και μετά του άλλου υλικού αντικατοπτρίζοντας πιθανότατα μικρού χρονικού διαστήματος επαναλαμβανόμενες μεταβολές στις συνθήκες ιζηματογένεσης.

Σύμφωνα με τον Γεωλογικό Χάρτη της Ελλάδας (Φύλλο «Κηφισιά», ΙΓΜΕ) τα δείγματα της Άργιλου Αμαρουσίου ανήκουν στους Λιμναίους Σχηματισμούς Καλογρέζας-Πικερμίου (Νεογε-

<sup>5</sup> Σημερινό Εμπορικό Κέντρο «Golden Hall».

νές, Ανώτερο Μειόκαινο), οι οποίοι ιδιαίτερα στην περιοχή της Καλογρέζας αποτελούνται από λευκές έως υποκίτρινες μάργες, αμιγείς έως αμμούχες και από ερυθρούς πηλούς με συχνές παρεμβολές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών και αργιλοαμμωδών υλικών (όπως επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των Τόλη & Καβουνίδη, 2004, και Τόλη και λοιπών, 2006, για την ίδια περιοχή). Επίσης απαντώνται ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστολίθων μικρού πάχους καθώς και σημαντικά κοιτάσματα λιγνιτών, τα οποία κατά το παρελθόν έτυχαν έντονης εξόρυξης (στην άμεση περιοχή του Ολυμπιακού Αθλητικού Συγκροτήματος αναζητήθηκαν με μεθόδους σεισμικής τομογραφίας χωρίς να βρεθούν -Τόλης & Καβουνίδη, 2004). Τα συγκεκριμένα δείγματα ωστόσο μοιάζουν περισσότερο σε υλικά των Λιμνοχερσαίων Σχηματισμών Κηφισού που αποτελούνται από κυρίως καστανέρυθρου χρώματος, λεπτομερείς αποθέσεις πηλών, αργίλων και αργιλοαμμούχων υλικών με κατά θέσεις διάσπαρτες κροκάλες και παρεμβολές ψηφιδοπαγών και κροκαλοπαγών. Τα δείγματα της Αργίλου και της Μάργας Κηφισιάς προέρχονται από την περιοχή της Κάτω Κηφισιάς που απαντώνται οι Λιμνοχερσαίοι Σχηματισμοί Κηφισού (Γεωλ. Χ. Ελλάδα, Φύλλο «Κηφισιά», ΙΓΜΕ) με τα μαργαϊκά υλικά να εντοπίζονται χαμηλότερα στην στρωματογραφική στήλη από τους ερυθροπηλούς και τις αργίλους χωρίς να αποκλείονται ενστρώσεις του ενός υλικού εντός του άλλου. Η παρουσία μαργαϊκών υλικών εντός των Λιμνοχερσαίων Σχηματισμών Κηφισού δεν αναφέρεται στον Γεωλογικό Χάρτη της Ελλάδας για αυτούς αλλά η περιοχή γειτνιάζει γεωγραφικά με την περιοχή βορειότερα αυτής όπου εμφανίζονται οι Αδρομερείς Ποταμολιμναίοι Σχηματισμοί των παρυφών της Πάρνηθας και του Πεντελικού εντός των οποίων αναφέρεται ότι παρεμβάλλονται ερυθροί πηλοί και μαργαϊκά υλικά. Εκτιμάται ότι δεν υπήρχαν σημαντικά υπερκείμενα που να διαβρώθηκαν στις περιοχές από τις οποίες προήλθαν τα δείγματα.

Η Αργίλος Μελίτης Φλώρινας προέρχεται από δείγματα γεωτρήσεων για την κατασκευή νέας μονάδας στον Ατμοηλεκτρικό Σταθμό (ΑΗΣ) Μελίτης της ΔΕΗ Α.Ε. Και τα δείγματα αυτά ελήφθησαν με «φραγμό» και κατά τον χρόνο που ελήφθησαν από τα κιβώτια αποθήκευσής τους ήταν αρκετά ταλαιπωρημένα με ενδείξεις ότι είχαν αρχίσει να ξηραίνονται. Γι' αυτόν το λόγο και αυτά χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την παρασκευή δοκιμίων από αναζυμωμένο υλικό. Το υλικό εντάσσεται στις ολοκαινικές αποθέσεις της περιοχής που αποτελούνται κυρίως από στιφρές αργίλους έως αμμώδεις αργίλους σκούρου χρώματος. Γενικά εκτιμάται και για αυτό το υλικό ότι δεν υπήρχαν σημαντικού πάχους υπερκείμενα που να διαβρώθηκαν.

Η Αργίλος Ορεστιάδας Έβρου προέρχεται από ερευνητικό φρέαρ που διανοίχθηκε στα πλαίσια της έρευνας για την κατασκευή του τεχνικού εμποδίου στο χερσαίο τμήμα της ελληνοτουρκικής



μεθορίου («φράχτης» Έβρου). Το δείγμα ήταν διαταραγμένο και χρησιμοποιήθηκε μόνο για την παρασκευή δοκιμών από αναζυμωμένο υλικό. Στην ευρύτερη περιοχή κυριαρχούν οι τεταρτογενείς αλλουβιακές προσχώσεις των ποταμών Άρδα και Έβρου αποτελούμενες από υλικά ποικίλης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Το συγκεκριμένο υλικό προέρχεται από τις αλλουβιακές προσχώσεις του Έβρου και γενικά εκτιμάται ότι δεν υπήρχαν σημαντικού πάχους υπερκείμενα που να διαβρώθηκαν.

Η Άργιλος Λονδίνου προέρχεται από το Λονδίνο και τον γνωστό από την διεθνή βιβλιογραφία αργιλικό σχηματισμό. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από την εκσκαφή ερευνητικού φρέατος στη θέση Prospect Park στο Βόρειο Λονδίνο. Κατά το χρόνο απόκτησής τους ο γράφων ήταν φοιτητής στο πανεπιστήμιο Imperial College του Λονδίνου και τα χρησιμοποίησε για την εκτέλεση δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης που αναφέρονται για πρώτη φορά στην διπλωματική του εργασία εκεί (Bardanis, 1998). Οι δοκιμές αυτές έγιναν στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του πανεπιστημίου Imperial College. Τα αποτελέσματα τους χρησιμοποιούνται και στην παρούσα διδακτορική διατριβή καθώς το υλικό αυτό είναι μία άργιλος φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης με υψηλή πλαστικότητα (Κεφάλαιο 13). Η Άργιλος Λονδίνου είναι μία άργιλος θαλάσσιας προέλευσης (marine clay), η απόθεση της οποίας τοποθετείται γεωλογικά στο Ηώκαινο (Τριτογενές-Μέσο Παλαιογενές). Στη φυσική της κατάσταση είναι συνήθως πολύ στιφρή, ρηγματωμένη με χρώμα σκούρο γκριζό έως μπλε όταν δεν έχει αποσαθρωθεί και καφέ έως γκριζό ή καφέ όταν είναι αποσαθρωμένη. Το ανώτερο τμήμα της μπορεί να βρεθεί αποσαθρωμένο σε βάθη μέχρι και 15 m από την επιφάνεια (Chandler, 2000) οπότε και η άργιλος απαντάται με το χρώμα που έχει το αποσαθρωμένο υλικό και χαμηλότερη αντοχή. Ο Chandler (2000) επέδειξε ότι όσο αυξάνεται το απόλυτο υψόμετρο στο οποίο απαντάται η Άργιλος Λονδίνου στην επιφάνεια, τόσο μεγαλώνει το πάχος μέχρι το οποίο βρίσκεται αποσαθρωμένη. Γενικά στην Άργιλο Λονδίνου απαντώνται μόνο ίχνη χονδρόκοκκου υλικού και τοπικά μπορεί να βρεθούν ορίζοντες με στρογγυλοποιημένα συγκρίματα αργιλόλιθου (claystone nodules). Προς το βάθος του σχηματισμού (γνωστό ως «Basement Beds») το υλικό γίνεται πιο αμμώδες και παρουσιάζεται μία χαρακτηριστική στρώση αποστρογγυλοποιημένων χαλίκων (pebble band). Το πάχος της Άργιλου Λονδίνου στη θέση Prospect Park κυμαίνεται μεταξύ 35 και 40 m (Willis & Hamilton, 1996).

Η Άργιλος Αμφιλοχίας προέρχεται από δείγματα γεωτρήσεων για την κατασκευή της Ιόνιας Οδού, συγκεκριμένα στο τμήμα παράκαμψης της πόλης της Αμφιλοχίας. Και τα δείγματα αυτά ελήφθησαν με «φραγμό» και κατά τον χρόνο που ελήφθησαν από τα κιβώτια αποθήκευσής τους

ήταν αρκετά ταλαιπωρημένα με ενδείξεις ότι είχαν αρχίσει να ξηραίνονται. Γι' αυτόν το λόγο και αυτά χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την παρασκευή δοκιμίων από αναζυμωμένο υλικό. Το υλικό εντάσσεται στις ολοκαινικές αποθέσεις της περιοχής που καλύπτουν το ασβεστολιθικό υπόβαθρο. Γενικά απαντώνται εδαφικά υλικά ποικίλης κοκκομετρικής διαβάθμισης, αλλά το συγκεκριμένο δείγμα αποτελεί αργιλοίλυ πολύ υψηλής πλαστικότητας. Γενικά εκτιμάται και για αυτό το υλικό ότι δεν υπήρχαν σημαντικού πάχους υπερκείμενα που να διαβρώθηκαν.

Η Μάργα Κορίνθου προέρχεται από το βόρειο πρηνές της Διώρυγας της Κορίνθου. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν αποκόπηκαν με προσοχή από προσιτό σημείο του βόρειου πρηνούς της διώρυγας στην περιοχή του «Μεγάλου Χαλάσματος»<sup>6</sup> και συνιστούν αδιατάρακτα δείγματα πολύ υψηλής ποιότητας από τα οποία μορφώθηκαν δοκίμια για τη μελέτη της συμπεριφοράς του φυσικού υλικού εκτός από αναζυμωμένα. Με βάση τους Kanvadas, et al. (2003) η ευρύτερη περιοχή της Διώρυγας της Κορίνθου καλύπτεται από σημαντικού πάχους πλειοκαινικές αποθέσεις μαργών γνωστές ως σχηματισμός με την ονομασία «Μάργα Κορίνθου», οι οποίες ανυψώθηκαν (uplifted) πάνω από το επίπεδο της θάλασσας κατά το Πλειστόκαινο και υπόκεινται πλειστοκαινικών ιζημάτων (ασθενώς συγκολλημένοι ψαμμίτες και λατυποπαγή που αποσαθρώνονται σε αργιλώδεις ή ιλυώδεις άμμους). Σύμφωνα με τον Freyberg (1973) οι μάργες της Κορίνθου απετίθεντο αρχικά σε γλυκό νερό, στη συνέχεια σε νερό με μεταβαλλόμενη αλατότητα και προς το τέλος σε θαλάσσιο περιβάλλον. Οι υπάρχουσες γεωλογικές πληροφορίες υποδεικνύουν ότι πολύ μικρό πάχος υπερκειμένων έχει αφαιρεθεί από διάβρωση και κατά συνέπεια οι μάργες της Κορίνθου μπορούν να θεωρηθούν γεωλογικά «κανονικά στερεοποιημένες» (πληροφορία που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη της συμπίεστότητάς τους και των χαρακτηριστικών ξήρανσης όπως περιγράφεται στα Κεφάλαια 13 και 14).

Η Μάργα Πατρών προέρχεται από τα προϊόντα εκσκαφής της σήραγγας μήκους 250 m του αρχικού τμήματος K1-K4 της Ευρείας Παράκαμψης Πατρών<sup>7</sup>. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν ελήφθησαν από τα προϊόντα εκσκαφής της σήραγγας και ήταν προφανώς διαταραγμένα. Κατά τον Γεωλογικό Χάρτη της Ελλάδας (Φύλλα «Πάτρα», «Χαλανδρίτσα» και «Ναύπακτος», ΙΓΜΕ) και τους Ντούλη & Ρίτσο (1997) η Μάργα Πατρών ανήκει στο Νεογενές (Πλειόκαινο) και έχει αποτεθεί σε θαλάσσιο ή υφάλμυρο περιβάλλον (αβαθής ή μικρού βάθους

---

<sup>6</sup> Θέση κατά μήκος της διώρυγας όπου διερχόταν η πρώτη σιδηροδρομική γέφυρα. Αυτή καταστράφηκε κατά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο προκαλώντας την μεγαλύτερη κατολίπηση στην ιστορία της διώρυγας και κλείνοντάς την για την ναυσιπλοΐα μέχρι την επαναδιάνοιξη της στη δεκαετία του 1950. Η θέση αυτή αναγνωρίζεται μέχρι σήμερα από το μεγαλύτερο πλάτος της διώρυγας εκεί και την χαρακτηριστική ακτή μικρού πλάτους στο βόρειο πρηνές από όπου ελήφθησαν τα δείγματα.

<sup>7</sup> Κατασκευή «Κ. Ι. Σαραντόπουλος» Α.Ε.

θαλάσσια απόθεση). Εμφανίζεται σε διάφορες λιθολογικές φάσεις από τις οποίες στην περιοχή διάνοιξης της σήραγγας από την οποία προήλθε το υλικό που χρησιμοποιήθηκε, συναντάται κυρίως η λεπτομερής αργιλική φάση σε συνδυασμό με επάλληλες λεπτές αμμώδεις ενστρώσεις. Τοπικά μέσα στη μάζα της μπορεί να υπάρχουν εμφανίσεις πιο αμμώδους (ή και ακόμα πιο χονδρόκοκκου υλικού) χωρίς να εμφανίζονται σαφή όρια. Οι μάργες αυτές στο σύνολό τους έχουν συνεκτική δομή, μικρή αντοχή στη διάβρωση και ενώ σε βάθος βρίσκονται σε αρκετά καλή κατάσταση, προς την επιφάνεια υπάρχει μανδύας αποσάθρωσης από υλικά αργιλικής σύστασης, χαλαρής δομής. Με βάση την ορυκτολογική ανάλυση που έγινε στο δείγμα του υλικού που χρησιμοποιήθηκε προέκυψε ότι πρόκειται μάλλον για μαργαϊκή άργιλο.

Η Μάργα Χαλκουτσίου αποτελεί μαργαϊκό σχηματισμό που απαντάται στις ακτές της βόρειας Αττικής. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν αποκόπηκαν με προσοχή από προσιτό σημείο της ακτής κοντά στην πόλη του Χαλκουτσίου και συνιστούν αδιατάρακτα δείγματα πολύ υψηλής ποιότητας από τα οποία μορφώθηκαν δοκίμια για τη μελέτη της συμπεριφοράς του φυσικού υλικού εκτός από αναζυμωμένα. Ο μαργαϊκός αυτός σχηματισμός εκτείνεται κατά μήκος της ακτογραμμής τουλάχιστον για 5km με την επιφάνειά του εκτεθειμένη στη διαβρωτική δράση της θάλασσας. Κατά μήκος της ακτογραμμής υπάρχουν μικρότερες ή μεγαλύτερες κατολισθήσεις εξαιτίας της θαλάσσιας διαβρωτικής δράσης στον πόδα των πρανών. Το πρανές από το οποίο ελήφθησαν τα δοκίμια ήταν χαμηλό αλλά γενικά για την περιοχή δεν μπορεί να αποκλειστεί σημαντική αφαίρεση προηγούμενων υπερκειμένων με τη μορφή κατολισθαίνουσων μαζών που καταλήγουν στη θαλάσσια λεκάνη. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου σχηματισμού είναι η έκθεσή του στη θέση αυτή στους επικρατούντες βόρειους ανέμους. Όπως επιδεικνύεται στο Κεφ. 14, το γεγονός αυτό μάλλον έχει επιδράσει στη φύση των επιφανειακών τουλάχιστον τμημάτων του σχηματισμού.

Ο Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου προέρχεται από εκσκαφή σε χαμηλό πρανές ορύγματος οδού στο βόρειο τμήμα του νησιού και αποτελεί μέρος του αποσαθρωμένου μανδύα των υποκείμενων Φυλλιτών. Το δείγμα που ελήφθη ήταν διαταραγμένο και αποκόπηκε από πρανές ορύγματος επαρχιακής οδού.

Ο Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου εντάσσεται γεωλογικά στο Ηωελληνικό Τεκτονικό Κάλυμμα και απαντάται μαζί με οφειτασβεστίτες και το οφιολιθικό “mélange” (Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο «Νήσος Σκύρος»). Στην περιοχή του Φράγματος Φερεκάμπου Ν. Σκύρου από όπου προέρχεται το δείγμα απαντάται άλλοτε πιο βραχώδης και άλλοτε πιο

αποσαθρωμένος (συνήθως μάλιστα φυλλώδης) με κάλυμμα αποτελούμενο από μεταβαλλόμενου πάχους στρώσεις αργίλου, αμμώδους αργίλου και αμμοχαλικών εγγύτερα στην κοίτη ποταμών, ή –προς τις πλαγιές της κοιλάδας- και λατυποπαγών και ασβεστολίθων. Το δείγμα που ελήφθη ήταν διαταραγμένο και αποκόπηκε από πρυνές εκσκαφής στην περιοχή του φράγματος.

Ο Αργιλοποιημένος Ιλύλιθος Πάρνηθας εντάσσεται γεωλογικά στις εμφανίσεις του φλύσχη που απαντώνται στο όρος Πάρνηθα. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν αποκόπηκαν με προσοχή από φυσικό πρυνές πλησίον μικρής τεχνητής λίμνης στην Ιπποκράτειο Πολιτεία και συνιστούν αδιατάρακτα δείγματα πολύ υψηλής ποιότητας από τα οποία μορφώθηκαν δοκίμια για τη μελέτη της συμπεριφοράς του φυσικού υλικού εκτός από αναζυμωμένα.

### **11.2.3 Συνόψιση κύριων γεωλογικών χαρακτηριστικών**

Στον Πίν. 11.1 συνοψίζονται τα κύρια γεωλογικά χαρακτηριστικά των εδαφών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Ειδικά σε ό,τι αφορά το θέμα της παρουσίας ή όχι παλαιότερων υπερκειμένων, η πληροφορία αυτή κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών και παρατίθεται στον Πίν. 11.1, με την εξής όμως διευκρίνιση: οι αναφερόμενες πληροφορίες για μη ύπαρξη παλαιότερων υπερκειμένων αφορούν στη μη ύπαρξη παλαιότερων εδαφικών σχηματισμών επί των σχηματισμών από τους οποίους προέρχονται τα δείγματα των εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν ή άλλου είδους φορτία όπως στρώσεις πάγων μεγάλου πάχους λόγω παγετωνικής δράσης. Δεν αναφέρονται στη διαβρωτική δράση ποταμών και χειμάρρων, οι οποίοι με την παρουσία τους έχουν διαβρώσει ή προσχώσει την επιφάνεια του εδάφους σε διάφορες περιοχές. Κατά συνέπεια με αυτή τη διευκρίνιση πρόσφατα ιζήματα χωρίς σημαντική ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης με αποτύπωση της επιρροής της στα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της «δομής» τους (structure) είναι πιθανόν μόνο η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων και η Άργιλος Χανίων, η Άργιλος Λιβαδερού Δράμας και η Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου. Αντίστοιχα, πραγματικά φορτισμένα κατά το παρελθόν ιζηματογενής άργιλος από την οποία αφαιρέθηκαν στη διάρκεια της γεωλογικής της ιστορίας σημαντικά φορτία είναι μόνο η Άργιλος Λονδίνου. Τα υπόλοιπα από τα χρησιμοποιηθέντα εδάφη φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης έχουν επηρεαστεί από μικρού μεγέθους διαδοχικές διαβρώσεις και προσχώσεις στην επιφάνεια του εδάφους λόγω της παρουσίας ποταμών και χειμάρρων (χαρακτηριστικά παραδείγματα τα αργιλικά και μαργαϊκά ιζήματα εντός του Λεκανοπεδίου Αττικής και η επιρροή στην ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης

τους της παρουσίας του Κηφισού Ποταμού). Ειδικά για τα μαργαϊκά εδάφη πρέπει να ληφθεί υπόψη η παρουσία των ανθρακικών ορυκτών και η επιρροή τους στη «δομή» των εδαφικών υλικών (Kanvadas, et al., 2003) και ιδιαίτερα για τη Μάργα Κορίνθου η ανύψωσή της κατά το Πλειστόκαινο που προφανώς θα μεταφράστηκε σε αύξηση της ενεργού τάσης (λόγω μείωσης των πιέσεων πόρων εντός αυτής). Η Μάργα Χαλκουτσίου αποτελεί ιδιαίτερη περίπτωση καθώς σε αυτήν φαίνεται ότι υπάρχει αφενός η δομή λόγω της παρουσίας των ανθρακικών ορυκτών αλλά και η αφαίρεση υπερκειμένων με τη μορφή αβαθών ή και βαθύτερων κατολισθήσεων κατά μήκος της ακτής στην οποία εμφανίζεται στην επιφάνεια ο συγκεκριμένος σχηματισμός. Κατά συνέπεια τα περισσότερα από τα χρησιμοποιηθέντα εδαφικά υλικά δεν μπορούν να θεωρηθούν γεωλογικά «υπερστερεοποιημένα» με την έννοια της ύπαρξης παλαιών φορτίων λόγω υπερκειμένων σχηματισμών ή παγετώνων (μόνο η Άργιλος Λονδίνου, και οριακά η Μάργα Χαλκουτσίου) αλλά ούτε και γεωλογικά «κανονικά στερεοποιημένα», κύρια λόγω της δράσης ποταμών και χειμάρρων στην επιφάνεια του εδάφους (π.χ. αργιλικά και μαργαϊκά ιζήματα κοντά στην κοίτη του Ποταμού Κηφισού), φαινομένων τεκτονισμού (ανύψωση Μάργας Κορίνθου κατά το Πλειστόκαινο) και ειδικά για τις μάργες λόγω της παρουσίας των ανθρακικών ορυκτών. Υπό αυτό το πρίσμα, γεωλογικά «κανονικά στερεοποιημένα» εδαφικά υλικά από τα χρησιμοποιηθέντα είναι μόνο η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων, η Άργιλος Χανίων, η Άργιλος Λιβαδερού Δράμας και η Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου.

**Πίνακας 11.1.** Γεωλογική ηλικία και προέλευση ιζηματογενών εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές δοκιμές της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Εδαφικό υλικό	Γεωλογική ηλικία σχηματισμού	Γεωλογική προέλευση σχηματισμού	Γεωλογική πληροφορία για προηγούμενη ύπαρξη υπερκείμενων
Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων	Τεταρτογενές/ Ολόκαινο	Απόθεση σε λιμναίο περιβάλλον	Πρόσφατο ίζημα χωρίς παρουσία παλαιότερων υπερκείμενων
Άργιλος Χανίων	Τεταρτογενές/ Ολόκαινο	Αλλουβιακές προσχώσεις	Ίζημα μικρής ηλικίας χωρίς παρουσία παλαιότερων υπερκείμενων
Άργιλος Κορίνθου	Νεογενές/ Πλειόκαινο	Απόθεση σε θαλάσσιο περιβάλλον	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση
Άργιλος Λιβαδερού Δράμας	Άνω Πλειόκαινο/ Μέσο Πλειστόκαινο	Λιμνοχερσαίο ίζημα	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση
Άργιλος Κηφισιάς	Νεογενές/Ανώτερο Μειόκαινο	Απόθεση σε λιμναίο περιβάλλον	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση
Άργιλος Μελίτης Φλώρινας	Ολόκαινο	Ποταμολιμναία ιζήματα	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση
Άργιλος Αμαρουσίου	Νεογενές/Ανώτερο Μειόκαινο	Απόθεση σε λιμναίο περιβάλλον	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση
Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου	Τεταρτογενές	Αλλουβιακές προσχώσεις	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση
Άργιλος Λονδίνου	Παλαιογενές/ Ηώκαινο	Θαλάσσιας προέλευσης άργιλος	Υπερκείμενοι παγετόνες
Άργιλος Αμφιλοχίας	Ολόκαινο	Αποθέσεις κορημάτων	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση
Μάργα Κορίνθου	Νεογενές/ Πλειόκαινο	Ανάλογα με το βάθος και από τα μεγαλύτερα βάθη προς τα μικρότερα: σε γλυκό νερό, σε νερό μεταβλητής αλατότητας και σε θαλασσινό νερό	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση
Μάργα Κηφισιάς	Νεογενές/Ανώτερο Μειόκαινο	Απόθεση σε λιμναίο περιβάλλον	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση
Μάργα Πατρών	Νεογενές/ Πλειόκαινο	Απόθεση σε θαλάσσιο ή υφάλμυρο περιβάλλον	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση
Μάργα Χαλκουτσίου	Νεογενές	Απόθεση σε θαλάσσιο ή υφάλμυρο περιβάλλον	Κοντά στις ακτές από όπου ελήφθη το δείγμα ενδεχομένως και να έχει γίνει σημαντική διάβρωση στον γεωλογικό χρόνο
Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου	Ιουρασικό	Αποσαθρωμένος μανδύας	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση
Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου	Ιουρασικό	Αποσαθρωμένος μανδύας	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση
Αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας	Ανώτερο Μαιστρίχτιο	Αποσαθρωμένος μανδύας	Δεν έχει γίνει σημαντική διάβρωση

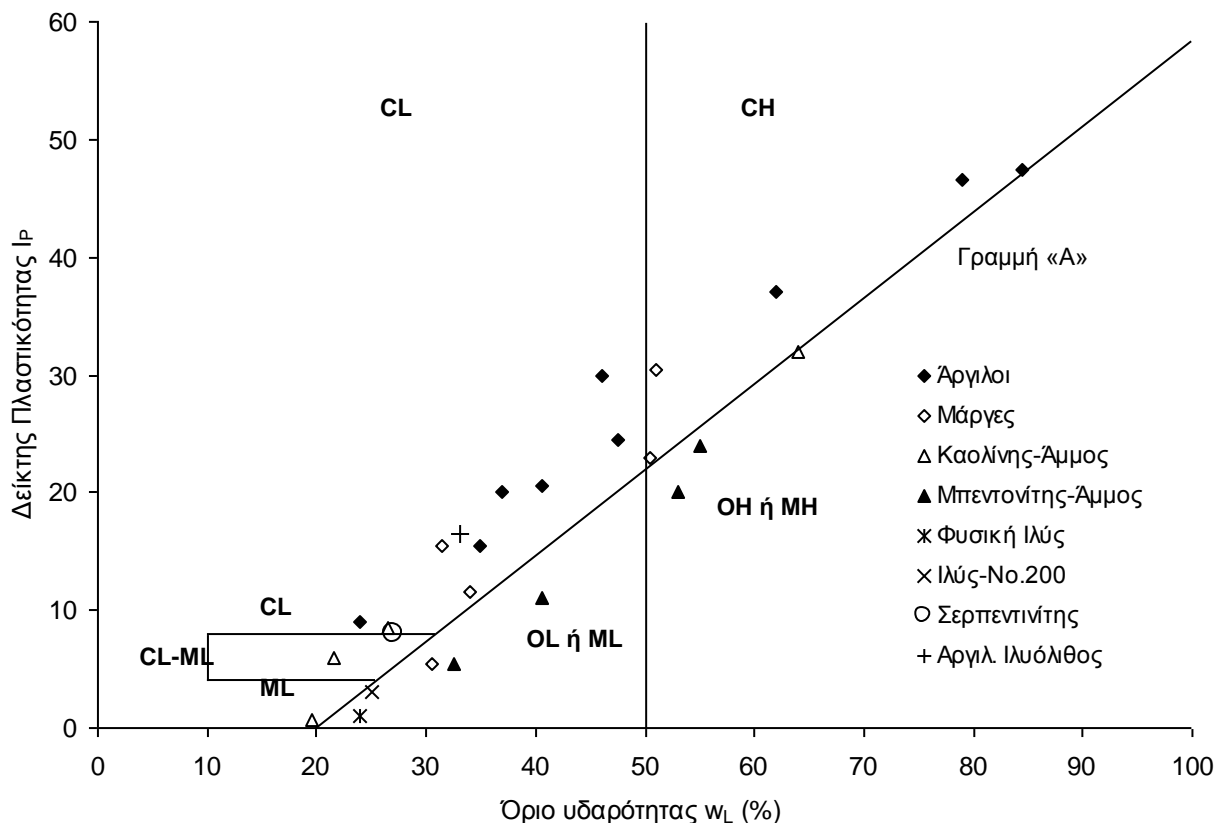
### 11.3 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΙΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Για τα προαναφερθέντα εδαφικά υλικά στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών που απαιτήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής έγιναν και πλήρεις δοκιμές κατάταξης. Αυτές περιελάμβαναν:

- Προσδιορισμό ποσοστού φυσικής υγρασίας (για τα εδαφικά υλικά για τα οποία ελήφθησαν αδιατάρακτα δείγματα οπότε είχε νόημα αυτός).
- Προσδιορισμό Ορίων Atterberg.
- Προσδιορισμό ανηγμένου ειδικού βάρους στερεάς φάσης ( $G_s$ ).
- Προσδιορισμό κοκκομετρικής διαβάθμισης με κόσκινα και αραιόμετρο για τον προσδιορισμό της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών προσδιορισμού φυσικών χαρακτηριστικών που πραγματοποιήθηκαν στα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης παρουσιάζονται στον Πίν. 11.2α και στα υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης στον Πίν. 11.2β. Οι αναφερόμενες τιμές της δραστηρότητας έχουν προκύψει με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών και όχι την ορυκτολογική τους σύσταση. Αυτή λαμβάνεται υπόψη στην §11.4. Αναφέρονται δε τα φυσικά χαρακτηριστικά μόνο των εδαφών στα οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών. Η Μάργα Κορίνθου κατά την εξέτασή της διακρίθηκε σε χαμηλής και υψηλής πλαστικότητας υλικό με διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά και αντίστοιχα διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά (όπως παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 13).

Στο Σχ. 11.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande με στοιχεία των εξετασθέντων εδαφών. Με βάση το σχήμα αυτό όλα τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης κατατάσσονται ως άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας εκτός από την Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου, την Άργιλο Λονδίνου, την Άργιλο Αμφιλοχίας, την Μάργα Πατρών και την Μάργα Χαλκουτσίου που κατατάσσονται ως άργιλοι υψηλής πλαστικότητας, την λιγότερο πλαστική Μάργα Κορίνθου και την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων που κατατάσσονται ως ιλείς χαμηλής πλαστικότητας. Από τα εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης ο αμιγής καολίνης και τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου SB-10 και SB-15 κατατάσσονται ως ιλείς υψηλής πλαστικότητας, και το μείγμα καολίνη-άμμου SK-50 ως άργιλος χαμηλής πλαστικότητας, ενώ



**Σχήμα 11.1.** Διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande με τα αποτελέσματα από τα εδαφικά υλικά στα οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων.

όλα τα υπόλοιπα υλικά ως ιλεις χαμηλής πλαστικότητας. Οργανικά ανιχνεύθηκαν μόνο στα εδαφικά υλικά που αναφέρονται στον Πίν. 11.2α όπου παρατίθενται τα φυσικά χαρακτηριστικά όλων των εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Στον Πιν. 11.2β παρατίθενται τα φυσικά χαρακτηριστικά όλων των εδαφικών υλικών τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης.

Στα Σχ. 11.2α, 11.2β, 11.2γ, 11.2δ και 11.2ε παρουσιάζονται οι καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης για τις αργίλους φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης μαζί με τον Καολίνη τύπου Speswhite και την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, τις αργίλους φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, τις μάργες, τα μείγματα καολίνη-άμμου και την ιλύ που εξετάστηκαν. Στον Πίν. 11.3α παρουσιάζονται τα ποσοστά αργίλου, ιλύος και άμμου για κάθε εδαφικό υλικό φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, ενώ στον Πίν. 11.3β παρουσιάζονται τα ποσοστά αυτά για κάθε εδαφικό υλικό τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Με βάση τα στοιχεία αυτά, τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης κατατάσσονται ως εξής:



- Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων: Ιλυώδης λεπτή άμμος με λίγη άργιλο
- Άργιλος Χανίων: Αμμώδης ιλύς με άργιλο
- Άργιλος Κορίνθου: Αργιλώδης ιλύς με λίγη λεπτή άμμο
- Άργιλος Λιβαδερού Δράμας: Αμμώδης ιλύς με άργιλο
- Άργιλος Κηφισιάς: Αργιλώδης ιλύς με ίχνη άμμου
- Άργιλος Μελίτης Φλώρινας: Αμμώδης ιλύς με άργιλο
- Άργιλος Αμαρουσίου: Αργιλώδης ιλύς με άμμο και ίχνη λεπτών χαλίκων
- Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου: Αργιλώδης ιλύς με ίχνη άμμου
- Άργιλος Λονδίνου: Αργιλώδης ιλύς<sup>8</sup>
- Άργιλος Αμφιλοχίας: Αργιλώδης ιλύς
- Μάργα Κορίνθου: Ιλύς με λίγη άμμο και άργιλο
- Πλ. Μάργα Κορίνθου: Αργιλώδης ιλύς με ίχνη άμμου
- Μάργα Κηφισιάς: Αργιλώδης ιλύς με άμμο
- Μάργα Πατρών: Αργιλώδης ιλύς
- Μάργα Χαλκουτσίου: Αργιλώδης ιλύς με άμμο
- Αποσ. Φυλλίτης Σκύρου: Αμμώδης ιλύς με ίχνη αργίλου
- Αποσ. Σερπεντινίτης Σκύρου: Αμμοϊλύς με ίχνη αργίλου
- Αργιλ/νος Ιλυόλιθος Πάρνηθας: Αργιλώδης ιλύς με άμμο

και τα εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης ως εξής:

- Θραυστή χονδροκόκκη άμμος: (ως ονομάζεται)
- Καολίνης Speswhite: Ιλυώδης άργιλος
- Πολύ Λεπτόκοκκη Άμμος (ως ονομάζεται)
- Ιλύς (διερχ. Νο 200 Ιλύος Λ. Ιωαννίνων): Αργιλώδης Ιλύς
- SK-05, SK-10, SK-20, SK-35 και SK-50: Αργιλώδεις λεπτόκοκκες άμμοι με λίγη ιλύ
- SB-02, SB-04, SB-07, SB-10 και SB-15: Αργιλώδεις λεπτόκοκκες άμμοι

Στο Σχ. 11.3 συσχετίζεται ο Δείκτης Πλαστικότητας με το ποσοστό της περιεχόμενης αργίλου όπως αυτό προέκυψε από τις κοκκομετρικές αναλύσεις με αραιόμετρο. Όλα τα εδάφη είναι μέ-

<sup>8</sup> Εκφράζονται επιφυλάξεις για την κοκκομετρική διαβάθμιση αυτού του υλικού, το οποίο αποδεδειγμένα περιέχει υψηλά ποσοστά αργίλου, καθώς κατά το χρόνο πραγματοποίησης της δοκιμής προσδιορισμού κοκκομετρικής διαβάθμισης με κόσκινα είχε ξεραθεί πρακτικά ως το όριο συρρίκνωσής του.

σης έως υψηλής δραστηριότητας με εξαίρεση τα μείγματα καολίνη-άμμου, την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων και το διερχόμενο της από το κόσκινο Νο 200 που είναι χαμηλής δραστηριότητας.

**Πίνακας 11.2α.** Φυσικά χαρακτηριστικά εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης.

Εδαφικό υλικό	w <sub>0</sub>	w <sub>1</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	G <sub>s</sub>	Ποσοστό οργανικών (μέθοδος ξηρής καύσης)	Ποσοστό Αργιλικού Υλικού	Δραστηριότητα
	(%)	(%)	(%)			(%)	(%)	
Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων	23.0	24.0	23.0	1.0	2.55	-	8.4	0.12
Άργιλος Χανίων	19.7 <sup>9</sup>	24.0	15.0	9.0	2.68	-	18.1	0.50
Άργιλος Κορίνθου	19.2 <sup>9</sup>	35.0	19.5	15.5	2.58	-	20.6	0.75
Άργιλος Λιβαδερού Δράμας	-	37.0	17.0	20.0	2.70	-	22.0	0.91
Άργιλος Κηφισιάς	20.3	40.5	20.0	20.5	2.67	-	33.0	0.62
Άργιλος Μελίτης Φλώρινας	-	46.0	16.0	30.0	2.58	-	19.3	1.55
Άργιλος Αμαρουσίου	19.5	47.5	23.0	24.5	2.75	-	34.2	0.72
Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου	-	62.0	25.0	37.0	2.55	3.1	34.4	1.08
Άργιλος Λονδίνου	-	79.0	32.5	46.5	2.64	-	33.5	1.39
Άργιλος Αμφιλοχίας	37.1	84.5	37.0	47.5	2.62	1.6	49.9	0.95
Μάργα Κορίνθου	24.4	30.5	25.0	5.5	2.67	-	6.5	0.85
Πλ. Μάργα Κορίνθου	24.9	34.0	22.5	11.5	2.67	-	10.7	1.07
Μάργα Κηφισιάς	19.4	31.5	16.0	15.5	2.66	-	24.9	0.62
Μάργα Πατρών	-	50.5	27.5	23.0	2.65	-	28.2	0.82
Μάργα Χαλκουτσίου	22.9	51.0	20.5	30.5	2.69	1.8	20.5	1.49
Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου	-		N.P.		2.65	-	1.3	-
Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου	-	27.0	19.0	8.0	2.61	-	2.2	3.64
Αργιλοποιημένος Ιλύολιθος Πάρνηθας	6.4	33.0	16.5	16.5	2.69	1.5	28.3	0.58

<sup>9</sup> Για τις τιμές αυτές της φυσικής υγρασίας διατηρείται επιφύλαξη καθώς τα δείγματα είχαν ξεραθεί σε κάποιο βαθμό.

**Πίνακας 11.2β.** Φυσικά χαρακτηριστικά εδαφικών υλικών **τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης** (όρια Atterberg για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου όπως προσδιορίστηκαν από τον Αναστασίου, 2004).

Εδαφικό υλικό	w <sub>l</sub> (%)	w <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub>	G <sub>s</sub>	Ποσοστό Αργιλικού Υλικού (%)	Δραστικότητα
Θραυστή χονδρόκοκκη άμμος («ρυζάκι»)	-	-	-	2.75	0	-
Αμιγής Ιλύς	25.0	22.0	3.0	2.55	23.7	0.13
Καολίνης Speswhite	64.0	32.0	32.0	2.61	71.2	0.47
Πολύ Λεπτή Άμμος	-	-	-	2.55	0	-
SK-05	-	-	-	2.55	3.4	-
SK-10	-	-	-	2.56	6.5	-
SK-20	19.5	18.8	0.7	2.56	14.2	0.05
SK-35	21.5	15.5	6.0	2.57	24.9	0.25
SK-50	26.5	18.0	8.5	2.58	35.6	0.25
SB-02	-	-	-	2.55	2	-
SB-04	32.5	27.0	5.5	2.56	4	1.38
SB-07	40.5	29.5	11.0	2.56	7	1.57
SB-10	53.0	33.0	20.0	2.57	10	2.00
SB-15	55.0	31.0	24.0	2.58	15	1.60

Όπως φαίνεται από τους Πίν. 11.2α και 11.2β καλύφθηκε επαρκώς το εύρος πλαστικότητας από 0 έως 50 από τα εδαφικά υλικά φυσικής και τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Η ικανοποιητική αυτή κάλυψη του εύρους πλαστικότητας με τη μεγαλύτερη σημασία μεταφράζεται όπως φαίνεται και σε αντίστοιχη ικανοποιητική κάλυψη του εύρους τιμών ορίων υδαρότητας, του εύρους τιμών ποσοστού αργίλου και αργιλοϊλύος και του εύρους τιμών δραστικότητας (υπολογισμένης με βάση το ποσοστό σωματιδίων μεγέθους αργίλου και όχι το πραγματικό ποσοστό αργιλικών ορυκτών). Επίσης δοκιμάστηκε ικανοποιητικός αριθμός αργίλων αλλά και μαργών. Δόθηκε έμφαση στην εξέταση εδαφικών υλικών με πολύ μικρό δείκτη πλαστικότητας (Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων: 1, το διερχόμενο της από το κόσκινο No 200: 3, λιγότερο πλαστική Μάργα Κορίνθου και μείγμα μπεντονίτη-άμμου SB-04: 5.5 και μείγμα καολίνη-άμμου SK-20: 0.7) ή και μηδενικό όπως ο αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου, καθώς όπως επισημάνθηκε ήδη με βάση τα στοιχεία από τη βιβλιογραφία στο Κεφάλαιο 10 αλλά και αποδεικνύεται με βάση νέα πειραματικά δεδομένα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 13, εδαφικά υλικά με τέτοιες τιμές δείκτη πλαστικότητας παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε ό,τι αφορά την μονοδιάστατή τους συμπίεση επιβάλλοντας την χρήση της Γενικευμένης Γραμμής Εγγενούς

**Πίνακας 11.3α.** Ποσοστά αργίλου, ιλύος και άμμου εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης.

Εδαφικό υλικό	Ποσοστό Αργίλου (%)	Ποσοστό Ιλύος (%)	Ποσοστό Άμμου				Ποσοστό Χαλίκων (%)
			Λεπτή (%)	Μέση (%)	Χονδρή (%)	Σύνολο (%)	
Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων	<b>8.4</b>	<b>26.9</b>	64.3	0.4	0.1	<b>64.8</b>	-
Άργιλος Χανίων	<b>18.1</b>	<b>49.8</b>	28.8	2.9	0.4	<b>32.1</b>	-
Άργιλος Κορίνθου	<b>20.6</b>	<b>75.2</b>	4.1	0.1	-	<b>4.2</b>	-
Άργιλος Λιβαδερού Δράμας	<b>22.0</b>	<b>45.8</b>	20.7	9.2	2.1	<b>32.0</b>	<b>0.1</b>
Άργιλος Κηφισιάς	<b>33.0</b>	<b>64.0</b>	2.3	0.4	0.3	<b>3.0</b>	-
Άργιλος Μελίτης Φλώρινας	<b>19.3</b>	<b>43.6</b>	24.4	10.3	2.0	<b>36.7</b>	<b>0.3</b>
Άργιλος Αμαρουσίου	<b>34.2</b>	<b>51.8</b>	1.7	3.7	7.6	<b>13.0</b>	<b>1.0</b>
Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου	<b>34.4</b>	<b>61.8</b>	2.8	0.8	0.2	<b>3.8</b>	-
Άργιλος Λονδίνου	<b>33.5</b>	<b>66.5</b>	-	-	-	<b>0</b>	-
Άργιλος Αμφιλοχίας	<b>49.9</b>	<b>50.1</b>	-	-	-	-	-
Λιγότερο Πλαστική Μάργα Κορίνθου	<b>6.5</b>	<b>84.7</b>	8.8	-	-	<b>8.8</b>	-
Πιο Πλαστική Μάργα Κορίνθου	<b>10.7</b>	<b>86.1</b>	3.2	-	-	<b>3.2</b>	-
Μάργα Κηφισιάς	<b>24.9</b>	<b>68.1</b>	5.9	0.8	0.2	<b>7.0</b>	<b>0.1</b>
Μάργα Πατρών	<b>28.2</b>	<b>71.4</b>	0.4	-	-	<b>0.4</b>	-
Μάργα Χαλκουτσίου	<b>20.5</b>	<b>64.2</b>	10.0	4.1	0.9	<b>15.0</b>	<b>0.3</b>
Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου	<b>1.3</b>	<b>71.6</b>	16.8	8.5	1.9	<b>27.1</b>	<b>0</b>
Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου	<b>2.2</b>	<b>48.5</b>	27.1	16.8	4.8	<b>48.6</b>	<b>0.7</b>
Αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας	<b>28.3</b>	<b>46.3</b>	10.5	7.9	2.9	<b>21.3</b>	<b>4.1</b>

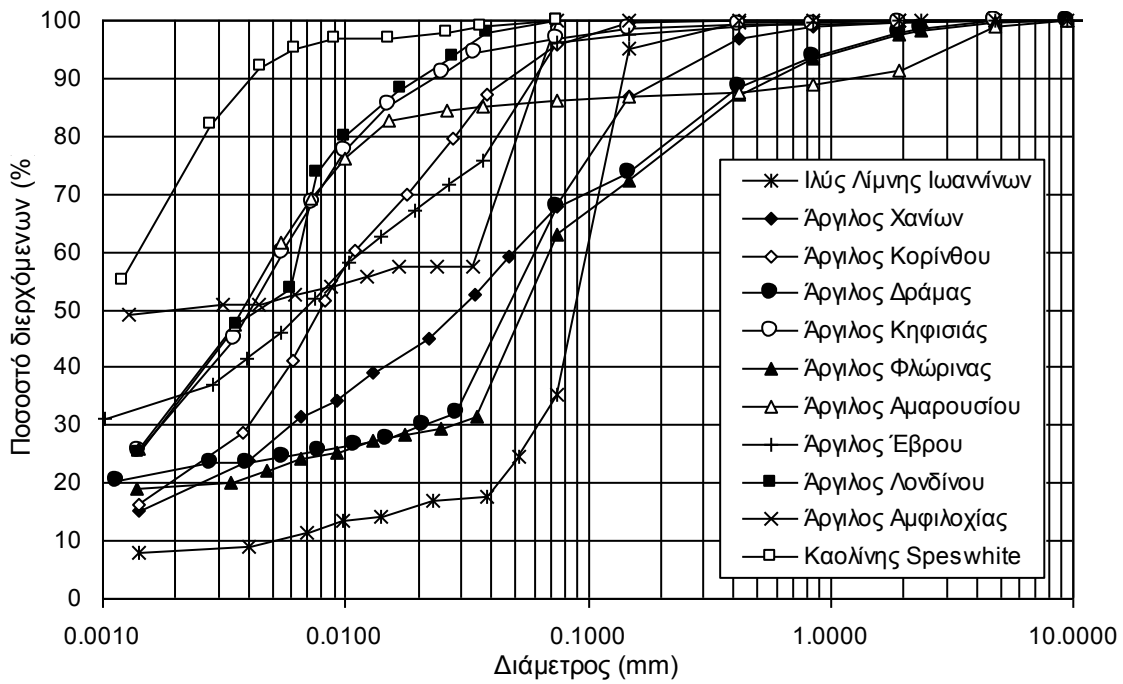
**Πίνακας 11.3β.** Ποσοστά αργίλου, ιλύος και άμμου εδαφικών υλικών τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης.

Εδαφικό υλικό	Ποσοστό Αργίλου (%)	Ποσοστό Ιλύος (%)	Ποσοστό Άμμου			
			Λεπτή (%)	Μέση (%)	Χονδρή (%)	Σύνολο (%)
Θραυστή χονδρόκοκκη άμμος («φυζάκι»)	<b>0</b>	<b>0.4</b>	8.3	31.4	59.9	<b>99.6</b>
Αμγής Ιλύς	<b>23.7</b>	<b>76.3</b>	-	-	-	<b>0</b>
Καολίνης Speswhite	<b>68.3</b>	<b>31.7</b>	-	-	-	<b>0</b>
Πολύ Λεπτή Άμμος	<b>0</b>	<b>0</b>	100	-	-	<b>100</b>
SK-05	<b>3.4</b>	<b>1.6</b>	95	-	-	<b>95</b>
SK-10	<b>6.8</b>	<b>3.2</b>	90	-	-	<b>90</b>
SK-20	<b>13.7</b>	<b>6.3</b>	80	-	-	<b>80</b>
SK-35	<b>23.9</b>	<b>11.1</b>	65	-	-	<b>65</b>
SK-50	<b>34.2</b>	<b>15.8</b>	50	-	-	<b>50</b>
SB-02	<b>2</b>	-	98	-	-	<b>98</b>
SB-04	<b>4</b>	-	96	-	-	<b>96</b>
SB-07	<b>7</b>	-	93	-	-	<b>93</b>
SB-10	<b>10</b>	-	90	-	-	<b>90</b>
SB-15	<b>15</b>	-	85	-	-	<b>85</b>

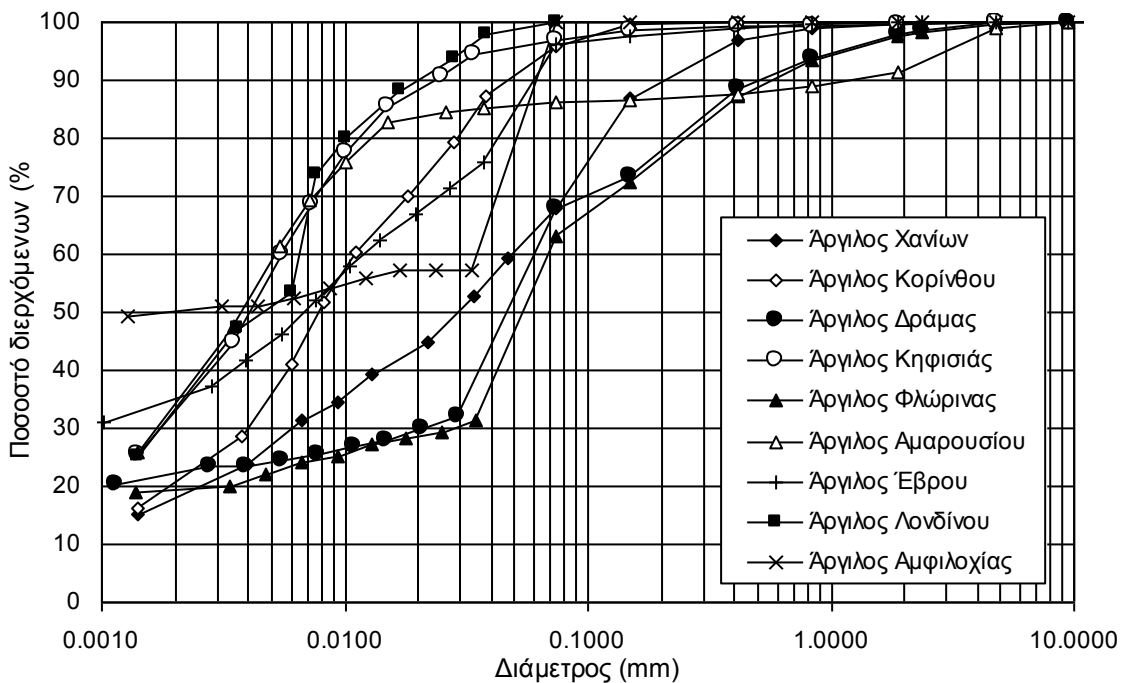
Συμπίεσης. Ο προσδιορισμός τόσο χαμηλών τιμών του δείκτη πλαστικότητας αποδείχθηκε εξαιρετικά επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία που απαίτησε μεγάλο αριθμό επαναλήψεων των δοκιμών (για την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων ο αριθμός των δοκιμών έφτασε τις 10). Τόσο χαμηλές τιμές δείκτη πλαστικότητας απαντώνται και στην βιβλιογραφία όπως π.χ. 1 για ιλύ από την Ποτίδαια από τους Νάσκο (2003), 2 έως 5 από τους Κούκη και λοιπούς (1997) για αμμοίλεις έως αργιλοϊλυώδεις άμμους από την ευρύτερη περιοχή της πόλης των Τρικάλων, 4.8 για μείγμα καολίνη (30%)-λεπτής χαλαζιτικής άμμου (70%) από τους Mesri & Cepeda Diaz (1968), 4.7 για μείγμα καολίνη (11.25%)-μπεντονίτη (1.25%)-άμμου (87.5%) από τους Seed, et al. (1964) και 1.5 έως 4 από τους Μπαρδάνη & Καβουνίδη (2001β) για αργιλοίλεις από τον ελλαδικό χώρο.

Η επαρκής κάλυψη του εύρους πλαστικότητας φαίνεται και στο Σχ. 11.1 όπου παρουσιάζεται το Διάγραμμα Πλαστικότητας του Casagrande με τα αποτελέσματα των εδαφικών υλικών που δοκιμάστηκαν. Τα περισσότερα από τα εδαφικά υλικά βρίσκονται επί της Γραμμής «Α» ή πάνω από αυτήν με εξαίρεση την λιγότερο πλαστική Μάργα Κορίνθου, την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων στη φυσική της κοκκομετρική διαβάθμιση και το διερχόμενο αυτής από το κόσκινο Νο 200, αλλά και τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου. Η θέση των μειγμάτων μπεντονίτη-άμμου στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande κάτω από την Γραμμή «Α» φαίνεται προς στιγμή παράλογη δεδομένης της παρουσίας του μπεντονίτη. Η περιεκτικότητα όμως των μειγμάτων σε μπεντονίτη είναι πολύ μικρή προσδίδοντας συνολική συμπεριφορά ιλύος (ιδίως για τα μικρότερης περιεκτικότητας σε μπεντονίτη μείγματα μεταξύ τους όπως επιδεικνύεται στο Κεφάλαιο 13 και για τις μηχανικές ιδιότητες), η οποία μεταβάλλεται για τα μείγματα υψηλότερης περιεκτικότητας σε μπεντονίτη (προβάλλονται πάνω από την Γραμμή «Α» με διαρκώς αυξανόμενη απόσταση μέχρι το σημείο που αντιστοιχεί στον αμιγή μπεντονίτη). Αυτό έχει επιδειχθεί από τους Park & Koumoto (2001) και επιβεβαιώθηκε και από τον Αναστασίου (2004).

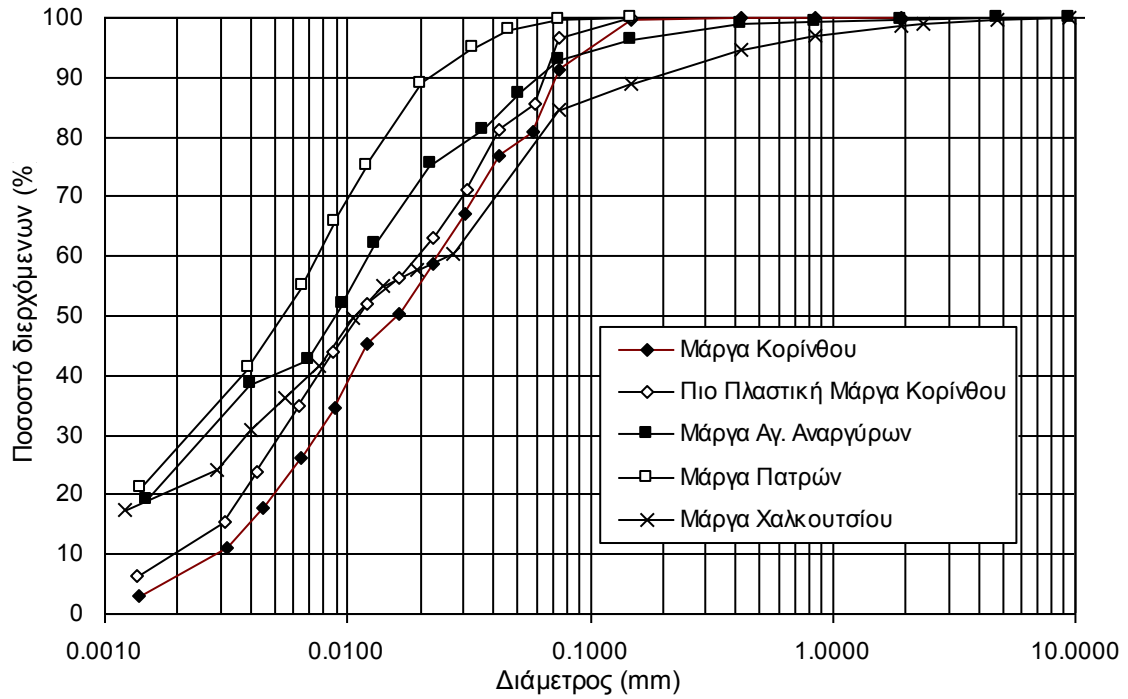
Σε ό,τι αφορά τις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις, όπως φαίνεται από τα Σχ. 11.2α, 11.2β και 11.2γ επιτεύχθηκε ικανοποιητική κάλυψη του εύρους των κοκκομετρικών διαβαθμίσεων που καλύπτουν λεπτόκοκκα (αργιλικά) εδάφη ως προς το περιεχόμενο ποσοστό αργίλου, ιλύος και χονδροκόκκων. Προς συμπλήρωση του εύρους κοκκομετρικής διαβάθμισης χρησιμοποιήθηκαν και τα εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης, οι καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης των οποίων παρουσιάζονται στο Σχ. 11.2δ για τα μείγματα καολίνη-άμμου (όπως και η κοκκομετρική διαβάθμιση του αμιγούς Καολίνη Speswhite). Από την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης του αμιγούς καολίνη μέχρι την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης της αμιγούς πολύ λεπτόκοκκης άμμου το εύρος κοκκομετρικής διαβάθμισης



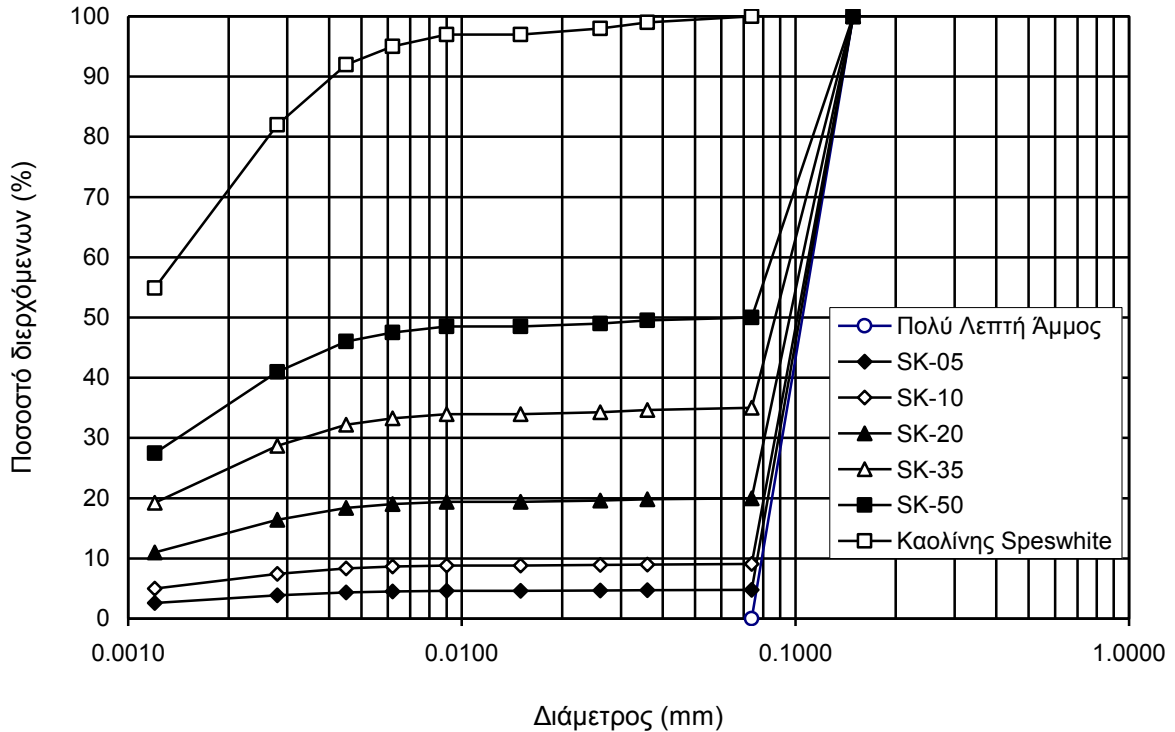
**Σχήμα 11.2α.** Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης για όλες τις αργίλους φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, τον Καολίνη Speswhite και την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων.



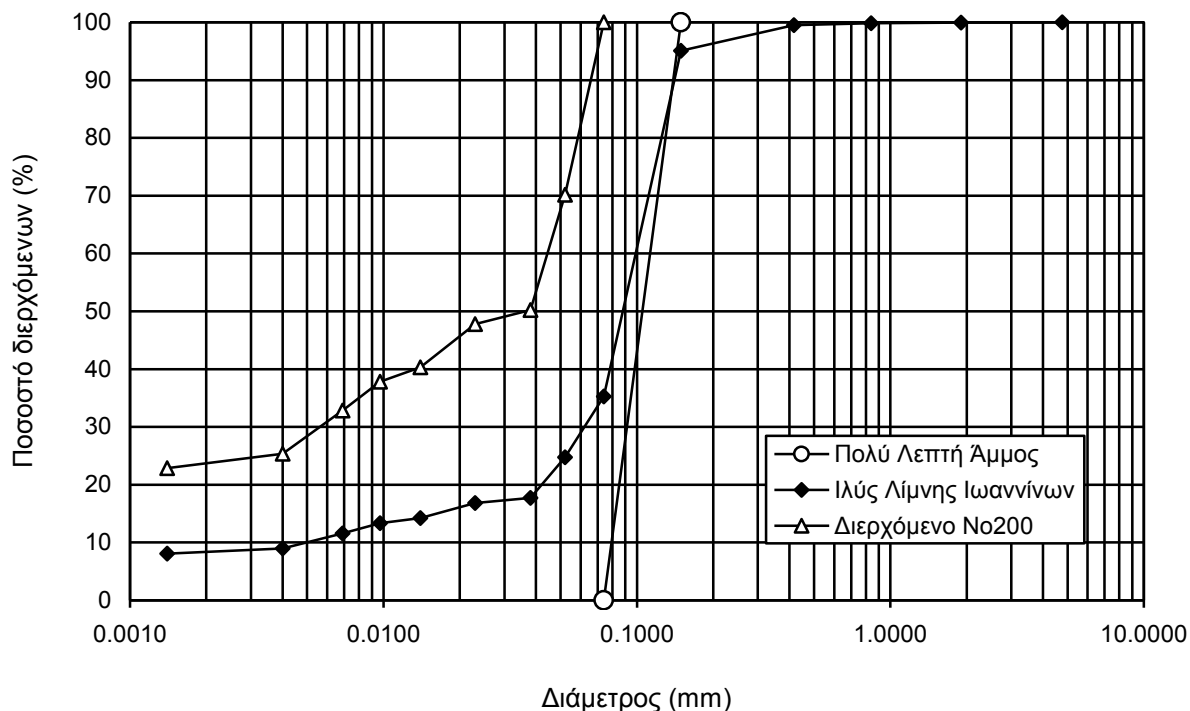
**Σχήμα 11.2β.** Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης για όλες τις αργίλους φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης.



Σχήμα 11.2γ. Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης για όλες τις μάργες.



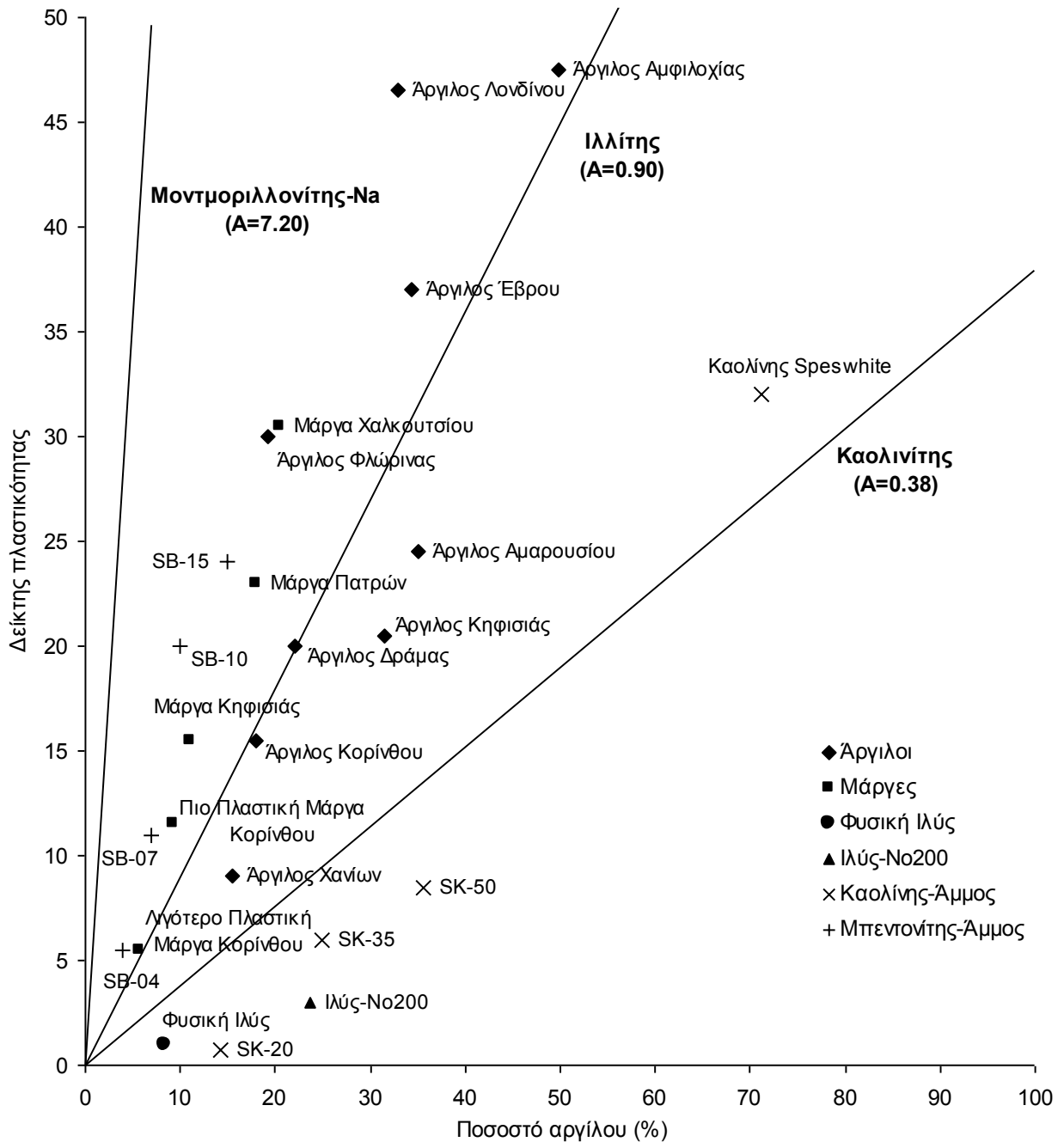
Σχήμα 11.2δ. Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης για τα μείγματα καολίνη – πολύ λεπτής άμμου.



**Σχήμα 11.2ε.** Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης για την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, την περιεχόμενη άμμο που διέρχεται από το κόσκινο Νο 100 και συγκρατείται στο κόσκινο Νο 200 μετά από καλό πλύσιμο και το περιεχόμενο υλικό που διέρχεται από το κόσκινο Νο 200.

καλύφθηκε επαρκώς (με εξαίρεση την περιοχή μεταξύ αμιγούς καολίνη και SK-50 όπου όμως δεν υπήρχε τέτοια ανάγκη γιατί η αντίστοιχη μηχανική συμπεριφορά δεν διέφερε τόσο –ιδέ Κεφάλαιο 13) αλλά κατά τρόπο που οδηγούσε σε υλικά κακής διαβάθμισης. Αυτό αποτελεί πράγματι μια αδυναμία της κάλυψης του εύρους κοκκομετρικών διαβαθμίσεων μεταξύ των δύο ακραίων καταστάσεων (η επιρροή της οποίας πρέπει να διερευνηθεί στο μέλλον) αλλά κατά την φάση εκτέλεσης της εργαστηριακής διερεύνησης δεν κατέστη διαθέσιμη κάποια αμιγής μη πλαστική ιλύς ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν μείγματα καολίνη-ιλύος-άμμου τα οποία θα είχαν ομαλότερες καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης (η παρασκευή τεχνητής μη πλαστικής ιλύος από θραύση κόκκων χαλαζιτικών άμμων αποφεύχθηκε αφού συχνά τα εξαιρετικά γωνιώδη σωματίδια της ιλύος που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία μπορεί να αλλοιώσουν την παρατηρούμενη συμπεριφορά).





**Σχήμα 11.3.** Συσχέτιση Δείκτη Πλαστικότητας με το περιεχόμενο ποσοστό αργίλου όπως αυτό προκύπτει από την κοκκομετρική διαβάθμιση των εδαφικών υλικών.

Στα Σχ. 11.4α, 11.4β και 11.4γ παρουσιάζεται η εξέλιξη του ορίου υδαρότητας, του ορίου πλαστικότητας και του δείκτη πλαστικότητας με το ποσοστό σωματιδίων μεγέθους αργίλου όπως αυτό υπολογίστηκε από τις καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης όλων των υλικών, και στα Σχ. 11.5α, 11.5β και 11.5γ παρουσιάζεται η εξέλιξη των ίδιων μεγεθών με το ποσοστό σωματιδίων

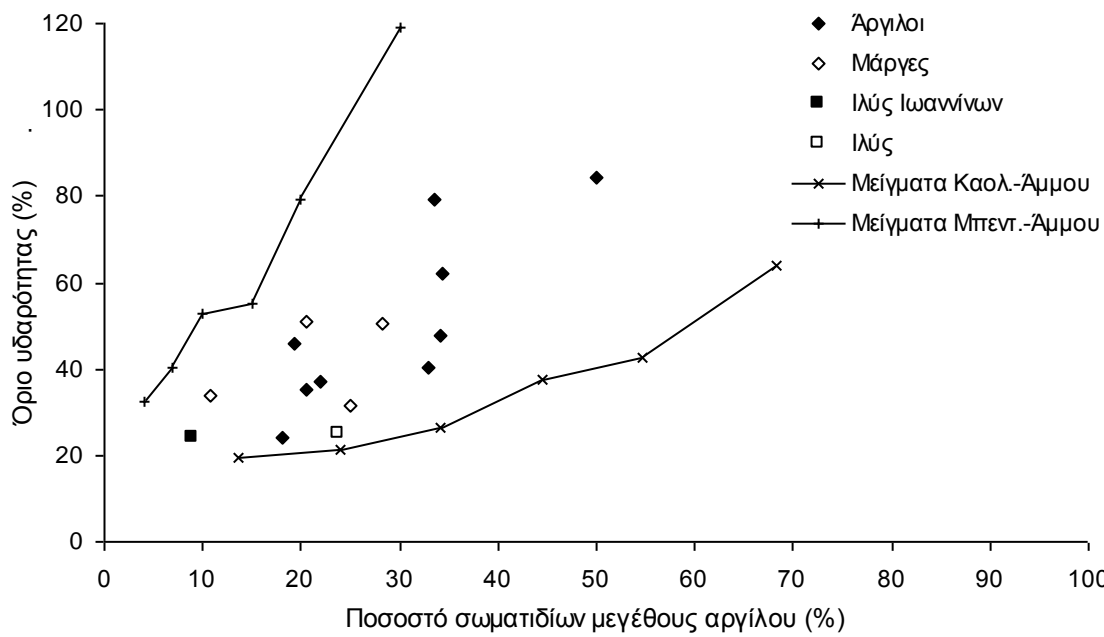
μεγέθους αργιλοΐλους. Για καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων στα διαγράμματα αυτά προβάλλονται, όχι μόνο οι τιμές των ορίων Atterberg των εδαφικών υλικών τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης στα οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών, αλλά και οι τιμές μειγμάτων με άλλες περιεκτικότητες σε καολίνη ή μπεντονίτη που πραγματοποιήθηκαν ακριβώς για την μελέτη της εξέλιξης των ορίων Atterberg των μειγμάτων με την περιεκτικότητα σε καολίνη ή μπεντονίτη. Οι τιμές για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου προέρχονται από τον Αναστασίου (2004) και οι τιμές για τα μείγματα SK-65 και SK-80 (δοκιμές στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής) είναι αντίστοιχα  $w_L = 37.5 \%$ ,  $w_P = 18.2 \%$  και  $I_P = 19.3$  και  $w_L = 42.4 \%$ ,  $w_P = 22.7 \%$  και  $I_P = 19.7$ .

Όπως φαίνεται από το Σχ. 11.4α όσο αυξάνεται το ποσοστό σωματιδίων μεγέθους αργίλου τόσο αυξάνεται το όριο υδαρότητας των εδαφικών υλικών. Η τάση αυτή καταγράφεται πολύ πιο ευκρινώς για τα μείγματα καολίνη-άμμου και τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου, η ορυκτολογική σύσταση των οποίων είναι ελεγχόμενη. Ταυτόχρονα λόγω του ότι ο καολίνης είναι το λιγότερο δραστικό από τα βασικά αργιλικά ορυκτά, και ο μπεντονίτης (μοντμοριλλονίτης) είναι το πιο δραστικό από τα βασικά αργιλικά ορυκτά, η εξέλιξη του ορίου υδαρότητας γι' αυτή την ομάδα εδαφικών υλικών φαίνεται να οριοθετεί το κάτω και το άνω όριο αντίστοιχα για την μεταβολή του ορίου υδαρότητας με το ποσοστό περιεχόμενων σωματιδίων μεγέθους αργίλου. Τα υπόλοιπα εδαφικά υλικά βρίσκονται ανάμεσα σε αυτά τα όρια λόγω διαφορετικής ορυκτολογίας και επειδή περιέχουν αργιλικά ορυκτά ποικίλης δραστικότητας. Κατά τα λοιπά η μεταβολή του ορίου υδαρότητας με το ποσοστό σωματιδίων μεγέθους αργίλου φαίνεται να είναι πιο ραγδαία για τις αργίλους φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης από όσο για τα μείγματα καολίνη-άμμου και λιγότερο ραγδαία προφανώς από όσο για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου. Μεταξύ δε των εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης είναι λιγότερο ραγδαία για τις μάργες από όσο για τις αργίλους και η μικρότερη παρατηρηθείσα για τις ιλείς. Στο Σχ. 11.4β το όριο πλαστικότητας φαίνεται να αυξάνει γενικά για το εύρος υψηλών τιμών του ποσοστού περιεχόμενων σωματιδίων μεγέθους αργίλου αν και στο εύρος μικρών τιμών διαπιστώνεται μία τάση για μείωσή του (ιλείς και μάργες). Αυτό γενικά φαίνεται να συμφωνεί με την εξέλιξη του ορίου πλαστικότητας για τα μείγματα καολίνη-άμμου και τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου, για τα οποία υπάρχει μια ενδιάμεση περιοχή καμψής στην οποία το όριο πλαστικότητας μειώνεται και μετά αρχίζει πάλι να αυξάνει. Οι τιμές του ορίου πλαστικότητας των μειγμάτων μπεντονίτη-άμμου διατηρούνται υψηλότερες των τιμών για τα μείγματα καολίνη-άμμου στο μεγαλύτερο εύρος τιμών ποσοστού περιεχόμενων σωματιδίων μεγέθους αργίλου και με εξαίρεση τέσσερα σημεία εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου

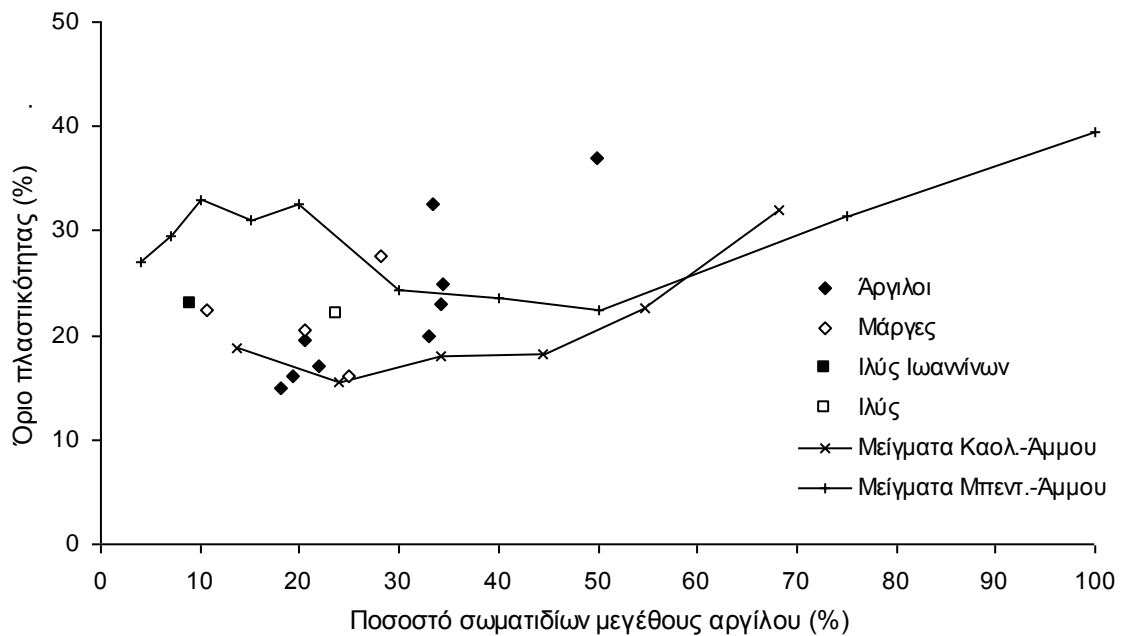
και τα μείγματα καολίνη-άμμου οριοθετούν και σε αυτό το διάγραμμα το άνω και το κάτω όριο αντίστοιχα για τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Ακριβώς αντίστοιχη με την τάση εξέλιξης του ορίου υδαρότητας με το ποσοστό περιεχόμενων σωματιδίων μεγέθους αργίλου είναι και η τάση εξέλιξης του δείκτη πλαστικότητας με το ποσοστό αυτό. Πράγματι στο Σχ. 11.4γ η εξέλιξη του δείκτη πλαστικότητας για τα μείγματα καολίνη-άμμου φαίνεται να οριοθετεί το κάτω όριο στο διάγραμμα αυτό και η εξέλιξη του δείκτη πλαστικότητας για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου να οριοθετεί το άνω όριο, ενώ τα υπόλοιπα εδαφικά υλικά βρίσκονται ανάμεσα σε αυτά τα όρια λόγω διαφορετικής ορυκτολογικής σύστασης και επειδή περιέχουν και αργιλικά ορυκτά ποικίλης δραστηριότητας. Κατά τα λοιπά, όπως ακριβώς και με το όριο υδαρότητας η μεταβολή του δείκτη πλαστικότητας με το ποσοστό σωματιδίων μεγέθους αργίλου φαίνεται να είναι πιο ραγδαία για τις αργίλους φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης από όσο για τα μείγματα καολίνη-άμμου και λιγότερο ραγδαία για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου. Μεταξύ δε των εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης είναι λιγότερο έντονη για τις μάργες από όσο για τις αργίλους και η μικρότερη παρατηρηθείσα για τις ιλείς. Εκτός των ορίων μεταβολής που καθορίζουν τα μείγματα καολίνη-άμμου και τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου βρίσκεται μόνο η τιμή για το διερχόμενο από το κόσκινο Νο 200 της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων.

Σε ό,τι αφορά το Σχ. 11.5 όπου τα όρια Atterberg συσχετίζονται με το ποσοστό περιεχόμενων σωματιδίων μεγέθους αργιλοϊλύος γενικά παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό των περιεχόμενων σωματιδίων μεγέθους αργιλοϊλύος, τόσο αυξάνεται το όριο υδαρότητας, το όριο πλαστικότητας και ο δείκτης πλαστικότητας. Εξαιρέσεις εμφανίζονται μόνο για το όριο πλαστικότητας στις μικρές τιμές του ποσοστού περιεχόμενων σωματιδίων μεγέθους αργιλοϊλύος.

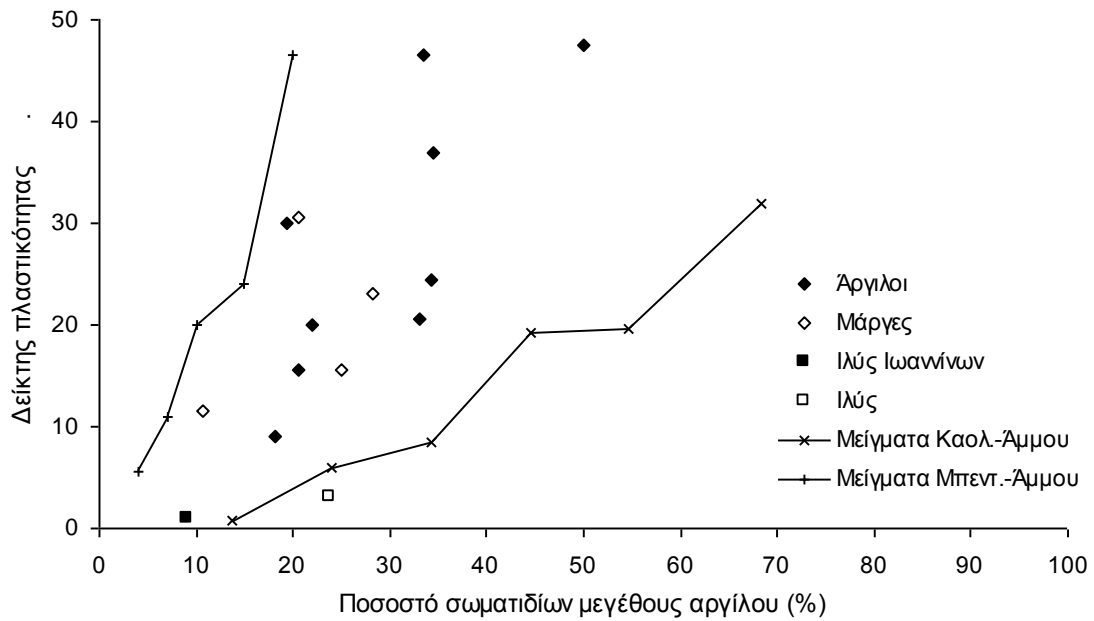
Προκειμένου τα φαινόμενα αυτά να αξιολογηθούν και να ερμηνευτούν καλύτερα συγκεντρώθηκαν από την βιβλιογραφία στοιχεία για την ορυκτολογική σύσταση του κάθε εδαφικού υλικού από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν και πραγματοποιήθηκαν και ορισμένες νέες ορυκτολογικές αναλύσεις. Τα συγκεντρωθέντα στοιχεία παρουσιάζονται στην §11.4.



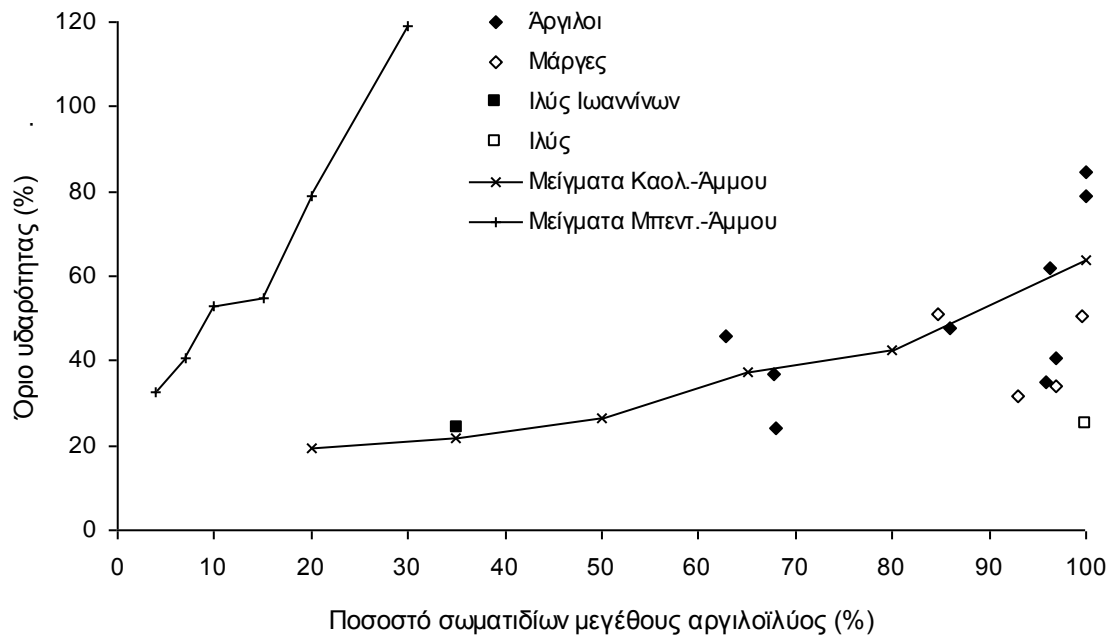
**Σχήμα 11.4α.** Όριο υδαρότητας με το ποσοστό σωματιδίων μεγέθους αργίλου (τιμές ορίων Atterberg για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου όπως μετρήθηκαν από τον Αναστασίου, 2004).



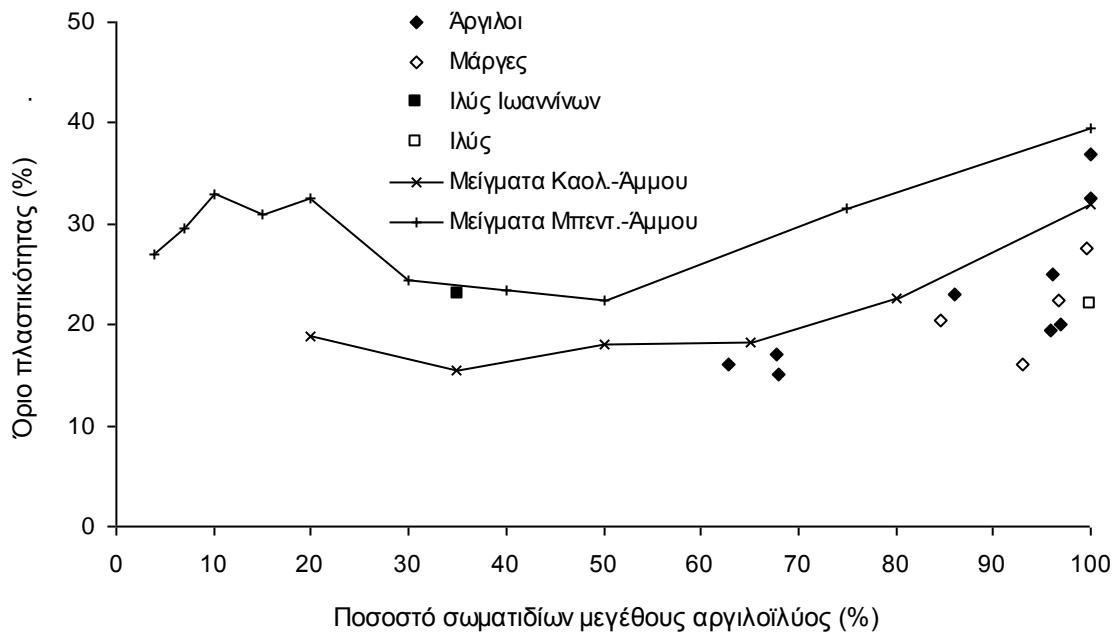
**Σχήμα 11.4β.** Όριο πλαστικότητας με το ποσοστό σωματιδίων μεγέθους αργίλου (τιμές ορίων Atterberg για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου όπως μετρήθηκαν από τον Αναστασίου, 2004).



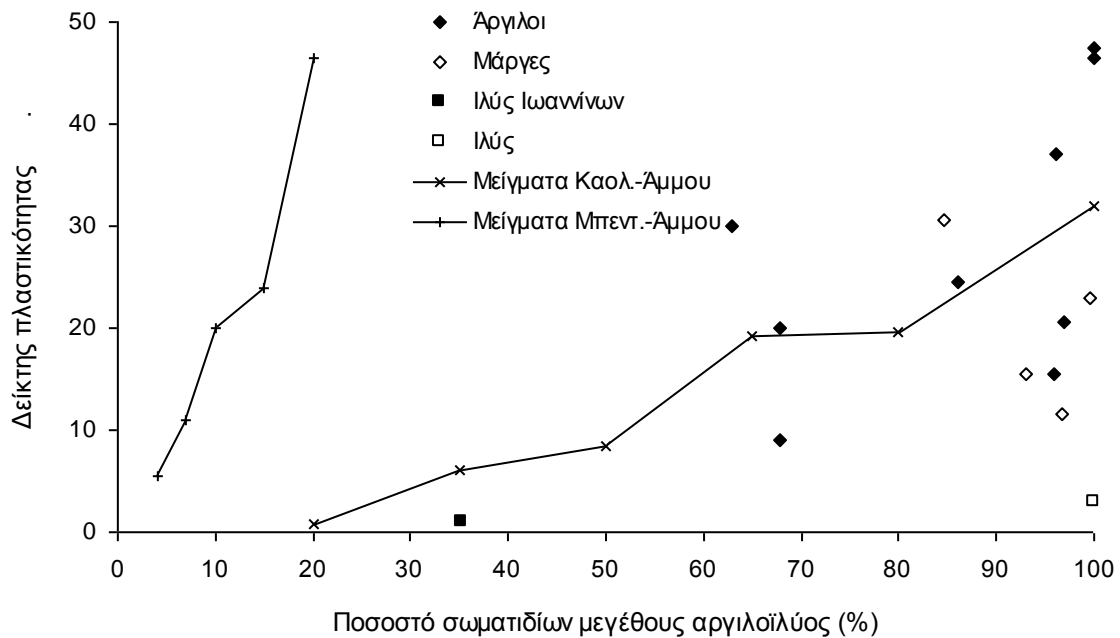
**Σχήμα 11.4γ.** Δείκτης πλαστικότητας με το ποσοστό σωματιδίων μεγέθους αργίλου (τιμές ορίων Atterberg για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου όπως μετρήθηκαν από τον Αναστασίου, 2004).



**Σχήμα 11.5α.** Όριο υδαρότητας με το ποσοστό σωματιδίων μεγέθους αργιλοϊλύος (τιμές ορίων Atterberg για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου όπως μετρήθηκαν από τον Αναστασίου, 2004).



**Σχήμα 11.5β.** Όριο πλαστικότητας με το ποσοστό σωματιδίων μεγέθους αργιλοϊλύος (τιμές ορίων Atterberg για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου όπως μετρήθηκαν από τον Αναστασίου, 2004).



**Σχήμα 11.5.** Δείκτης πλαστικότητας με το ποσοστό σωματιδίων μεγέθους αργιλοϊλύος (τιμές ορίων Atterberg για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου όπως μετρήθηκαν από τον Αναστασίου, 2004).

Εκτός από τη συσχέτιση των ορίων Atterberg με το ποσοστό των περιεχόμενων σωματιδίων αργίλου σε κάθε εδαφικό υλικό, μελετήθηκαν περαιτέρω και οι καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών. Αρχικά προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες καμπύλες προσομοίωσης για αυτές με βάση την μέθοδο των Fredlund, et al. (2000) και στη συνέχεια οι πέντε παράμετροι προσομοίωσης προβλήθηκαν σε διαγράμματα με τα όρια Atterberg των εδαφικών υλικών προς αναζήτηση συσχέτισης μεταξύ τους (αφού ο προσδιορισμός των ορίων Atterberg είναι πολύ απλούστερος και συντομότερος από τον προσδιορισμό της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης). Η μέθοδος των Fredlund, et al. (2000), σε αντίθεση με τη συνηθισμένη πρακτική ένωσης των σημείων που έχουν προσδιοριστεί για μια καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης, υιοθετεί μία συνάρτηση του ποσοστού διερχομένου υλικού με την ονομαστική διάμετρο των κόκκων και των πλακιδίων, η γραφική παράσταση της οποίας διέρχεται δια μέσω των πειραματικά προσδιορισθέντων σημείων. Οι τιμές των παραμέτρων της συνάρτησης βελτιστοποιούνται έτσι ώστε να προσδιοριστεί η βέλτιστη προσομοίωση της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων κατά την βελτιστοποίηση (σε απλοποιημένη μορφή, δηλαδή υπολογιζόταν για κάθε δοκιμαζόμενη τιμή παραμέτρου προσομοίωσης το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των προβλέψεων με βάση τη δοκιμαζόμενη τιμή και των μετρήσεων μέχρι να βρεθεί ο συνδυασμός τιμών παραμέτρων για τον οποίο γινόταν ελάχιστο). Ο σκοπός πραγματοποίησης της προσομοίωσης αυτής ήταν ο προσδιορισμός των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης των καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης (η οποία προσδιορίζεται εύκολα σε αντίθεση με τις μηχανικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών, ιδίως όταν είναι μη κορεσμένα) για την αναζήτηση τυχόν συσχετίσεων μεταξύ αυτών και των παραμέτρων προσομοίωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (βλ. Κεφάλαιο 14) ή άλλων παραμέτρων.

Η εξίσωση που πρότειναν οι Fredlund, et al. (2000) συνδέει το προβλεπόμενο ποσοστό διερχομένων με την διάμετρο του κοσκίνου μέσω τεσσάρων παραμέτρων προσομοίωσης (Εξ. 11.1).

$$P_p(d) = \frac{1}{\left\{ \ln \left[ \exp(1) + \left( \frac{\alpha_{gr}}{d} \right)^{n_{gr}} \right] \right\}^{m_{gr}}} \left\{ 1 - \frac{\left[ \ln \left( 1 + \frac{d_{rgr}}{d} \right) \right]^7}{\left[ \ln \left( 1 + \frac{d_{rgr}}{d_m} \right) \right]^7} \right\} \quad (11.1)$$

όπου:  $\alpha_{gr}$ , παράμετρος που αντιστοιχεί στο σημείο καμπής της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης και σχετίζεται με το αρχικό σημείο καμπύλωσης της καμπύλης,  
 $n_{gr}$ , παράμετρος που σχετίζεται με την πιο απότομη κλίση της καμπύλης,  
 $m_{gr}$ , παράμετρος που σχετίζεται με το σχήμα της καμπύλης,  
 $d_{rgr}$ , παράμετρος που σχετίζεται με τη διάμετρο των λεπτόκοκκων σε ένα εδαφικό υλικό,  
 $d$ , διάμετρος κόκκων, και  
 $d_m$ , διάμετρος του ελάχιστου επιτρεπόμενου μεγέθους κόκκων.

Η Εξ. 11.1 προτάθηκε για καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικών υλικών με ένα κύριο μέγεθος κόκκων ή πλακιδίων (unimodal equation). Σε ό,τι αφορά τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στην Εξ. 11.1 η παράμετρος  $\alpha_{gr}$  ρυθμίζει την θέση του απότομου τμήματος της καμπύλης προσομοίωσης κατά μήκος του άξονα της διαμέτρου κόκκων, δηλαδή όσο πιο μεγάλη τιμή λαμβάνει, τόσο προς τις μεγαλύτερες τιμές του άξονα της διαμέτρου κόκκων τοποθετείται το τμήμα με την πιο απότομη κλίση της καμπύλης προσομοίωσης. Η παράμετρος  $n_{gr}$  ρυθμίζει την καμπυλότητα του κοίλου τμήματος της καμπύλης προσομοίωσης, δηλαδή όσο πιο μεγάλη γίνεται η τιμή της παραμέτρου, τόσο πιο καμπύλο γίνεται το πρώτο κοίλο τμήμα της καμπύλης προσομοίωσης. Η παράμετρος  $m_{gr}$  ρυθμίζει την θέση κατά μήκος του άξονα του ποσοστού διερχομένων του πρώτου τμήματος της καμπύλης προσομοίωσης πριν την ραγδαία αύξηση της τιμής του ποσοστού διερχομένων, δηλαδή όσο μειώνεται η τιμή του  $m_{gr}$  τόσο το τμήμα αυτό της καμπύλης βρίσκεται ψηλότερα κατά μήκος του άξονα. Η παράμετρος  $d_{rgr}$  ρυθμίζει ουσιαστικά την καμπυλότητα του πρώτου κυρτού τμήματος της καμπύλης προσομοίωσης, δηλαδή όσο πιο μικρή γίνεται η τιμή του  $d_{rgr}$ , τόσο πιο καμπύλο γίνεται το πρώτο κυρτό τμήμα της καμπύλης προσομοίωσης.

Περισσότερα για την μέθοδο των Fredlund, et al. (2000) αλλά και αναλυτικά οι προσομοιώσεις των καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης για όλα τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρατίθενται στο Παράρτημα Γ. Στους Πίν. 11.4α και 11.4β παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης για τις βέλτιστες προσεγγίσεις των καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών. Στα Σχ. 11.6, 11.7, 11.8, 11.9 και 11.10 προβάλλονται αντίστοιχα οι παράμετροι  $\alpha_{gr}$ ,  $n_{gr}$ ,  $m_{gr}$ ,  $d_{rgr}$  και  $d_m$  με τα όρια Atterberg των εδαφικών υλικών (για κάθε ένα από αυτά τα σχήματα: (α) εκάστοτε παράμετρος με το όριο υδαρότητας, (β): εκάστοτε παράμετρος με το όριο πλαστικότητας, και (γ): εκάστοτε παράμετρος με τον δείκτη πλαστικότητας). Από τα Σχ. 11.6, 11.7, 11.8, 11.9 και 11.10 προκύπτει καταρχάς ότι τυχόν τάσεις εξέλιξης παρατηρούνται μεν για κάποιες παραμέτρους αλλά δεν μπορούν να



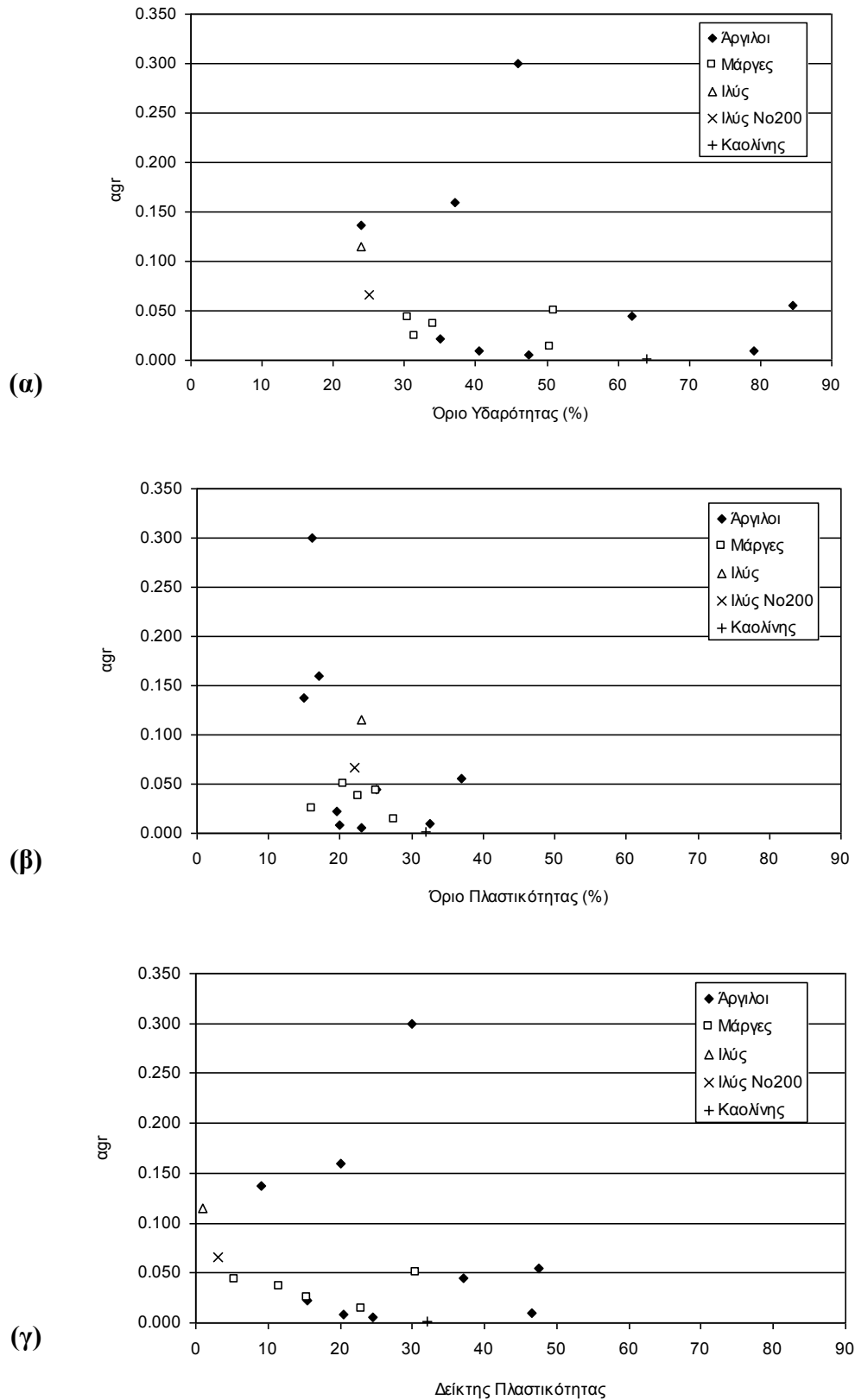
θεωρηθούν επαρκώς ισχυρές για να διατυπωθούν συσχετίσεις για το πλήθος των υαρχόντων στοιχείων. Οι τάσεις εξέλιξης για την κάθε παράμετρο (εφόσον πράγματι διαπιστώνονται) παρουσιάζονται ισχυρότερες με το όριο υδαρότητας και τον δείκτη πλαστικότητας παρά με το όριο πλαστικότητας (χωρίς μάλιστα να διαφαίνεται συσχέτιση με αυτό για όλες τις παραμέτρους).

**Πίνακας 11.4α.** Τιμές παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης (παρατίθενται και οι τιμές των ορίων Atterberg).

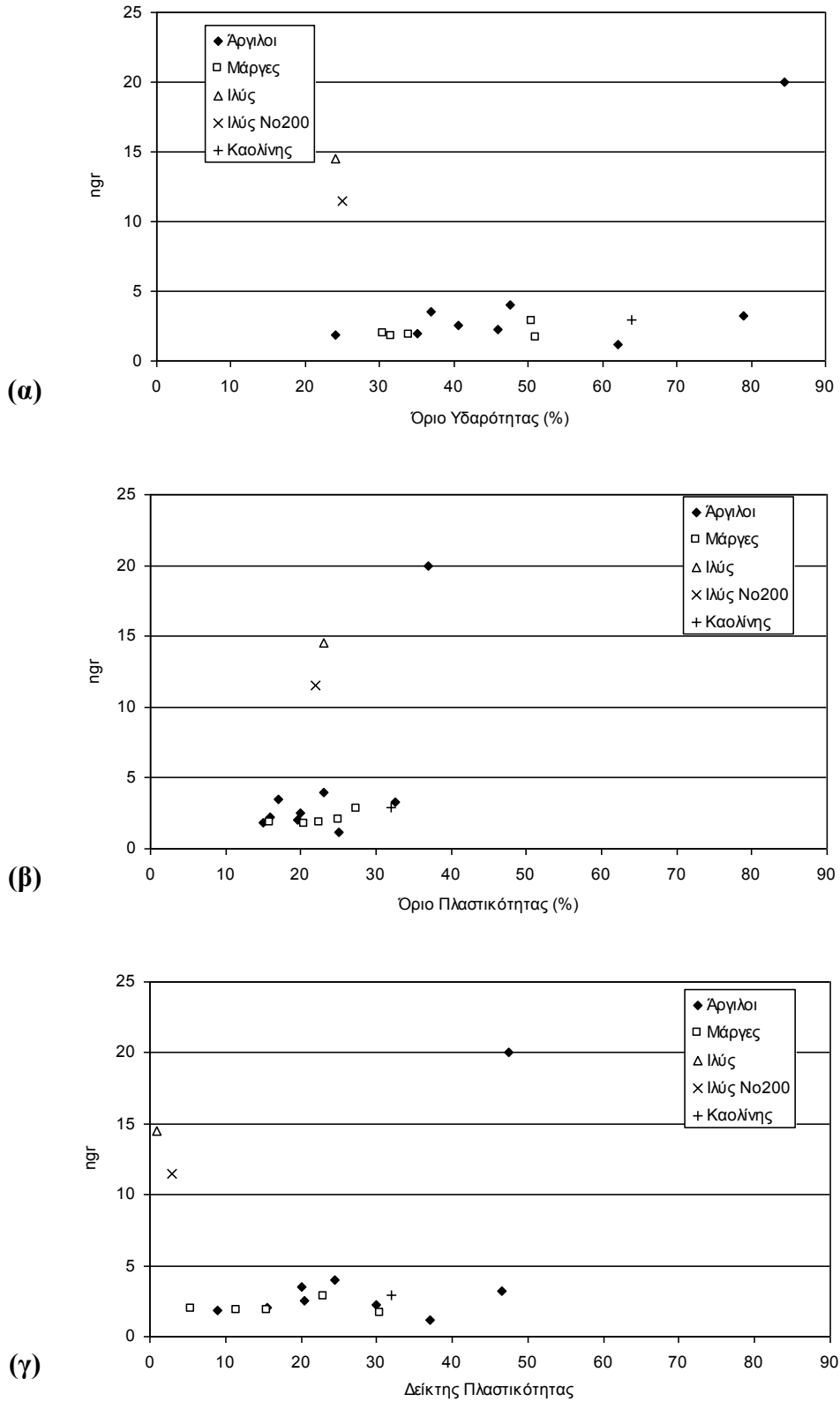
Εδαφικό υλικό	w <sub>l</sub> (%)	w <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub>	α <sub>gr</sub>	n <sub>gr</sub>	m <sub>gr</sub>	d <sub>rgr</sub>	d <sub>m</sub>
Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων	24.0	23.0	1.0	0.115	14.50	0.55	39000	0.000042
Αργίλος Χανίων	24.0	15.0	9.0	0.137	1.85	0.55	950	0.000362
Αργίλος Κορίνθου	35.0	19.5	15.5	0.022	2.00	0.59	310	0.000527
Αργίλος Λιβαδερού Δράμας	37.0	17.0	20.0	0.16	3.50	0.56	0.1	0.000001
Αργίλος Κηφισιάς	40.5	20.0	20.5	0.009	2.55	0.48	270	0.000360
Αργίλος Μελίτης Φλώρινας	46.0	16.0	30.0	0.30	2.25	0.59	300	0.000063
Αργίλος Αμαρουσίου	47.5	23.0	24.5	0.005	4.00	0.48	77000000	0.00007
Αργίλος Ορεστιάδας Έβρου	62.0	25.0	37.0	0.045	1.15	0.66	200	0.000074
Αργίλος Λονδίνου	79.0	32.5	46.5	0.01	3.25	0.46	90	0.000311
Αργίλος Αμφιλοχίας	84.5	37.0	47.5	0.055	20.00	0.18	1	0.00000001
Μάργα Κορίνθου	30.5	25.0	5.5	0.043	1.99	0.64	90	0.00137
Πλ. Μάργα Κορίνθου	34.0	22.5	11.5	0.037	1.82	0.62	60	0.00109
Μάργα Κηφισιάς	31.5	16.0	15.5	0.025	1.80	0.59	3000	0.000274
Μάργα Πατρών	50.5	27.5	23.0	0.014	2.80	0.52	28	0.000398
Μάργα Χαλκουτσίου	51.0	20.5	30.5	0.05	1.70	0.60	1000	0.00025

**Πίνακας 11.4β.** Τιμές παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικών υλικών τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης (παρατίθενται και οι τιμές των ορίων Atterberg).

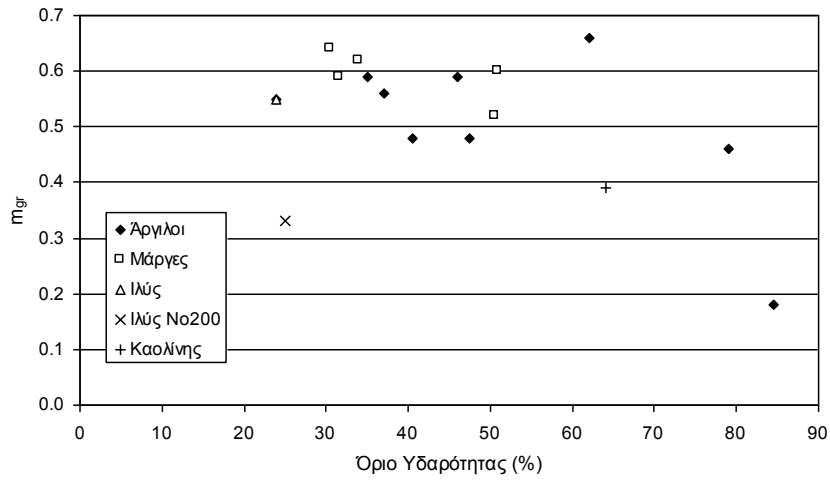
Εδαφικό υλικό	w <sub>l</sub> (%)	w <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub>	α <sub>gr</sub>	n <sub>gr</sub>	m <sub>gr</sub>	d <sub>rgr</sub>	d <sub>m</sub>
Αμυγής Ιλύς	25.0	22.0	3.0	0.066	11.5	0.33	1.3	0.000284
Καολίνης Speswhite	64.0	32.0	32.0	0.002	2.9	0.39	2.7	0.000266



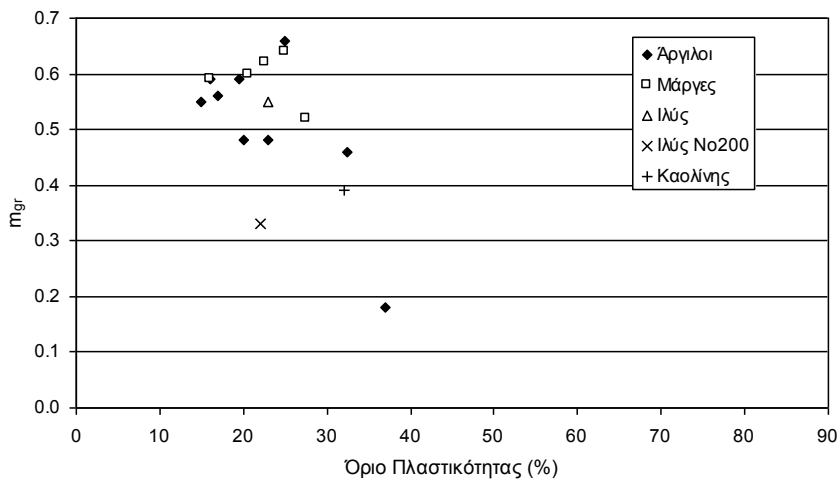
**Σχήμα 11.6.** Παράμετρος  $a_{gr}$  με το όριο υδαρότητας (α), το όριο πλαστικότητας (β) και τον δείκτη πλαστικότητας (γ).



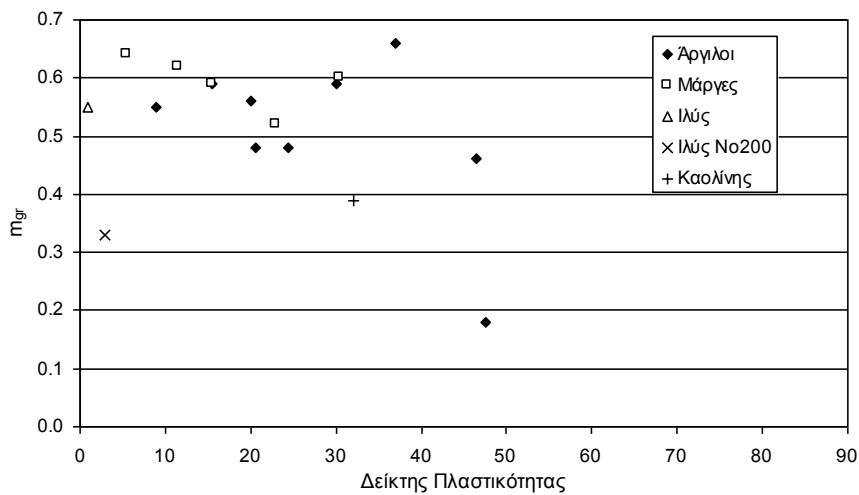
Σχήμα 11.7. Παράμετρος  $n_{gr}$  με το όριο υδαρότητας (α), το όριο πλαστικότητας (β) και τον δείκτη πλαστικότητας (γ).



(α)

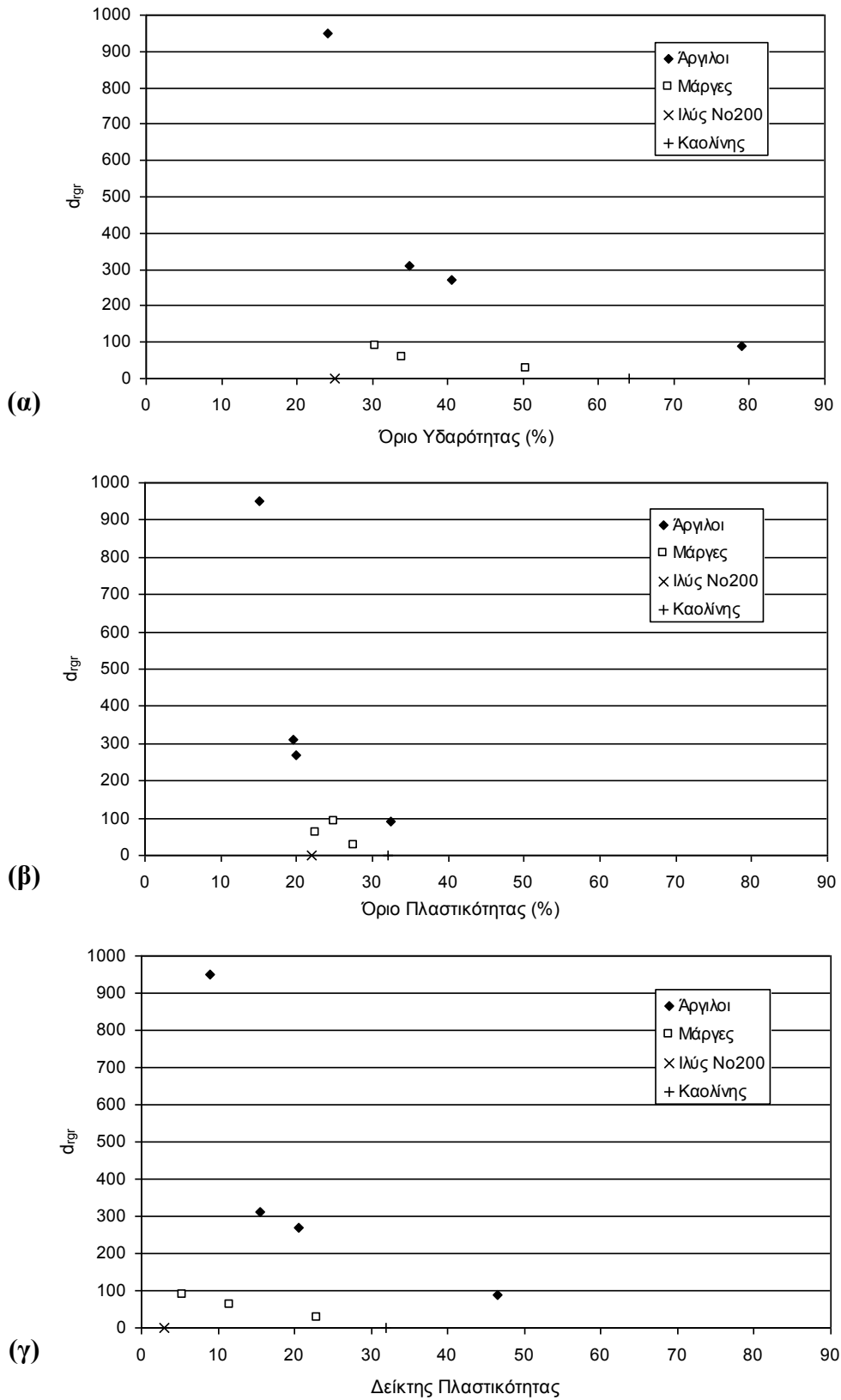


(β)

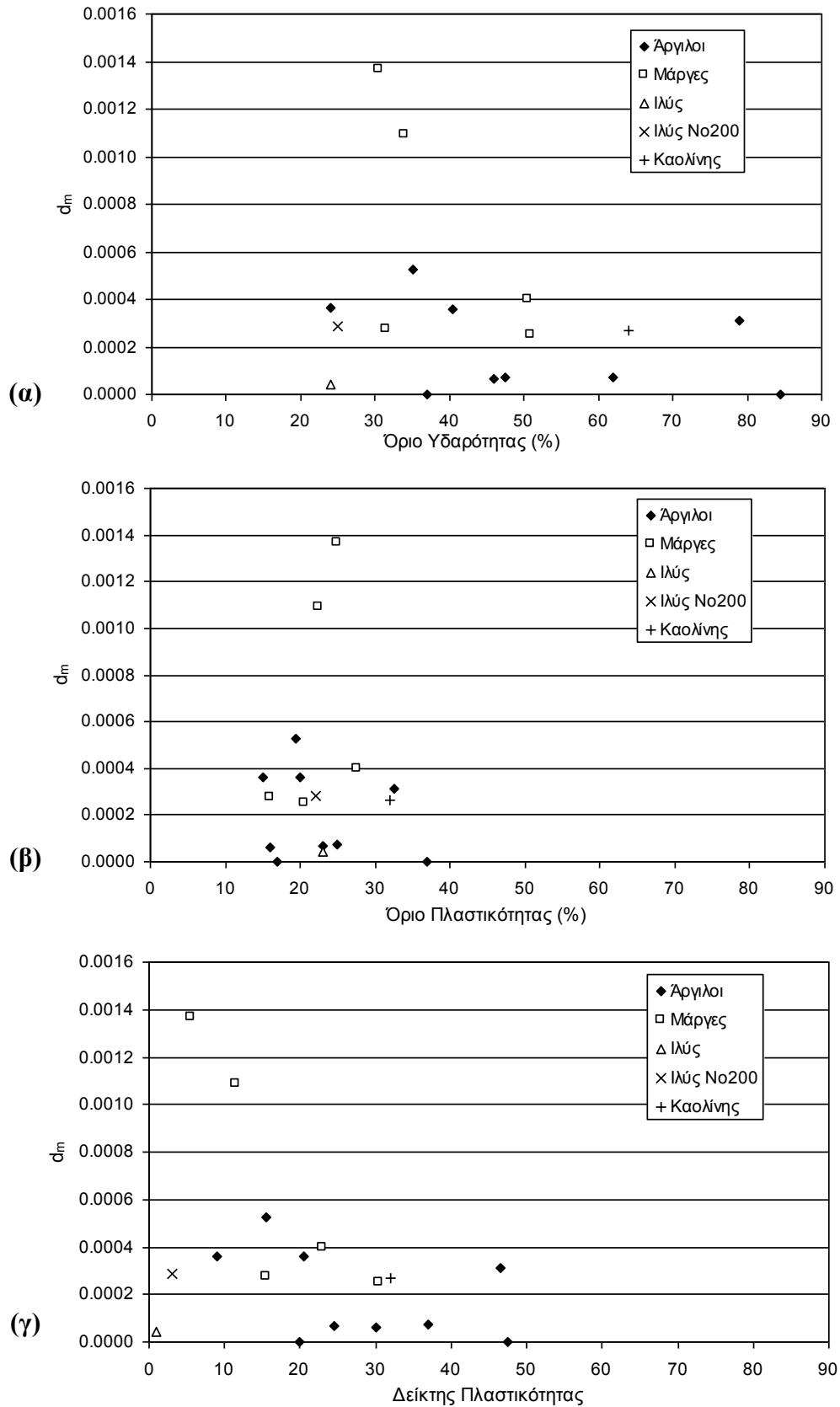


(γ)

Σχήμα 11.8. Παράμετρος  $m_{gr}$  με το όριο υδαρότητας (α), το όριο πλαστικότητας (β) και τον δείκτη πλαστικότητας (γ).



Σχήμα 11.9. Παράμετρος  $d_{rgr}$  με το όριο υδαρότητας (α), το όριο πλαστικότητας (β) και τον δείκτη πλαστικότητας (γ).



Σχήμα 11.10. Παράμετρος  $d_m$  με το όριο υδαρότητας (α), το όριο πλαστικότητας (β) και τον δείκτη πλαστικότητας (γ).

## 11.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Για καλύτερη ερμηνεία των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα αυτών ορυκτολογικές αναλύσεις. Οι ορυκτολογικές αναλύσεις έγιναν στο ΙΓΜΕ και πραγματοποιήθηκαν στα εξής υλικά:

- Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων
- Άργιλος Χανίων
- Άργιλος Κορίνθου
- Άργιλος Κηφισιάς
- Άργιλος Αμαρουσίου
- Μάργα Κορίνθου (χαμηλής πλαστικότητας)
- Μάργα Κηφισιάς
- Μάργα Πατρών

Εκτός από τα αποτελέσματα των αναλύσεων που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρατίθενται και αποτελέσματα που είναι γνωστά από τη βιβλιογραφία για τον Καολίνη Speswhite, την Άργιλο Λονδίνου, την Μάργα Κορίνθου και την Μάργα Πατρών για συμπλήρωση των στοιχείων από τις ορυκτολογικές αναλύσεις που έγιναν και σύγκριση με τα αποτελέσματα της νεώτερης ορυκτολογικής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων που είναι γνωστά από την βιβλιογραφία παρατίθενται στον Πίν. 11.5 και τα συγκεντρωτικά ποσοστά των αργιλικών, ασβεστιτικών και πυριτικών ορυκτών επί του συνόλου (και όχι μόνο για το διερχόμενο από το κόσκινο Νο 200) όλων των υλικών παρατίθενται στον Πίν. 11.6. Στον Πίν. 11.7 παρουσιάζονται αναλυτικά τα ποσοστά των περιεχόμενων ορυκτών στα εδαφικά υλικά που πραγματοποιήθηκαν νεώτερες ορυκτολογικές αναλύσεις. Από τα δείγματα που παραδόθηκαν στο ΙΓΜΕ μορφώθηκαν παρασκευάσματα κόνεως τα οποία μελετήθηκαν με την μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων X (X-Ray Diffraction), ενώ παράλληλα έγινε στα δείγματα δοκιμή με κυανούν του μεθυλενίου για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας σε μοντμοριλλονίτη, απομάκρυνση των ανθρακικών ορυκτών και ποσοτικός προσδιορισμός. Έγινε επίσης μικροφωτογράφιση των παρασκευασμάτων κόνεως σε παράλληλα και κάθετα πρίσματα. Στο Παράρτημα Δ παρατίθεται η γνωμάτευση του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών για τα ορυκτολογικά συστατικά των δειγμάτων στα οποία έγιναν εκεί ορυκτολογικές αναλύσεις.

**Πίνακας 11.5.** Στοιχεία ορυκτολογικών αναλύσεων που συγκεντρώθηκαν από τη βιβλιογραφία (τα ποσοστά που αναφέρονται αφορούν στο υλικό που διέρχεται από το κόσκινο Νο 200).

Ορυκτό	Μάργα Κορίνθου (Kanvadas, et al, 2003)	Μάργα Πατρών (Ντούλης & Ρίτσος, 1997)	Καολίνης Speswhite (Dineen, 1997)	Άργιλος Λονδίνου (Dineen, 1997)
Ασβεστίτης	73-77	50	-	-
Χαλαζίας	13-17	20	-	-
Καολινίτης	-	-	82	16
Ιλλίτης	1.5-3.0	20	5	52
Μοντμοριλλονίτης	<1		8	32
Χλωρίτης	1-7	10	4	1
Άστριος	2-4		-	-
Πυριτικά ορυκτά	<1	-	-	-

**Πίνακας 11.6.** Ποσοστά περιεχόμενων ορυκτών για όλα τα εδαφικά υλικά στα οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών (επί του συνόλου και όχι μόνο του διερχόμενου από το κόσκινο Νο 200).

Εδαφικό υλικό	Αργιλικά ορυκτά επί του συνόλου (%)	Ανθρακικά ορυκτά επί του συνόλου (%)	Πυριτικά ορυκτά επί του συνόλου (%)	Κατάταξη του υλικού με βάση την ορυκτολογική σύσταση
Ίλύς Λίμνης Ιωαννίνων	16.0	2.5	80.5	Πηλός (Χαλαζιτική ίλύς συνεκτιμώντας και την κοκκομετρική διαβάθμιση)
Άργιλος Χανίων	32.5	3.0	63.5	Πηλός
Άργιλος Κορίνθου	23.0	57.0	19.0	Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος σε φάση διαγένεσης
Άργιλος Κηφισιάς	45.0	38.0	16.0	Μαργαϊκή Άργιλος
Άργιλος Αμαρουσίου	65.0	17.0	17.0	Άργιλος
Άργιλος Λονδίνου	100.0	-	-	Άργιλος
Μάργα Κορίνθου	18.0	62.0	19.0	Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος σε φάση διαγένεσης
Μάργα Κηφισιάς	27.0	52.0	20.0	Αργιλική Μάργα
Μάργα Πατρών	42.0	9.0	48.0	Αργιλώδης Πηλός



**Πίνακας 11.7.** Στοιχεία ορυκτολογικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής (τα ποσοστά που αναφέρονται αφορούν στο υλικό που διέρχεται από το κόσκινο Νο 200).

Ορυκτά	Ιλός Λίμνης Ιωαννίνων (%)	Αργίλος Χανίων (%)	Αργίλος Κορίνθου (%)	Αργίλος Κηφισιάς (%)	Αργίλος Αμαρουσίου (%)	Μάργα Κορίνθου (%)	Μάργα Κηφισιάς (%)	Μάργα Πατρών (%)
<b>Πυριτικά</b>								
Χαλαζία	75*	60	16	16	14	16	18	45
Αλβίτης	5	3	2.5	-	3	3	2	3
Μικροκλινης	0.5	0.5	0.5	-	-	-	-	-
<b>Ανθρακικά</b>								
Ασβεστίτης	2.5	3	55	37	17	60	52	9
Δολομίτης	-	-	2	1	-	2	-	-
<b>Αργιλικά</b>								
Αλλοούσιτης	-	10	5	8	8	-	-	3
Ιλλίτης	3	3	-	10	15	7	5	3
Μοσχοβίτης	-	5	4	7	10	1	3	3
Σερπεντίνη	2	-	2	4	4	1.5	-	9
Χλωρίτης	3	3	3	4	5	1.5	2	3
Βιοτίτης	-	-	-	-	-	-	-	3
Υδροβιοτίτης	0.5	-	-	-	-	-	-	-
Καολινίτης	-	-	-	-	10	-	-	4
Μοντομορ- λονίτης	7	9	9	12	11	7	17	14
Μαγνητίτης	0.5	-	-	-	-	-	-	-
Ακτινόλιθος	-	1	-	-	-	-	-	-
Επίδοτο	-	0.5	-	-	-	-	-	-
Γκαϊτίτης	-	1	-	-	2*	-	-	-
Λοιπά ορυκτά	1	1	1	1	1	1	1	1
Είδος λοιπών ορυκτών	Επίδοτο, Ζιρκόνιο, Ρουτίλιο, Χρωμίτης, Υδροξείδια Σιδήρου	Επίδοτο, Τουρμαλίνης, Ζιρκόνιο, Ρουτίλιο	Επίδοτο, Ζιρκόνιο, Ρουτίλιο, Τιτανίτης, Μαγνητίτης, Χρωμίτης	Αστριοι, Τουρμαλίνης, Ζιρκόνιο, Ρουτίλιο, Τιτανίτης, Οξειδία- Υδροξείδια Σιδήρου	Επίδοτο, Τουρμαλίνης, Ζιρκόνιο, Ρουτίλιο	Ζιρκόνιο, Ρουτίλιο, Μαγνητίτης, Γκαϊτίτης, Χρωμίτης	Επίδοτο, Τουρμαλίνης, Ζιρκόνιο, Ρουτίλιο, Οξειδία- Υδροξείδια Σιδήρου	Ζιρκόνιο, Ρουτίλιο, Μαγνητίτης, Χρωμίτης, Γκαϊτίτης
Παρατηρήσεις	*και Κερατόλιθος				*Αιματίτης- Γκαϊτίτης			

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων, πολλά από τα εδαφικά υλικά για τα οποία μέχρι στιγμής χρησιμοποιήθηκαν οι εμπειρικές τους ονομασίες, στην πραγματικότητα δεν κατηγοριοποιούνται έτσι επί τη βάση της ορυκτολογικής τους σύστασης. Έτσι η «Αργίλος Χανίων» στην πραγματικότητα αποτελεί πηλό, η «Αργίλος Κορίνθου» αποτελεί μαρ-

γαϊκό ασβεστόλιθο σε φάση διαγένεσης, όπως και η «Μάργα Κορίνθου»<sup>10</sup>, η «Άργιλος Κηφισιάς» αποτελεί μαργαϊκή άργιλο, όπως και η «Μάργα Πατρών».

Με δεδομένη πλέον την ορυκτολογική σύσταση των εδαφικών υλικών εξηγούνται και διάφορα χαρακτηριστικά που εντοπίστηκαν στην μέχρι στιγμής αξιολόγηση των φυσικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και επισημάνθηκαν στην §11.3. Πράγματι η «Άργιλος Κορίνθου» και η «Άργιλος Κηφισιάς» οι οποίες παρουσιάζουν χαρακτηριστικά πιο κοντά σε εκείνα των μαργών, δικαιολογούνται, αφού επιβεβαιώθηκε ορυκτολογικά ότι περιέχουν πολύ μεγάλο ποσοστό ασβεστιτικού υλικού. Αντίθετα η «Μάργα Πατρών» η οποία περιέχει το μικρότερο ποσοστό ασβεστιτικού υλικού από τα εξ αρχής αναφερόμενα ως «μάργες» εδαφικά υλικά, βρίσκεται ανάμεσα στα χαρακτηριστικά για τις μάργες και τις αργίλους από τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο Σχ. 11.11 παρουσιάζεται η εξέλιξη των ορίων Atterberg με το ποσοστό των περιεχόμενων αργιλικών ορυκτών επί του συνόλου (για τα υλικά που έγιναν ορυκτολογικές αναλύσεις), στο Σχ. 11.12 η εξέλιξή τους με το ποσοστό των περιεχόμενων ασβεστιτικών ορυκτών επί του συνόλου, στο Σχ. 11.13 η εξέλιξή τους με το ποσοστό των περιεχόμενων αργιλικών και ασβεστιτικών ορυκτών μαζί επί του συνόλου και στο Σχ. 11.14 η εξέλιξή τους με το ποσοστό των περιεχόμενων πυριτικών ορυκτών επί του συνόλου. Τέλος στον Πίν. 11.8 παρουσιάζονται οι διορθωμένες τιμές της δραστηριότητας με βάση τα περιεχόμενα αργιλικά ορυκτά και στο Σχ. 11.15 παρουσιάζεται το διάγραμμα δείκτη πλαστικότητας – πραγματικού ποσοστού περιεχόμενων αργιλικών ορυκτών με βάση τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων.

Από το Σχ. 11.11α προκύπτει ότι το όριο υδαρότητας αυξάνει με το ποσοστό των περιεχόμενων αργιλικών ορυκτών. Ακριβώς αντίστοιχη είναι η εικόνα και για την εξέλιξη του δείκτη πλαστικότητας όπως φαίνεται στο Σχ. 11.11β. Τα μείγματα καολίνη-άμμου και μπεντονίτη άμμου διαγράφουν σαφές κάτω και άνω όριο της σχετικής εξέλιξης αντίστοιχα.

Από τα Σχ. 11.12α και 11.12β προκύπτει ότι για τα εδαφικά υλικά με σημαντικά ποσοστά ανθρακικών ορυκτών (>10% περίπου ώστε να αναφερόμαστε σε εδαφικά υλικά που ποικίλλουν από μαργαϊκές άργιλοι έως εδαφικά υλικά σύστασης μαργαϊκού ασβεστολίθου), όσο αυξάνεται το

---

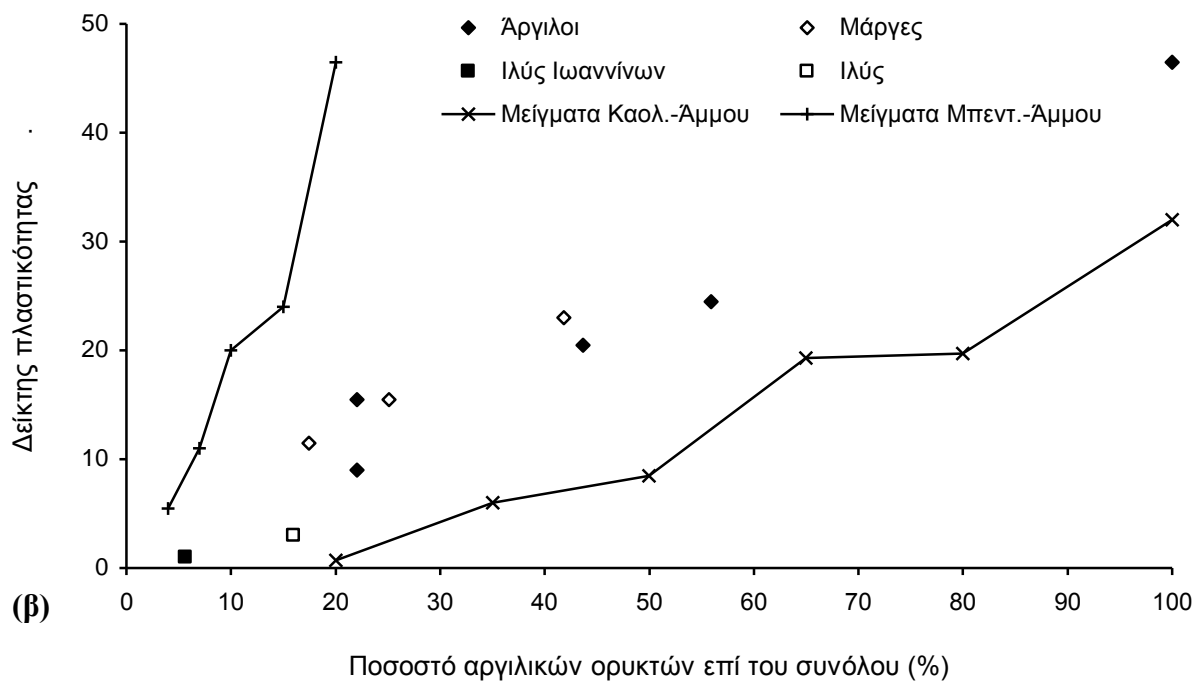
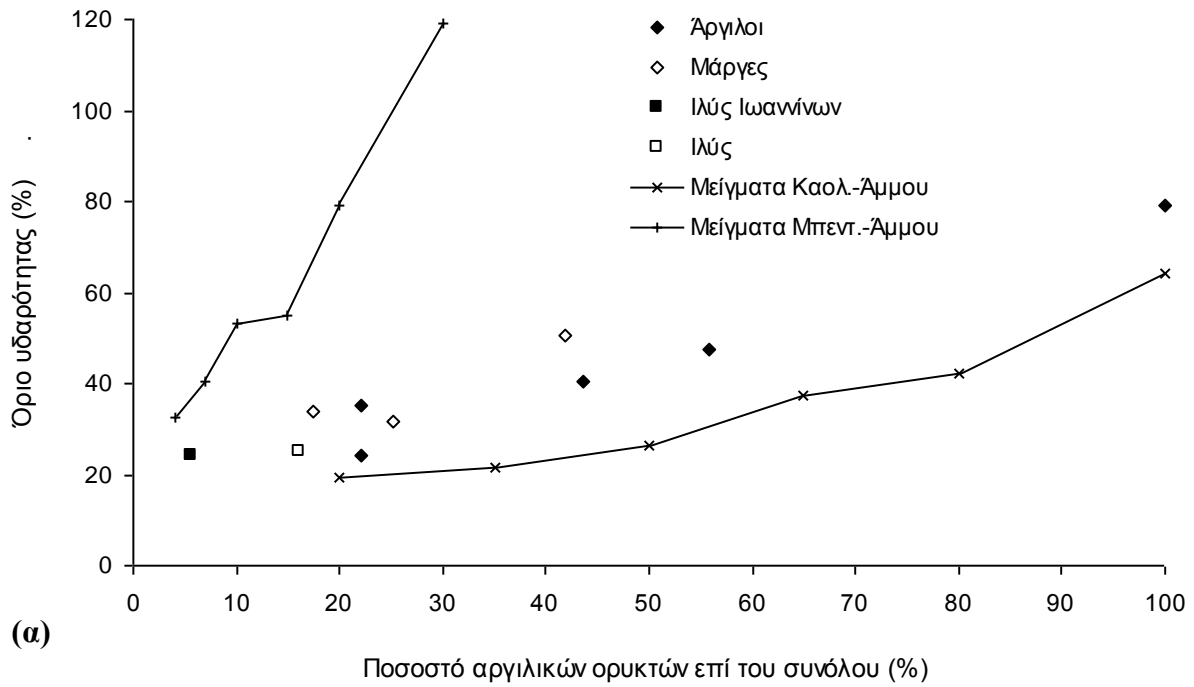
<sup>10</sup> Κανένα από δύο υλικά δεν συνιστά βέβαια πραγματικό ασβεστόλιθο ή έστω μαργαϊκό ασβεστόλιθο, αφού η «Άργιλος Κορίνθου» είναι έδαφος και η «Μάργα Κορίνθου» σκληρό έδαφος/μαλακός βράχος. Ορυκτολογικά ωστόσο και τα δύο υλικά περιέχουν ασβεστιτικό υλικό σε τέτοιο ποσοστό που μετά από χρόνο τέτοιο που θα είχε επέλθει η διαγένεσή τους θα συνιστούσαν πράγματι μαργαϊκούς ασβεστολίθους.

ποσοστό των περιεχόμενων ανθρακικών ορυκτών, τόσο μειώνεται και το όριο υδαρότητας και ο δείκτης πλαστικότητας και μάλιστα με τάση η οποία παρουσιάζεται γραμμική σε πολύ καλή προσέγγιση.

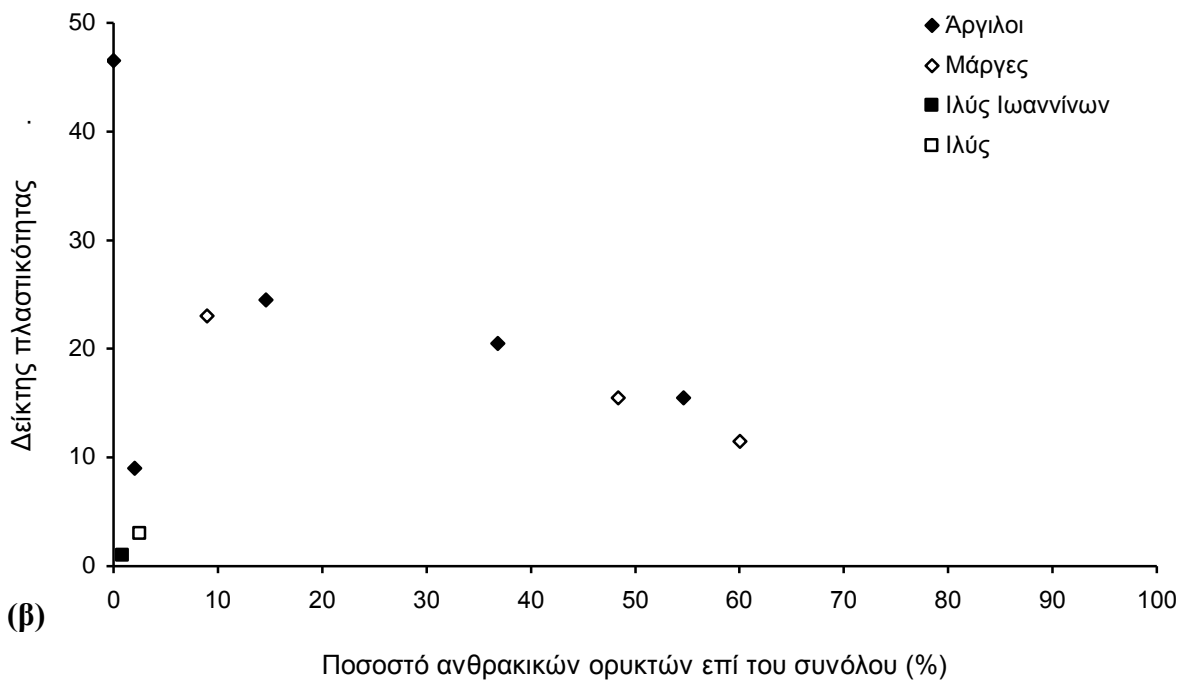
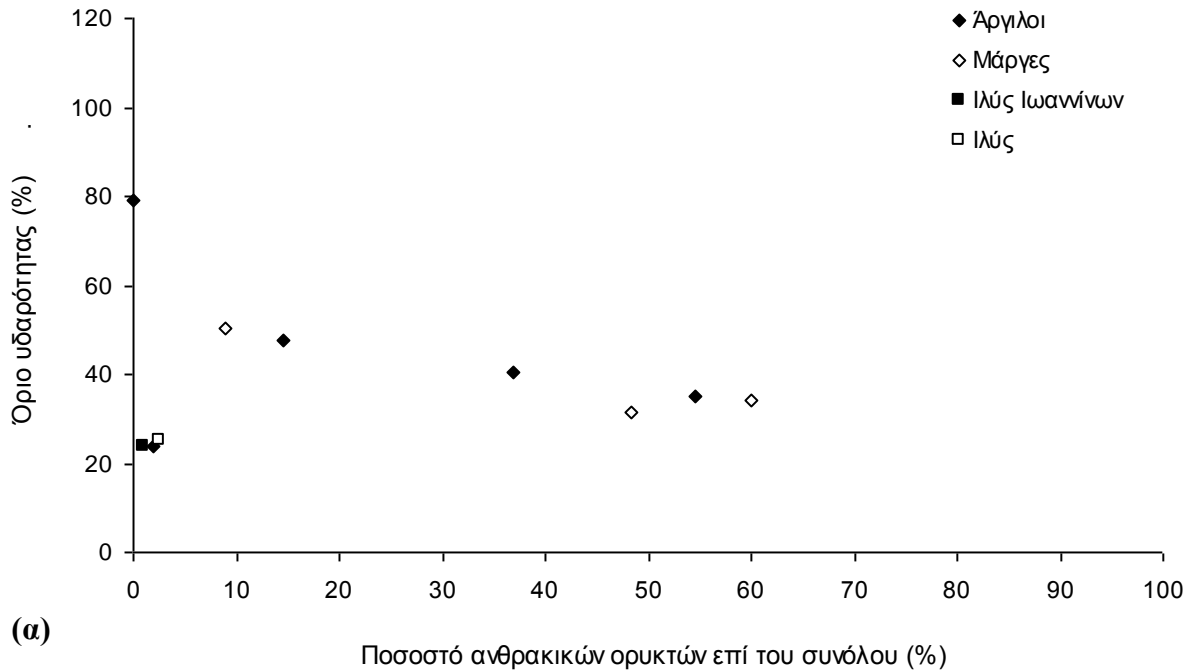
Σε ό,τι αφορά την επιρροή του ποσοστού των περιεχόμενων πυριτικών ορυκτών, όπως φαίνεται από τα Σχ. 11.13α και 11.13β, όσο αυξάνεται το ποσοστό τους, τόσο μειώνεται και το όριο υδαρότητας και ο δείκτης πλαστικότητας. Ακριβώς αντίστροφη είναι η εικόνα από τα Σχ. 11.14α και 11.14β, αφού το ποσοστό των περιεχόμενων ανθρακικών και αργιλικών ορυκτών μαζί είναι συμπληρωματικό του ποσοστού των περιεχόμενων πυριτικών ορυκτών, οπότε όσο αυξάνεται το ποσοστό των ανθρακικών και αργιλικών ορυκτών μαζί, τόσο αυξάνεται και το όριο υδαρότητας και ο δείκτης πλαστικότητας. Εκείνο που προκύπτει ωστόσο και από το Σχ. 11.13 και από το Σχ. 11.14 είναι ότι η καμπύλη εξέλιξης του ορίου υδαρότητας και του δείκτη πλαστικότητας των μειγμάτων καολίνη-άμμου με το αντίστοιχο ποσοστό δεν αποτελεί κάτω όριο όπως στο Σχ. 11.11. Οι μάργες (εκτός από την Μάργα Πατρών που στην πραγματικότητα αποτελεί μαργαϊκή άργιλο) και οι άργιλοι με υψηλό ποσοστό ανθρακικών ορυκτών (Άργιλος Κορίνθου και Άργιλος Κηφισιάς) έχουν μικρότερο όριο υδαρότητας και δείκτη πλαστικότητας και από τα μείγματα καολίνη-άμμου για δεδομένο ποσοστό πυριτικών ορυκτών ή δεδομένο ποσοστό αργιλικών και ανθρακικών ορυκτών μαζί. Αυτό είναι λογικό αφού όπως φάνηκε από το Σχ. 11.12 η επιρροή των ανθρακικών ορυκτών είναι να μειώνει το όριο υδαρότητας και τον δείκτη πλαστικότητας.

Σε ό,τι αφορά την επιρροή του ποσοστού των περιεχόμενων βασικών αργιλικών ορυκτών (μοντομοριλλονίτη, ιλλίτη και καολινίτη), όπως φαίνεται από τα Σχ. 11.15α και 11.15β, όσο αυξάνεται το ποσοστό τους, τόσο αυξάνεται και το όριο υδαρότητας και ο δείκτης πλαστικότητας, και μάλιστα πιο ραγδαία από όσο για παράδειγμα με το ποσοστό αργιλικών ορυκτών, αφού αυτά είναι τα πιο δραστικά ορυκτά μεταξύ των αργιλικών ορυκτών.

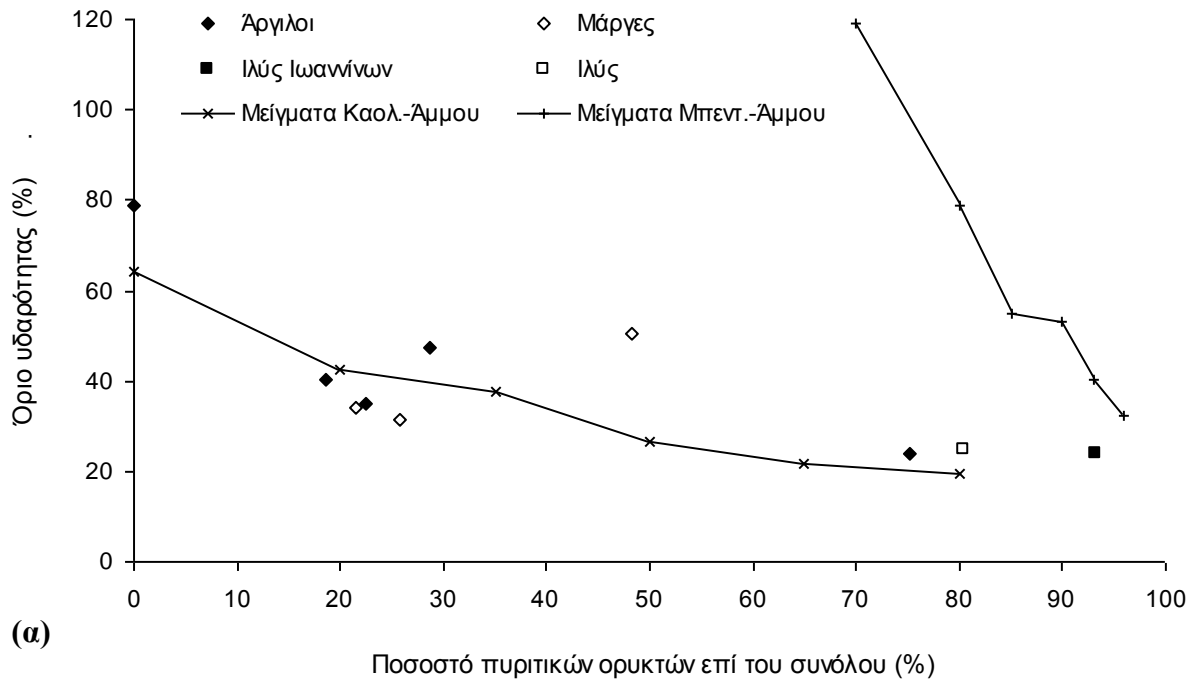
Τέλος, όπως φαίνεται από το Σχ. 11.16 με το διορθωμένο ποσοστό περιεχόμενης αργίλου, όλα τα εδαφικά υλικά είναι στην πραγματικότητα μέσης έως υψηλής δραστηριότητας (συμπεριλαμβανομένων των ιλύων) λόγω της παρουσίας του μοντομοριλλονίτη που επιβεβαιώθηκε για όλα τα εδαφικά υλικά. Εξαίρεση αποτελούν -προφανώς- μόνο τα μείγματα καολίνη-άμμου.



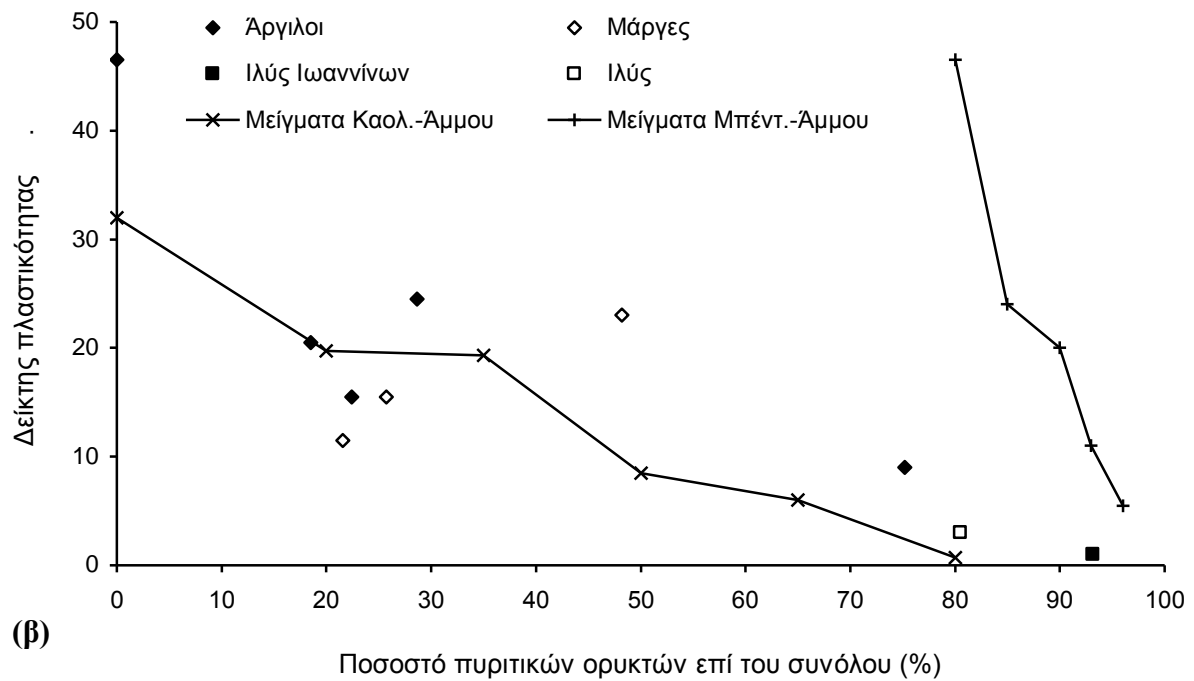
Σχήμα 11.11. Όριο υδαρότητας (α) και δείκτης πλαστικότητας (β) με το ποσοστό περιεχόμενων αργιλικών ορυκτών.



**Σχήμα 11.12.** Όριο υδαρότητας (α) και δείκτης πλαστικότητας (β) με το ποσοστό περιεχόμενων ανθρακικών ορυκτών.

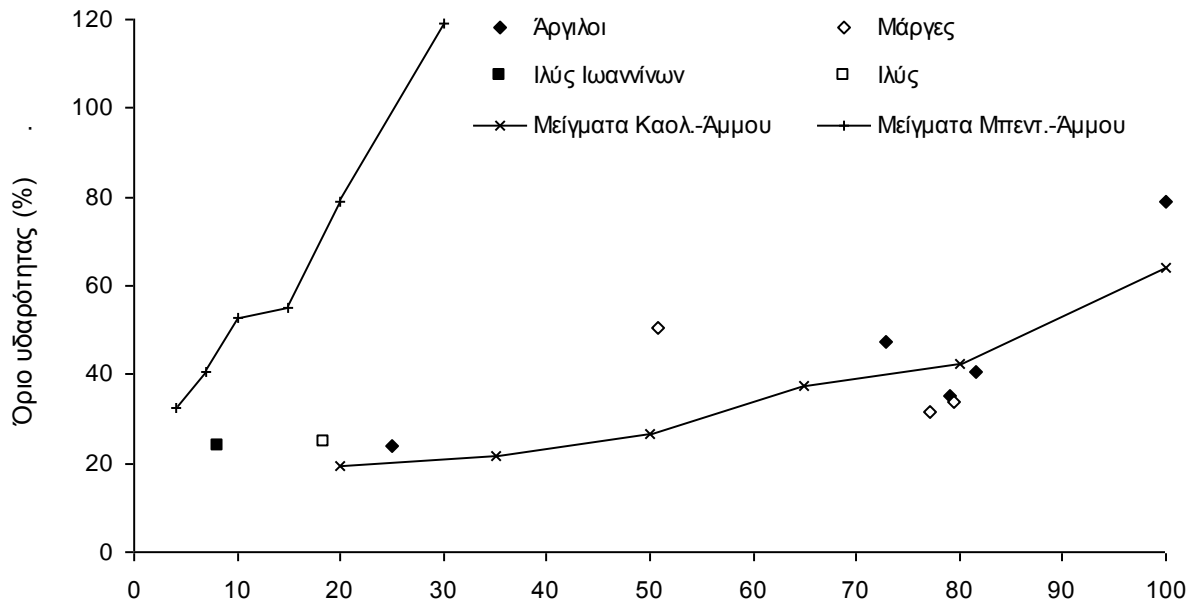


(α)



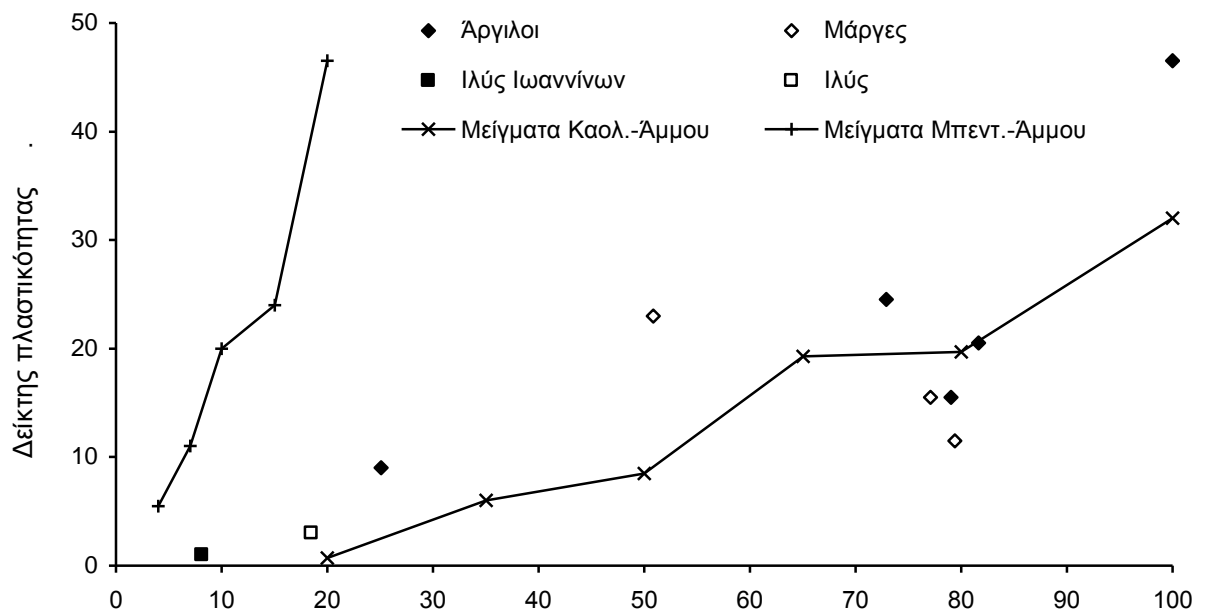
(β)

Σχήμα 11.13. Όριο υδαρότητας (α) και δείκτης πλαστικότητας (β) με το ποσοστό περιεχόμενων πυριτικών ορυκτών.



(α)

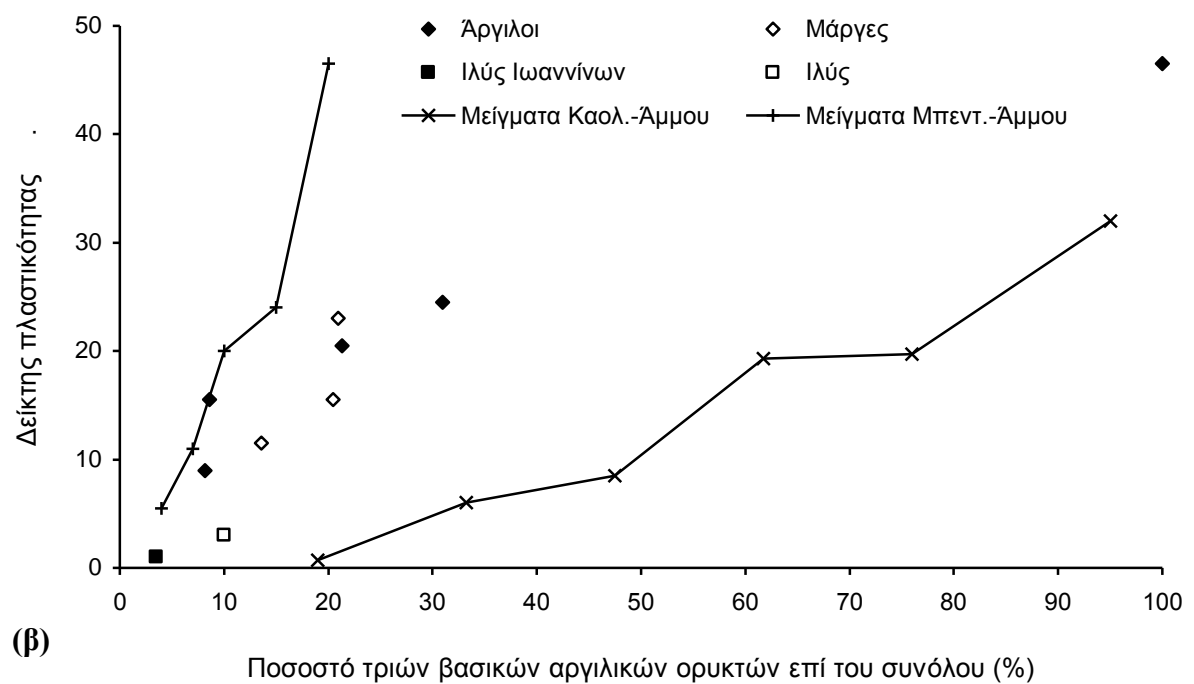
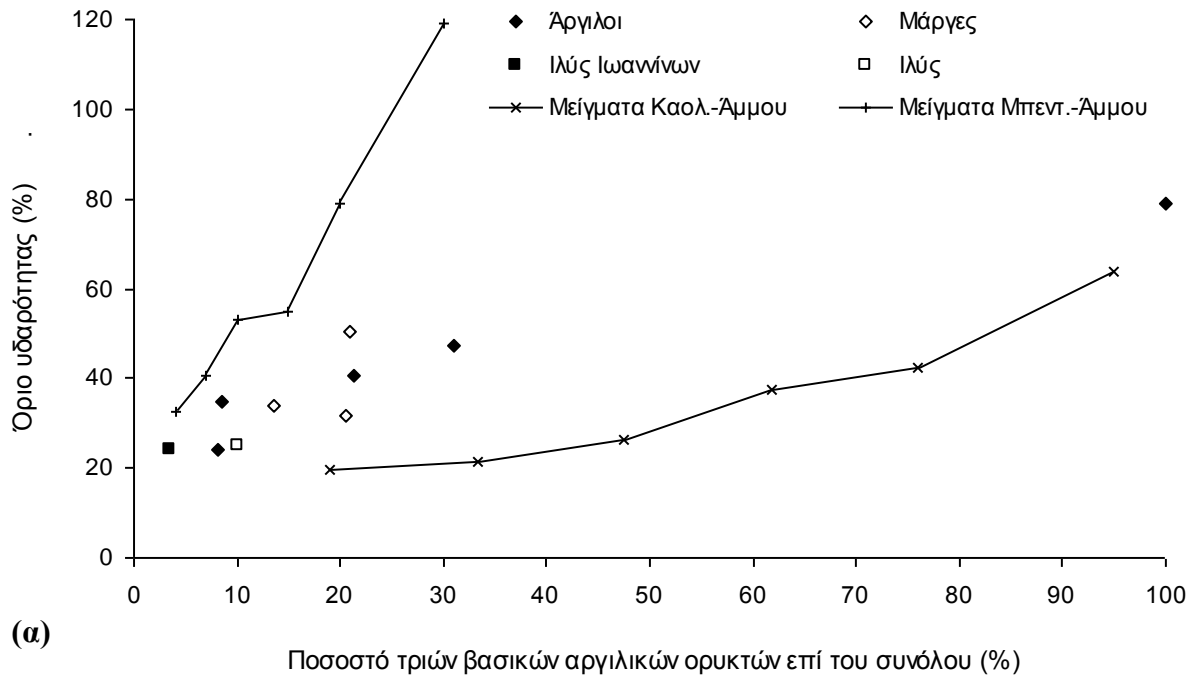
Ποσοστό αργιλικών και ανθρακικών ορυκτών επί του συνόλου (%)



(β)

Ποσοστό αργιλικών και ανθρακικών ορυκτών επί του συνόλου (%)

**Σχήμα 11.14.** Όριο υδαρότητας (α) και δείκτης πλαστικότητας (β) με το ποσοστό περιεχόμενων αργιλικών και ανθρακικών ορυκτών.



**Σχήμα 11.15.** Όριο υδαρότητας (α) και δείκτης πλαστικότητας (β) με το ποσοστό περιεχόμενων βασικών αργιλικών ορυκτών (μοντμοριλλονίτης, ιλλίτης και καολινίτης).

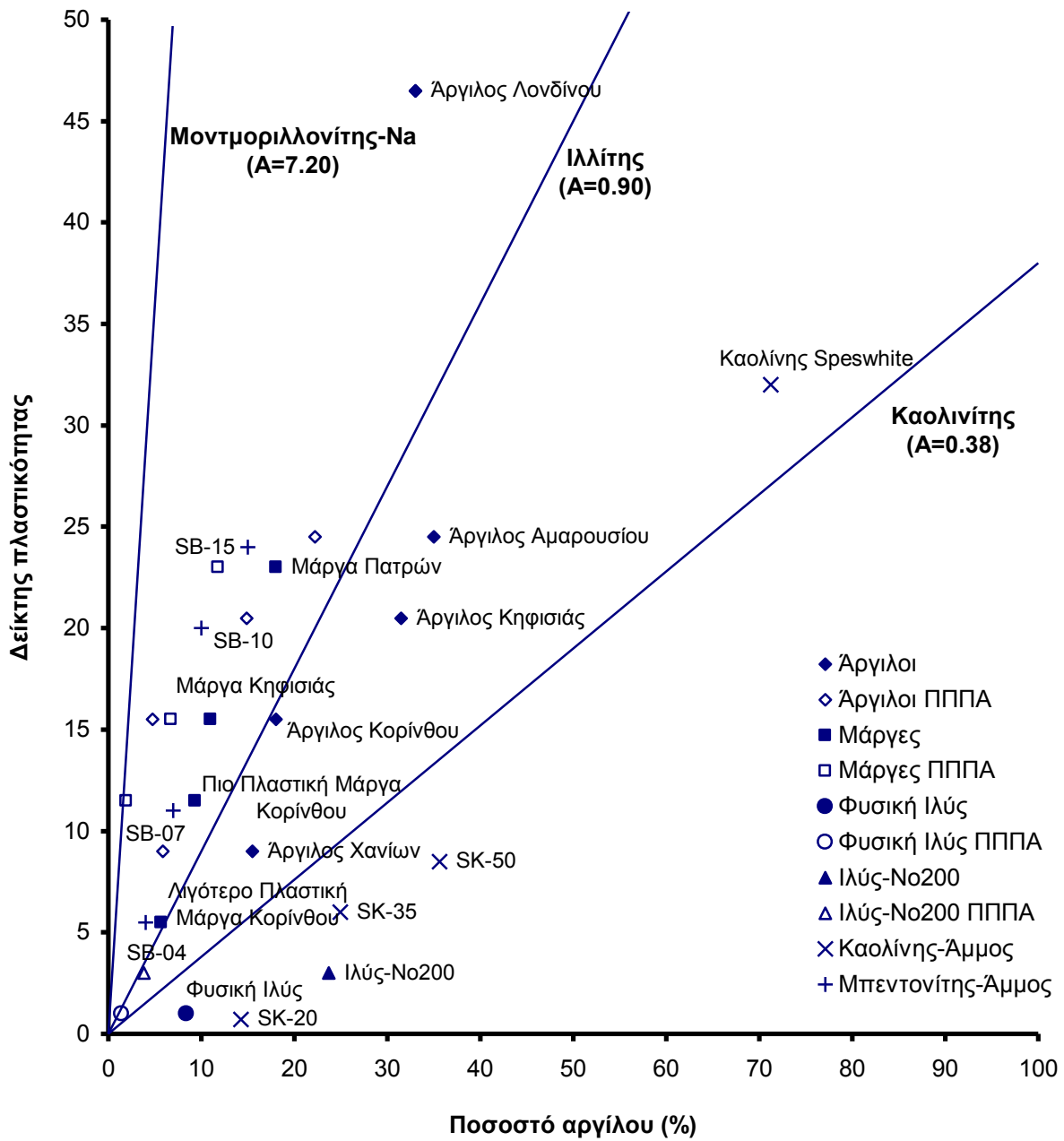


**Πίνακας 11.8α.** Διορθωμένες τιμές δραστηριότητας εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης.

Εδαφικό υλικό	w <sub>i</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	Ποσοστό Αργιλικού Υλικού	Δραστηριότητα	Πραγματικό Ποσοστό Αργιλικού Υλικού	Διορθωμένη Δραστηριότητα
	(%)	(%)		(%)		(%)	
Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων	24.0	23.0	1.0	8.4	0.12	1.4	0.71
Αργίλος Χανίων	24.0	15.0	9.0	18.1	0.50	5.9	1.53
Αργίλος Κορίνθου	35.0	19.5	15.5	20.6	0.75	4.7	3.30
Αργίλος Κηφισιάς	40.5	20.0	20.5	33.0	0.62	14.9	2.21
Αργίλος Αμαρουσίου	47.5	23.0	24.5	34.2	0.72	22.2	1.10
Αργίλος Λονδίνου	79.0	32.5	46.5	33.5	1.39	33.5	1.39
Μάργα Κορίνθου	30.5	25.0	5.5	6.5	0.85	-	-
Πλ. Μάργα Κορίνθου	34.0	22.5	11.5	10.7	1.07	1.9	6.05
Μάργα Κηφισιάς	31.5	16.0	15.5	24.9	0.62	6.7	2.31
Μάργα Πατρών	50.5	27.5	23.0	28.2	0.82	11.8	1.95

**Πίνακας 11.8β.** Διορθωμένες τιμές δραστηριότητας εδαφικών υλικών τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης (όρια Atterberg για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου όπως υπολογίστηκαν από τον Αναστασίου, 2004).

Εδαφικό υλικό	w <sub>i</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	Ποσοστό Αργιλικού Υλικού	Δραστηριότητα	Πραγματικό Ποσοστό Αργιλικού Υλικού	Διορθωμένη Δραστηριότητα
	(%)	(%)		(%)		(%)	
Αμιγής Ιλύς	25.0	22.0	3.0	23.7	0.13	3.8	0.79
Καολίνης Speswhite	64.0	32.0	32.0	71.2	0.47	71.2	0.47
Πολύ Λεπτή Άμμος	-	-	-	0	-	0	-
SK-05	-	-	-	3.4	-	3.4	-
SK-10	-	-	-	6.5	-	6.5	-
SK-20	19.5	18.8	0.7	14.2	0.05	14.2	0.05
SK-35	21.5	15.5	6.0	24.9	0.25	24.9	0.25
SK-50	26.5	18.0	8.5	35.6	0.25	35.6	0.25
SB-02	-	-	-	2	-	2	-
SB-04	32.5	27.0	5.5	4	1.38	4	1.38
SB-07	40.5	29.5	11.0	7	1.57	7	1.57
SB-10	53.0	33.0	20.0	10	2.00	10	2.00
SB-15	55.0	31.0	24.0	15	1.60	15	1.60



**Σχήμα 11.16.** Συσχέτιση Δείκτη Πλαστικότητας με το πραγματικό ποσοστό περιεχόμενης αργίλου (ΠΠΠΑ) όπως αυτό προκύπτει από την κοκκομετρική διαβάθμιση και την ορυκτολογική ανάλυση των εδαφικών υλικών.

## 11.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο που προηγήθηκε παρουσιάστηκαν τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών που εκπονήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Περιγράφηκε η προέλευσή τους και ο τρόπος της δειγματοληψίας τους και δόθηκαν στοιχεία της γεωλογικής τους ιστορίας. Περιγράφηκαν επίσης τα φυσικά τους χαρακτηριστικά και η ορυκτολογική τους σύσταση όπως αυτή κατέστη γνωστή από τις ορυκτολογικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής και συμπληρώθηκαν από στοιχεία της βιβλιογραφίας. Από τα στοιχεία που παρατέθηκαν προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα σε ό,τι αφορά τα εδαφικά υλικά που επελέγησαν για την πραγματοποίηση δοκιμών προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών:

- Τα επιλεγθέντα εδαφικά υλικά καλύπτουν επαρκώς όλο το φάσμα της κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών ποικίλλοντας από την πλέον λεπτόκοκκη άμμο μέχρι άργιλο.
- Έχει δοθεί έμφαση στα εδαφικά υλικά πολύ χαμηλής πλαστικότητας για τα οποία ενδιαφέρει η συμπιεστότητά τους όταν είναι αναζυμωμένα.
- Τα επιλεγθέντα εδαφικά υλικά καλύπτουν επαρκώς όλο το φάσμα της ορυκτολογικής σύστασης που ενδιαφέρει.
- Από την πλειοψηφία των εδαφικών υλικών ελήφθησαν διαταραγμένα δείγματα τα οποία προσέφεραν πληθώρα στοιχείων για τη συμπεριφορά των αναζυμωμένων εδαφικών υλικών αλλά και αδιατάρακτα δείγματα μέσης έως πολύ υψηλής ποιότητας από τα οποία προέκυψαν τιμές παραμέτρων για τα εδαφικά υλικά κατά το δυνατόν πιο κοντά στη φυσική τους κατάσταση.

Επί τη βάση των παραπάνω θεωρείται ότι εξασφαλίστηκε μία επαρκώς ευρεία βάση δεδομένων σε ό,τι αφορά το είδος των δοκιμασθέντων υλικών με τιμές παραμέτρων για αναζυμωμένα εδαφικά υλικά και για εδαφικά υλικά όσο πιο κοντά στη φυσική τους κατάσταση. Ο μεγάλος αριθμός των δοκιμασθέντων υλικών και η επαρκής κάλυψη της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της ορυκτολογικής σύστασης προσθέτουν στην αξιοπιστία αυτής της βάσης δεδομένων.

Από αυτή καθεαυτή την αξιολόγηση των φυσικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών προέκυψαν τα εξής κύρια συμπεράσματα:

1. Οι καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικών υλικών μπορούν να προσομοιωθούν εύκολα με χρήση της μεθόδου των Fredlund, et al. (2000) και να προκύψουν έτσι για κάθε εδαφικό υλικό συναρτήσεις του ποσοστού του διερχόμενου υλικού από δεδομένη ονομαστική διάμετρο σωματιδίων με την διάμετρο αυτή.
2. Οι τιμές των ορίων Atterberg των μειγμάτων καολίνη-άμμου και μπεντονίτη-άμμου συσχετιζόμενες με το περιεχόμενο ποσοστό σωματιδίων μεγέθους αργίλου όπως προκύπτει από τις καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης οριοθετούν την περιοχή που καταλαμβάνεται στα ίδια διαγράμματα από τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Οι τιμές των ορίων Atterberg για τα μείγματα καολίνη-άμμου σχηματίζουν το κάτω όριο και οι τιμές των ορίων Atterberg για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου σχηματίζουν το άνω όριο.
3. Ίδια είναι και η οριοθέτηση στα διαγράμματα των ορίων Atterberg με το ποσοστό περιεχόμενων αργιλικών ορυκτών επί του συνόλου και με το ποσοστό περιεχόμενων βασικών αργιλικών ορυκτών επί του συνόλου.
4. Το όριο υδαρότητας και το όριο πλαστικότητας μειώνονται γραμμικά με το ποσοστό των περιεχόμενων ανθρακικών ορυκτών.
5. Ως αποτέλεσμα αυτού άργιλοι και μάργες με το ίδιο ποσοστό αργιλικών και ανθρακικών ορυκτών, μπορεί να έχουν μικρότερο όριο υδαρότητας και δείκτη πλαστικότητας από τα μείγματα καολίνη-άμμου παρά το γεγονός ότι τα αργιλικά ορυκτά στα μείγματα αυτά είναι τα μεγαλύτερου μεγέθους.
6. Σε όλα τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης που πραγματοποιήθηκαν ορυκτολογικές αναλύσεις εντοπίστηκε μοντμοριλλονίτης, χλωρίτης, ασβεστίτης και χαλαζίας. Από τα βασικά αργιλικά ορυκτά, το επόμενο συχνότερα απαντώμενο είναι ο ιλλίτης (μόνο στην Άργιλο Κορίνθου δεν βρέθηκε), ενώ καολινίτης εντοπίστηκε μόνο σε δύο, στην Άργιλο Αμαρουσίου και στην Μάργα Πατρών. Αξιοσημείωτη είναι επίσης και η παρουσία αλλοϋσίτη σε όλες τις άργιλους και στην Μάργα Πατρών.
7. Υπάρχει εντυπωσιακή σύμπτωση ανάμεσα στην ορυκτολογική σύσταση της «Άργιλου Κορίνθου» και της «Μάργας Κορίνθου» και ως προς τα ανιχνευθέντα ορυκτά και ως προς τις περιεκτικότητές τους. Αυτό επιβεβαιώνει την γεωλογική προέλευση της πρώτης από την δεύτερη και εξηγεί τα παραπλήσια όρια Atterberg των δύο υλικών.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12

## ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

### 12.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών σε δεκαοκτώ διαφορετικά εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και δεκατέσσερα διαφορετικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών αυτών υλικών αναφέρονται στο Κεφάλαιο 11 όπου και δίνονται πληροφορίες για την προέλευσή τους, τον τρόπο της δειγματοληψίας, τη γεωλογική τους ιστορία, τα φυσικά τους χαρακτηριστικά και την ορυκτολογική τους σύσταση. Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται το πρόγραμμα των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές:

- Μονοδιάστατης συμπίεσης: σε πλήρως κορεσμένα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά, σε αρχικά μη κορεσμένα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά, σε φυσικά εδαφικά υλικά, με απευθείας μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας σε φυσικά εδαφικά υλικά, για την προπαρασκευή δοκιμών, καθώς και σε συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά.
- Βραδείας άμεσης διάτμησης με στερεοποίηση σε αναζυμωμένα και συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά.
- Ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά μετά από την ξήρανσή τους σε θάλαμο μύζησης.
- Προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.
- Προσδιορισμού καμπύλης συγκράτησης ύδατος με την παραμονή στην ατμόσφαιρα.
- Προσδιορισμού καμπύλης συγκράτησης ύδατος με την παραμονή στον φούρνο των 110 °C.

Οι προαναφερθείσες δοκιμές ομαδοποιούνται σε δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης, δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και δοκιμές προσδιορισμού συγκράτησης ύδατος με παραμονή στην ατμόσφαιρα ή στο φούρνο των 110 °C και τέλος ειδικές δοκιμές (όπου περιλαμβάνονται όλες οι υπόλοιπες) και περιγράφονται ξεχωριστά στις παραγράφους που ακολουθούν στο παρόν κεφάλαιο.

## **12.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ**

### **12.2.1 Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε πλήρως κορεσμένα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά.**

Η πρώτη ομάδα δοκιμών που εκτελέστηκαν ήταν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε πλήρως κορεσμένα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά. Ο σκοπός αυτής της σειράς δοκιμών ήταν διπλός:

- Στην πρώτη φάση διερευνήθηκε το ίδιο το θεωρητικό πλαίσιο των εγγενών ιδιοτήτων με την πραγματοποίηση δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε πέντε διαφορετικά υλικά. Στη φάση αυτή ενδιέφερε η διερεύνηση της «στιβαρότητας» (“robustness”) της Γραμμής Εγγενούς Συμπίεσης ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών και συγκεκριμένα την πλαστικότητα και το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών.
- Στη δεύτερη φάση και σε συνδυασμό με τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε φυσικά υλικά εκτελούντο παράλληλα δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης στα ίδια υλικά αλλά αναζυμωμένα πλέον προκειμένου να βγουν συμπεράσματα για τη δομή των φυσικών εδαφικών υλικών. Τα δεδομένα από αυτές τις δοκιμές σε αναζυμωμένα εδάφη χρησιμοποιήθηκαν για να συμπληρωθεί η βάση δεδομένων με τις δοκιμές σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά της πρώτης φάσης.

Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην πρώτη φάση ήταν η Άργιλος Χανίων, η Άργιλος Κορίνθου, η Μάργα Πατρών, ο Καολίνης τύπου Speswhite και η Άργιλος Λονδίνου. Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη δεύτερη φάση ήταν η Μάργα Κορίνθου, η Μάργα Χαλκουτσίου, η Μάργα και η Άργιλος Κηφισιάς και η Άργιλος Αμαρουσίου, στα οποία έγιναν και δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης και σε δοκίμια των υλικών στη φυσική τους κατάσταση. Συμπληρώνοντας τις δοκιμές των δύο αυτών φάσεων πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε αναζυμωμένη Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, Άργιλο Ορεστιάδας Έβρου, Άργιλο Αμφιλοχίας και

αποσαθρωμένο Φυλλίτη Σκύρου. Η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων μάλιστα δοκιμάστηκε τόσο αυτούσια (με τη φυσική της κοκκομετρική διαβάθμιση) όσο και το ποσοστό πολύ λεπτής άμμου που περιέχεται σε αυτήν (διερχόμενο από το κόσκινο Νούμερο 100 και συγκρατούμενο από το κόσκινο Νούμερο 200) καθώς και το διερχόμενο αυτής από το κόσκινο Νο 200 προκειμένου το θεωρητικό πλαίσιο των εγγενών ιδιοτήτων να δοκιμαστεί στα όριά του (σε ό,τι αφορά την πλαστικότητα). Εν όψει των αποτελεσμάτων των δοκιμών σε αυτά τα υλικά και της αναλυτικής επεξεργασίας του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 10 εκτελέστηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης και σε μείγματα της πολύ λεπτής άμμου που περιέχεται στην Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων με καολίνη, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης του Αναστασίου (2004) σε μείγματα της ίδιας άμμου με μπεντονίτη. Τέλος, προς διερεύνηση της επιρροής του μεγέθους της κατακόρυφης τάσης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης και σε θραυστή χονδρόκοκκη άμμο («ρυζάκι»).

### **12.2.2 Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αρχικά μη κορεσμένα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά.**

Η δεύτερη ομάδα δοκιμών που εκτελέστηκαν ήταν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αρχικά μη κορεσμένα εδαφικά υλικά. Οι δοκιμές αυτές εκτελέστηκαν προκειμένου να επιδειχθούν ορισμένα χαρακτηριστικά της συμπιεστότητας και της διαπερατότητας των αργιλικών εδαφικών υλικών όταν αυτά είναι αρχικά μη κορεσμένα. Οι δοκιμές αυτές εκτελέστηκαν σε δοκίμια Καολίνης τύπου Speswhite.

### **12.2.3 Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε φυσικά εδαφικά υλικά.**

Η τρίτη ομάδα δοκιμών που εκτελέστηκαν ήταν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε φυσικά εδαφικά υλικά. Τα υλικά αυτά προαναφέρθηκαν στην §12.2.1 και ήταν η Μάργα Κορίνθου, η Μάργα Χαλκουτσίου, η Μάργα και η Άργιλος Κηφισιάς και η Άργιλος Αμαρουσίου. Εκτελέστηκαν δοκιμές μέχρι αρκετά υψηλές τιμές της τάσης (7600 kPa) προκειμένου να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά καταστροφής της δομής των φυσικών αργιλικών εδαφών (αποδόμησης -destructuration) με την αύξηση της επιβαλλόμενης τάσης υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως και να προσδιοριστεί η δομή των φυσικών αυτών υλικών μέσα από τη

σύγκριση με τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης στα ίδια υλικά αναζυμωμένα.

Εκτελέστηκε επίσης μία δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης με απευθείας μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας σε φυσική Μάργα Κορίνθου.

#### **12.2.4 Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης για την προπαρασκευή δοκιμών.**

Αυτή η ομάδα δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης περιελάμβανε τις δοκιμές προπαρασκευής δοκιμών για την τοποθέτηση στη συσκευή προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και των καμπυλών συγκράτησης ύδατος με τον χρόνο παραμονής των δοκιμών στον ατμοσφαιρικό αέρα και τον εργαστηριακό φούρνο των 110 °C. Τα εδαφικά υλικά για τα οποία προσδιορίστηκαν χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού σε δοκίμια αναζυμωμένα και επανασυμπιεσμένα ήταν η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων, η Άργιλος Χανίων, η Άργιλος Λιβαδερού Δράμας, η Άργιλος και η Μάργα Κηφισιάς, η Άργιλος Μελίτης Φλώρινας, η Άργιλος Αμαρουσίου, η Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου, η Άργιλος Αμφιλοχίας, η Μάργα Κορίνθου, η Μάργα Χαλκουτσίου, ο Αργιλοποιημένος Ιλύλιθος Πάρνηθας και ο Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου. Περισσότερες πληροφορίες και αιτιολόγηση για τη σκοπιμότητα αυτής της προετοιμασίας των δοκιμών δίνονται στις παραγράφους για τις δοκιμές προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και των καμπυλών συγκράτησης ύδατος με τον χρόνο παραμονής των δοκιμών στον ατμοσφαιρικό αέρα και τον φούρνο των 110 °C (§14.5.2 και 14.5.3).

#### **12.2.5 Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά.**

Εκτός από τις δοκιμές σε αναζυμωμένα και φυσικά εδαφικά υλικά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης και σε συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά. Ο σκοπός των δοκιμών αυτών ήταν η διερεύνηση των ογκομετρικών μεταβολών που συμβαίνουν υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης κατά τη διαβροχή δοκιμών ευρισκόμενων υπό σταθερή τάση. Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την ομάδα δοκιμών ήταν ο Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου και η Άργιλος Αμαρουσίου.



### 12.2.6 Συνοψιση δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης ανά υλικό.

Στον Πίν. 12.1 συνοψίζονται οι δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης που εκτελέστηκαν ανά εδαφικό υλικό και η φύση του κατά την εκτέλεση των δοκιμών.

**Πίνακας 12.1.** Είδος δοκιμίου στο οποίο εκτελέστηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης ανά υλικό.

Εδαφικό υλικό	Δοκιμές σε αναζυμωμένο εδαφικό υλικό	Δοκιμές σε φυσικό υλικό	Δοκιμές σε συμπακνωμένο υλικό	Δοκιμές προετοιμασίας δοκιμίων
<b>ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ - ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ</b>				
Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων	X	-	-	X
Άργιλος Χανίων	X	-	-	X
Άργιλος Κορίνθου	X	-	-	-
Άργιλος Κηφισιάς	X	X	-	X
Άργιλος Αμαρουσίου	X	X	X	X
Άργιλος Λονδίνου	X	-	-	-
Άργιλος Λιβαδερού Δράμας	X	-	-	X
Άργιλος Μελίτης Φλώρινας	X	-	-	X
Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου	X	-	-	X
Άργιλος Αμφιλοχίας	X	-	-	X
Μάργα Κορίνθου (χαμ. πλαστ.)	X	X	-	X
Μάργα Κορίνθου (υψ. πλαστ.)	X	X	-	-
Μάργα Κηφισιάς	X	X	-	X
Μάργα Πατρών	X	-	-	-
Μάργα Χαλκουτσίου	X	X	-	X
<b>ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ - ΕΛΛΟΥΒΙΑΚΑ</b>				
Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου	X	-	-	X
Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου	-	-	X	X
Αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας	X	X	-	X
<b>ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ</b>				
Καολίνης Speswhite	X	-	-	X
Πολύ λεπτόκοκκη άμμος	X	-	-	-
Ιλύς	X	-	-	-
Μείγματα SK	X	-	-	-
Μείγματα SB	X	-	-	-
Θραυστή χονδρόκοκκη άμμος	X	-	-	-

## 12.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ

Δοκιμές προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού πραγματοποιήθηκαν στα εξής εδαφικά υλικά:

- Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων (προσυμπιεσμένη)
- Άργιλος Χανίων (προσυμπιεσμένη)
- Άργιλος Λιβαδερού Δράμας (προσυμπιεσμένη)
- Άργιλος Μελίτης Φλώρινας (προσυμπιεσμένη)
- Άργιλος Κηφισιάς (προσυμπιεσμένη)
- Άργιλος Αμαρουσίου (αναζυμωμένη & προσυμπιεσμένη, καθώς και συμπτκνωμένη, στη βέλτιστη υγρασία καθώς και ξηρά και υγρά από αυτήν)
- Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου (αναζυμωμένη & προσυμπιεσμένη)
- Άργιλος Αμφιλοχίας (αναζυμωμένη & προσυμπιεσμένη, καθώς και προσυμπιεσμένη μετά από τεχνητή σιμέντωση με τσιμέντο)
- Μάργα Κορίνθου (αναζυμωμένη, προσυμπιεσμένη & φυσική)
- Μάργα Κηφισιάς (προσυμπιεσμένη)
- Μάργα Χαλκουτσίου (αναζυμωμένη, προσυμπιεσμένη & φυσική)
- Αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας (αναζυμωμένη, προσυμπιεσμένη & φυσική)
- Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου (αναζυμωμένη & προσυμπιεσμένη)
- Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου (συμπτκνωμένος, στη βέλτιστη υγρασία καθώς και ξηρά και υγρά από αυτήν)

Με τις δοκιμές προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στα συγκεκριμένα υλικά διερευνήθηκε η επιρροή της πλαστικότητας των εδαφικών υλικών στη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού καθώς και του αρχικού λόγου κενών των υλικών όπως προκύπτει μόνο λόγω συμπίεσής τους αλλά και λόγω φυσικών διεργασιών (δοκιμές στα φυσικά υλικά). Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι μετατόπισης άξονα και ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω κορεσμένων υδατικών διαλυμάτων αλάτων. Μέσω της πρώτης μεθόδου επιβλήθηκαν τιμές της μύζησης μέχρι 1500 kPa και μέσω της δεύτερης τιμές της μύζησης από 5 μέχρι και 150 MPa. Για επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης με κορεσμένα υδατικά διαλύματα αλάτων συνδυάστηκε

με τη δυνατότητα μέτρησης της ολικής μύζησης σε υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου. Λεπτομέρειες για την εφαρμογή των δύο αυτών μεθόδων παρατίθενται στο Κεφάλαιο 14 όπου παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα των δοκιμών που έγιναν και η αξιολόγησή τους.

Εκτός από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού στα φυσικά και αναζυμωμένα και επανασυμπιεσμένα εδαφικά υλικά που προαναφέρθηκαν, προσδιορίστηκαν και οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού σε συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά. Τα υλικά αυτά ήταν η Άργιλος Αμαρουσίου και ο Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου και οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού τους προσδιορίστηκαν για συμπυκνωμένα δείγματα στη βέλτιστη υγρασία καθώς και «ξηρά» και «υγρά» από τη βέλτιστη.

#### **12.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ ΥΔΑΤΟΣ ΜΕ ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ Ή ΤΟΝ ΦΟΥΡΝΟ ΤΩΝ 110 °C**

Εκτός από τις δοκιμές προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που πραγματοποιήθηκαν, σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές προσδιορισμού των καμπυλών συγκράτησης ύδατος με το χρόνο παραμονής των εδαφικών δοκιμών στις ατμοσφαιρικές συνθήκες ή στο φούρνο των 110 °C. Ο σχεδιασμός των δοκιμών αυτών (δεν βρέθηκε καμιά αναφορά σε παρόμοιες δοκιμές κατά τη βιβλιογραφική αναζήτηση που πραγματοποιήθηκε σχετικά) έγινε με βάση τα παρακάτω στοιχεία:

- Εξ ορισμού το παραμένον ποσοστό υγρασίας είναι το ποσοστό υγρασίας μέχρι το οποίο θα ξηρανθεί εδαφικό υλικό που αφήνεται σε δεδομένες συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος ατμοσφαιρικού αέρα εκφράζοντας την κατάσταση ισορροπίας η οποία αποκαθίσταται μακροπρόθεσμα μεταξύ του νερού των πόρων του εδαφικού υλικού και του περιβάλλοντος ατμοσφαιρικού αέρα υπό τις δεδομένες συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Κατά συνέπεια αφήνοντας δοκίμια εδαφικού υλικού στις συνθήκες του ατμοσφαιρικού αέρα και παρακολουθώντας το βάρος τους μέχρι τη σταθεροποίησή του στις συνθήκες αυτές προσδιορίζεται το παραμένον ποσοστό υγρασίας για κάθε εδαφικό υλικό.
- Παρακολουθώντας δε ολόκληρη την καμπύλη με το χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα παρακολουθείται ουσιαστικά η καμπύλη απώλειας ύδατος (ή αλλιώς συγκράτησης ύδατος από το εδαφικό υλικό) με την ενέργεια που παρέχεται στο δοκίμιο του εδαφικού υλικού.

- Αντίστοιχα παρακολουθώντας ολόκληρη την καμπύλη με το χρόνο παραμονής στο φούρνο των 110 °C παρακολουθείται ουσιαστικά η καμπύλη απώλειας ύδατος (ή αλλιώς συγκράτησης ύδατος από το εδαφικό υλικό) με την ενέργεια που παρέχεται στο δοκίμιο του εδαφικού υλικού μέσω θερμότητας (αυτή τη φορά στο φούρνο των 110 °C).
- Η θεωρητική βάση που οδήγησε στο σχεδιασμό και την εκτέλεση αυτού του είδους των δοκιμών ήταν ακριβώς ότι και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού συνιστά κατ' ουσία την καμπύλη απώλειας ύδατος ενός δοκιμίου εδαφικού υλικού με την ενέργεια που παρέχουμε σε αυτό μέσω της αύξησης της επιβαλλόμενης μύζησης. Κατά συνέπεια έχοντας και τις προαναφερθείσες καμπύλες θα μπορούσε να διερευνηθεί η συσχέτιση μεταξύ των δύο καταλήγοντας (εφόσον επιβεβαιωθεί) σε μία έμμεση ταχύτερη και απλούστερη μέθοδο προσδιορισμού του κλάδου παρθένας ξήρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται το πρόγραμμα των δοκιμών αυτού του είδους που πραγματοποιήθηκαν.

#### **12.4.1 Δοκιμές προσδιορισμού καμπύλης συγκράτησης ύδατος με παραμονή στην ατμόσφαιρα.**

Δοκιμές προσδιορισμού της καμπύλης συγκράτησης ύδατος με την παραμονή δοκιμίων στην ατμόσφαιρα πραγματοποιήθηκαν στα εξής εδαφικά υλικά:

- Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων (αναζυμωμένη και προσυμπιεσμένη)
- Άργιλος Χανίων (αναζυμωμένη και προσυμπιεσμένη)
- Μάργα Κορίνθου (αναζυμωμένη, προσυμπιεσμένη και φυσική)
- Μάργα Κηφισιάς (προσυμπιεσμένη)
- Άργιλος Κηφισιάς (προσυμπιεσμένη)
- Καολίνης τύπου Speswhite (αναζυμωμένος και προσυμπιεσμένος)

Από τις δοκιμές αυτές προσδιορίστηκε το παραμένον ποσοστό υγρασίας των υλικών αυτών και ο λόγος κενών τους στην κατάσταση που βρίσκονταν, καθώς και ολόκληρες οι καμπύλες συγκράτησης νερού με το χρόνο παραμονής των δοκιμίων σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Εκτός από τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα των Παπαμεντζελόπουλου & Τσούκα (2004), οι οποίοι προσδιόρισαν καμπύλες συγκράτησης ύδατος με την παραμονή δοκιμίων στην ατμόσφαιρα για διάφορες τάσεις προσυμπίεσης στο ίδιο εδαφικό υλικό (Αργίλος Χανίων).

#### **12.4.2 Δοκιμές προσδιορισμού καμπύλης συγκράτησης ύδατος με παραμονή στον εργαστηριακό φούρνο των 110 °C**

Δοκιμές προσδιορισμού της καμπύλης συγκράτησης ύδατος με την παραμονή δοκιμίων στον εργαστηριακό φούρνο με θερμοκρασία 110 °C πραγματοποιήθηκαν στα ίδια εδαφικά υλικά (και με την ίδια ιστορία φόρτισης) για τα οποία πραγματοποιήθηκαν και οι δοκιμές προσδιορισμού της καμπύλης συγκράτησης ύδατος με την παραμονή δοκιμίων στην ατμόσφαιρα. Στο τέλος των δοκιμών αυτών, οπότε και τα δείγματα ήταν πλέον απολύτως ξηρά, προσδιορίστηκε ο λόγος κενών τους με τη μέθοδο της εμβάπτισής τους σε παραφίνη. Η τιμή του λόγου κενών που προσδιορίστηκε με αυτόν τον τρόπο είναι η τιμή του λόγου κενών που αντιστοιχεί στη θεωρητική τιμή της μύζησης 1.000.000 kPa, η οποία έχει αποδειχθεί με βάση θερμοδυναμικές θεωρήσεις ότι είναι η μύζηση που πρέπει να ασκηθεί σε οποιοδήποτε εδαφικό υλικό για να ξεραθεί απολύτως μέσω εφαρμογής μύζησης (Fredlund & Rahardjo, 1993).

#### **12.4.3 Συνόψιση δοκιμών χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, προσδιορισμού καμπύλης συγκράτησης ύδατος με παραμονή στην ατμόσφαιρα, προσδιορισμού καμπύλης συγκράτησης ύδατος με παραμονή στον εργαστηριακό φούρνο των 110 °C**

Στον Πίν. 12.2 συνοψίζονται οι δοκιμές χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, προσδιορισμού καμπύλης συγκράτησης ύδατος με παραμονή στην ατμόσφαιρα, προσδιορισμού καμπύλης συγκράτησης ύδατος με παραμονή στον εργαστηριακό φούρνο των 110 °C που εκτελέστηκαν ανά εδαφικό υλικό και η φύση του υλικού κατά την εκτέλεση των δοκιμών.

Εδαφικό υλικό	Δοκιμές χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού				Δοκιμές καμπύλης συγκράτησης ύδατος με παραμονή στην ατμόσφαιρα	Δοκιμές καμπύλης συγκράτησης ύδατος με παραμονή στον φούρνο
	Σε αναζ. υλικό	Σε αναζ. και επανα- συμπιεσμένο υλικό	Σε φυσικό υλικό	Σε συμπ/νο υλικό		
<b>ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ - ΙΖΗΜΑΤΟΓΕΝΗ</b>						
Πλύς Λίμνης Ιωαννίνων	-	1	-	-	-	-
Άργιλος Χανίων	-	1	-	-	1	1
Άργιλος Κηφισιάς	-	1	-	-	1	1
Άργιλος Αμαρουσίου	1	3	-	3	-	-
Άργιλος Λιβαδερού Δράμας	-	1	-	-	-	-
Άργιλος Μελίτης Φλώρινας	-	1	-	-	-	-
Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου	1	3	-	-	-	-
Άργιλος Αμφιλοχίας	1	3	-	-	-	-
Μάργα Κορίνθου (χαμ. πλαστ.)	1	1	1	-	1	1
Μάργα Κηφισιάς	-	1	-	-	1	1
Μάργα Χαλκουτσίου	1	3	1	-	-	-
<b>ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ - ΕΛΛΟΥΒΙΑΚΑ</b>						
Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου	1	1	-	-	-	-
Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου	-	-	-	3	-	-
Αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας	1	1	1	-	-	-
<b>ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ</b>						
Καολίνης Speswhite	-	-	-	-	1	1

## 12.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών που καταστρώθηκε αποσκοπούσε στη διερεύνηση της στιβαρότητας της Εγγενούς Γραμμής Συμπίεσης και των ορίων που αυτή παραμένει πράγματι ευθεία, στη διερεύνηση των χαρακτηριστικών της δομής φυσικών αργιλικών εδαφών μέσα από τη σύγκριση της συμπεστότητάς τους υπό μονοδιάστατες συνθήκες με τα αντίστοιχα αναζυμωμένα υλικά, τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών συμπίεσης σε συνθήκες μερικού κορεσμού εδαφικών υλικών που ποικίλλαν από άμμοι μέχρι άργιλοι υψηλής πλαστικότητας και τη διερεύνηση των καμπυλών συγκράτησης ύδατος με τη μεταβολή παραδοσιακών παραμέτρων, όπως η μύζηση, και άλλων που καταστρώθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, όπως ο χρόνος παραμονής των δοκιμών των εδαφικών υλικών στις ατμοσφαιρικές συνθήκες ή ο χρόνος παραμονής τους στον φούρνο των 110 °C. Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν και πιο συγκεκριμένα:

- στο Κεφάλαιο 13 παρουσιάζεται η διερεύνηση της συμπεστότητας των αναζυμωμένων εδαφών, η επιρροή του αρχικού βαθμού κορεσμού στη συμπεστότητα των αναζυμωμένων εδαφών και η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των φυσικών αργιλικών εδαφών,
- στο Κεφάλαιο 14 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που προσδιορίστηκαν, οι καμπύλες συγκράτησης ύδατος με το χρόνο παραμονής στην ατμόσφαιρα και τον εργαστηριακό φούρνο των 110 °C,
- στο Κεφάλαιο 15 παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από όλες τις υπόλοιπες δοκιμές που αναφέρθηκαν,
- στο Κεφάλαιο 16 γίνεται ανακεφαλαίωση των συμπερασμάτων στα οποία κατέληξε η εργαστηριακή διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 13

## ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

### 13.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής σε αναζυμωμένα και φυσικά εδαφικά υλικά. Οι αντικειμενικοί στόχοι του προγράμματος εργαστηριακών δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης που πραγματοποιήθηκαν ήταν:

- Η διερεύνηση του εύρους ισχύος του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων και της χρήσης του για την αξιολόγηση της δομής των φυσικών πλήρως κορεσμένων εδαφικών υλικών. Η έμφαση δόθηκε στην πειραματική τεκμηρίωση της γενικευμένης γραμμής εγγενούς συμπίεσης και την επίδειξη της επιρροής του αρχικού βαθμού κορεσμού των δοκιμών στα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης.
- Η γενικότερη ανάγκη για αξιόπιστα πειραματικά δεδομένα προκειμένου να δημιουργηθεί μία βάση αξιόπιστων πειραματικών δεδομένων σε εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο που χρησιμοποιήθηκε για το προσομοίωμα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλα προσομοιώματα στο μέλλον.

Εκτελέστηκαν δοκιμές:

- Μονοδιάστατης συμπίεσης σε πλήρως κορεσμένα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά.
- Μονοδιάστατης συμπίεσης σε αρχικά μη κορεσμένα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά.
- Μονοδιάστατης συμπίεσης σε φυσικά εδαφικά υλικά.
- Μονοδιάστατης συμπίεσης με απευθείας μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας σε φυσικά εδαφικά υλικά.

- Μονοδιάστατης συμπίεσης για την προπαρασκευή δοκιμίων.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο με εξαίρεση τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης για την προπαρασκευή δοκιμίων στα οποία γίνεται αναφορά στο Κεφάλαιο 14.

### 13.2 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ

Για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν τα μηχανικά συμπιεσόμετρα του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής, προέλευσης Wykeham Farrance Βρετανίας. Στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων υπάρχουν δύο τύποι συμπιεσομέτρου οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν. Και οι δύο διαθέτουν μοχλό εμπρόσθιας φόρτωσης και φρένο ελέγχου του αρχικού χρόνου επιβολής της φόρτισης. Στον έναν τύπο συμπιεσομέτρου είναι δυνατή η επιβολή μέγιστης τάσης 4800 kPa (για την ακρίβεια 48 kg/cm<sup>2</sup>, δηλαδή 4707 kPa) με χρήση δακτυλίων διαμέτρου 70 mm και στον άλλον τύπο είναι δυνατή η επιβολή μέγιστης τάσης 3200 kPa (32 kg/cm<sup>2</sup>, δηλαδή 3138 kPa) με χρήση δακτυλίων διαμέτρου 70 mm. Για τον τύπο αυτό ωστόσο διατίθενται και δακτύλιοι διαμέτρου 50 mm με χρήση των οποίων μπορεί να επιβληθεί μέγιστη τάση 6400 kPa (64 kg/cm<sup>2</sup>, δηλαδή 6276 kPa). Για τα ίδια συμπιεσόμετρα διατίθενται επίσης και δακτύλιοι διαμέτρου 100 mm καθώς και κυψέλες για μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας με την τάση με δακτυλίους διαμέτρου 70 mm. Και στους δύο τύπους συμπιεσομέτρων και για τους δακτυλίους όλων των διαμέτρων το ύψος των δακτυλίων ήταν 19 mm. Οι δακτύλιοι όλων των τύπων έχουν λεία εσωτερική επιφάνεια. Μόνο ο πάνω πορόλιθος μπορεί να κινηθεί σχετικά ως προς τον δακτύλιο.

Είναι γνωστό ότι στα συμπιεσόμετρα με μοχλό εμπρόσθιας φόρτωσης αλλάζει κατά τη διάρκεια της δοκιμής ο λόγος του μήκους του μοχλού φόρτωσης προς το μήκος του μοχλού εφαρμογής του φορτίου στην κυψέλη. Με δεδομένο αυτό και με χρήση της παρεχόμενης δυνατότητας στα συμπιεσόμετρα για μεταβολή της απόστασης από τον μοχλό φόρτωσης ως την κυψέλη φόρτισης του δοκιμίου, ο μοχλός τοποθετείται αρχικά με ελαφρά κλίση προς τα πάνω έτσι ώστε συμπιεζόμενου του δοκιμίου να βρεθεί προοδευτικά σε οριζόντια θέση και μετά αντιστοίχως να βρεθεί με ελαφρά κλίση προς τα κάτω. Αυτό μεταφράζεται σε μία απόκλιση της πραγματικά εφαρμοζόμενης τάσης από τη θεωρητικά εφαρμοζόμενη τάση (με βάση το βάρος επί του μοχλού φόρτισης και τον λόγο του μήκους μοχλού φόρτισης και σημείου περιστροφής-σημείου εφαρμογής φορ-

τίου στο δοκίμιο). Κατά τη διάρκεια των εκτελεσθεισών δοκιμών μετρήθηκε ότι ο λόγος αυτός μεταβλήθηκε από την τιμή 11 που έχει για οριζόντια θέση του μοχλού φόρτισης σε 10.9 για κεκλιμένη θέση (είτε προς τα πάνω –αρχή φόρτισης, άρα μικρά φορτία- είτε προς τα κάτω –τέλος φόρτισης, άρα μεγάλα φορτία). Δεδομένου ότι η σχέση που συνδέει τον λόγο αυτό με την εφαρμοζόμενη στο δοκίμιο τάση είναι γραμμική, προκύπτει ότι για τη μικρότερη ονομαστική τάση επιτυγχανόμενη με φόρτωση του μοχλού που ήταν 12.5 kPa, η πραγματικά ασκούμενη τάση είναι  $12.5 \cdot 10.9 / 11 = 12.39$  kPa. Αντίστοιχα για τη μεγαλύτερη ονομαστική τάση των 6276 kPa, η πραγματικά ασκούμενη τάση είναι  $6276 \cdot 10.9 / 11 = 6219$  kPa. Συναρτήσει των απόλυτων μεγεθών της ελάχιστης και της μέγιστης ονομαστικής τάσης, οι διαφορές αυτές είναι πολύ μικρές και γι' αυτό κατά την παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των εκτελεσθεισών δοκιμών που ακολουθεί δεν λαμβάνεται υπόψη η διαφορά αυτή μεταξύ πραγματικά εφαρμοζόμενης και ονομαστικής τάσης<sup>1</sup>.

Για τη μέτρηση της κατακόρυφης παραμόρφωσης στις πραγματοποιηθείσες δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης χρησιμοποιήθηκαν ωρολογιακά μηκυνσιόμετρα ακρίβειας 0.002 mm και κινούμενου στελέχους διαδρομής 10 mm. Για τις δοκιμές στις οποίες αναφέρεται στο κείμενο χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα της ίδιας ακρίβειας με ψηφιακούς καταγραφείς. Προκειμένου να αποφευχθούν γνωστά προβλήματα τα οποία παρουσιάζονται στις καταγραφές από ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα στην αρχή κάθε φόρτισης (οπότε και οι καταγραφόμενες παραμορφώσεις είναι ραγδαίες) χρησιμοποιήθηκαν διατάξεις στις οποίες τα ηλεκτρονικά μηκυνσιόμετρα προσαρμόζονται στο άνω μέρος των ωρολογιακών με τα κινούμενα στελέχη και των δύο τοποθετημένα σε σειρά για να πραγματοποιούν την ίδια διαδρομή. Κατά τη χρήση των διατάξεων αυτών καταγράφονταν οι ενδείξεις των ωρολογιακών μηκυνσιόμετρων κατά την πρώτη ώρα των μετρήσεων και για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα μόνο οι ενδείξεις των ψηφιακών μηκυνσιόμετρων, χρησιμοποιώντας για έλεγχο μεταξύ των καταγραφών από τους δύο τύπους μηκυνσιόμετρων τις ενδείξεις της μισής και της μίας ώρας.

Κατά τη διάρκεια του υλοποιηθέντος προγράμματος δοκιμών τα συμπιεσόμετρα καθαρίζονταν σε τακτά χρονικά διαστήματα και τα μέρη στα οποία υπάρχει κίνηση λιπαίνονταν με πετρέλαιο καθαρισμού. Αποφεύχθηκε η χρήση λιπαντικού λαδιού καθώς έχει παρατηρηθεί ότι σκόνη που

<sup>1</sup> Έστω ότι ο λόγος κενών στην τάση των 6276 kPa είναι 0.50 και στην προηγούμενη τάση των 3138 kPa είναι 0.55, ενώ ταυτόχρονα στην πρώτη τάση ο λόγος του μοχλού φόρτισης ήταν 10.9 ενώ στην δεύτερη ήταν 11 (ακρικές παραδοχές υπέρ της ασφαλείας) και υπολογίζεται ο δείκτης συμπίεσης  $C_c$  από τα δύο σημεία. Αν αγνοηθεί η μειωμένη τιμή του λόγου του μοχλού φόρτισης είναι  $C_c = 0.166$ , ενώ αν δεν αγνοηθεί είναι  $C_c = 0.168$  (1.2%). Η διαφορά αυτή είναι μέγιστη με τις παραδοχές που έγιναν. Δεδομένης της επιτυγχανόμενης ακρίβειας υπολογισμού παραμέτρων στην εδαφομηχανική η μέγιστη αυτή διαφορά κρίνεται ασήμαντη.

μαζεύεται σε αυτό προοδευτικά δυσχεραίνει την κίνηση των στελεχών. Τα εξαρτήματα κάθε κυψέλης καθαρίζονταν επιμελώς σε τακτά χρονικά διαστήματα (πλύσιμο και εμβάπτιση και παραμονή σε λουτρό υπερήχων – ultrasonic bath), ενώ ιδιαίτερα οι δακτύλιοι και οι πορόλιθοι πάντοτε πριν και μετά από κάθε δοκιμή. Ειδικά οι πορόλιθοι τοποθετούντο μέσα σε απεσταγμένο νερό μαζί με το οποίο έβραζαν πριν από κάθε δοκιμή, προκειμένου, αφενός να καθαριστούν καλά από τυχόν αργιλικό υλικό που είχε εγκλωβιστεί στους πόρους του υλικού τους και να έχουν πάντοτε πριν από κάθε δοκιμή την μέγιστη διαπερατότητά τους, και αφετέρου να επιτυγχάνεται ο πλήρης κορεσμός τους πριν από κάθε νέα δοκιμή. Η εσωτερική πλευρά των δακτυλίων καθαριζόταν επιμελώς πριν από κάθε εισαγωγή νέου δοκιμίου (φυσικού ή αναζυμωμένου) και λιπαινόταν με βαζελίνη ώστε να είναι όσο πιο λεία γίνεται προς εξασφάλιση των συνθηκών μονοδιάστατης συμπίεσης.

Η επιμέλεια που επιδείχθηκε για την καθαριότητα των πορολίθων οδήγησε στην αποφυγή παρεμβολής χαρτιών φίλτρου (filter papers) μεταξύ πορολίθων και δοκιμίου παρά τις συστάσεις διεθνών προτύπων περί του αντιθέτου (π.χ. British Standard<sup>2</sup>). Όπως αναφέρει ο Head (1982) και μελέτησε διεξοδικά ο Baracos (1976), πλακίδια αργίλου από τα δοκίμια μπορεί να διεισδύσουν στις ίνες των χαρτιών φίλτρου μειώνοντας πάρα πολύ την διαπερατότητα στο άνω και το κάτω όριο στράγγισης των δοκιμίων δυσχεραίνοντας την αποτόνωση των πιέσεων πόρων κατά την στερεοποίηση, ιδίως σε δοκιμές μεγάλης χρονικής διάρκειας. Γι' αυτό και ο Head (1982) συστήνει την αποφυγή της τοποθέτησης χαρτιών φίλτρου.

Για κάθε σειρά πειραμάτων με την ίδια αλληλουχία φορτίων και για κάθε συμπιεσόμετρο με την κάθε κυψέλη που χρησιμοποιήθηκε σε αυτό πραγματοποιήθηκαν δοκιμές συμμόρφωσης<sup>3</sup> (compliance tests) στην αρχή και το τέλος κάθε σειράς πειραμάτων αλλά και στο ενδιάμεσο αυτής προκειμένου για ιδιαίτερα μακροχρόνιες σειρές πειραμάτων. Η κάθε δοκιμή συμμόρφωσης πραγματοποιείτο τουλάχιστον δύο φορές, ενώ αν τα αποτελέσματα από τις δύο πρώτες δοκιμές δεν συμφωνούσαν μεταξύ τους πραγματοποιείτο και τρίτη φορά. Για τη διόρθωση των αποτελεσμάτων των δοκιμών στα εδαφικά υλικά χρησιμοποιείτο ο μέσος όρος των τιμών της καταγραφόμενης καθίζησης από τις δύο δοκιμές συμμόρφωσης που συμφωνούσαν τα αποτελέσματά

---

<sup>2</sup> BS1377: Part 5: 1990: 3.

<sup>3</sup> Δοκιμή συμμόρφωσης είναι η δοκιμή κατά την οποία εισάγεται στην κυψέλη φόρτισης ένα χαλύβδινο –και ως εκ τούτου πρακτικά ασυμπίεστο για το εύρος των εφαρμοζόμενων τάσεων- δοκίμιο, των ιδίων διαστάσεων με τα δοκίμια εδαφικού υλικού, και συμπιέζεται με την αλληλουχία φορτίων που θα συμπιεστούν και τα δοκίμια του εδαφικού υλικού. Κατά τη δοκιμή αυτή καταγράφονται στο μηχανοστάσιο ενδείξεις που οφείλονται στην παραμόρφωση της ίδιας της συσκευής (αφού για το εύρος των εφαρμοζόμενων τάσεων το χαλύβδινο δοκίμιο πρακτικά δεν παραμορφώνεται) και αφαιρούνται από τις καταγραφόμενες ενδείξεις στη δοκιμή συμπίεσης του δοκιμίου από εδαφικό υλικό.

τους. Η σημασία της τακτικής εκπόνησης δοκιμών συμμόρφωσης και χρησιμοποίησής τους στην ανάλυση αποτελεσμάτων δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης έχει παρουσιαστεί εκτενώς από τους Μπαρδάνη & Γρίφιζα (2012).

### 13.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

#### 13.3.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της διερεύνησης των εγγενών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών πραγματοποιήθηκε μια πρώτη σειρά δοκιμών σε αναζυμωμένα δείγματα πέντε διαφορετικών εδαφικών υλικών και συγκεκριμένα σε τέσσερα φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και ορυκτολογικής σύστασης και ένα τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης και ορυκτολογικής σύστασης. Τα τέσσερα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης ήταν η Άργιλος Χανίων, η Άργιλος Κορίνθου, η Μάργα Πατρών και η Άργιλος Λονδίνου και το υλικό τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης ήταν ο Καολίνης τύπου Speswhite.

Σκοπός της σειράς αυτής των δοκιμών ήταν η εργαστηριακή διερεύνηση του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων όπως αυτό περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 10 ως προς διάφορες παραμέτρους. Οι παράμετροι αυτές ήταν:

1. **Η πλαστικότητα των εδαφικών υλικών.** Ο έλεγχος ως προς την παράμετρο αυτή απετέλεσε και το κριτήριο επιλογής των υλικών που προαναφέρθηκαν προκειμένου να καλυφθεί με επάρκεια το εύρος τιμών ορίου υδαρότητας και δείκτη πλαστικότητας από τα υλικά χαμηλής πλαστικότητας έως τα υλικά υψηλής πλαστικότητας. Όπως φαίνεται και από τις φυσικές ιδιότητες των προαναφερθέντων υλικών που παρατίθενται στο Κεφάλαιο 11, η Άργιλος Χανίων και η Άργιλος Κορίνθου είναι υλικά χαμηλής πλαστικότητας, η Μάργα Πατρών βρίσκεται πολύ κοντά στο όριο διάκρισης μεταξύ υλικών χαμηλής και υψηλής πλαστικότητας (αφού έχει  $w_L = 50.5\%$ ) και ο Καολίνης τύπου Speswhite και η Άργιλος Λονδίνου είναι υλικά υψηλής πλαστικότητας. Ο Καολίνης και η Μάργα Πατρών κείνται πρακτικά επί της «Γραμμής Α» στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande, ενώ τα άλλα τρία υλικά σε απόσταση από αυτήν προς τα πάνω. Αν και ο καολίνης είναι ένα υλικό τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης και ορυκτολογικής σύστασης, η χρήση του θεωρήθηκε

επιβεβλημένη προκειμένου να ελεγχθεί σε αυτό το υλικό η αξιοπιστία των πραγματοποιηθεισών δοκιμών, αφού για αυτό το υλικό υπάρχουν αποτελέσματα και από άλλους ερευνητές εργαζόμενους σε άλλα εργαστήρια. Για τον ίδιο λόγο χρησιμοποιήθηκε και η Άργιλος Λονδίνου, όπως επίσης και για το ότι παρουσιάστηκε έντονη δυσκολία ανεύρεσης ενός αργιλικού υλικού πολύ υψηλής πλαστικότητας από τον ελλαδικό χώρο κατά τον χρόνο εκτέλεσης των δοκιμών αυτής της σειράς.

2. **Το αρχικό ποσοστό υγρασίας του πολτού.** Για κάθε εδαφικό υλικό παρασκευάζονταν πολτοί σε πέντε διαφορετικές τιμές του ποσοστού υγρασίας κυμαινόμενες από 0.75 έως 2 φορές το όριο υδαρότητας του κάθε εδαφικού υλικού (0.75, 1.10, 1.40, 1.70 και 2.00). Προκειμένου να ελέγχεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης, για κάποιες από τις τιμές του ποσοστού υγρασίας (συνήθως τις ακραίες) πραγματοποιούνταν δύο δοκιμές.
3. **Ο αρχικός βαθμός κορεσμού του πολτού.** Για τις χαμηλότερες από τις προηγούμενες τιμές αρχικών ποσοστών υγρασίας παρατηρήθηκε ότι οι παρασκευαζόμενοι πολτοί δεν ήταν αρχικά πλήρως κορεσμένοι (σε όλα τα υλικά για  $w_o = 0.75 w_L$  και σε κάποια υλικά για  $w_o = 1.10 w_L$  αν και στις περιπτώσεις αυτές εκτιμάται ότι απλώς υπήρξε ανεπαρκής ο χρόνος ύγρανσης των πολτών –time for hydration). Το γεγονός αυτό μάλιστα είχε το αποτέλεσμα οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης να μην είναι γραμμικές, όπως αναμενόταν προκειμένου για αναζυμωμένα εδάφη, αλλά για τις μικρές τιμές τάσεων κυρτές (έντονα μερικές φορές) με τα κοίλα προς τα κάτω, οι οποίες γίνονταν πρακτικά ευθείες με την αύξηση της τάσης. Προκειμένου να διερευνηθεί λοιπόν επαρκώς η επιρροή του αρχικού βαθμού κορεσμού πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε καολίνη με διάφορες αρχικές τιμές του βαθμού κορεσμού (μικρότερες ακόμα και από εκείνες που προέκυπταν για  $w_o = 0.75 w_L$ ). Η επιλογή μόνο του καολίνη για την διερεύνηση αυτής της παραμέτρου έγινε γιατί ήταν το μόνο υλικό διαθέσιμο σε μορφή σκόνης, στην οποία προσθέτοντας νερό παρασκευάζεται ο πολτός στο επιθυμητό ποσοστό υγρασίας. Σε συμφωνία με τις προτάσεις των Burland (1990 & 1998), Dineen (1997 & 1998) και Chandler (2000) αποφεύχθηκε η πραγματοποίηση τέτοιων δοκιμών στα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, αφού αυτά βρίσκονταν ήδη σε κάποιο ποσοστό υγρασίας και τυχόν ξήρανσή τους, είτε στο φούρνο, είτε στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, θα μπορούσε να προκαλέσει μη αναστρέψιμες μεταβολές σε αυτά, οπότε τα αποτελέσματα των δοκιμών δεν θα κατέγραφαν μόνο την επιρροή του βαθμού κορεσμού που ήταν και το ζητούμενο, αλλά και της ιστορίας ύγρανσης-ξήρανσης, χωρίς μάλιστα πλήρη έλεγχο αυτής.
4. **Το χρονικό βήμα αύξησης του φορτίου κατά την εκτέλεση των δοκιμών.** Για τα υλικά χαμηλής πλαστικότητας στα οποία έγιναν δοκιμές (αλλά ακόμα και τα υψηλότερης όπως η

Μάργα Πατρών και ο Καολίνης τύπου Speswhite) παρατηρήθηκε ότι η καθίζηση ολοκληρωνόταν πολύ πιο γρήγορα από τις 24 ώρες στις οποίες επιβαλλόταν κάθε φορτίο. Αφού είχαν πραγματοποιηθεί οι δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 24 ωρών σε όλα τα εδαφικά υλικά, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με χρονικό διαχωρισμό επιβολής των φορτίων μόλις 2 ώρες (χρονικό διάστημα για το οποίο είχε επιβεβαιωθεί από τις καμπύλες καθίζησης-χρόνου στις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 24 ωρών ότι είχε ολοκληρωθεί τουλάχιστον το 95% της συνολικής καθίζησης για δεδομένο φορτίο) προκειμένου να συγκριθούν οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης από τους δύο τύπους δοκιμών για κάθε υλικό.

5. **Ο λόγος των διαστάσεων του δοκιμίου** (διάμετρος/ύψος). Είναι ήδη γνωστό ότι ο λόγος των διαστάσεων του δοκιμίου επηρεάζει τα αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια από αδιατάρακτα δείγματα φυσικών εδαφών. Το ίδιο πιστεύεται ότι δεν ισχύει για δοκίμια αναζυμωμένων εδαφών. Προκειμένου να διερευνηθεί αυτό πραγματοποιήθηκε μία σειρά δοκιμών σε Άργιλο Χανίων για δύο διαφορετικούς λόγους διαμέτρου προς ύψος:
- **2.63** (D = 50 mm, H = 19 mm), και
  - **3.68** (D = 70 mm, H = 19 mm).

Για λόγους χρονικών περιορισμών και δεδομένης της μικρότερης σημασίας της διερεύνησης αυτής (προκειμένου για αναζυμωμένα εδάφη) δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τέτοιου είδους και σε άλλα εδαφικά υλικά.

6. **Το βήμα αύξησης του φορτίου**. Το βήμα αύξησης του φορτίου κατά τη διάρκεια της φόρτισης είναι γενικά,  $\Delta\sigma_v'/\sigma_v' = 1$ . Προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή της τιμής του στις καμπύλες εγγενούς συμπίεστικότητας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στην Άργιλο Χανίων για δύο διαφορετικές τιμές του βήματος,  $\Delta\sigma_v'/\sigma_v' = 0.33 - 0.5$  και  $\Delta\sigma_v'/\sigma_v' = 3$ . Για λόγους χρονικών περιορισμών και δεδομένης της μικρότερης σημασίας της διερεύνησης αυτής (προκειμένου για αναζυμωμένα εδάφη), όπως και στην περίπτωση του λόγου των διαστάσεων του δοκιμίου δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τέτοιου είδους και σε άλλα εδαφικά υλικά.

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που προαναφέρθηκαν. Προηγείται ωστόσο η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.

### 13.3.2 Πειραματική διαδικασία

#### Παρασκευή των πολτών

Αντίθετα με τις δοκιμές συμπίεσης σε φυσικά εδαφικά υλικά όπου ιδιαίτερης σημασίας είναι η προσεκτική κοπή των δοκιμίων από τα δείγματα του φυσικού εδαφικού υλικού, στις δοκιμές

συμπύεσης (και γενικότερα κάθε είδους δοκιμές) σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά είναι πολύ σημαντική η προσεκτική παρασκευή του πολτού του αναζυμωμένου εδαφικού υλικού. Σε συμφωνία με τις υποδείξεις των Burland (1990) και Dineen (1997) δεδομένου ότι είναι πολύ δύσκολη η παρασκευή νερού με την ίδια ακριβώς περιεκτικότητα στις ίδιες ουσίες που περιέχει και το νερό των πόρων του φυσικού εδαφικού υλικού από το οποίο θα παρασκευαστεί ο πολτός του αναζυμωμένου υλικού, χρησιμοποιήθηκε απεσταγμένο (distilled), απαερωμένο (deaired) νερό για την ανάμειξη με το φυσικό εδαφικό υλικό ή το υλικό τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Οι πολτοί που παρασκευάζονταν σε δεδομένο ποσοστό υγρασίας<sup>4</sup> τοποθετούντο σε υγραντήρα με εφαρμογή μικρής υποπίεσης για ένα χρονικό διάστημα, ώστε, αφενός τυχόν εγκλωβισμένος αέρας κατά την ανάμειξη να διαφύγει, και αφετέρου να ολοκληρωθεί με επιτυχία η ύγρανση (hydration). Προκειμένου για αργιλικά εδάφη (ακόμα και χαμηλής πλαστικότητας) η απλή ανάμειξή τους με νερό με μηχανικά μέσα και η μηχανική διάσπαση των συσσωματωμάτων των κόκκων και των πλακιδίων, όσο προσεκτική και αν είναι δεν αρκεί για να εξασφαλίσει ομογενοποίηση του πολτού ως προς το ποσοστό υγρασίας. Για να επέλθει αυτή, η προσεκτική διάσπαση των συσσωματωμάτων των κόκκων και των πλακιδίων και η επιμελής ανάμειξη του πολτού μετά την προσθήκη της κατάλληλης ποσότητας νερού πρέπει να ακολουθείται από παραμονή του πολτού σε υγρό περιβάλλον για επαρκές χρονικό διάστημα, ώστε το νερό που προστέθηκε να κατανεμηθεί ομοιόμορφα μέσα στον πολτό ακόμα και στο μικρότερο επίπεδο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ύγρανση (hydration). Τόσο από την εμπειρία του γράφοντος όσο και σε συμφωνία με τις υποδείξεις των Burland (1998) και Dineen (1998) ο απαιτούμενος χρόνος για επίτευξη της ύγρανσης είναι της τάξης των 1-2 ημερών προκειμένου για υλικά χαμηλής πλαστικότητας και 3-7 ημερών προκειμένου για υλικά υψηλής πλαστικότητας. Προβλέποντας την αναπόφευκτη απώλεια υγρασίας που μπορεί να προκαλέσει η παραμονή του πολτού –έστω σε υγραντήρα- για τέτοια χρονικά διαστήματα και ως εκ τούτου τη μείωση του ποσοστού υγρασίας του, προστίθεται πάντα περισσότερο νερό κατά την παρασκευή του πολτού (η ποσότητα ποικίλλει ανάλογα με το επιθυμητό ποσοστό υγρασίας του πολτού και το είδος του εδαφικού υλικού). Προκειμένου επίσης για υλικά με ποικιλία μεγέθους κόκκων και πλακιδίων, σκόπιμη είναι η περιοδική ανάδευση του υλικού όσο παραμένει σε υγραντήρα για την ολοκλήρωση της ύγρανσης ώστε να αποφεύγεται η καθίζηση των πιο χονδρόκοκκων σωματιδίων και η αναπόφευκτη ανομοιογένεια του πολτού που αυτή προκαλεί (παρόλο που η ανάδευση αυτή λόγω της προσθήκης αέρα κατά την διάρκειά της παρατείνει το χρόνο ολοκλήρωσης της ύγρανσης). Είναι προφανές ότι η ανάγκη για επίτευξη ύ-

<sup>4</sup> Με προσθήκη της κατάλληλης ποσότητας νερού για δεδομένη ποσότητα φυσικού υλικού γνωστού ποσοστού υγρασίας ή δεδομένη ποσότητα ξηρού υλικού τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης όπως ο Καολίνης τύπου Speswhite.



γρανσης των πολτών των αναζυμωμένων εδαφικών υλικών δυσκολεύει την ταυτόχρονη επίτευξη ενός ακριβούς ποσοστού υγρασίας. Γι' αυτό και δεδομένου ότι είναι κρισιμότερη η προσεκτική παρασκευή ενός πολτού από την παρασκευή ενός πολτού στο ακριβές ποσοστό υγρασίας που επιθυμείται (για τη συγκεκριμένη σειρά πειραμάτων), μικρές αποκλίσεις από την επιθυμητή τιμή του ποσοστού υγρασίας είναι αναπόφευκτες και πρέπει να γίνονται αποδεκτές. Αφού παρασκευαστεί ο πολτός ενός αναζυμωμένου εδαφικού υλικού και αφεθεί για επαρκές χρονικό διάστημα ώστε να επιτευχθεί η ύγρανση, μετρείται το ποσοστό υγρασίας του προς επιβεβαίωση της εγγύτητας στην επιθυμητή τιμή. Εάν τυχόν η πραγματική τιμή του ποσοστού υγρασίας από την επιθυμητή παρουσιάζει πολύ μεγάλη απόκλιση τότε επιχειρείται προσθήκη νερού ή απώλεια μέσω μικρής διάρκειας ξήρανσης στην ατμόσφαιρα.

#### Μόρφωση δοκιμίων & υπολογισμός αρχικού ύψους

Όταν πια έχει παρασκευαστεί ο πολτός του αναζυμωμένου εδαφικού υλικού με τις επιθυμητές ιδιότητες τοποθετείται μέρος του στην κυψέλη φόρτισης του συμπιεσομέτρου. Προκειμένου για πολύ ρευστούς πολτούς (ποσοστό υγρασίας  $> 1.5 w_L$ ) η τοποθέτηση του δοκιμίου γίνεται με κουτάλι μετά τη συναρμολόγηση της κυψέλης φόρτισης του συμπιεσομέτρου (και της λίπανσης της εσωτερικής πλευράς του δακτυλίου) και την πλήρωσή της με νερό ώστε να αποφευχθεί η εισαγωγή αέρα και να διασφαλιστεί ο αρχικός πλήρης κορεσμός των δοκιμίων. Προκειμένου για λιγότερο ρευστούς πολτούς (ποσοστό υγρασίας μεταξύ  $w_L$  και  $1.5 w_L$ ) η τοποθέτηση του δοκιμίου γίνεται με τον ίδιο τρόπο αλλά χωρίς να είναι γεμάτη με νερό η κυψέλη του συμπιεσομέτρου, αφού τότε η διαδικασία μπορεί να γίνει ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρα, ενώ η μικρότερη ρευστότητα του υλικού δυσκολεύει την απομάκρυνσή του από το κουτάλι με αποτέλεσμα τη συχνή ανάδευση και άρα εισαγωγή αέρα παρά την ύπαρξη του νερού. Προτιμάται αντίθετα η εν ξηρώ τοποθέτηση και για την αποφυγή της εισαγωγής αέρα στο δοκίμιο μικραίνει η ποσότητα που εισάγεται κάθε φορά με το κουτάλι ώστε να ξεκολλάει αυτή πιο εύκολα και όταν τοποθετείται στην κυψέλη αναδεύεται προσεκτικά με λεπτό αιχμηρό αντικείμενο. Τέλος, για ημίρρεστους πολτούς (ποσοστό υγρασίας  $< w_L$ ) ή και ημιπλαστικές μάζες εδαφικού υλικού για αρκετά πιο μικρά ποσοστά υγρασίας, τα δοκίμια των αναζυμωμένων εδαφικών υλικών τοποθετούνται όχι στην πλήρως συναρμολογημένη κυψέλη φόρτισης αλλά μόνο στον –εσωτερικά λιπασμένο– δακτύλιο σταθερά τοποθετημένο επί του κάτω πορολίθου. Για την τοποθέτηση δε του υλικού χρησιμοποιείται σπάτουλα με την οποία διασφαλίζεται η ομοιομορφία του παρασκευαζόμενου δοκιμίου και η παρασκευή του στο επιθυμητό μέγεθος. Μετά την τοποθέτηση του δοκιμίου στον δακτύλιο με προσαρμοσμένο τον κάτω πορόλιθο, τοποθετούνται όλα μαζί στην κυψέλη φόρτισης.

Σε ό,τι αφορά το ύψος των δοκιμίων, όπως φάνηκε ήδη από τα προαναφερθέντα, αυτό δεν είναι γνωστό μετά την παρασκευή τους<sup>5</sup>. Γι' αυτό μετά την τοποθέτηση των δοκιμίων στις κυψέλες, τοποθετείται το σκέπασμα («καπάκι») της κυψέλης με τον άνω πορόλιθο και αμέσως μετρείται το ύψος με τοποθέτηση εξωτερικού μηκυνσιόμετρου από πάνω. Με το ίδιο μηκυνσιόμετρο στην ίδια ακριβώς θέση έχει προηγούμενα ληφθεί η ένδειξη με τοποθετημένο χαλύβδινο δοκίμιο γνωστού ύψους, οπότε από τη διαφορά των δύο ενδείξεων προκύπτει η τιμή του αρχικού ύψους του δοκιμίου του αναζυμωμένου εδαφικού υλικού. Το μηκυνσιόμετρο μέτρησης του αρχικού ύψους μπορεί να είναι είτε ανεξάρτητο, τοποθετημένο επί βραχίονα, οπότε η μέτρηση μπορεί να γίνει επί οποιασδήποτε σταθερής οριζόντιας επίπεδης επιφάνειας, είτε το μηκυνσιόμετρο μιας συσκευής συμπίεσομέτρου με την κυψέλη τοποθετημένη επί της κλίνης φόρτισης. Είναι προφανές ότι επειδή τα δοκίμια είναι αρχικώς πολύ μαλακά, το μηκυνσιόμετρο πρέπει να τοποθετηθεί πρακτικά «ακαριαία» μετά την τοποθέτηση του σκεπάσματος της κυψέλης, αφού και μόνο με το μικρό βάρος του σκεπάσματος θα αρχίσει ραγδαία συμπίεση του δοκιμίου. Για έναν έμπειρο χειριστή ο χρόνος μεταξύ τοποθέτησης σκεπάσματος και τοποθέτησης μηκυνσιόμετρου είναι πολύ μικρός, οπότε η μέτρηση του αρχικού ύψους είναι αρκετά ακριβής. Επίσης το σκέπασμα πρέπει να τοποθετείται ταχύτατα μεν, πολύ προσεκτικά δε, καθώς τυχόν απροσεξία κατά την τοποθέτηση οδηγεί σε βύθιση του σκεπάσματος μέσα στο πολύ μαλακό υλικό και υπερχειλίση του πολτού, οπότε η διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί. Αν και συνήθως δεν επιδιώκεται, είναι δυνατή και η χρονική παρακολούθηση των καθιζήσεων για το μικρό αυτό φορτίο του σκεπάσματος (κατά τάξη μεγέθους 1-2 kPa). Εάν η κυψέλη δεν είναι ήδη γεμάτη με νερό κατά την τοποθέτηση του σκεπάσματος πρέπει να πληρωθεί εντός ενός λεπτού από την τοποθέτησή του.

#### Φόρτιση δοκιμίων

Ακριβώς επειδή τα δοκίμια από αναζυμωμένα εδαφικά υλικά είναι πολύ μαλακά πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτική και η αύξηση του φορτίου μετά την τοποθέτηση του σκεπάσματος. Έτσι είναι σκόπιμο να αποφεύγεται η εφαρμογή μεγάλων τάσεων αμέσως μετά από αυτή του σκεπάσματος για να αρχίσει η καθορισμένη αλληλουχία φορτίσεων. Η φόρτιση λοιπόν μπορεί να συνεχίζει με επιβολή επιπλέον 12.5 kPa ή ακόμα και 6.25 kPa προκειμένου για πολλούς ιδιαίτερα πλαστικών εδαφικών υλικών με πολύ υψηλό ποσοστό υγρασίας. Τόσο μικρά φορτία δεν υπάρχουν συχνά σε ένα εργαστήριο (ιδίως για μικρής διαμέτρου δακτυλίου), οπότε είτε πρέπει με κάποιο τρόπο να υλοποιούνται από αυτοσχέδια υλικά, είτε να χρησιμοποιούνται συμπίεσομέτρα με προσαρμοσμένο μικρό φορτίο που διατρέχει κατά μήκος του τον μοχλό φόρτισης επιτρέπο-

---

<sup>5</sup> Αντίθετα από τα δοκίμια των φυσικών εδαφικών υλικών, όπου επειδή τα δοκίμια αποκόπτονται από τα διατιθέμενα δείγματα με τους δακτυλίους, έχουν ακριβώς τις διαστάσεις των δακτυλίων (ύψος και διάμετρο).

ντας την υλοποίηση κατακόρυφων τάσεων ακόμα και 1 kPa σε δοκίμια διαμέτρου 70 mm (τέτοια συμπιεσόμετρα υπάρχουν στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής και χρησιμοποιήθηκαν).

Σε ό,τι αφορά την αλληλουχία φορτίσεων αυτή ήταν 12.5-25-50-100-200-400-800-1600 kPa για τον κλάδο φόρτισης και 1600-400-100-25 kPa για τον κλάδο αποφόρτισης. Δεδομένης της μικρότερης κλίσης του κλάδου αποφόρτισης της καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης σε σχέση με τον κλάδο φόρτισης και της μη παρακολούθησης της χρονικής εξέλιξης των παραμορφώσεων κατά την αποφόρτιση επιτρέπεται ο διπλασιασμός των βημάτων αποφόρτισης σε σχέση με τα βήματα φόρτισης που υιοθετήθηκαν. Για πολλούς στο χαμηλό όριο του εύρους ποσοστού υγρασίας που εξετάστηκε, παρακάμφθηκε η τάση των 12.5 kPa αφού το εδαφικό υλικό δεν ήταν τόσο μαλακό. Για τον προσδιορισμό της τιμής του λόγου κενών στα 1000 kPa έγινε γραμμική παρεμβολή μεταξύ της τιμής του λόγου κενών στα 800 και στα 1600 kPa αφού για τη χρονική κλίμακα της εκτέλεσης των δοκιμών δεν υπήρχε χρόνος για εκτέλεση δοκιμών στο κάθε ποσοστό υγρασίας με αλληλουχία φορτίσεων που να διέρχεται από το 1000 kPa.

Εξαίρεση σε ό,τι αφορά τα παραπάνω έγινε για την Άργιλο Λονδίνου. Αντίθετα από τις υπόλοιπες δοκιμές, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή, και οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής, οι δοκιμές στην Άργιλο Λονδίνου έγιναν από τον γράφοντα στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Imperial College στο Λονδίνο στα πλαίσια της διπλωματικής του εργασίας κατά τις μεταπτυχιακές σπουδές του εκεί (Bardanis, 1998). Δεδομένου ότι κατά τον χρόνο πραγματοποίησης των δοκιμών αυτών κατέστη αδύνατη η ανεύρεση ενός άμεσα διαθέσιμου εδαφικού υλικού υψηλής πλαστικότητας, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών. Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε άλλους τύπους συμπιεσομέτρων και έχει υιοθετηθεί ιδιαίτερη αλληλουχία φορτίσεων. Οι ιδιαιτερότητες αυτές περιγράφονται στην §13.3.8.

#### Εξαγωγή δοκιμών από τις κυψέλες & επεξεργασία αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών τα δοκίμια εξάγονται από τις κυψέλες, ζυγίζονται και τοποθετούνται στον εργαστηριακό φούρνο των 110 °C για να προσδιοριστεί το τελικό ποσοστό υγρασίας τους. Μπορούν να τοποθετηθούν είτε με τους δακτυλίους εντός των οποίων βρίσκονται είτε εκτός αυτών, το οποίο επιταχύνει την εκτέλεση των πειραμάτων, αφού καθίστανται αμέσως διαθέσιμοι οι δακτύλιοι για τοποθέτηση των νέων δοκιμών και όχι με καθυστέρηση μίας ημέρας για να ολοκληρωθεί η ξήρανση των δοκιμών. Η εξαγωγή των δοκιμών από τους δα-

κτυλίους εισάγει αβεβαιότητες στον ακριβή προσδιορισμό της συνολικής μάζας του δοκιμίου τελικά (όπως άλλωστε και η τυχόν επικόλληση εδαφικού υλικού από το δοκίμιο στον άνω ή τον κάτω πορόλιθο, οι οποίοι πρέπει να καθαρίζονται και το υλικό να προστίθεται πάνω στο δοκίμιο) αλλά το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με ζύγιση του δοκιμίου μαζί με τον δακτύλιο πριν την εξαγωγή του και τη ζύγιση του δακτυλίου μετά αφού αυτός καθαριστεί επιμελώς.

Τέλος σε ό,τι αφορά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των δοκιμών επιλέχθηκε η επίλυση «από το τέλος προς την αρχή», δηλαδή από τις τελικές διαστάσεις του δοκιμίου, το τελικό ποσοστό υγρασίας που προσδιορίστηκε και το ήδη γνωστό ανηγμένο ειδικό βάρος στερεάς φάσης ( $G_s$ ), υπολογίστηκε ο λόγος κενών με την παραδοχή ότι η τελική τιμή του βαθμού κορεσμού ήταν 100%. Προκειμένου για υλικά αναζυμωμένα σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές του ποσοστού υγρασίας ή και για αναζυμωμένα υλικά μικρότερου ποσοστού υγρασίας και φυσικά υλικά, η φόρτιση μέχρι υψηλές τιμές της τάσης ( $> 1000$  kPa) εξασφαλίζει ότι ο τελικός βαθμός κορεσμού είναι 100%. Αντίθετα αν επιχειρούσε κάποιος να «επιλύσει» τις δοκιμές ξεκινώντας από τις αρχικές διαστάσεις και το αρχικό ποσοστό υγρασίας δεν θα μπορούσε να υπολογίσει τον αρχικό λόγο κενών αφού δεν είναι γνωστός ο αρχικός βαθμός κορεσμού. Τυχόν υπόθεση δε ότι αυτός είναι 100% ακόμα και για αρκετά ρευστούς πολτούς –πολλώ δε μάλλον για πολτούς μικρότερου ποσοστού υγρασίας ή φυσικά υλικά- θα ήταν ανακριβής και θα εισήγαγε σημαντικά λάθη στον υπολογισμό των τιμών του λόγου κενών για κάθε τιμή της τάσης. Η μέθοδος αυτή (επίλυση «από την αρχή στο τέλος») πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο όταν είναι με βεβαιότητα γνωστός ο αρχικός βαθμός κορεσμού του δοκιμίου, αν και πάλι λόγω των μεγαλύτερων αβεβαιοτήτων των καταγραφόμενων μεταβολών του ύψους των δοκιμίων στην αρχή της δοκιμής (ιδίως για μαλακά υλικά) θα εισήγαγε και πάλι λάθη χωρίς μάλιστα δυνατότητα διόρθωσης<sup>6</sup>.

### 13.3.3 Επιλογή αρχικού ποσοστού υγρασίας πολτών

Ένα ιδιαίτερο θέμα συζήτησης αποτελεί το αρχικό ποσοστό υγρασίας στο οποίο πρέπει να παρασκευάζονται οι πολτοί των αναζυμωμένων εδαφών. Δεδομένου ότι κατά την χρήση των αναζυμωμένων εδαφών γίνεται προσπάθεια να προσομοιωθεί η ιστορία της φόρτισης των ιζηματογε-

---

<sup>6</sup> Συχνά σε δοκίμια από μαλακά εδάφη ή πολτούς αναζυμωμένων εδαφικών υλικών, στην αρχή των δοκιμών οι καταγραφόμενες μεταβολές του ύψους των δοκιμίων μπορεί να μην οφείλονται αποκλειστικά και μόνο στη συμπίεσή τους αλλά και στην διαφυγή εδαφικού υλικού από το μικρό κενό μεταξύ σκεπάσματος και δακτυλίου. Αν υιοθετηθεί η επίλυση «από το τέλος στην αρχή» μπορεί να γίνει διόρθωση με γραμμική προέκταση των τιμών του λόγου κενών προς τις μικρότερες τιμές τάσης, το οποίο δεν μπορεί να γίνει στην αντίθετη περίπτωση.

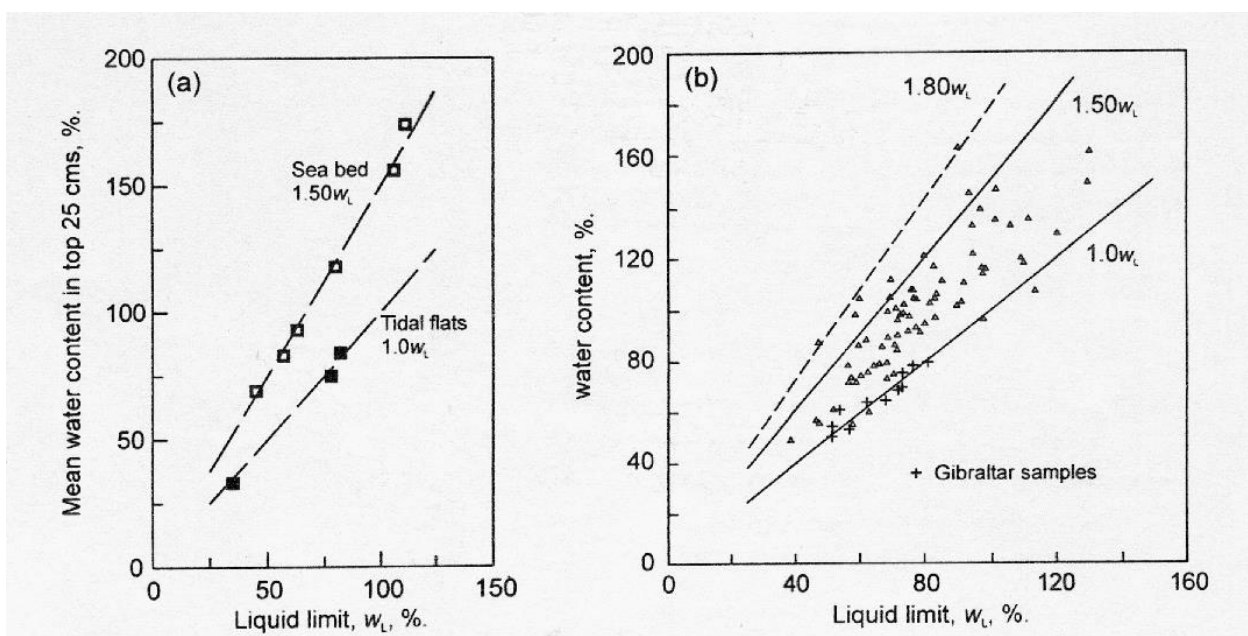
νών αργίλων από την αρχή της απόθεσής τους ως μικρής ηλικίας ιζήματα στους πυθμένες λιμναίων ή θαλάσσιων λεκανών, είναι σκόπιμη η αναζήτηση των τιμών ποσοστού υγρασίας (και του ορίου υδαρότητάς τους) που έχουν πολύ πρόσφατα ιζήματα σε σημερινές λεκάνες ιζηματογένεσης.

Ο Skempton (1970) παρουσίασε αποτελέσματα ποσοστών υγρασίας προσφάτων αργιλικών ιζημάτων από τον πυθμένα της θάλασσας τα οποία και συσχέτισε με το όριο υδαρότητας των εδαφικών υλικών (Σχ. 13.1α). Τα δείγματα είχαν προέλθει από ιζήματα στα άνω 0.25 m του πυθμένα της θάλασσας. Τα δεδομένα του παρουσίαζαν άνω όριο για το ποσοστό υγρασίας ίσο με 1.5  $w_L$  και ένα κάτω όριο περί το  $w_L$  προκειμένου για δείγματα προερχόμενα από τον πυθμένα της θάλασσας σε περιοχές παλιρροιών (tidal flats).

Οι Buchan & Smith (1999) παρουσίασαν δεδομένα για δείγματα ιζημάτων σε βάθη έως 0.25-0.30 m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας προερχόμενα από ολόκληρο τον Ατλαντικό Ωκεανό (Σχ. 13.1β). Το άνω όριο για το ποσοστό υγρασίας με βάση τα δικά τους (πολύ περισσότερα) δεδομένα ήταν περί το 1.8  $w_L$  και το κάτω όριο κοντά στο  $w_L$ , το οποίο όμως δεν προσδιορίστηκε για δείγματα από περιοχές παλιρροιών αλλά από μεγαλύτερα βάθη (κυρίως μάλιστα σε δείγματα προερχόμενα από τη θαλάσσια περιοχή ανοικτά του Γιβραλτάρ). Ο Chandler (2000) εκτιμά ότι αυτό πιθανότατα οφείλεται στο ότι τα δείγματα αυτά δεν προέρχονταν από αβυσσικά πεδία (abyssal plains), οπότε και τα αποτεθειμένα ιζήματα δεν έχουν επηρεαστεί από υποθαλάσσιες κατολισθήσεις, αλλά από υποθαλάσσιες κλιτείς με αποτέλεσμα τα δείγματα, παρόλο που προέρχονταν από τόσο μικρά βάθη κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας, να έχουν κάποια μικρή προστεροποίηση λόγω του ακόμα και μικρού πάχους υπερκειμένου το οποίο κατολίσθησε.

Αναζητώντας παρόμοια δεδομένα από τον ελλαδικό χώρο στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής έγινε αναδρομή στα μητρώα υποθαλάσσιων γεωτρήσεων του Κεντρικού Εργαστηρίου Δημοσίων Έργων του Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε. (σήμερα Υπουργείου ΥΠΟ.ΜΕ.ΔΙ.). Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν σε δείγματα αργιλικών ιζημάτων σε σχετικά αβαθή ύδατα (αφού όλες οι γεωτρήσεις, τα μητρώα των οποίων εξετάστηκαν, είχαν γίνει στα πλαίσια των απαιτούμενων γεωτεχνικών ερευνών για την κατασκευή λιμένων) στα άνω 0 έως 1.5 m του πυθμένα. Τα συγκεντρωθέντα στοιχεία είναι περιορισμένα σε αριθμό αφού στα πλαίσια των προαναφερθεισών γεωτεχνικών ερευνών, λογικά δεν ενδιέφεραν οι ιδιότητες των επιφανειακών στρώσεων του πυθμένα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 13.2, όπου έχουν σχεδιαστεί και τα προσδιορισθέντα όρια με βάση τα αποτελέσματα των Skempton (1970) και Buchan &

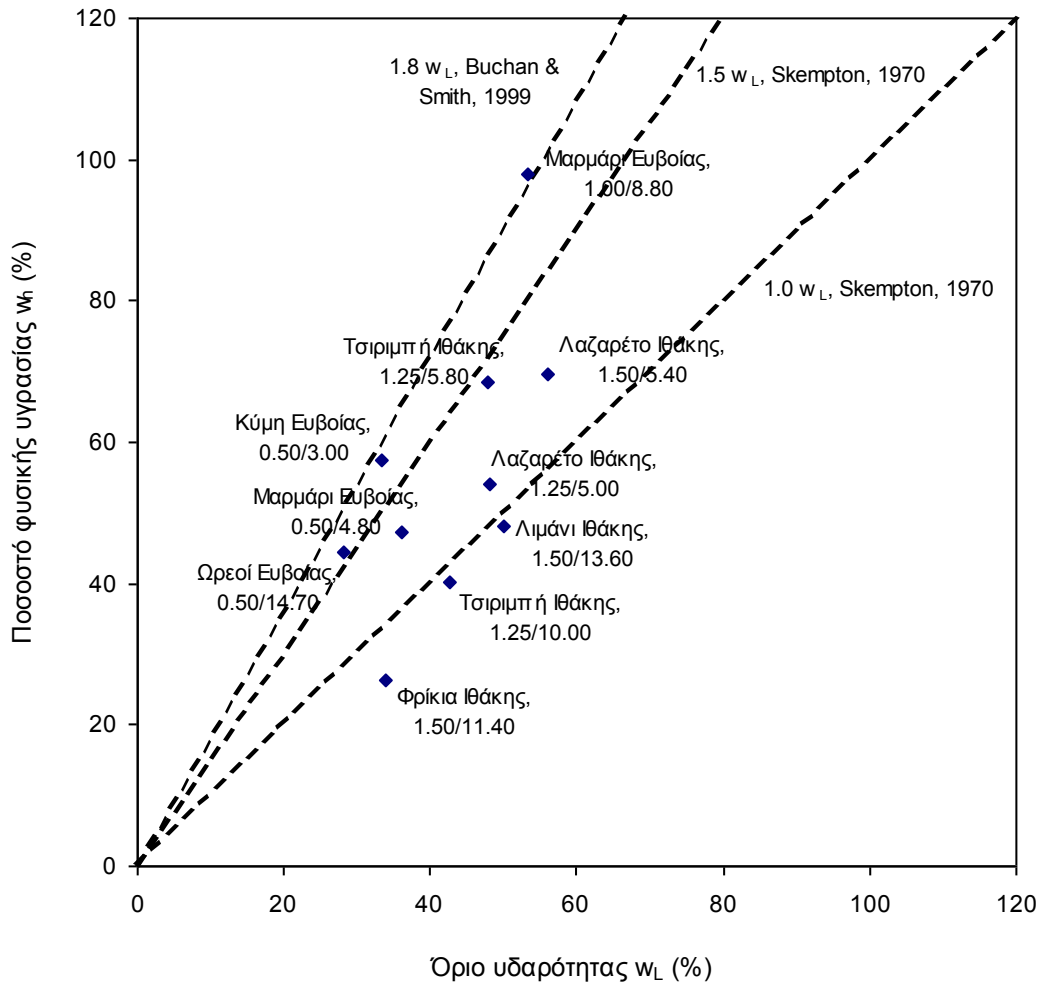
Smith (1999). Όπως φαίνεται από το Σχ. 13.2 τα ρηχότερα δείγματα βρίσκονται πιο κοντά στο άνω όριο του  $1.8 w_L$  των Buchan & Smith (1999), ενώ όσο τα δείγματα βαθαίνουν, οι τιμές του ποσοστού υγρασίας περιορίζονται κάτω από το  $1.5 w_L$  ή και το  $1.0 w_L$  καθιστώντας μάλλον λογική την ερμηνεία του Chandler (2000) για τα δεδομένα των Buchan & Smith (1999), όπου το ποσοστό υγρασίας είχε βρεθεί ακόμα και κάτω από το  $w_L$  λόγω υποθαλάσσιων κατολισθήσεων. Πράγματι λοιπόν, απομάκρυνση ακόμα και περί τα 1 έως 1.5 m μόλις ιζήματος από τον πυθμένα αποκαλύπτει αποτεθειμένα ιζήματα με σημαντική απομείωση του ποσοστού υγρασίας σε σχέση με ιζήματα από μικρότερο βάθος επί των οποίων δεν έχει προϋπάρξει καθόλου υλικό.



**Σχήμα 13.1.** Ποσοστό φυσικής υγρασίας προσφάτων αργιλικών ιζημάτων ως προς το όριο υδαρότητας τους για δεδομένα από τους α) Skempton (1970) και β) Buchan & Smith (1999) -όπως παρατίθενται στον Chandler (2000).

Παρά το γεγονός ότι τα διατιθέμενα στοιχεία από τον ελλαδικό χώρο είναι πολύ λίγα (ιδίως μάλιστα για τα πολύ μικρά βάθη,  $<0.50$  m), μετά από την παρουσίαση των προαναφερθέντων δεδομένων διαπιστώνεται ότι προκειμένου να προσομοιωθεί η στερεοποίηση των αργιλικών ιζημάτων που αποτίθενται στον πυθμένα των θαλασσών και των λιμνών, το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών αναζυμωμένης αργίλου πρέπει να κυμαίνεται από  $1.8 w_L$  έως  $1.0 w_L$  κατ' ελάχιστον (καλό θα ήταν να είναι μεγαλύτερο του  $1.2 w_L$ , δεδομένων των αμφιβολιών που έχουν εκφραστεί για τιμές χαμηλότερες από αυτήν ως προς το κατά πόσο τα ιζήματα αυτά ήταν πράγματι κα-

νονικά στερεοποιημένα). Κατά συνέπεια, δικαίως τα όρια της παρούσας εργαστηριακής διερεύνησης κυμάνθηκαν μεταξύ  $0.75 w_L$  και  $2.0 w_L$ , διερευνώντας το εύρος τιμών ποσοστού υγρασίας προσφάτων αργιλικών ιζημάτων και επεκτείνοντάς το οριακά και προς τις δύο πλευρές.



**Σχήμα 13.2.** Ποσοστό φυσικής υγρασίας προσφάτων αργιλικών ιζημάτων από τον ελλαδικό χώρο ως προς το όριο υδαρότητάς τους (θέση, βάθος δείγματος/βάθος πυθμένα). Έχουν σχεδιαστεί και τα όρια που προσδιορίστηκαν από τους Skempton (1970) και Buchan & Smith (1999).

### 13.3.4 Δοκιμές στην Άργιλο Χανίων

Τα φυσικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά της Άργιλου Χανίων παρατίθενται στο Κεφάλαιο 11. Εκτελέστηκαν συνολικά 15 δοκιμές στα πλαίσια της διερεύνησης των εγγενών ιδιοτήτων συμπίεσής:

- 5 δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων των 24 ωρών, φόρτιση μέχρι τα 1600 kPa με βήμα αύξησης φορτίου  $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v = 1$ , διάμετρο δοκιμίων 70mm και ύψος περί τα 19mm<sup>7</sup>, και τα αρχικά ποσοστά υγρασίας του Πίν. 13.1 (δοκιμές CSC),
- 5 δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης όπως οι προηγούμενες με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων των 2 ωρών, και τα αρχικά ποσοστά υγρασίας του Πίν. 13.1 (δοκιμές FCSC),
- 3 δοκιμές με χρονικό διαχωρισμό φορτίσεων 24 ώρες αλλά διαφορετικά βήματα αύξησης φορτίου ( $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v = 0.333 - 0.5$ , VER70\_0.5,  $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v = 1$ , VER70\_1, και  $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v = 3$ , VER70\_3),
- 1 δοκιμή με διαφορετικό λόγο διαμέτρου προς ύψος: 2.63 (D = 50 mm, H = 19 mm), αλλά  $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v = 1$ , η οποία μάλιστα έφτασε μέχρι και μεγαλύτερη τάση (3200 kPa) η VER50\_1, και
- 1 δοκιμή με έναν ενδιάμεσο κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης (RCSC-LU), διάμετρο 70mm και  $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v = 1$ , για να συγκριθεί ο δείκτης αποφόρτισης σε διαφορετικά επίπεδα τάσης στο ίδιο δοκίμιο.

Στο Σχ. 13.3α παρουσιάζονται οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης των δοκιμών με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων 24 h και στο Σχ. 13.3β οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης. Στα Σχ. 13.4α και 13.4β παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες των δοκιμών με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων 2 h. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.3α οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από τις δοκιμές για χρονικούς διαχωρισμούς 24 h πρακτικά συμπίπτουν μετά από 50 kPa κατακόρυφης τάσης, με εξαίρεση τη δοκιμή που έγινε στο υλικό που είχε αναζυμωθεί στο 75% του ορίου υδαρότητας (δοκιμή CSC075). Αντίστοιχα από το Σχ. 13.4α προκύπτει για τις καμπύλες από τις δοκιμές για χρονικούς διαχωρισμούς 2 h ότι η σύμπτωση των καμπυλών συμβαίνει επίσης για κατακόρυφη τάση 50 kPa, αν και σε αυτή την περίπτωση αποκλίνει και η δοκιμή στο 75% του ορίου υδαρότητας και η δοκιμή στο 110%. Σε

---

<sup>7</sup> Βλέπε προβλήματα που εμφανίζονται με έλεγχο του ύψους των δοκιμίων αναζυμωμένων υλικών στην §13.3.2.



ό,τι αφορά τις κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης προκύπτουν τα ίδια από τα Σχ. 13.3β και 13.4β αντίστοιχα και μάλιστα προκύπτει και η σύμπτωση τους με την θεωρητική γραμμή εγγενούς συμπίεσης (ΘΓΕΣ).

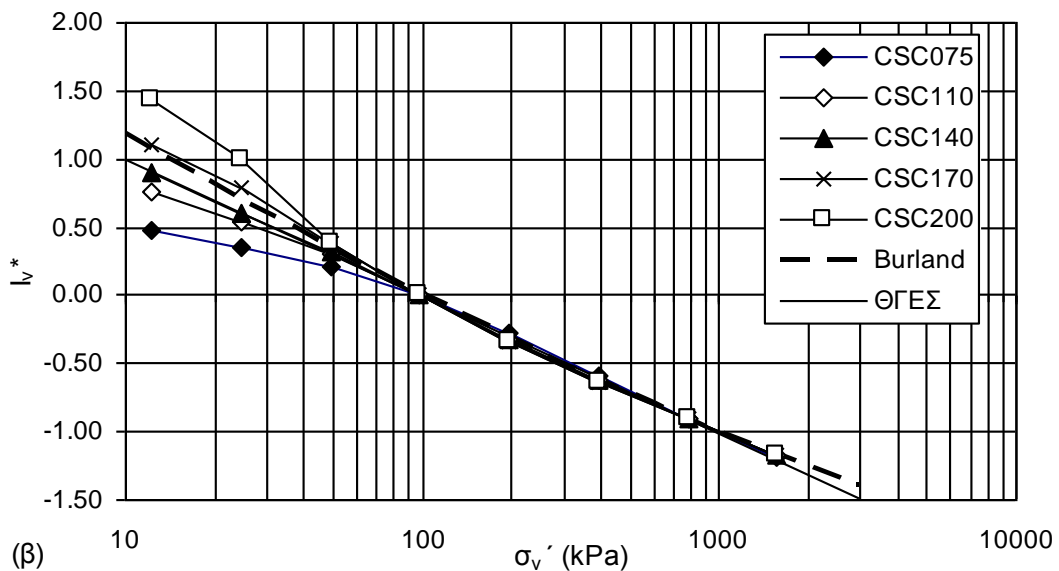
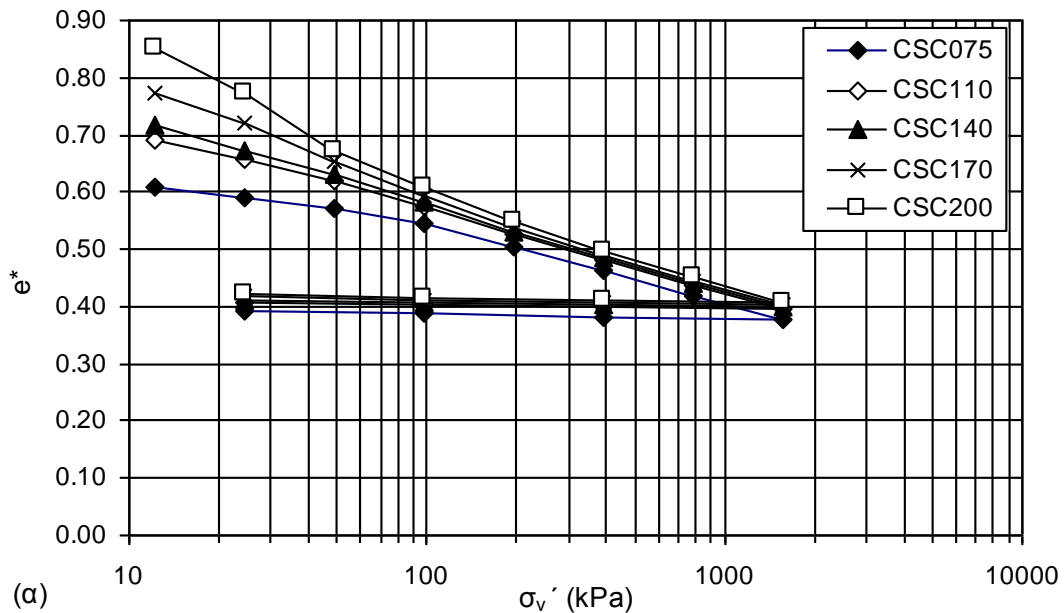
Στο Σχ. 13.5α συσχετίζονται ο δείκτης εγγενούς συμπίεσης και οι τιμές του εγγενούς λόγου κενών στα 1, 100 και 1000 kPa με το αρχικό ποσοστό υγρασίας εκπεφρασμένο ως ποσοστό το ορίου υδαρότητας του υλικού ( $w_L = 24\%$ ). Στο Σχ. 13.5β συσχετίζονται ο δείκτης εγγενούς συμπίεσης και ο δείκτης αποφόρτισης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας εκπεφρασμένο ως ποσοστό το ορίου υδαρότητας του υλικού, ενώ τέλος στο Σχ. 13.5γ παρουσιάζεται μεγέθυνση για τον δείκτη αποφόρτισης. Οι τιμές των παραμέτρων εγγενούς συμπίεσης παρατίθενται στον Πίν. 13.2. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.5α, ο εγγενής λόγος κενών στο 1 kPa αποτελεί πράγματι συνάρτηση του ποσοστού υγρασίας (αφού η επιβληθείσα τάση είναι πρακτικά ελάχιστη για να μεταβάλλει ουσιωδώς τον αρχικό λόγο κενών του πολτού που εξαρτάται μόνο από το αρχικό ποσοστό υγρασίας<sup>8</sup>), ενώ αντίθετα ο λόγος κενών στα 100 kPa και στα 1000 kPa,  $e^*_{100}$  και  $e^*_{1000}$  αντίστοιχα, όπως και ο δείκτης συμπίεσης  $C_c^*$  αποτελούν μάλλον σταθερές ανεξάρτητες του αρχικού ποσοστού υγρασίας για το συγκεκριμένο υλικό (παρόλο που πράγματι υπάρχει μία μικρή αύξησή τους με το ποσοστό υγρασίας). Ειδικά για τον δείκτη εγγενούς συμπίεσης  $C_c^*$  αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχ. 13.5β όπου παρατίθεται και η εξέλιξη του δείκτη αποφόρτισης  $C_r$ . Επίσης, για το συγκεκριμένο υλικό παρατηρούνται πρακτικά αμελητέες διαφορές μεταξύ των τιμών παραμέτρων από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 24h και χρονικούς διαχωρισμούς 2h, το οποίο αναμενόταν, αφού όπως φαίνεται στο Σχ. 13.6 όπου παρατίθενται οι καμπύλες καθιζήσεων χρόνου από την δοκιμή CSC-140, μέχρι τις 2h έχουν πρακτικά ολοκληρωθεί οι καθιζήσεις.

Από τα Σχ. 13.7α και 13.7β όπου παρουσιάζονται αντίστοιχα οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης της Αργίλου Χανίων για διαφορετικά βήματα φόρτισης και διαφορετικούς λόγους διαμέτρου προς ύψος, δεν παρουσιάζεται μεταβολή των χαρακτηριστικών εγγενούς συμπίεσης για μεταβολή αυτών των χαρακτηριστικών εκτέλεσης των δοκιμών σε αναζυμωμένα εδάφη. Για λόγους σύγκρισης παρατίθεται και η καμπύλη που αντιστοιχεί στην δοκιμή CSC-140.

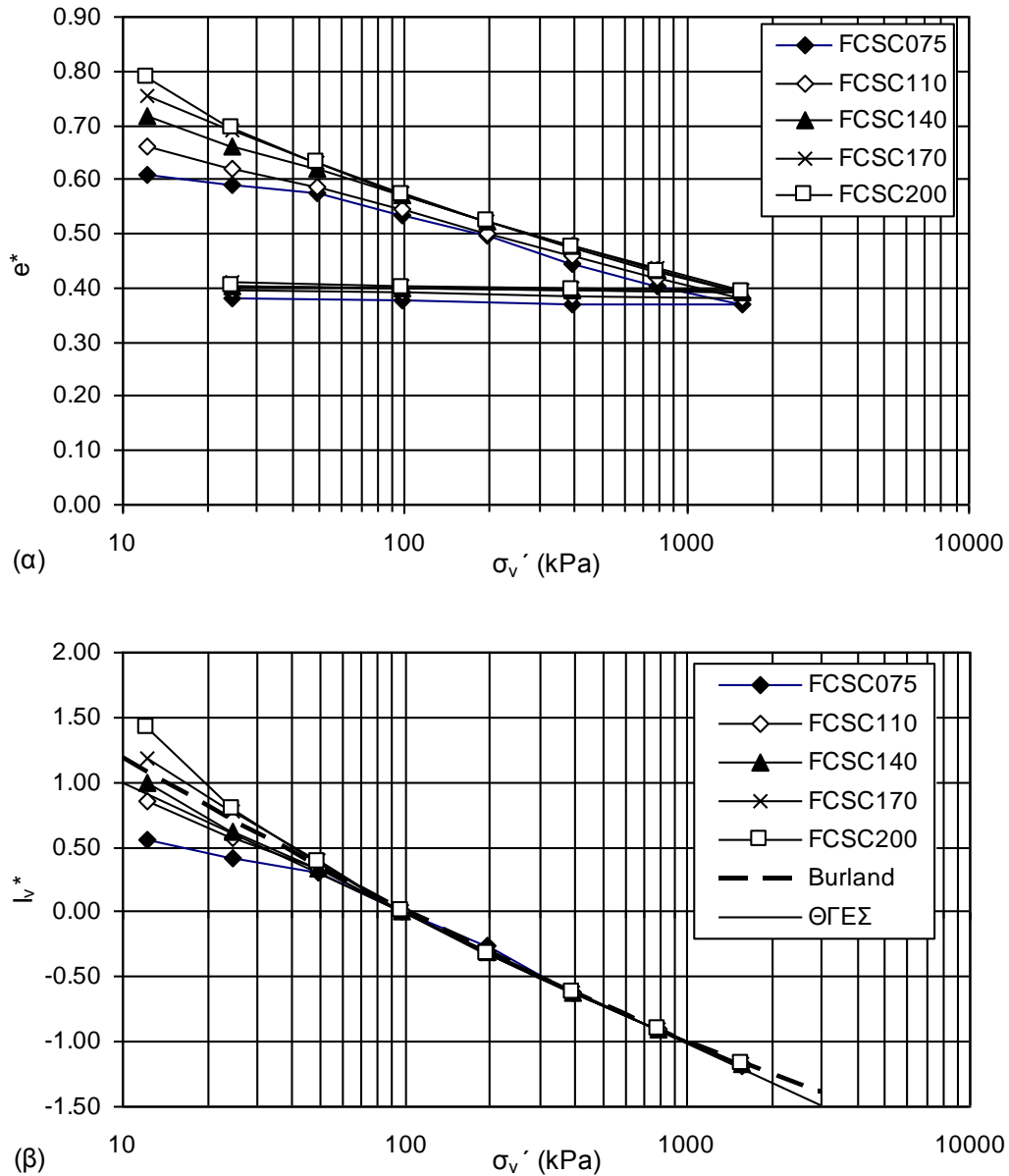
Τέλος όπως προκύπτει από το Σχ. 13.8 η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης για την Άργιλο Χανίων με μέγιστη φόρτιση ως τα 1600 kPa και ενδιάμεσο κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης μεταξύ 200 και

<sup>8</sup> Υπενθυμίζεται η σχέση  $w \cdot G_s = e \cdot S_r$ .

25 kPa προκύπτει πρακτικά η ίδια για την καμπύλη της δοκιμής CSC-140, ενώ ο δείκτης αποφόρτισης είναι ο ίδιος για τα δύο επίπεδα κατακόρυφης τάσης που έγινε η αποφόρτιση (0.007).



**Σχήμα 13.3.** α) Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, και β) κανονικοποιημένες καμπύλες Αργίλου Χανίων από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς μεταξύ διαδοχικών φορτίων 24h.



**Σχήμα 13.4.** α) Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, και β) κανονικοποιημένες καμπύλες Αργίλου Χανίων από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς μεταξύ διαδοχικών φορτίων 2h.

Τέλος στον Πίν. 13.3 παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης για την δοκιμή CSC-140. Επισημαίνεται η διαφορά μεταξύ της εγγενούς παραμέτρου απόστασης όπως προκύπτει απευθείας από υπολογισμό ( $d^*$  υπολ.) και όπως προκύπτει μετά από προσομοίωση της κανονικοποιημένης καμπύλης εγγενούς συμπίεσης ( $d^*$  προσέγγιση). Στην μεν πρώτη περίπτωση η εγγενής παράμετρος απόστασης  $d^*$  προκύπτει από τις τιμές της τάσης και του αντίστοιχου δείκτη κενών εκατέρωθεν της τιμής της τάσης  $10^{2.5} = 316.2$  kPa με γραμμική

**Πίνακας 13.1.** Αρχικά ποσοστά υγρασίας δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένη Άργιλο Χανίων ( $w_L = 24\%$ ).

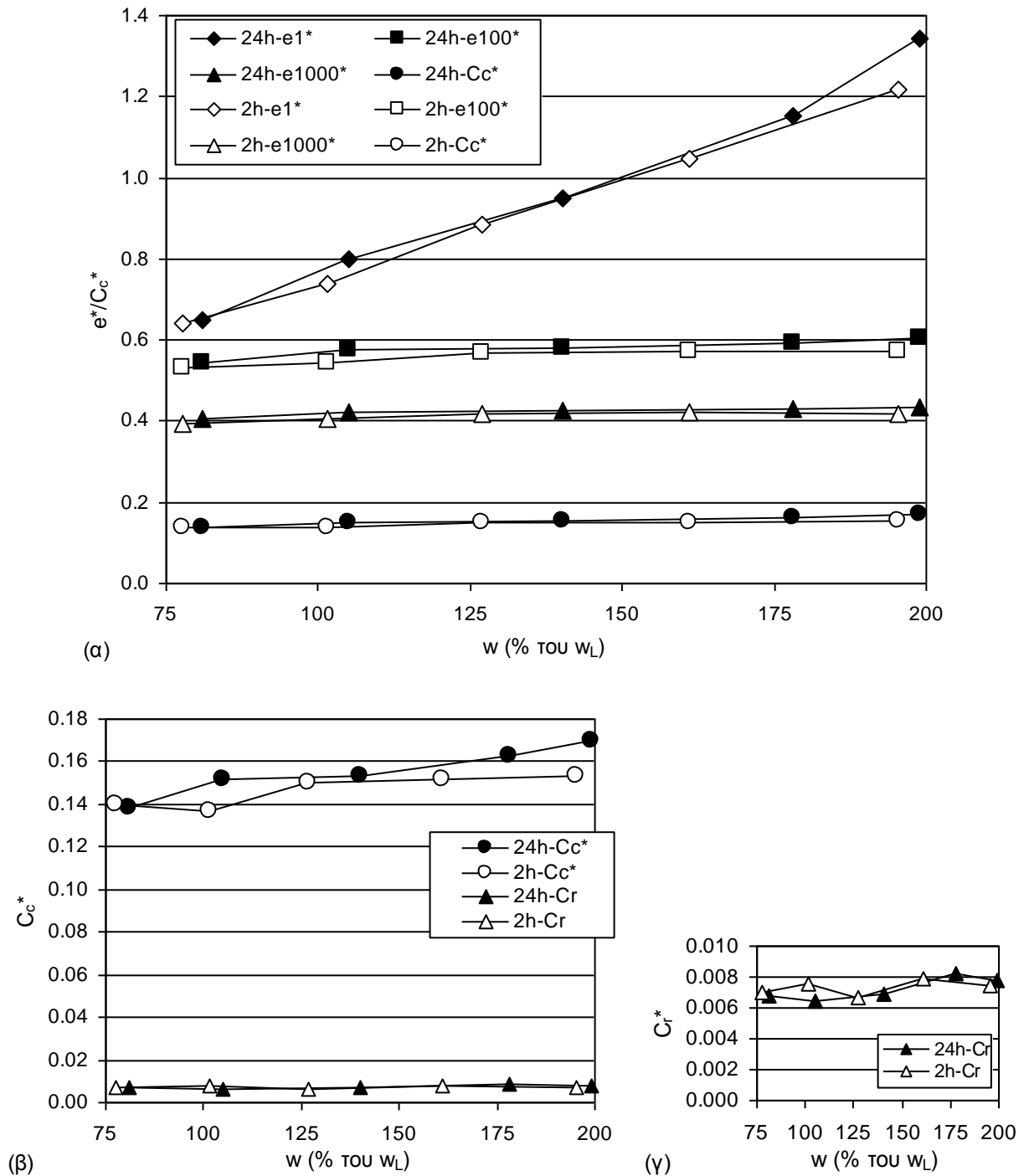
Δοκιμή	Αρχικό ποσοστό υγρασίας στόχος ως ποσοστό του $w_L$	Αρχικό ποσοστό υγρασίας-στόχος	Αρχικό ποσοστό υγρασίας που επιτεύχθηκε	Αρχικό ποσοστό υγρασίας που επιτεύχθηκε ως ποσοστό του $w_L$
	(%)	(%)	(%)	(%)
CSC075	75	18.0	19.41	80.9
CSC110	110	26.4	25.21	105.1
CSC140	140	33.6	33.64	140.2
CSC170	170	40.8	42.77	178.2
CSC200	200	48.0	47.77	199.0
FCSC075	75	18.0	18.63	77.6
FCSC110	110	26.4	24.39	101.6
FCSC140	140	33.6	30.48	127.0
FCSC170	170	40.8	38.63	161.0
FCSC200	200	48.0	46.91	195.5

**Πίνακας 13.2.** Παράμετροι εγγενούς συμπιεστότητας από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένη Άργιλο Χανίων ( $w_L = 24\%$ ).

Δοκιμή	$e^*_o$	$e^*_1$	$e^*_{100}$	$e^*_{1000}$	$C_c^*$	$C_r$
CSC075	0.649	0.648	0.543	0.404	0.138	0.007
CSC110	0.818	0.799	0.575	0.423	0.152	0.006
CSC140	0.987	0.950	0.580	0.427	0.153	0.007
CSC170	1.211	1.151	0.593	0.430	0.163	0.008
CSC200	1.356	1.341	0.605	0.436	0.170	0.008
FCSC075	0.652	0.643	0.531	0.392	0.140	0.007
FCSC110	0.750	0.740	0.543	0.406	0.137	0.008
FCSC140	0.915	0.885	0.569	0.419	0.150	0.007
FCSC170	1.101	1.049	0.573	0.422	0.152	0.008
FCSC200	1.318	1.218	0.571	0.417	0.154	0.007

**Πίνακας 13.3.** Εγγενείς παράμετροι απόστασης και εμπειρικές τιμές παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  για την δοκιμή CSC140 σε αναζυμωμένη Άργιλο Χανίων ( $w_L = 24\%$ ).

Δοκιμή	$d^*$ (υπολ.)	$d^*$ (προσέγγιση)		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
CSC140	-0.020	-0.012	Από το $d^*$	2.476	-1.425	0.102	-0.005
			Εμπειρικά	2.583	-1.849	0.377	-0.053



**Σχήμα 13.5.** α) Εξέλιξη του εγγενούς λόγου κενών στα 1, 100 και 1000 kPa και του δείκτη εγγενούς συμπίεσης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών εκπεφρασμένο ως ποσοστό του ορίου υδαρότητας, και β) εξέλιξη του δείκτη εγγενούς συμπίεσης και του δείκτη αποφόρτισης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών εκπεφρασμένο ως ποσοστό του ορίου υδαρότητας, για τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 24h και 2h (στο γ) παρουσιάζεται μεγέθυνση για καλύτερη απεικόνιση της εξέλιξης του δείκτη αποφόρτισης).

παρεμβολή<sup>9</sup>. Η τιμή αυτή ωστόσο δεν είναι ακριβής για την προσομοίωση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης (είναι μάλιστα τόσο πιο ανακριβής όσο πιο έντονα κυρτή ή κοίλη είναι η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης). Έτσι αυτή η τιμή χρησιμοποιείται ως τιμή εκκίνησης για τον υπολογισμό των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  από τις Εξ. 10.18 έως 10.22 από τις οποίες υπολογίζεται ο δείκτης κενών. Συγκρίνοντας αυτές τις τιμές δείκτη κενών με τις μετρηθείσες και προβαίνοντας σε διαδοχικές επιλογές της τιμής της εγγενούς παραμέτρου απόστασης μέχρι να επιτευχθεί η βέλτιστη προσέγγιση της μετρηθείσας κανονικοποιημένης καμπύλης εγγενούς συμπίεσης<sup>10</sup>, καταλήγουμε στην τελική τιμή της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$ , οι τιμές  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  που προβλέπονται από την οποία οδηγούν στην καλύτερη δυνατή προσέγγιση της μετρηθείσας κανονικοποιημένης καμπύλης εγγενούς συμπίεσης (τιμές  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  που προβλέπονται από το  $d^*$  στον Πιν. 13.3). Εμπειρικά προβλεφθείσες παράμετροι  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  αντίθετα (στην αντίστοιχη γραμμή του Πιν. 13.3) είναι οι τιμές των παραμέτρων αυτών που προβλέπονται αν επιχειρηθεί απευθείας η προσομοίωση της μετρηθείσας κανονικοποιημένης καμπύλης εγγενούς συμπίεσης.

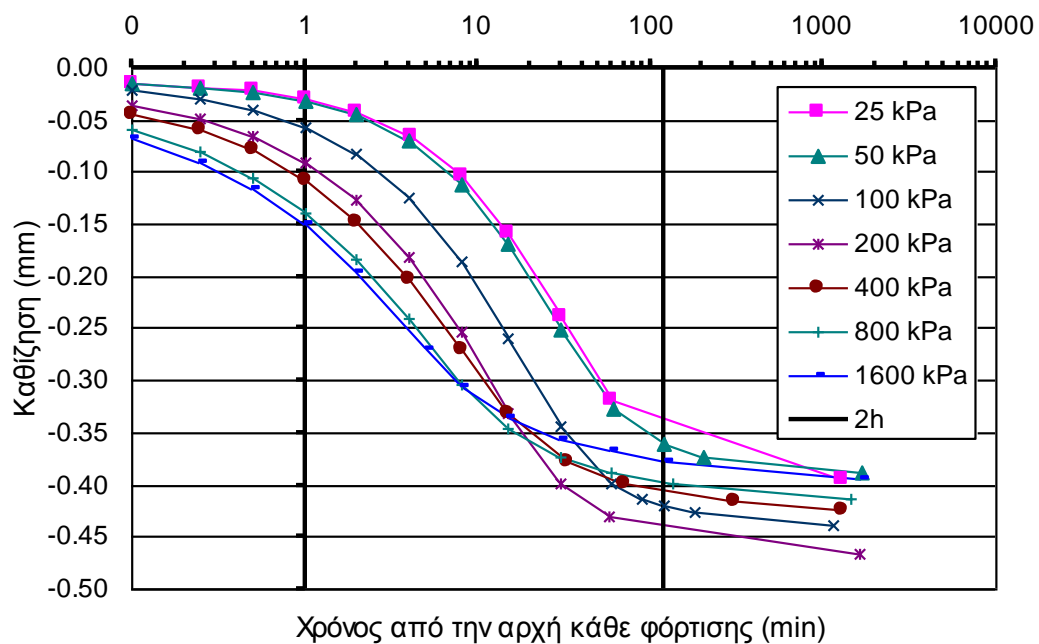
Η διαφορά είναι μάλλον λεπτή ανάμεσα στους δύο τρόπους προσδιορισμού των παραμέτρων αλλά κρίσιμη. Οι τιμές των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  που προέκυψαν από την (ουσιαστικά εμπειρικά εκτιμηθείσα τιμή της εγγενούς παραμέτρου απόστασης) υπακούουν στην θεωρία που αναπτύχθηκε στο Κεφ. 10 και εξαρτώνται μόνο από την εγγενή παράμετρο απόστασης με όλη την θεωρητική τεκμηρίωση που την συνοδεύει. Αντίθετα οι εμπειρικά προβλεφθείσες παράμετροι  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  δεν εξαρτώνται μόνο από μία θεωρητικά τεκμηριωμένη παράμετρο όπως η εγγενής παράμετρος απόστασης. Η χρήση από την άλλη πλευρά της αρχικής τιμής της εγγενούς παραμέτρου απόστασης όπως προκύπτει από τις τιμές της τάσης και του αντίστοιχου δείκτη κενών εκατέρωθεν της τιμής της τάσης  $10^{2.5} = 316.2$  kPa με γραμμική παρεμβολή, πέραν του ότι αποτελεί καλή αφετηρία των τιμών που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της μετρηθείσας κανονικοποιημένης καμπύλης εγγενούς συμπίεσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για την εκτίμηση της πραγματικής τιμής της εγγενούς παραμέτρου απόστασης μέσω της βάσης δεδομένων που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο και συνοψίζονται τα αποτελέσματά της στην §13.5.5. Εκεί παρουσιάζεται η συσχέτιση ανάμεσα στην εγγενή παράμετρο απόστασης που εξασφαλίζει την βέλτιστη προσέγγιση της μετρηθείσας κανονικοποιημένης καμπύλης εγγενούς συμπίεσης και της αρχικής τιμής της εγγενούς

<sup>9</sup> Οι τάσεις που «εγκλωβίζουν» αυτήν την τιμή μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με την αλληλουχία των φορτίσεων σε κάθε δοκιμή.

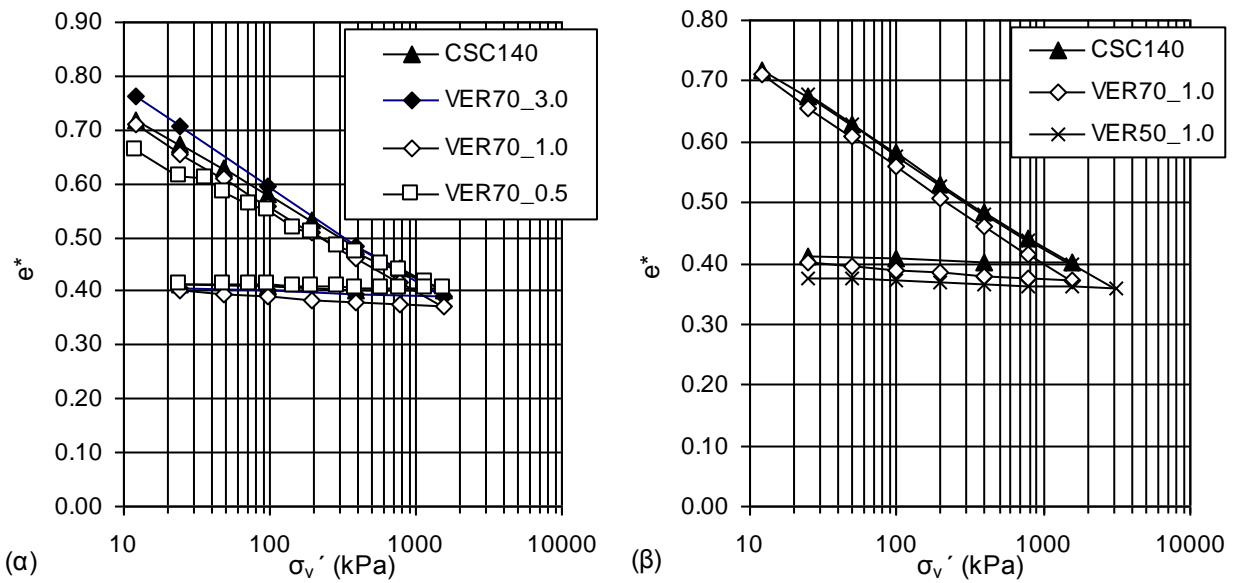
<sup>10</sup> Χρησιμοποιώντας κάποια από τις διαθέσιμες μεθόδους αξιολόγησης προσέγγισης, π.χ. την μέθοδο του αθροίσματος των ελαχίστων τετραγώνων των διαφορών.

παραμέτρου απόστασης όπως προκύπτει από τις τιμές της τάσης και του αντίστοιχου δείκτη κενών εκατέρωθεν της τιμής της τάσης  $10^{2.5} = 316.2$  kPa με γραμμική παρεμβολή για το σύνολο των αναζυμωμένων υλικών στα οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Στο Κεφ. 13 και την υπόλοιπη διατριβή ως εγγενής παράμετρος απόστασης νοείται η εγγενής παράμετρος απόστασης που εξασφαλίζει την βέλτιστη προσέγγιση της μετρηθείσας κανονικοποιημένης καμπύλης εγγενούς συμπίεσης.

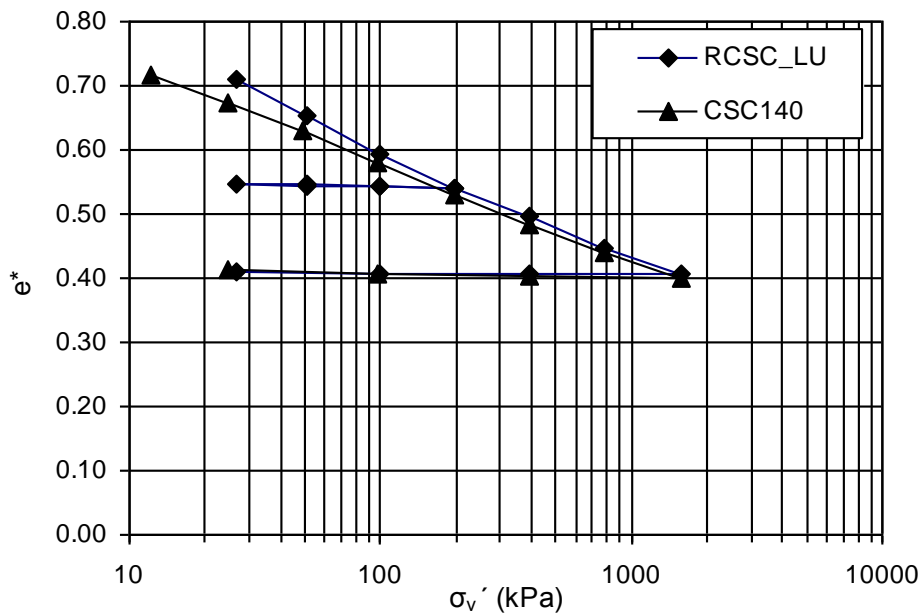
Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που παρουσιάζονται στον Πιν. 13.3, η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω (αρνητικό  $d^*$ ), ενώ είναι μάλλον μικρές οι διαφορές που προκύπτουν από την θεωρητική εκτίμηση των  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  (χρήση των Εξ. 10.18 έως 10.22 για την τιμή  $d^*$  της βέλτιστης προσέγγισης) και την εμπειρική (προσομοίωση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης απευθείας με πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού).



**Σχήμα 13.6.** Καμπύλες καθίζησης-χρόνου για τις φορτίσεις στην δοκιμή CSC-140.



**Σχήμα 13.7.** α) Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για τις δοκιμές με διαφορετικό βήμα αύξησης των φορτίων (παρατίθεται για σύγκριση και η δοκιμή CSC-140), και β) καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για τις δοκιμές με διαφορετικό λόγο διαμέτρου προς ύψος (παρατίθεται για σύγκριση και η δοκιμή CSC-140).



**Σχήμα 13.8.** Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από την δοκιμή RCSC-LU με ενδιάμεσο κλάδο φόρτισης-αποφόρτισης και την δοκιμή CSC-140.



### 13.3.5 Δοκιμές στην Άργιλο Κορίνθου

Τα φυσικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά της Άργιλου Κορίνθου παρατίθενται στο Κεφάλαιο 11. Εκτελέστηκαν συνολικά 12 δοκιμές στα πλαίσια της διερεύνησης των εγγενών ιδιοτήτων συμπίεσής:

- 7 δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων των 24 ωρών, φόρτιση μέχρι τα 1600 kPa με βήμα αύξησης φορτίου  $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v = 1$ , διάμετρο δοκιμίων 70mm και ύψος περί τα 19mm<sup>11</sup>, και τα αρχικά ποσοστά υγρασίας του Πίν. 13.4 (δοκιμές CC και VCC), και
- 5 δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης όπως οι προηγούμενες με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων των 2 ωρών, και τα αρχικά ποσοστά υγρασίας του Πίν. 13.4 (δοκιμές FCC),

Στο Σχ. 13.9α παρουσιάζονται οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης των δοκιμών με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων 24 h και στο Σχ. 13.9β οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης. Στα Σχ. 13.10α και 13.10β παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες των δοκιμών με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων 2 h. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.9α οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από τις δοκιμές για χρονικούς διαχωρισμούς 24 h πρακτικά συμπίπτουν μετά από 50 kPa κατακόρυφης τάσης. Αντίστοιχα από το Σχ. 13.10α προκύπτει για τις καμπύλες από τις δοκιμές για χρονικούς διαχωρισμούς 2 h ότι η σύμπτωση των καμπυλών συμβαίνει για κατακόρυφη τάση 50 kPa, αν και σε αυτή την περίπτωση αποκλίνει η δοκιμή στο 75% του ορίου υδαρότητας. Σε ό,τι αφορά τις κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης προκύπτουν τα ίδια από τα Σχ. 13.9β και 13.10β αντίστοιχα και μάλιστα προκύπτει και η σύμπτωση τους με την θεωρητική γραμμή εγγενούς συμπίεσης.

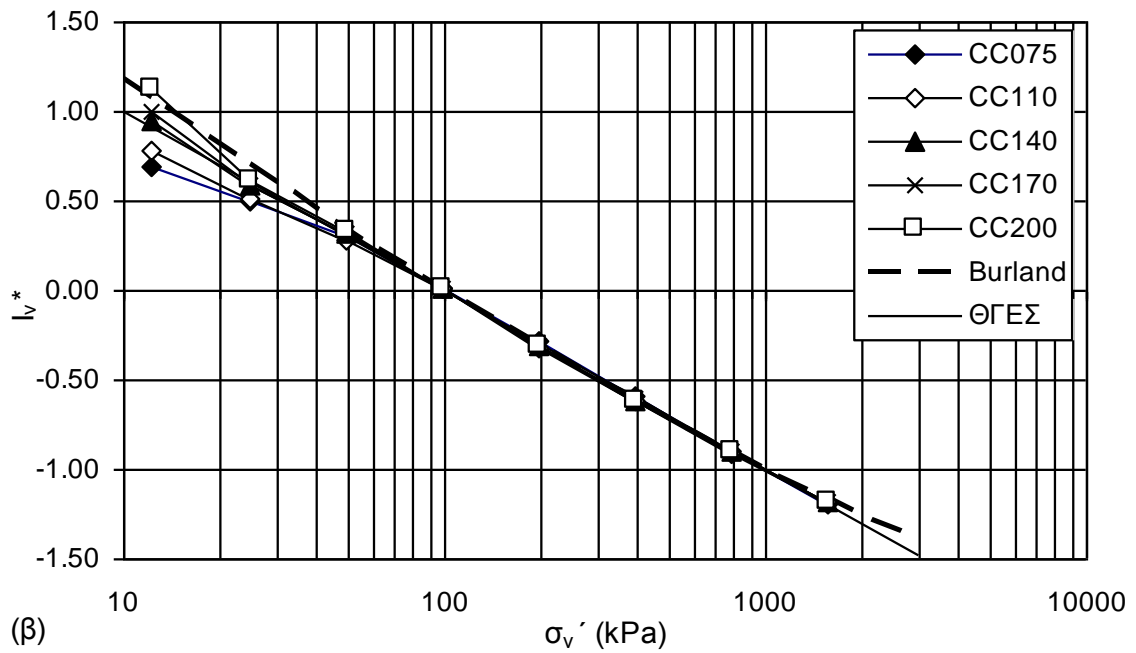
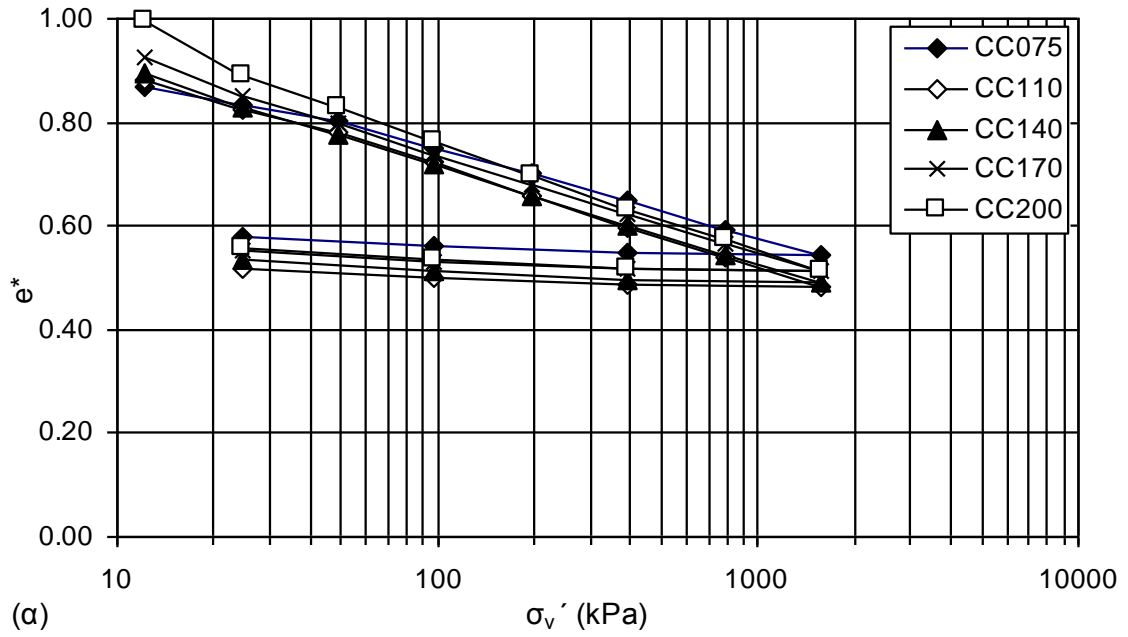
Στο Σχ. 13.11α συσχετίζονται ο δείκτης εγγενούς συμπίεσης και οι τιμές του εγγενούς λόγου κενών στα 1, 100 και 1000 kPa με το αρχικό ποσοστό υγρασίας εκπεφρασμένο ως ποσοστό το ορίου υδαρότητας του υλικού ( $w_L = 35\%$ ). Στο Σχ. 13.11β συσχετίζονται ο δείκτης εγγενούς συμπίεσης και ο δείκτης αποφόρτισης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας εκπεφρασμένο ως ποσοστό το ορίου υδαρότητας του υλικού, ενώ τέλος στο Σχ. 13.11γ παρουσιάζεται μεγέθυνση για τον δείκτη αποφόρτισης. Οι τιμές των παραμέτρων εγγενούς συμπίεσης παρατίθενται στον Πίν. 13.5. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.11α, ο εγγενής λόγος κενών στο 1 kPa αποτελεί

<sup>11</sup> Βλέπε προβλήματα που εμφανίζονται με έλεγχο του ύψους των δοκιμίων αναζυμωμένων υλικών στην §13.3.2.

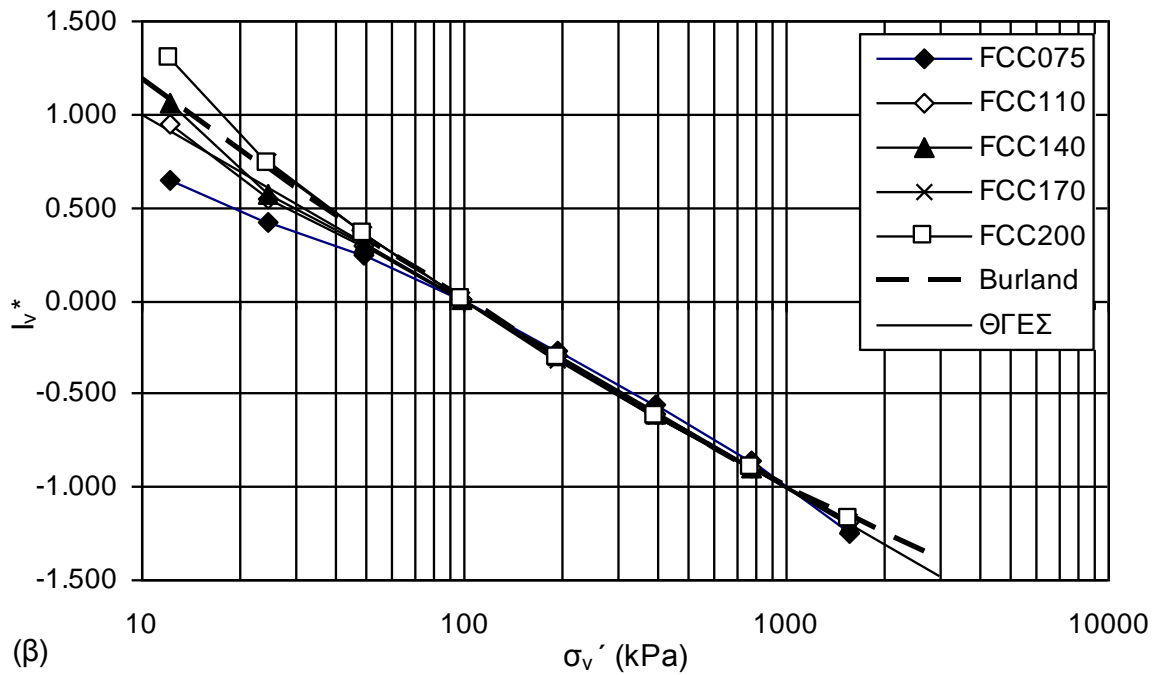
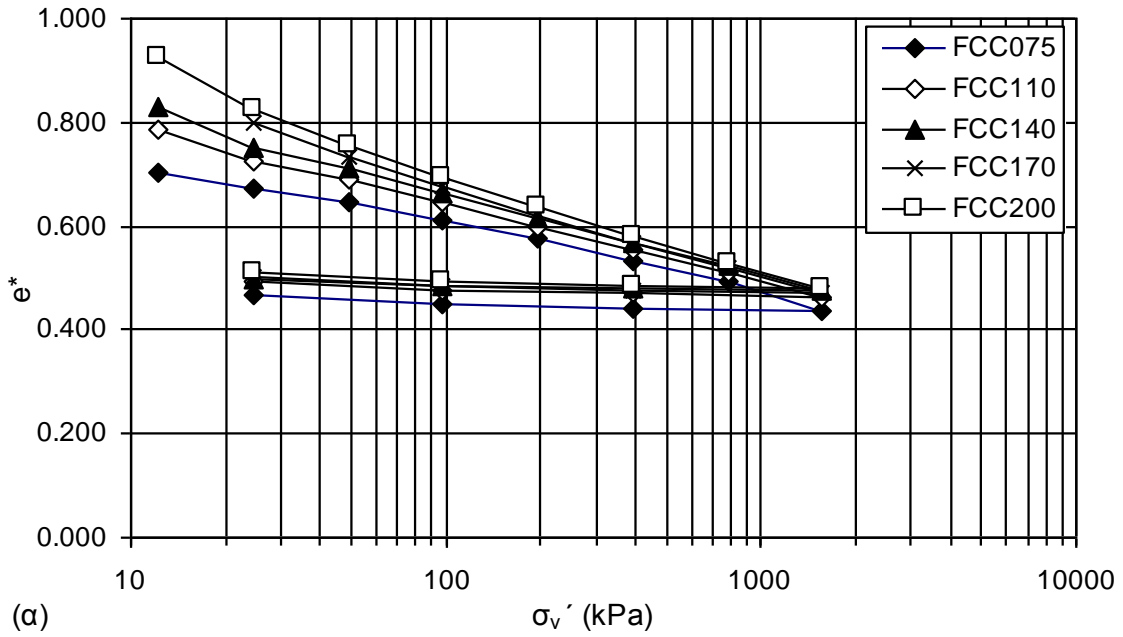
πράγματι συνάρτηση του ποσοστού υγρασίας (αφού η επιβληθείσα τάση είναι πρακτικά ελάχιστη για να μεταβάλλει ουσιωδώς τον αρχικό λόγο κενών του πολτού που εξαρτάται μόνο από το αρχικό ποσοστό υγρασίας), ενώ αντίθετα ο λόγος κενών στα 100 kPa και στα 1000 kPa,  $e^*_{100}$  και  $e^*_{1000}$  αντίστοιχα, όπως και ο δείκτης συμπίεσης  $C_c^*$  αποτελούν μάλλον σταθερές ανεξάρτητες του αρχικού ποσοστού υγρασίας για το συγκεκριμένο υλικό (παρόλο που πράγματι υπάρχει μία μικρή αύξησή τους με το ποσοστό υγρασίας). Ειδικά για τον δείκτη εγγενούς συμπίεσης  $C_c^*$  αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχ. 13.11β όπου παρατίθεται και η εξέλιξη του δείκτη αποφόρτισης  $C_f$ . Για το συγκεκριμένο υλικό παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των τιμών παραμέτρων από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 24h και χρονικούς διαχωρισμούς 2h, παρόλο που όπως φαίνεται στο Σχ. 13.12 όπου παρατίθενται οι καμπύλες καθιζήσεων χρόνου από την δοκιμή CC-140, μέχρι τις 2h έχουν πρακτικά ολοκληρωθεί οι καθιζήσεις.

Στο Σχ. 13.13 παρουσιάζονται οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από τις δοκιμές CC110 και VCC110, καθώς και CC200 και VCC200. Οι δοκιμές VCC ήταν δοκιμές που έγιναν στο ίδιο αρχικό ποσοστό υγρασίας του πολτού με τις αντίστοιχες δοκιμές CC προκειμένου να συγκριθούν αποτελέσματα δοκιμών με το ίδιο αρχικό ποσοστό υγρασίας και έτσι να αξιολογηθούν οι διαφορές που καταγράφονται στις δοκιμές που γίνονται με διαφορετικά ποσοστά υγρασίας. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.13 οι καμπύλες από δοκιμές με το ίδιο ακριβώς αρχικό ποσοστό υγρασίας –σε δυο διαφορετικά μάλιστα εύρη τιμών του αρχικού ποσοστού υγρασίας- προκύπτουν με πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους ανά ποσοστό υγρασίας. Κατά συνέπεια οι καταγραφόμενες διαφορές στις καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από ποσοστό υγρασίας σε ποσοστό υγρασίας είναι στατιστικά σημαντικές. Παρόμοιες δοκιμές έγιναν και σε δείγματα της Μάργας Πατρών (§13.3.6) και σε δείγματα του Καολίνη Speswhite (§13.3.7).

Τέλος στον Πίν. 13.4 παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης για την δοκιμή CC-140. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω (αρνητικό  $d^*$ ), ενώ είναι μετρίου μεγέθους οι διαφορές που προκύπτουν από την θεωρητική εκτίμηση των  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  (χρήση των Εξ. 10.18 έως 10.22) και την εμπειρική (προσομοίωση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης απευθείας με πολυωνμική εξίσωση τρίτου βαθμού).



**Σχήμα 13.9.** α) Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, και β) κανονικοποιημένες καμπύλες Αργίλου Κορίνθου από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς μεταξύ διαδοχικών φορτίων 24h.



**Σχήμα 13.10.** α) Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, και β) κανονικοποιημένες καμπύλες Αργίλου Κορίνθου από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς μεταξύ διαδοχικών φορτίων 24h.

**Πίνακας 13.4.** Αρχικά ποσοστά υγρασίας δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένη Άργιλο Κορίνθου ( $w_L = 35\%$ ).

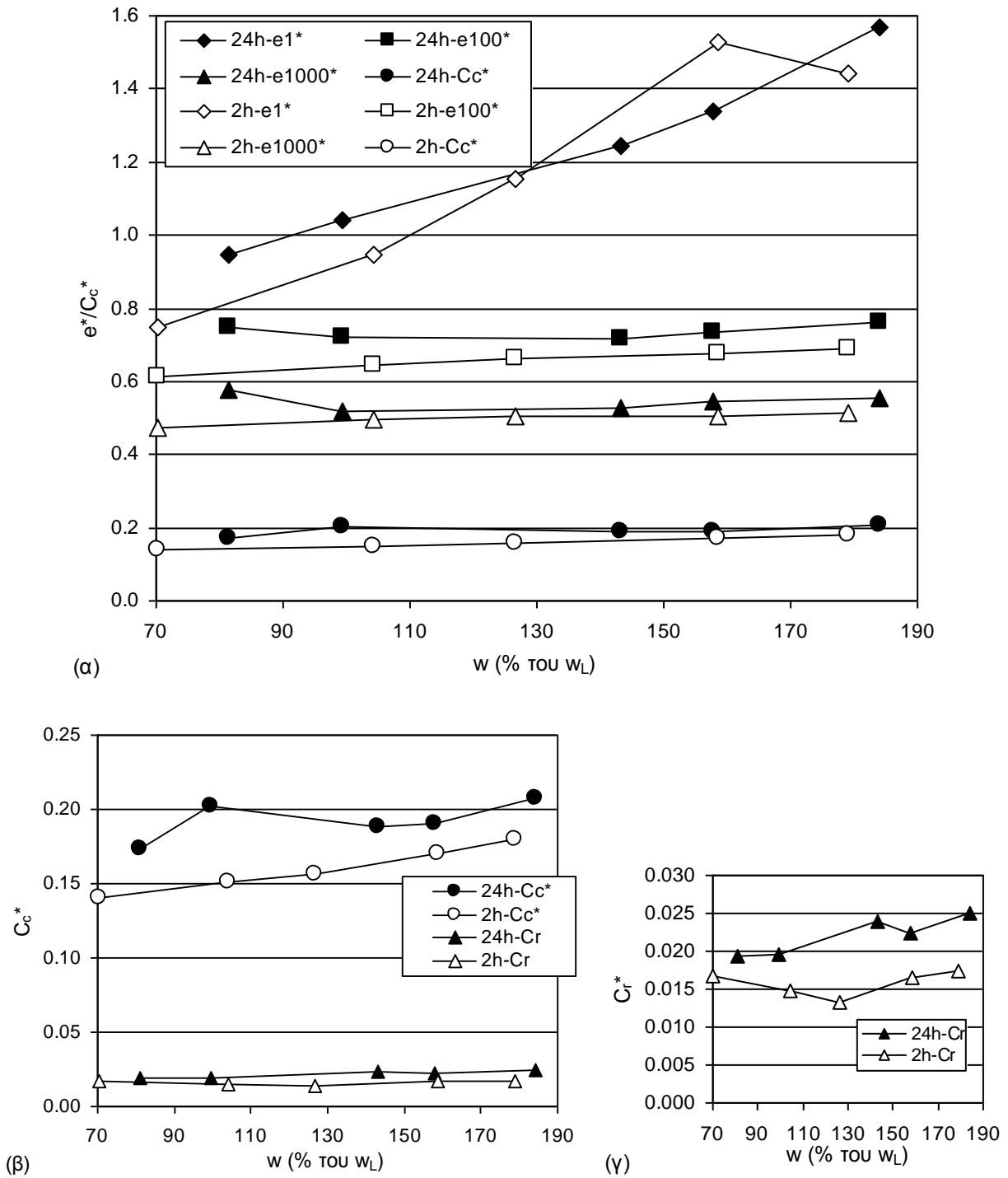
Δοκιμή	Αρχικό ποσοστό υγρασίας στόχος ως ποσοστό του $w_L$	Αρχικό ποσοστό υγρασίας-στόχος	Αρχικό ποσοστό υγρασίας που επιτεύχθηκε	Αρχικό ποσοστό υγρασίας που επιτεύχθηκε ως ποσοστό του $w_L$
	(%)	(%)	(%)	(%)
CC075	75	26.25	28.45	81.3
CC110	110	38.5	34.79	99.4
CC140	140	49.0	50.15	143.3
CC170	170	59.5	55.25	157.9
CC200	200	70.0	64.44	184.1
FCC075	75	26.25	24.60	70.3
FCC110	110	38.5	36.46	104.2
FCC140	140	49.0	44.35	126.7
FCC170	170	59.5	55.50	158.6
FCC200	200	70.0	62.68	179.1

**Πίνακας 13.5.** Παράμετροι εγγενούς συμπίεσιμότητας από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένη Άργιλο Κορίνθου ( $w_L = 35\%$ ).

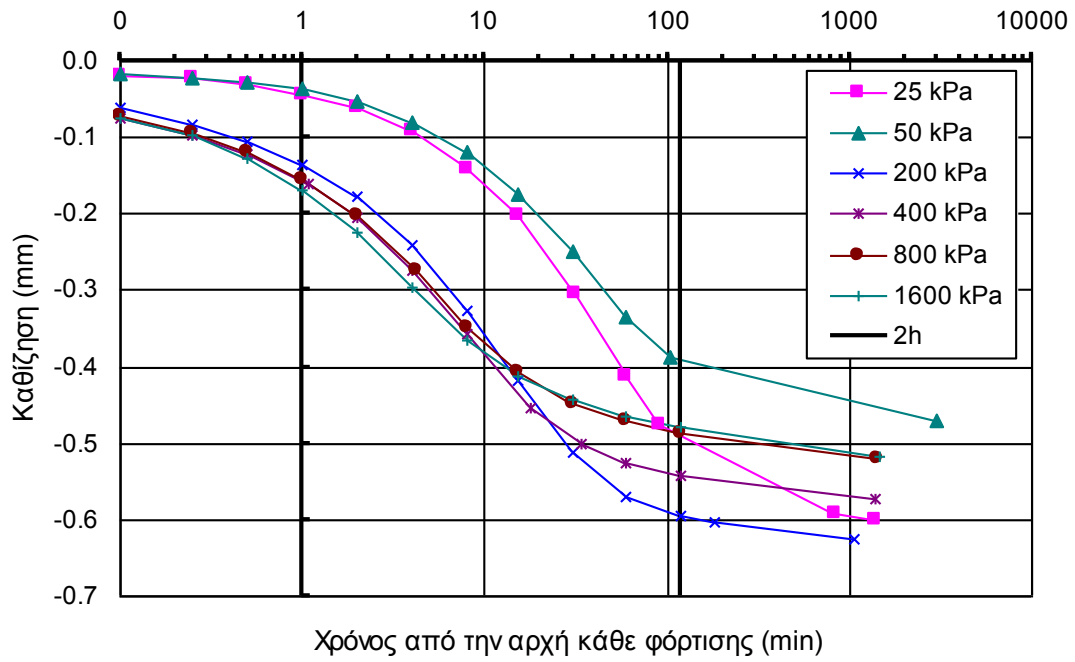
Δοκιμή	$e^*_o$	$e^*_1$	$e^*_{100}$	$e^*_{1000}$	$C_c^*$	$C_r$
CC075	0.959	0.948	0.749	0.576	0.173	0.019
CC110	1.067	1.043	0.721	0.519	0.202	0.020
CC140	1.345	1.244	0.716	0.527	0.189	0.024
CC170	1.474	1.339	0.737	0.547	0.190	0.022
CC200	1.798	1.566	0.760	0.552	0.208	0.025
FCC075	0.751	0.750	0.612	0.472	0.140	0.017
FCC110	0.992	0.948	0.644	0.494	0.151	0.015
FCC140	1.251	1.153	0.662	0.506	0.156	0.013
FCC170	1.770	1.528	0.674	0.504	0.170	0.017
FCC200	1.732	1.441	0.692	0.512	0.180	0.017

**Πίνακας 13.6.** Εγγενείς παράμετροι απόστασης και εμπειρικές τιμές παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  για την δοκιμή CC140 σε αναζυμωμένη Άργιλο Κορίνθου ( $w_L = 35\%$ ).

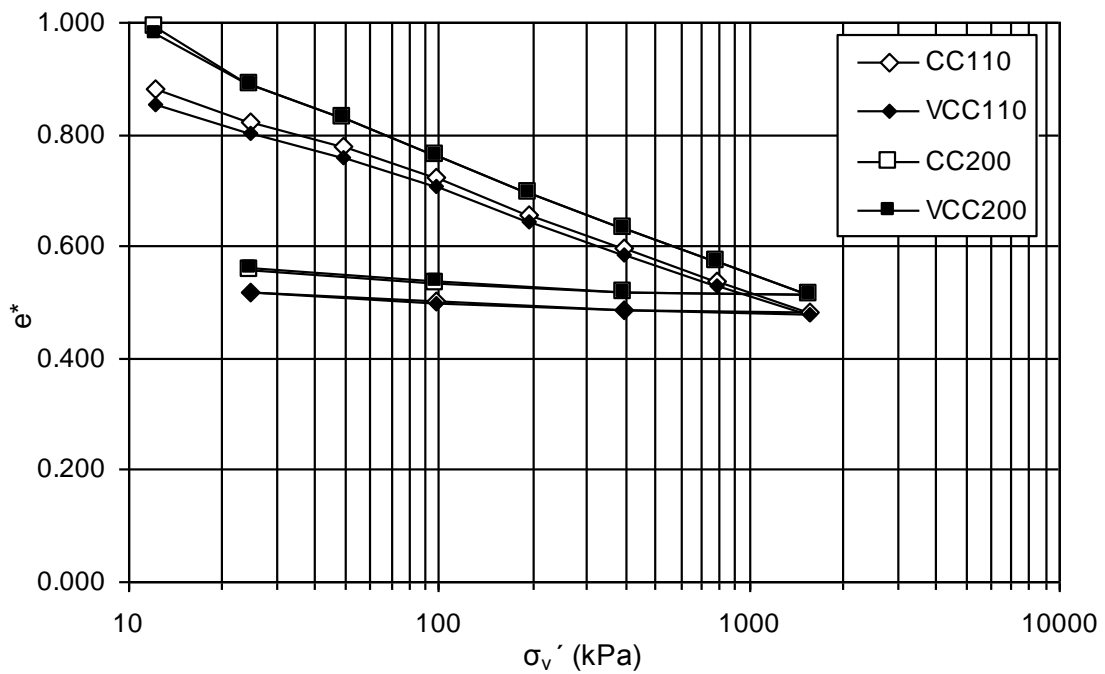
Δοκιμή	$d^*$ (υπολ.)	$d^*$ (προσέγγιση)		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
CC140	-0.013	-0.018	Από το $d^*$	2.766	-1.701	0.180	-0.010
			Εμπειρικά	2.909	-2.333	0.607	-0.088



**Σχήμα 13.11.** α) Εξέλιξη του εγγενούς λόγου κενών στα 1, 100 και 1000 kPa και του δείκτη εγγενούς συμπίεσης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών εκπεφρασμένο ως ποσοστό του ορίου υδαρότητας, και β) εξέλιξη του δείκτη εγγενούς συμπίεσης και του δείκτη αποφόρτισης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών εκπεφρασμένο ως ποσοστό του ορίου υδαρότητας, για τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 24h και 2h (στο γ) παρουσιάζεται μεγέθυνση για καλύτερη απεικόνιση της εξέλιξης του δείκτη αποφόρτισης).



Σχήμα 13.12. Καμπύλες καθίζησης-χρόνου για τις φορτίσεις στην δοκιμή CC-140.



Σχήμα 13.13. Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για τις δοκιμές CC110 και VCC110, καθώς και CC200 και VCC200.

### 13.3.6 Δοκιμές στη Μάργα Πατρών

Τα φυσικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά της Μάργας Πατρών παρατίθενται στο Κεφάλαιο 11. Εκτελέστηκαν συνολικά 12 δοκιμές στα πλαίσια της διερεύνησης των εγγενών ιδιοτήτων συμπίεσής:

- 7 δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων των 24 ωρών, φόρτιση μέχρι τα 1600 kPa με βήμα αύξησης φορτίου  $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v = 1$ , διάμετρο δοκιμίων 70mm και ύψος περί τα 19mm<sup>12</sup>, και τα αρχικά ποσοστά υγρασίας του Πίν. 13.7 (δοκιμές PM και VPM), και
- 5 δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης όπως οι προηγούμενες με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων των 2 ωρών, και τα αρχικά ποσοστά υγρασίας του Πίν. 13.7 (δοκιμές FPM),

Στο Σχ. 13.14α παρουσιάζονται οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης των δοκιμών με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων 24 h και στο Σχ. 13.14β οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης. Στα Σχ. 13.15α και 13.15β παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες των δοκιμών με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων 2 h. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.14α οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από τις δοκιμές για χρονικούς διαχωρισμούς 24 h πρακτικά συμπίπτουν μετά από 50 kPa κατακόρυφης τάσης. Αντίστοιχα από το Σχ. 13.15α προκύπτει για τις καμπύλες από τις δοκιμές για χρονικούς διαχωρισμούς 2 h ότι η σύμπτωση των καμπυλών συμβαίνει για κατακόρυφη τάση 100 kPa, αν και σε αυτή την περίπτωση αποκλίνει η δοκιμή στο 75% του ορίου υδαρότητας. Σε ό,τι αφορά τις κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης προκύπτουν τα ίδια από τα Σχ. 13.14β και 13.15β αντίστοιχα και μάλιστα προκύπτει και η σύμπτωση τους με την θεωρητική γραμμή εγγενούς συμπίεσης. Ειδικά μάλιστα στην περίπτωση των δοκιμών με χρονικούς διαχωρισμούς 24h είναι εντυπωσιακή η ταύτιση με την Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (ΘΓΕΣ).

Στο Σχ. 13.16α συσχετίζονται ο δείκτης εγγενούς συμπίεσης και οι τιμές του εγγενούς λόγου κενών στα 1, 100 και 1000 kPa με το αρχικό ποσοστό υγρασίας εκπεφρασμένο ως ποσοστό το ορίου υδαρότητας του υλικού ( $w_L = 50.5\%$ ). Στο Σχ. 13.16β συσχετίζονται ο δείκτης εγγενούς συμπίεσης και ο δείκτης αποφόρτισης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας εκπεφρασμένο ως ποσοστό το ορίου υδαρότητας του υλικού, ενώ τέλος στο Σχ. 13.16γ παρουσιάζεται μεγέθυνση

---

<sup>12</sup> Βλέπε προβλήματα που εμφανίζονται με έλεγχο του ύψους των δοκιμών αναζυμωμένων υλικών στην §13.3.2.



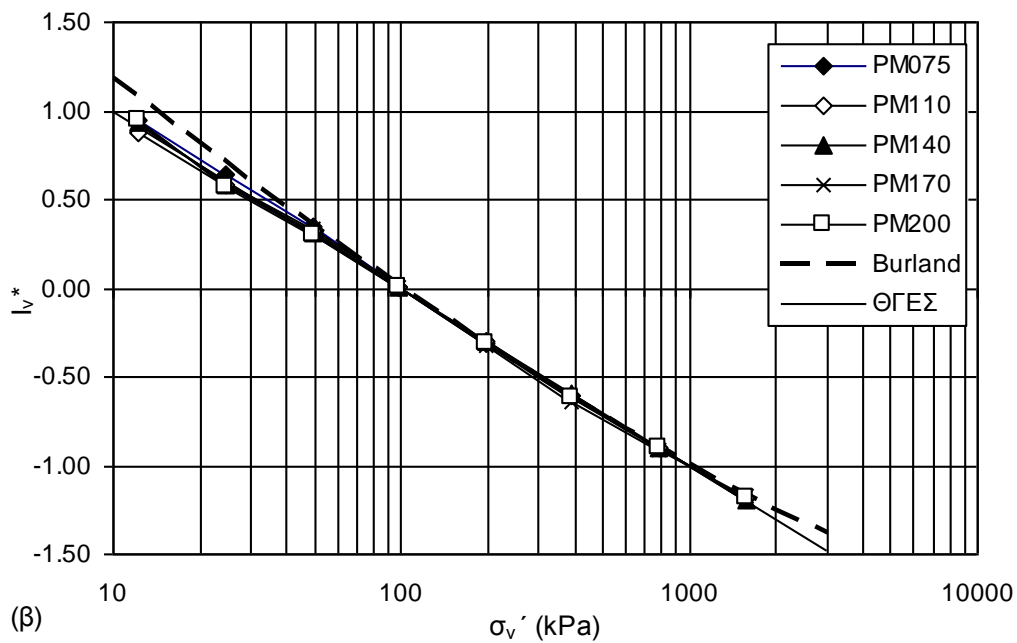
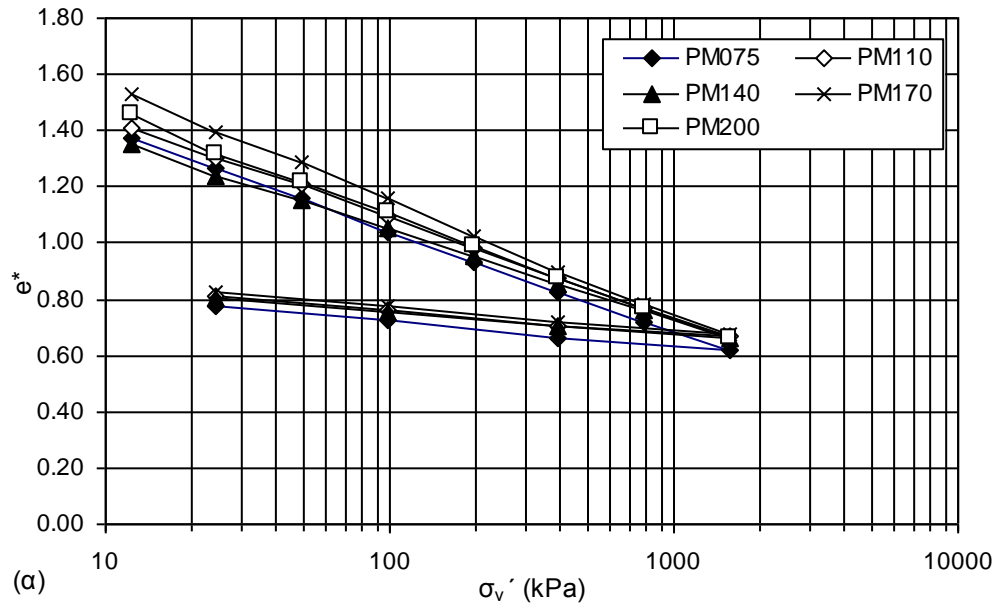
για τον δείκτη αποφόρτισης. Οι τιμές των παραμέτρων εγγενούς συμπίεσης παρατίθενται στον Πίν. 13.8. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.16α, ο εγγενής λόγος κενών στο 1 kPa αποτελεί πράγματι συνάρτηση του ποσοστού υγρασίας (αφού η επιβληθείσα τάση είναι πρακτικά ελάχιστη για να μεταβάλλει ουσιωδώς τον αρχικό λόγο κενών του πολτού που εξαρτάται μόνο από το αρχικό ποσοστό υγρασίας), ενώ αντίθετα ο λόγος κενών στα 100 kPa και στα 1000 kPa,  $e^*_{100}$  και  $e^*_{1000}$  αντίστοιχα, όπως και ο δείκτης συμπίεσης  $C_c^*$  αποτελούν μάλλον σταθερές ανεξάρτητες του αρχικού ποσοστού υγρασίας για το συγκεκριμένο υλικό (παρόλο που πράγματι υπάρχει μία μικρή αύξησή τους με το ποσοστό υγρασίας). Ειδικά για τον δείκτη εγγενούς συμπίεσης  $C_c^*$  αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχ. 13.16β όπου παρατίθεται και η εξέλιξη του δείκτη αποφόρτισης  $C_r$ . Επίσης, για το συγκεκριμένο υλικό παρατηρούνται μικρές διαφορές μεταξύ των τιμών παραμέτρων από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 24h και χρονικούς διαχωρισμούς 2h, το οποίο αναμενόταν, αφού όπως φαίνεται στο Σχ. 13.17 όπου παρατίθενται οι καμπύλες καθιζήσεων χρόνου από την δοκιμή PM-140, μέχρι τις 2h έχουν πρακτικά ολοκληρωθεί οι καθιζήσεις.

Στο Σχ. 13.18 παρουσιάζονται οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από τις δοκιμές PM075 και VPM075, καθώς και PM200 και VPM200. Οι δοκιμές VPM ήταν δοκιμές που έγιναν στο ίδιο αρχικό ποσοστό υγρασίας του πολτού με τις αντίστοιχες δοκιμές PM προκειμένου να συγκριθούν αποτελέσματα δοκιμών με το ίδιο αρχικό ποσοστό υγρασίας και έτσι να αξιολογηθούν οι διαφορές που καταγράφονται στις δοκιμές που γίνονται με διαφορετικά ποσοστά υγρασίας. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.18 οι καμπύλες από δοκιμές με το ίδιο ακριβώς αρχικό ποσοστό υγρασίας –σε δυο διαφορετικά μάλιστα εύρη τιμών του αρχικού ποσοστού υγρασίας- προκύπτουν με πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους ανά ποσοστό υγρασίας<sup>13</sup>. Κατά συνέπεια οι καταγραφόμενες διαφορές στις καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από ποσοστό υγρασίας σε ποσοστό υγρασίας είναι στατιστικά σημαντικές. Παρόμοιες δοκιμές έγιναν και σε δείγματα της Αργίλου Κορίνθου (§13.3.5) και σε δείγματα του Καολίνης Speswhite (§13.3.7).

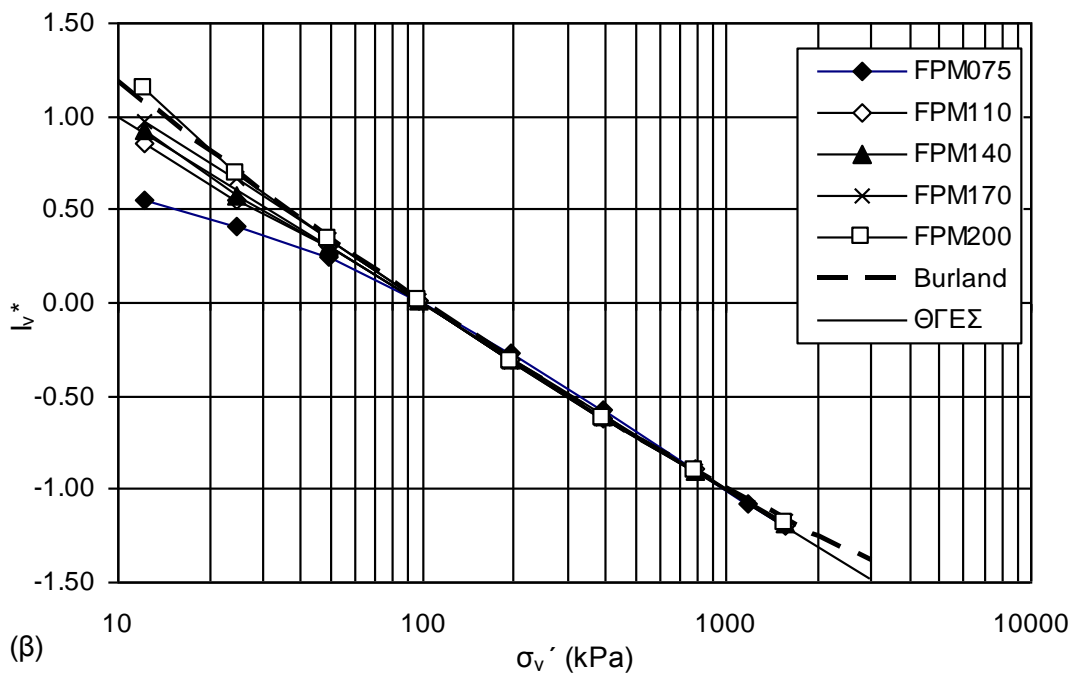
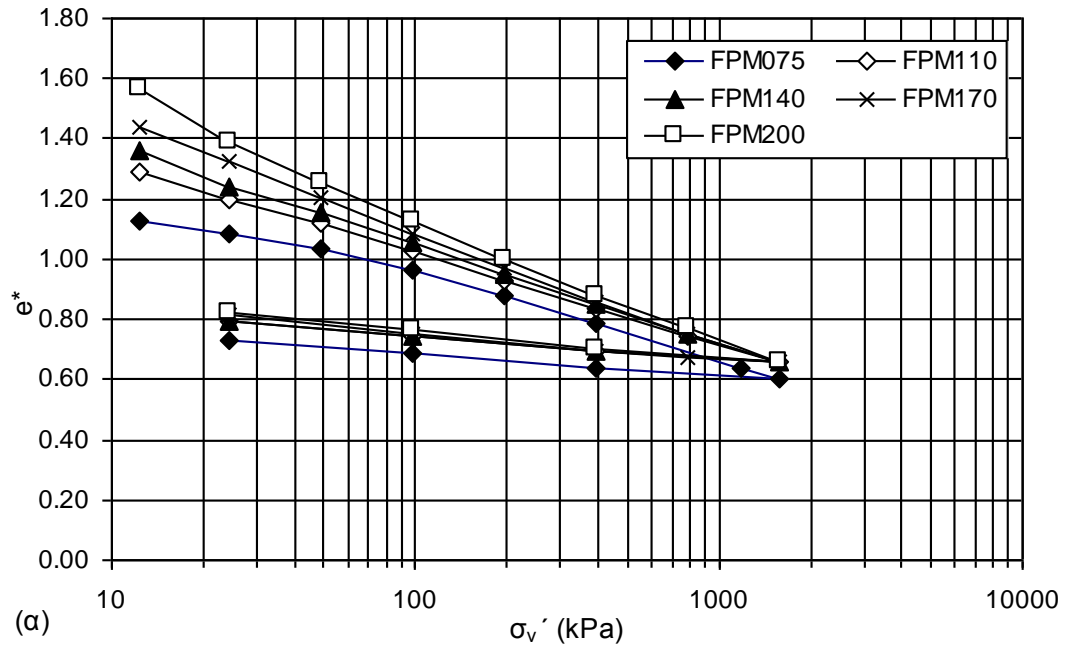
Τέλος στον Πίν. 13.9 παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης για την δοκιμή PM-140. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης προκύπτει ελαφρώς καμπύλη με τα κοίλα προς τα πάνω (μικρή

<sup>13</sup> Η δοκιμή PM200 τελείωσε πιο νωρίς γιατί δεν έγινε σταδιακή αποφόρτιση και στην δοκιμή VPM200 κατέστη υποχρεωτικό να γίνει αποφόρτιση από τα 400 kPa γιατί ο βραχίονας ανάρτησης φορτίων πλησίαζε την βάση του συμπιεσομέτρου και δεν θα ήταν δυνατή περαιτέρω καθιζήση. Σε κάθε περίπτωση η σύμπτωση των καμπυλών από τις δύο δοκιμές στην ίδια θέση με την ίδια κλίση επιδεικνύει ταύτιση των αποτελεσμάτων.

αρνητική τιμή του  $d^*$ ), ενώ είναι αρκετά μικρές οι διαφορές που προκύπτουν από την θεωρητική εκτίμηση των  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  (χρήση των Εξ. 10.18 έως 10.22) και την εμπειρική (προσομοίωση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης απευθείας με πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού).



**Σχήμα 13.14.** α) Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, και β) κανονικοποιημένες καμπύλες Μάργας Πατρών από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς μεταξύ διαδοχικών φορτίων 24h.



**Σχήμα 13.15.** α) Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, και β) κανονικοποιημένες καμπύλες Μάργας Πατρών από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς μεταξύ διαδοχικών φορτίων 2h.

**Πίνακας 13.7.** Αρχικά ποσοστά υγρασίας δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένη Μάργα Πατρών ( $w_L = 50.5\%$ ).

Δοκιμή	Αρχικό ποσοστό υγρασίας στόχος ως ποσοστό του $w_L$	Αρχικό ποσοστό υγρασίας-στόχος	Αρχικό ποσοστό υγρασίας που επιτεύχθηκε	Αρχικό ποσοστό υγρασίας που επιτεύχθηκε ως ποσοστό του $w_L$
	(%)	(%)	(%)	(%)
PM075	75	37.875	43.13	85.41
PM110	110	55.55	57.75	114.36
PM140	140	70.7	64.26	127.25
PM170	170	85.85	88.03	174.32
PM200	200	101.0	98.68	195.41
FPM075	75	37.875	35.74	70.77
FPM110	110	55.55	53.73	106.40
FPM140	140	70.7	63.37	125.49
FPM170	170	85.85	82.67	163.70
FPM200	200	101.0	94.74	187.60

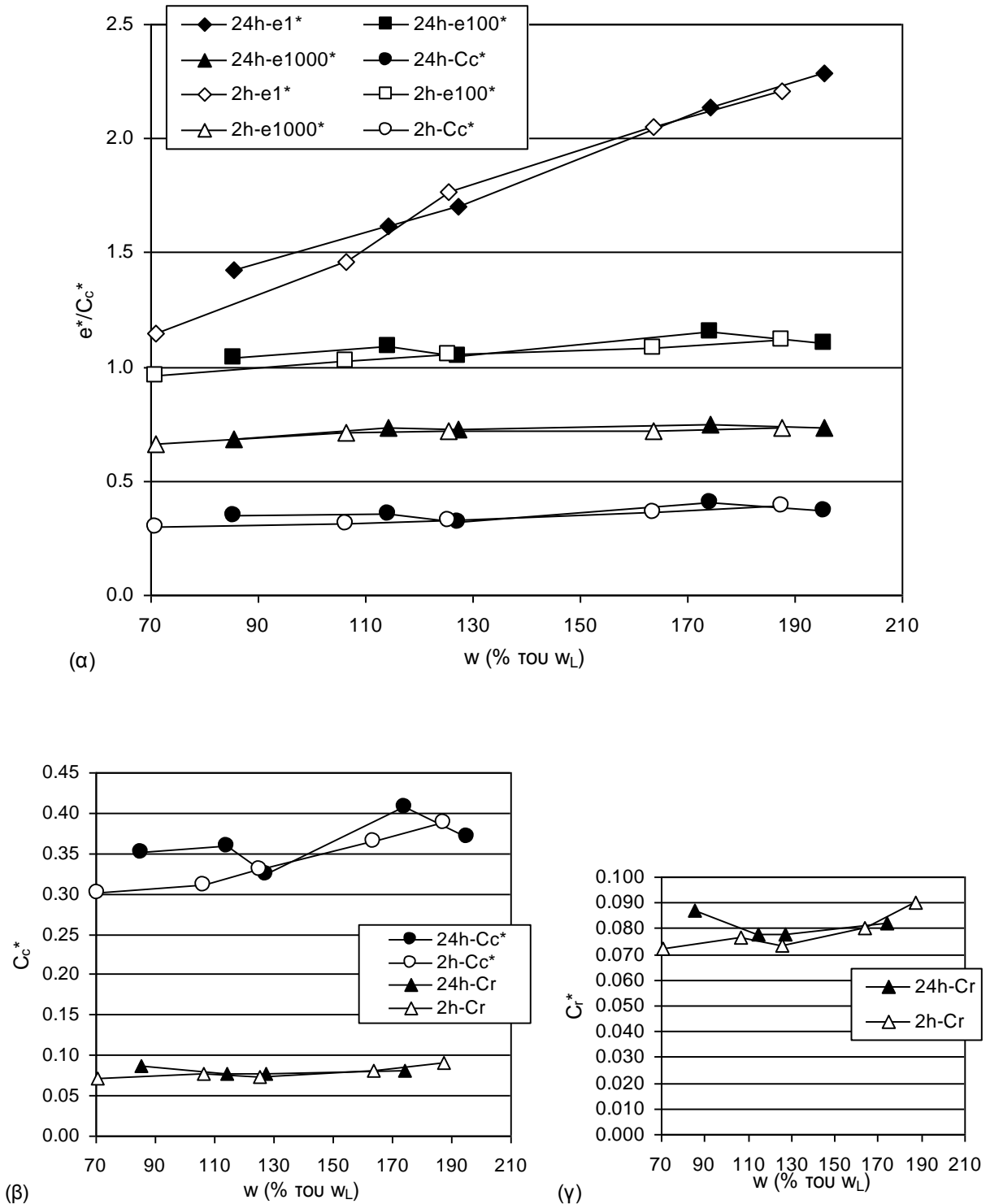
**Πίνακας 13.8.** Παράμετροι εγγενούς συμπιεστότητας από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένη Μάργα Πατρών ( $w_L = 50.5\%$ ).

Δοκιμή	$e^*_o$	$e^*_1$	$e^*_{100}$	$e^*_{1000}$	$C_c^*$	$C_r$
PM075	1.411	1.424	1.039	0.687	0.352	0.087
PM110	1.628	1.616	1.093	0.734	0.359	0.078
PM140	1.776	1.699	1.048	0.724	0.323	0.078
PM170	2.390	2.137	1.153	0.746	0.407	0.082
PM200	2.659	2.287	1.104	0.733	0.371	0.062 <sup>14</sup>
FPM075	1.122	1.148	0.961	0.660	0.302	0.072
FPM110	1.476	1.460	1.026	0.715	0.311	0.077
FPM140	1.850	1.767	1.051	0.721	0.330	0.074
FPM170	2.305	2.051	1.083	0.719	0.364	0.080
FPM200	2.567	2.206	1.121	0.732	0.389	0.090

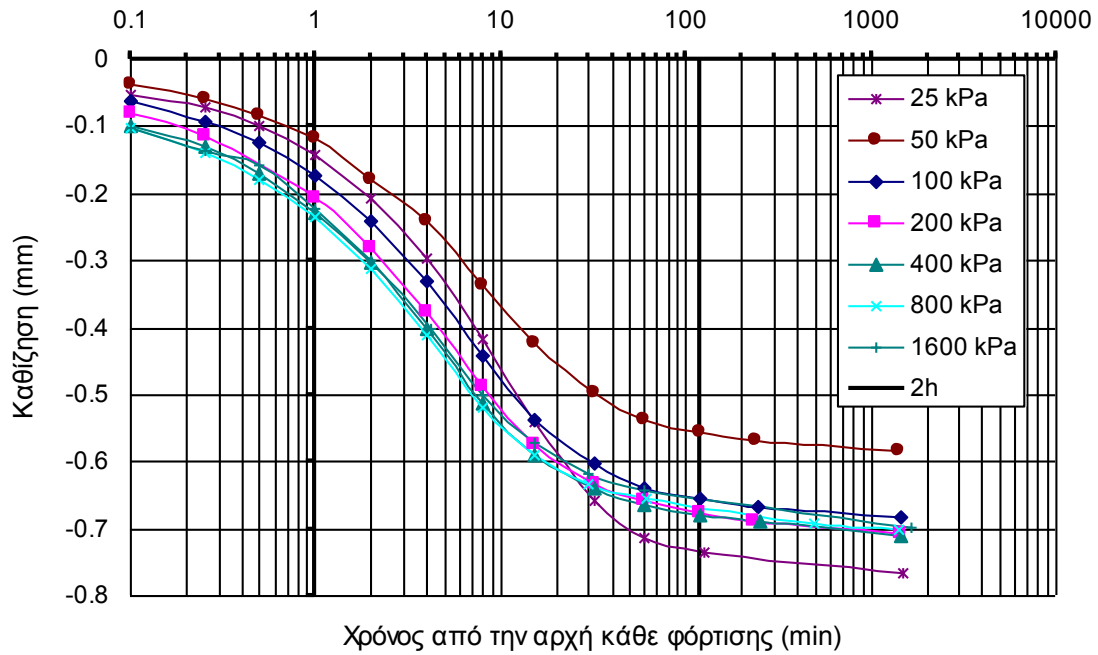
**Πίνακας 13.9.** Εγγενείς παράμετροι απόστασης και εμπειρικές τιμές παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  για την δοκιμή PM140 σε αναζυμωμένη Μάργα Πατρών ( $w_L = 50.5\%$ ).

Δοκιμή	$d^*$ (υπολ.)	$d^*$ (προσέγγιση)		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
PM140	-0.003	-0.002	Από το $d^*$	2.070	-1.059	0.012	0.000
			Εμπειρικά	2.089	-1.129	0.055	-0.007

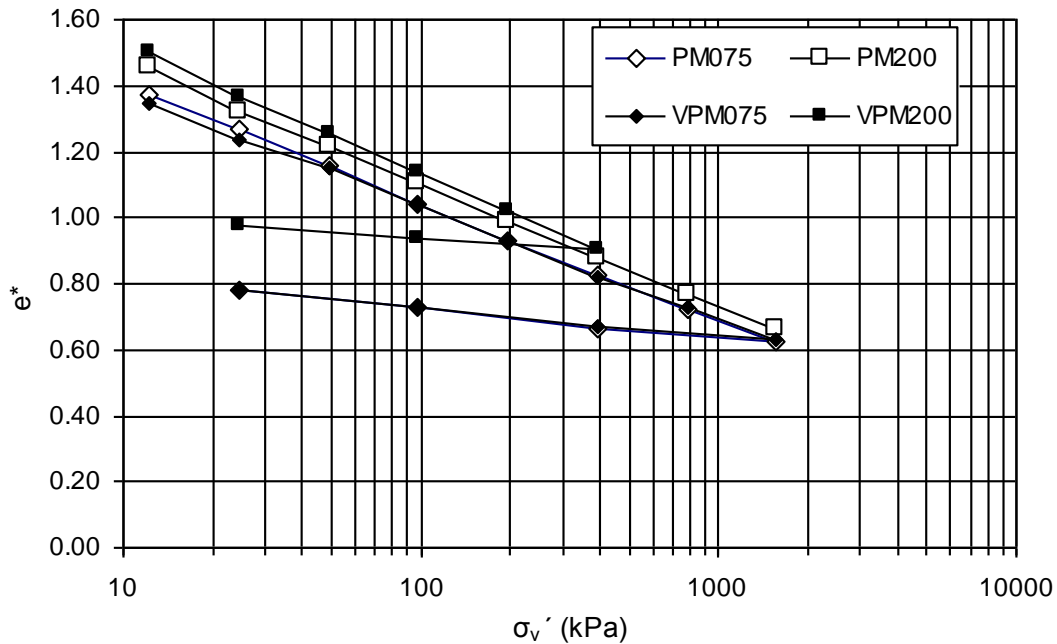
<sup>14</sup> Από την δοκιμή VPM200 για την αποφόρτιση από τα 400 kPa.



**Σχήμα 13.16.** α) Εξέλιξη του εγγενούς λόγου κενών στα 1, 100 και 1000 kPa και του δείκτη εγγενούς συμπίεσης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών εκπεφρασμένο ως ποσοστό του ορίου υδαρότητας, και β) εξέλιξη του δείκτη εγγενούς συμπίεσης και του δείκτη αποφόρτισης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών εκπεφρασμένο ως ποσοστό του ορίου υδαρότητας, για τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 24h και 2h (στο γ) παρουσιάζεται μεγέθυνση για καλύτερη απεικόνιση της εξέλιξης του δείκτη αποφόρτισης).



Σχήμα 13.17. Καμπύλες καθίζησης-χρόνου για τις φορτίσεις στην δοκιμή PM140.



Σχήμα 13.18. Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για τις δοκιμές PM075 και VPM075, καθώς και PM200 και VPM200.

### 13.3.7 Δοκιμές στον Καολίνη Speswhite

Τα φυσικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του καολίνη Speswhite παρατίθενται στο Κεφάλαιο 11. Εκτελέστηκαν συνολικά 14 δοκιμές στα πλαίσια της διερεύνησης των εγγενών ιδιοτήτων συμπίεσής:

- 9 δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων των 24 ωρών, φόρτιση μέχρι τα 1600 kPa με βήμα αύξησης φορτίου  $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v = 1$ , διάμετρο δοκιμίων 70mm και ύψος περί τα 19mm<sup>15</sup>, και τα αρχικά ποσοστά υγρασίας του Πίν. 13.10 (δοκιμές SK και VSK), και
- 5 δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης όπως οι προηγούμενες με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων των 2 ωρών, και τα αρχικά ποσοστά υγρασίας του Πίν. 13.10 (δοκιμές FSK),

Στο Σχ. 13.19α παρουσιάζονται οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης των δοκιμών με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων 24 h και στο Σχ. 13.19β οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης. Στα Σχ. 13.20α και 13.20β παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες των δοκιμών με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων 2 h. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.19α οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από τις δοκιμές για χρονικούς διαχωρισμούς 24 h πρακτικά συμπίπτουν μετά από 100 kPa κατακόρυφης τάσης, ενώ από το Σχ. 13.19β προκύπτει σύμπτωση πρακτικά μετά από 50 kPa κατακόρυφης τάσης. Αντίστοιχα από το Σχήμα 13.20α προκύπτει για τις καμπύλες από τις δοκιμές για χρονικούς διαχωρισμούς 2 h ότι η σύμπτωση των καμπυλών συμβαίνει για κατακόρυφη τάση 100 kPa, ενώ από το Σχ. 13.20β προκύπτει σύμπτωση πρακτικά μετά από 50 kPa κατακόρυφης τάσης. Ειδικά για τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 24h στα πλαίσια των οποίων πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές σε πολτούς με σημαντικά χαμηλότερα ποσοστά υγρασίας, είναι εμφανής η απόκλιση των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης των δοκιμών SK058, SK062 και SK075. Σε ό,τι αφορά τις κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης που προκύπτουν είναι εμφανής η κύρτωση των καμπυλών από τις δοκιμές στους πολτούς με χαμηλότερα ποσοστά υγρασίας (ως αποτέλεσμα του αρχικού μερικού κορεσμού, βλ. §5.5.2) και η καμπύλωση με τα κοίλα προς τα πάνω των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης από τις δοκιμές σε πολτούς με υψηλότερα ποσοστά υγρασίας. Μάλιστα για τις δοκιμές στα υψηλότερα ποσοστά υγρασίας οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης είναι πιο κοίλες και από την Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Burland, 1990) που παρατίθεται στο Σχ. 13.19β. Η μόνη

<sup>15</sup> Βλέπε προβλήματα που εμφανίζονται με έλεγχο του ύψους των δοκιμίων αναζυμωμένων υλικών στην §13.3.2.

κανονικοποιημένη καμπύλη που βρίσκεται πολύ κοντά στην ΘΓΕΣ είναι αυτή της δοκιμής SK110 από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 24h και η FSK110 από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 2h. Αυτό είναι αποτέλεσμα του αρχικού βαθμού κορεσμού του πολτού παρά της φύσης του συγκεκριμένου υλικού (ήταν 95%). Για σύγκριση οι πολτοί των δοκιμών SK058, SK062 και SK075 ήταν αντίστοιχα 81%, 83% και 88%. Αυτός ο αρχικός βαθμός κορεσμού του πολτού της δοκιμής SK110 προέκυψε μετά από ύγρανση (hydration) του πολτού επί 4 ημέρες<sup>16</sup> (ίδιος ήταν ο χρόνος και για τις δοκιμές SK058, SK062 και SK075). Αυτό αποτελεί πολύ χρήσιμο συμπέρασμα για την διαδικασία παρασκευής πολτών αναζυμωμένων υλικών αφού ακόμα και για ομολογουμένως πολύ υψηλά ποσοστά υγρασίας (110% του ορίου υδαρότητας ενός υλικού είναι πράγματι πολύ υψηλό ποσοστό υγρασίας για οποιοδήποτε υλικό) δεν είναι απαραίτητο ότι έχει επιτευχθεί ο αρχικός πλήρης κορεσμός πολτών υλικών υψηλής πλαστικότητας όπως ο καολίνης Speswhite ακόμα και για σημαντικούς χρόνους ύγρανσης. Άρα ο μεγάλος χρόνος ύγρανσης ενός πολτού αποτελεί βασική προϋπόθεση για να μπορεί να μελετηθεί η πραγματική εγγενής συμπεριφορά του υλικού που εξαρτάται μόνο από την φύση του και τίποτα άλλο, όπως στην προκειμένη περίπτωση τον αρχικό βαθμό κορεσμού. Το παράδειγμα της δοκιμής SK110 είναι χαρακτηριστικό. Αν εξεταστεί μόνο αυτή η δοκιμή, θα διαπιστωθεί ταύτιση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης του καολίνη με την ΘΓΕΣ. Αντίθετα αν εξεταστούν και οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης και των πολτών με μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας, προκύπτει ότι αυτές είναι πολύ κοίλες, πιο κοίλες μάλιστα και από την ΓΕΣ του Burland (1990).

Στο Σχ. 13.21α συσχετίζονται ο δείκτης εγγενούς συμπίεσης και οι τιμές του εγγενούς λόγου κενών στα 1, 100 και 1000 kPa με το αρχικό ποσοστό υγρασίας εκπεφρασμένο ως ποσοστό το ορίου υδαρότητας του υλικού ( $w_L = 64\%$ ). Στο Σχ. 13.21β συσχετίζονται ο δείκτης εγγενούς συμπίεσης και ο δείκτης αποφόρτισης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας εκπεφρασμένο ως ποσοστό το ορίου υδαρότητας του υλικού, ενώ τέλος στο Σχ. 13.21γ παρουσιάζεται μεγέθυνση για τον δείκτη αποφόρτισης. Οι τιμές των παραμέτρων εγγενούς συμπίεσης παρατίθενται στον Πίν. 13.11. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.21α, ο εγγενής λόγος κενών στο 1 kPa αποτελεί πράγματι συνάρτηση του ποσοστού υγρασίας (αφού η επιβληθείσα τάση είναι πρακτικά ελάχιστη για να μεταβάλλει ουσιωδώς τον αρχικό λόγο κενών του πολτού που εξαρτάται μόνο από το αρχικό ποσοστό υγρασίας), ενώ αντίθετα ο λόγος κενών στα 100 kPa και στα 1000 kPa,  $e^*_{100}$  και  $e^*_{1000}$  αντίστοιχα, όπως και ο δείκτης συμπίεσης  $C_c^*$  αποτελούν μάλλον σταθερές

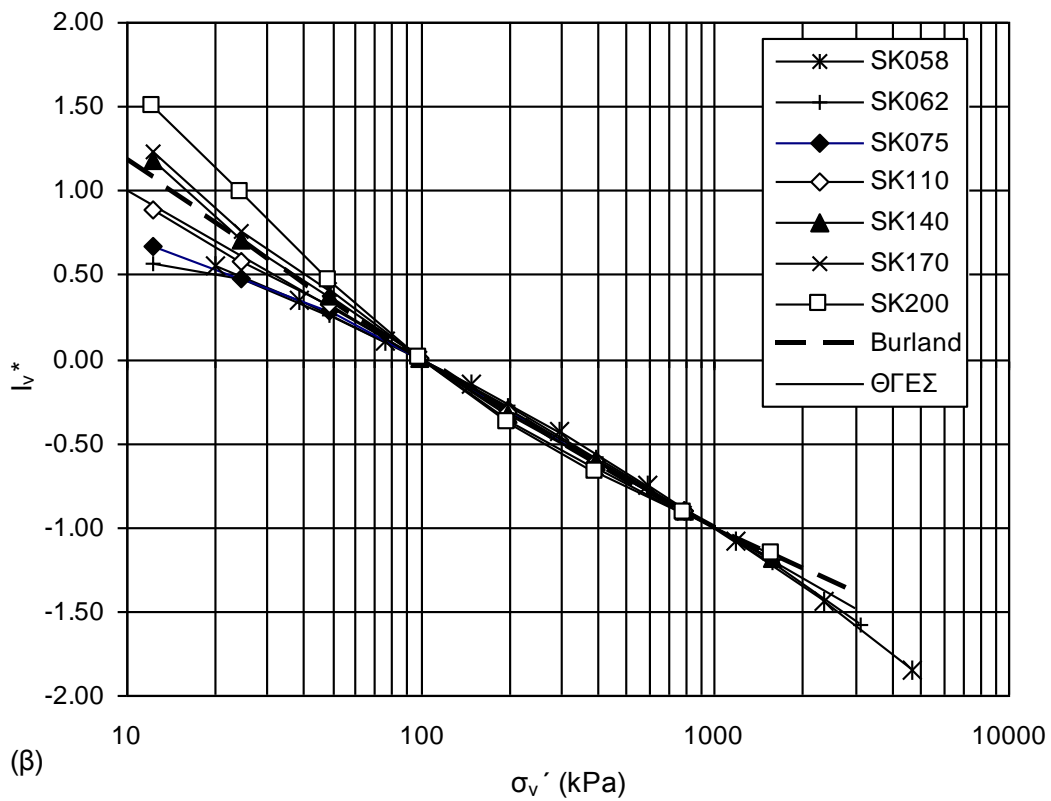
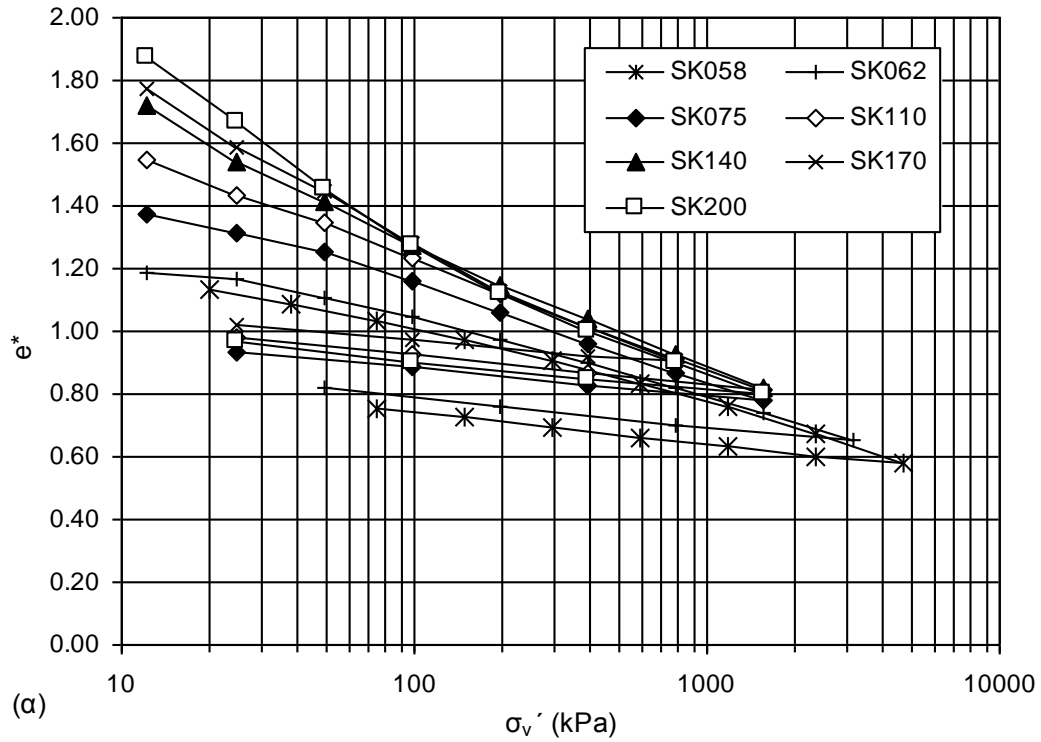
<sup>16</sup> Με παραμονή του πολτού μέσα σε υγραντήρα προκειμένου να μην υπάρχουν απώλειες υγρασίας από τον πολτό.



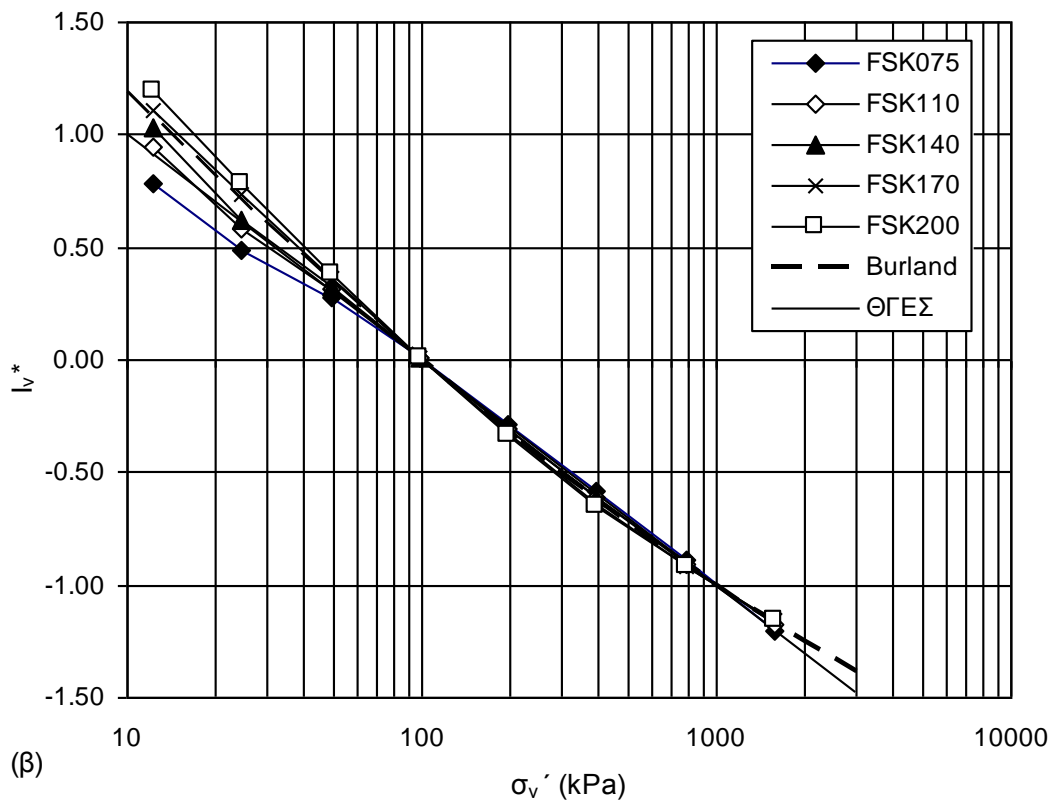
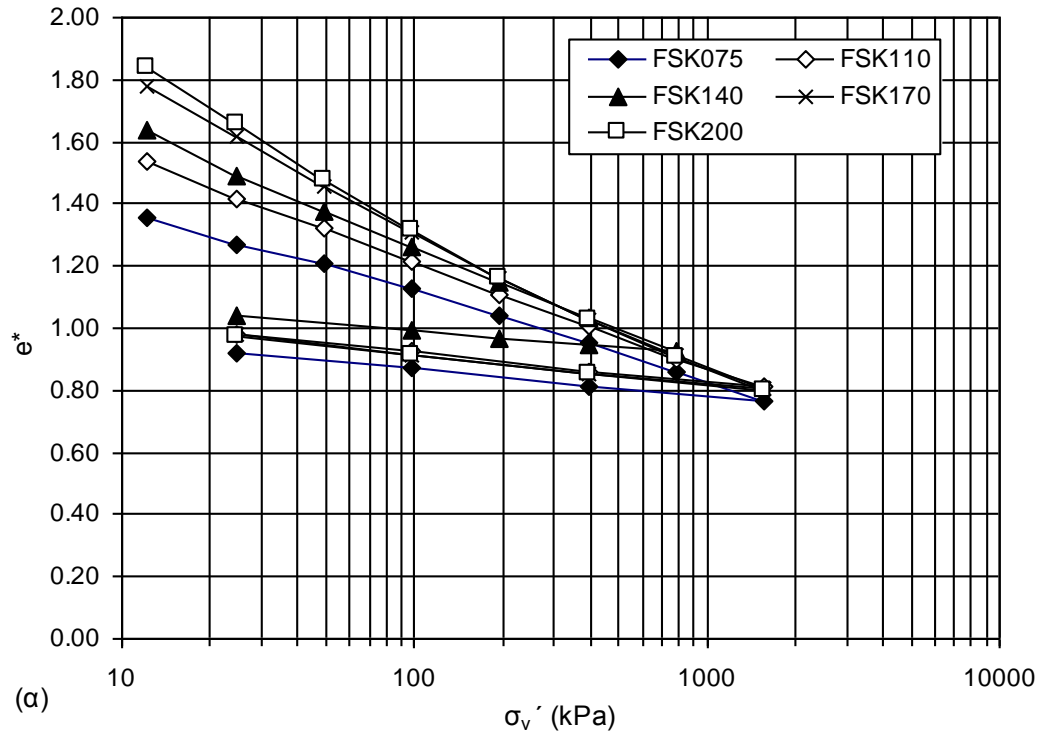
ανεξάρτητες του αρχικού ποσοστού υγρασίας για το συγκεκριμένο υλικό (παρόλο που πράγματι υπάρχει μία μικρή αύξησή τους με το ποσοστό υγρασίας). Ειδικά για τον δείκτη εγγενούς συμπίεσης  $C_c^*$  αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχ. 13.21β όπου παρατίθεται και η εξέλιξη του δείκτη αποφόρτισης  $C_r$ . Επίσης, για το συγκεκριμένο υλικό παρατηρούνται πολύ μικρές διαφορές μεταξύ των τιμών παραμέτρων από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 24h και χρονικούς διαχωρισμούς 2h, το οποίο αναμενόταν, αφού όπως φαίνεται στο Σχ. 13.22 όπου παρατίθενται οι καμπύλες καθιζήσεων-χρόνου από την δοκιμή SK-110, μέχρι τις 2h έχουν πρακτικά ολοκληρωθεί οι καθιζήσεις. Ειδικά για τις δοκιμές SK058 και SK062 παρατηρείται σημαντική μείωση του λόγου κενών στα 100 kPa και στα 1000 kPa καθώς και του εγγενούς δείκτη συμπίεσης, ως αποτέλεσμα του αρχικού μερικού κορεσμού, με την δοκιμή SK075 να αποτελεί (παρά και τον αρχικό μερικό κορεσμό αυτού του πολτού) το όριο της έναρξης εμφάνισης σταθερότητας για τα τρία αυτά μεγέθη. Και για αυτό το υλικό, το μέγεθος που αποδεικνύεται το λιγότερο ευαίσθητο ως προς το αρχικό ποσοστό υγρασίας είναι ο δείκτης αποφόρτισης.

Στο Σχ. 13.23 παρουσιάζονται οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από τις δοκιμές SK110 και VSK110, καθώς και SK200 και VSK200. Οι δοκιμές VSK ήταν δοκιμές που έγιναν στο ίδιο αρχικό ποσοστό υγρασίας του πολτού με τις αντίστοιχες δοκιμές SK προκειμένου να συγκριθούν αποτελέσματα δοκιμών με το ίδιο αρχικό ποσοστό υγρασίας και έτσι να αξιολογηθούν οι διαφορές που καταγράφονται στις δοκιμές που γίνονται με διαφορετικά ποσοστά υγρασίας. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.23 οι καμπύλες από δοκιμές με το ίδιο ακριβώς αρχικό ποσοστό υγρασίας –σε δυο διαφορετικά μάλιστα εύρη τιμών του αρχικού ποσοστού υγρασίας– προκύπτουν με πολύ μικρές διαφορές μεταξύ τους ανά ποσοστό υγρασίας. Κατά συνέπεια οι καταγραφόμενες διαφορές στις καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από ποσοστό υγρασίας σε ποσοστό υγρασίας είναι στατιστικά σημαντικές. Παρόμοιες δοκιμές έγιναν και σε δείγματα της Αργίλου Κορίνθου (§13.3.5) και σε δείγματα της Μάργας Πατρών (§13.3.6).

Τέλος στον Πίν. 13.12 παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης για την δοκιμή SK-200. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης στρέφει έντονα τα κοίλα προς τα πάνω (αρνητικό  $d^*$ ), ενώ είναι μάλλον μικρές οι διαφορές που προκύπτουν από την θεωρητική εκτίμηση των  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  (χρήση των Εξ. 10.18 έως 10.22) και την εμπειρική (προσομοίωση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης απευθείας με πολυωνμική εξίσωση τρίτου βαθμού).



**Σχήμα 13.19.** α) Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, και β) κανονικοποιημένες καμπύλες Καολίνη Speswhite από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς μεταξύ διαδοχικών φορτίων 24h.



**Σχήμα 13.20.** α) Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, και β) κανονικοποιημένες καμπύλες Καολίνη Speswhite από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς μεταξύ διαδοχικών φορτίων 2h.

**Πίνακας 13.10.** Αρχικά ποσοστά υγρασίας δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένο Καολίνη Speswhite ( $w_L = 64\%$ ).

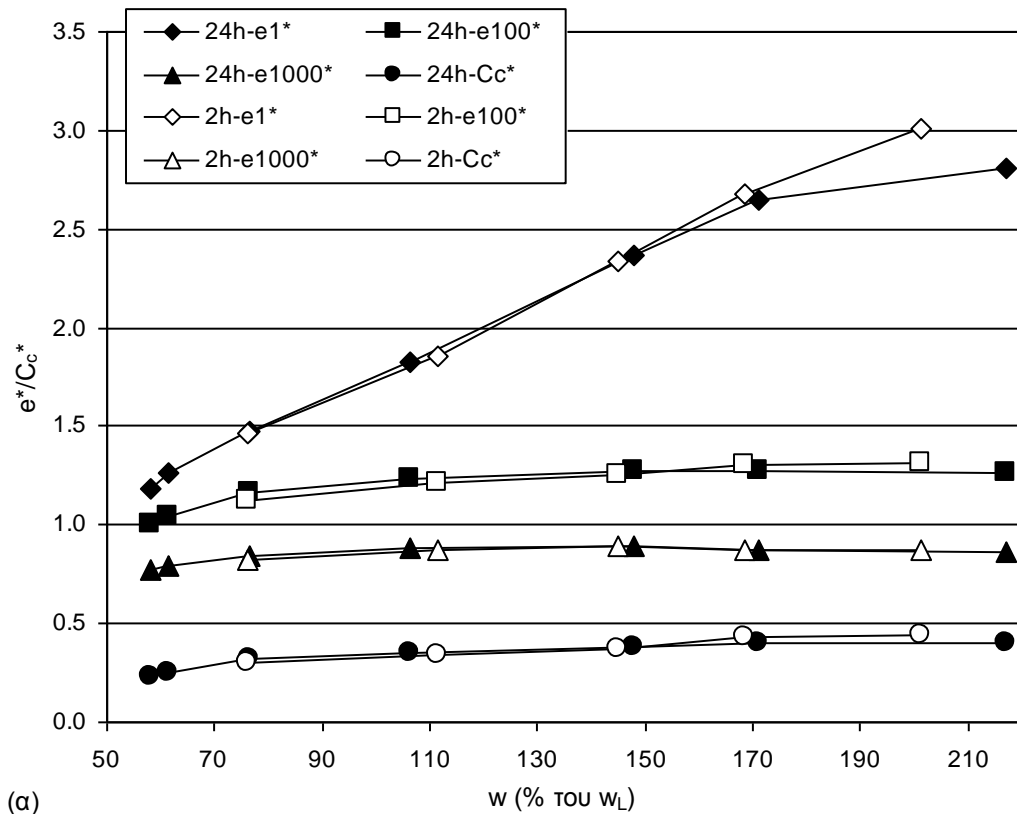
Δοκιμή	Αρχικό ποσοστό υγρασίας στόχος ως ποσοστό του $w_L$	Αρχικό ποσοστό υγρασίας-στόχος	Αρχικό ποσοστό υγρασίας που επιτεύχθηκε	Αρχικό ποσοστό υγρασίας που επιτεύχθηκε ως ποσοστό του $w_L$
	(%)	(%)	(%)	(%)
SK058	58	37.1	37.1	58.0
SK062	62	39.7	39.4	61.5
SK075	75	48.0	48.9	76.4
SK110	110	70.4	68.1	106.5
SK140	140	89.6	94.8	148.0
SK170	170	108.8	109.6	171.2
SK200	200	128.0	139.0	217.2
FSK075	75	48.0	48.8	76.3
FSK110	110	70.4	71.3	111.5
FSK140	140	89.6	92.8	144.9
FSK170	170	108.8	107.8	168.4
FSK200	200	128.0	128.7	201.1

**Πίνακας 13.11.** Παράμετροι εγγενούς συμπιεστότητας από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένο Καολίνη Speswhite ( $w_L = 64\%$ ).

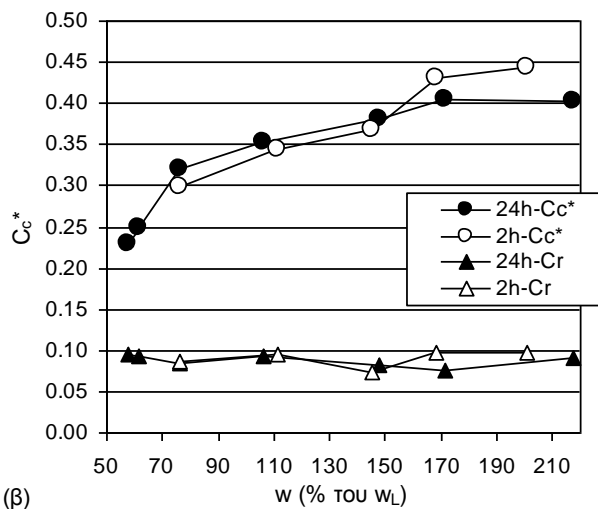
Δοκιμή	$e^*_o$	$e^*_1$	$e^*_{100}$	$e^*_{1000}$	$C_c^*$	$C_r$
SK058	1.181	1.181	1.006	0.776	0.230	0.095
SK062	1.256	1.266	1.044	0.794	0.250	0.094
SK075	1.451	1.474	1.159	0.838	0.321	0.085
SK110	1.863	1.826	1.230	0.878	0.352	0.092
SK140	2.553	2.369	1.272	0.891	0.381	0.081
SK170	3.046	2.643	1.276	0.871	0.405	0.076
SK200	3.457	2.806	1.269	0.865	0.404	0.092
FSK075	1.463	1.463	1.124	0.825	0.299	0.087
FSK110	1.911	1.852	1.214	0.870	0.344	0.095
FSK140	2.569	2.337	1.258	0.889	0.369	0.074
FSK170	3.130	2.683	1.304	0.874	0.430	0.098
FSK200	3.707	3.006	1.311	0.868	0.444	0.098

**Πίνακας 13.12.** Εγγενείς παράμετροι απόστασης και εμπειρικές τιμές παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  για την δοκιμή SK200 σε αναζυμωμένο Καολίνη Speswhite ( $w_L = 64\%$ ).

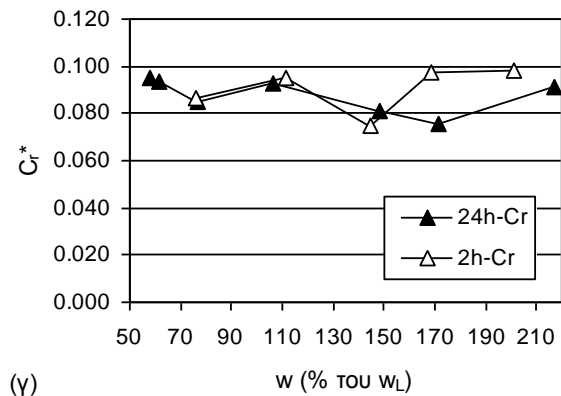
Δοκιμή	$d^*$ (υπολ.)	$d^*$ (προσέγγιση)		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
SK200	-0.055	-0.031	Από το $d^*$	3.513	-2.446	0.407	-0.031
			Εμπειρικά	3.023	-1.253	-0.299	0.089



(α)

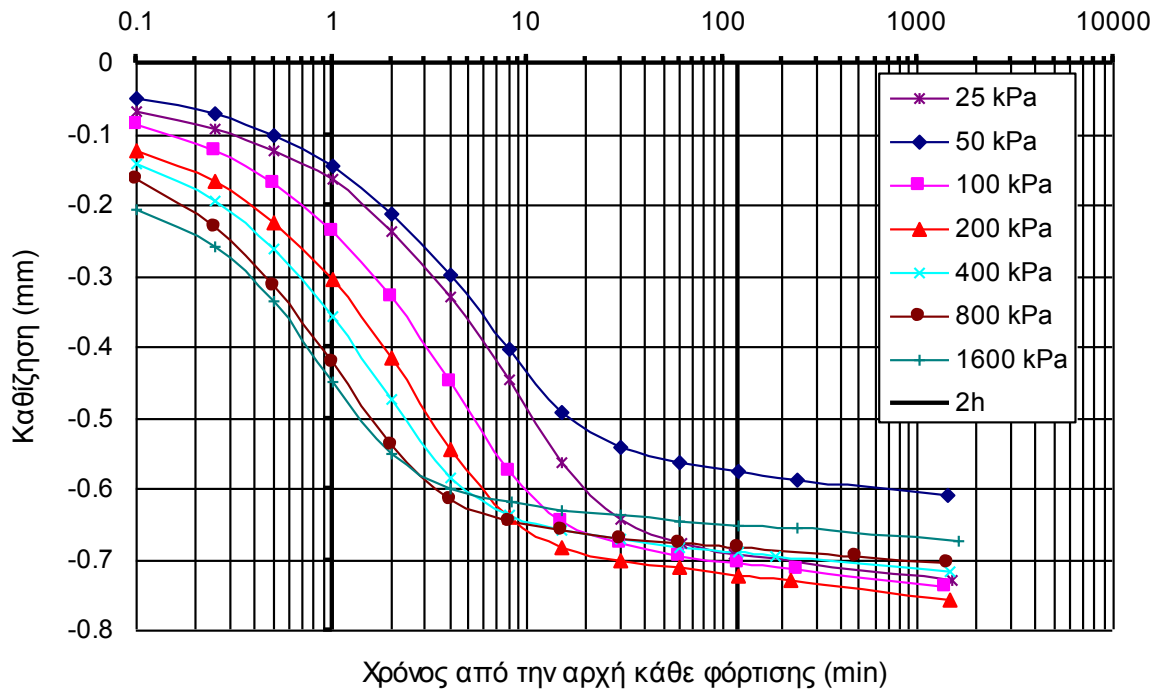


(β)

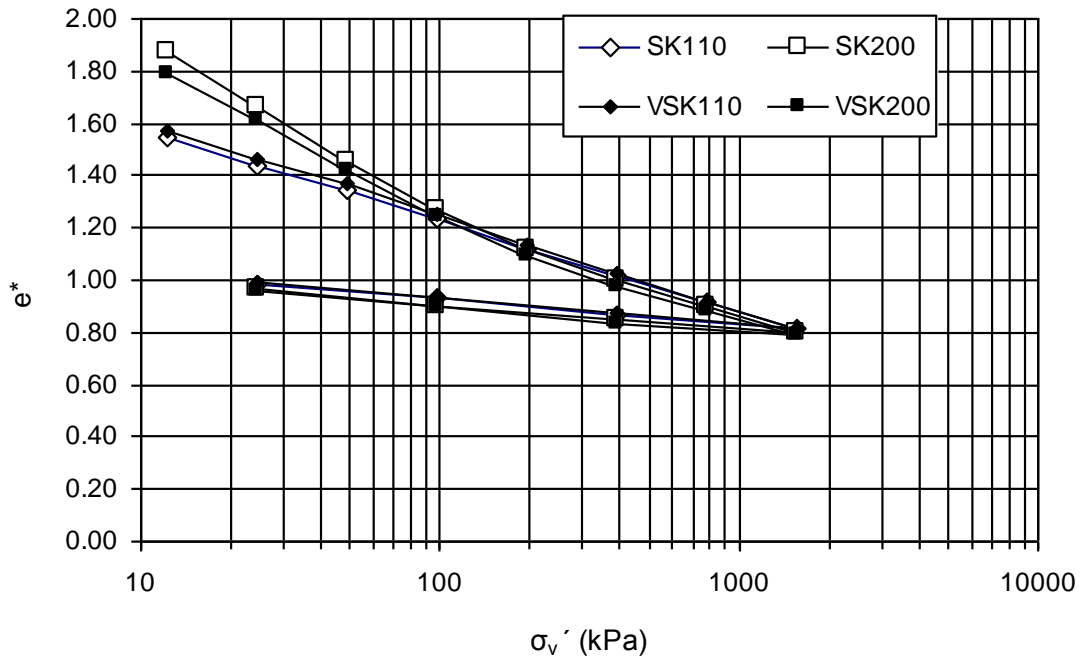


(γ)

**Σχήμα 13.21.** α) Εξέλιξη του εγγενούς λόγου κενών στα 1, 100 και 1000 kPa και του δείκτη εγγενούς συμπίεσης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών εκπεφρασμένο ως ποσοστό του ορίου υδαρότητας, και β) εξέλιξη του δείκτη εγγενούς συμπίεσης και του δείκτη αποφόρτισης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών εκπεφρασμένο ως ποσοστό του ορίου υδαρότητας, για τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς 24h και 2h (στο γ) παρουσιάζεται μεγέθυνση για καλύτερη απεικόνιση της εξέλιξης του δείκτη αποφόρτισης).



Σχήμα 13.22. Καμπύλες καθίζησης-χρόνου για τις φορτίσεις στην δοκιμή SK110.



Σχήμα 13.23. Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για τις δοκιμές SK110 και VSK110, καθώς και SK200 και VSK200.

### 13.3.8 Δοκιμές στην Άργιλο Λονδίνου

Όπως προαναφέρθηκε στην §13.3.2, κατά τη διάρκεια της εργαστηριακής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής δεν κατέστη διαθέσιμο κάποιο εδαφικό υλικό πολύ μεγάλης πλαστικότητας από τον ελλαδικό χώρο. Γι' αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε Άργιλο Λονδίνου που πραγματοποιήθηκαν από τον γράφοντα στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του πανεπιστημίου Imperial College του Λονδίνου στα πλαίσια της διπλωματικής του εργασίας εκεί (Bardanis, 1998). Τα φυσικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά της Αργίλου Λονδίνου παρατίθενται στο Κεφάλαιο 11 του παρόντος τόμου.

Οι δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν σε συμπιεσόμετρα οπίσθιας φόρτωσης της Wykeham Farrance σε δακτυλίους διαμέτρου 75 mm και ύψους 20 mm με λεία εσωτερική επιφάνεια και πορολίθους τόσο στην άνω όσο και στην κάτω πλευρά των δοκιμίων με δυνατότητα σχετικής κίνησης ως προς τον δακτύλιο μόνο του πάνω πορολίθου. Δεδομένου ότι επρόκειτο για συμπιεσόμετρα οπίσθιας φόρτωσης η επιρροή της γωνίας του μοχλού φόρτισης ήταν ακόμα μικρότερη από την περίπτωση των συμπιεσομέτρων εμπρόσθιας φόρτωσης<sup>17</sup>.

Η διαδικασία τοποθέτησης των δοκιμίων ήταν και εδώ αυτή που περιγράφεται στην §13.3.2. Ιδιαίτερη προσοχή επιδείχθηκε κατά την παρασκευή των πολτών, την τοποθέτησή τους στις κυψέλες φόρτισης και την ίδια την επιβολή της φόρτισης. Δεδομένου ότι αυτό το υλικό είναι αρκετά υψηλής πλαστικότητας και ορίου υδαρότητας (για τα πολύ υψηλού ποσοστού υγρασίας δοκίμια,  $w_o = 2.0$   $w_L = 2.0 \cdot 79 = 158\%$ ) η παρασκευή των πολτών και των δοκιμίων αποδείχτηκε ιδιαίτερα επίπονη διαδικασία.

Λόγω του περιορισμένου χρόνου της εργαστηριακής διερεύνησης στα πλαίσια της οποίας έγιναν οι δοκιμές αυτές, και καθώς ενδιέφεραν αποκλειστικά οι καμπύλες τάσης-λόγου κενών επιλέχθηκε η καταστρατήγηση της απαίτησης για σταθερό  $\Delta\sigma_v'/\sigma_v'$  και υλοποιήθηκε αλληλουχία φορτίσεων που διερχόταν και από την τάση των 100 kPa και από την τάση των 1000 kPa (Σκέπασμα-6.25-12.5-25-50-100-250-500-1000 kPa και μετά αποφόρτιση). Γι' αυτόν το λόγο τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών θεωρούνται εξίσου αξιόπιστα με τα προηγούμενα

<sup>17</sup> Τα συμπιεσόμετρα οπίσθιας φόρτωσης αποτελούν στην αρχική τους μορφή σχέδιο του Bishop που αποσκοπούσε ακριβώς στον περιορισμό της στροφής του μοχλού φόρτωσης χάρη στη δυνατότητα μετακίνησης του σημείου στροφής του μοχλού ως προς το δοκίμιο κατά την διάρκεια της δοκιμής χωρίς να αλλοιώνεται η τιμή της επιβαλλόμενης κατακόρυφης τάσης.

που παρουσιάστηκαν ως προς την εξέλιξη του λόγου κενών και της παραμόρφωσης με την τάση αλλά εκφράζονται ορισμένες επιφυλάξεις για την εξέλιξη των παραμέτρων στερεοποίησης με την αύξηση της τάσης (οι οποίες όμως δεν ενδιαφέρουν στην συγκεκριμένη πειραματική διερεύνηση).

Εκτελέστηκαν συνολικά 5 δοκιμές στα πλαίσια της διερεύνησης των εγγενών ιδιοτήτων συμπίεστικότητας:

- 5 δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων των 24 ωρών, φόρτιση μέχρι τα 1000 kPa με μη σταθερό βήμα αύξησης φορτίου  $\Delta\sigma'_v/\sigma'_v$ , διάμετρο δοκιμίων 75mm και ύψος περί τα 20mm<sup>18</sup>, και τα αρχικά ποσοστά υγρασίας του Πίν. 13.13 (δοκιμές LC).

Στο Σχ. 13.24α παρουσιάζονται οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης των δοκιμών με χρονικούς διαχωρισμούς φορτίσεων 24 h και στο Σχ. 13.24β οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.24α οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από τις δοκιμές για χρονικούς διαχωρισμούς 24 h πρακτικά συμπίπτουν μετά από 100 kPa κατακόρυφης τάσης, ενώ από το Σχ. 13.24β προκύπτει σύμπτωση πρακτικά μετά από 50 kPa κατακόρυφης τάσης. Σε ό,τι αφορά τις κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης που προκύπτουν, είναι εμφανής η καμπύλωση με τα κοίλα προς τα πάνω των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης από τις δοκιμές σε πολτούς με υψηλότερα ποσοστά υγρασίας (μοναδική εξαίρεση αποτελεί η καμπύλη από την δοκιμή LC075). Μάλιστα για τις δοκιμές στα υψηλότερα ποσοστά υγρασίας οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης είναι πιο κοίλες και από την Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Burland, 1990) που παρατίθεται στο Σχ. 13.24β.

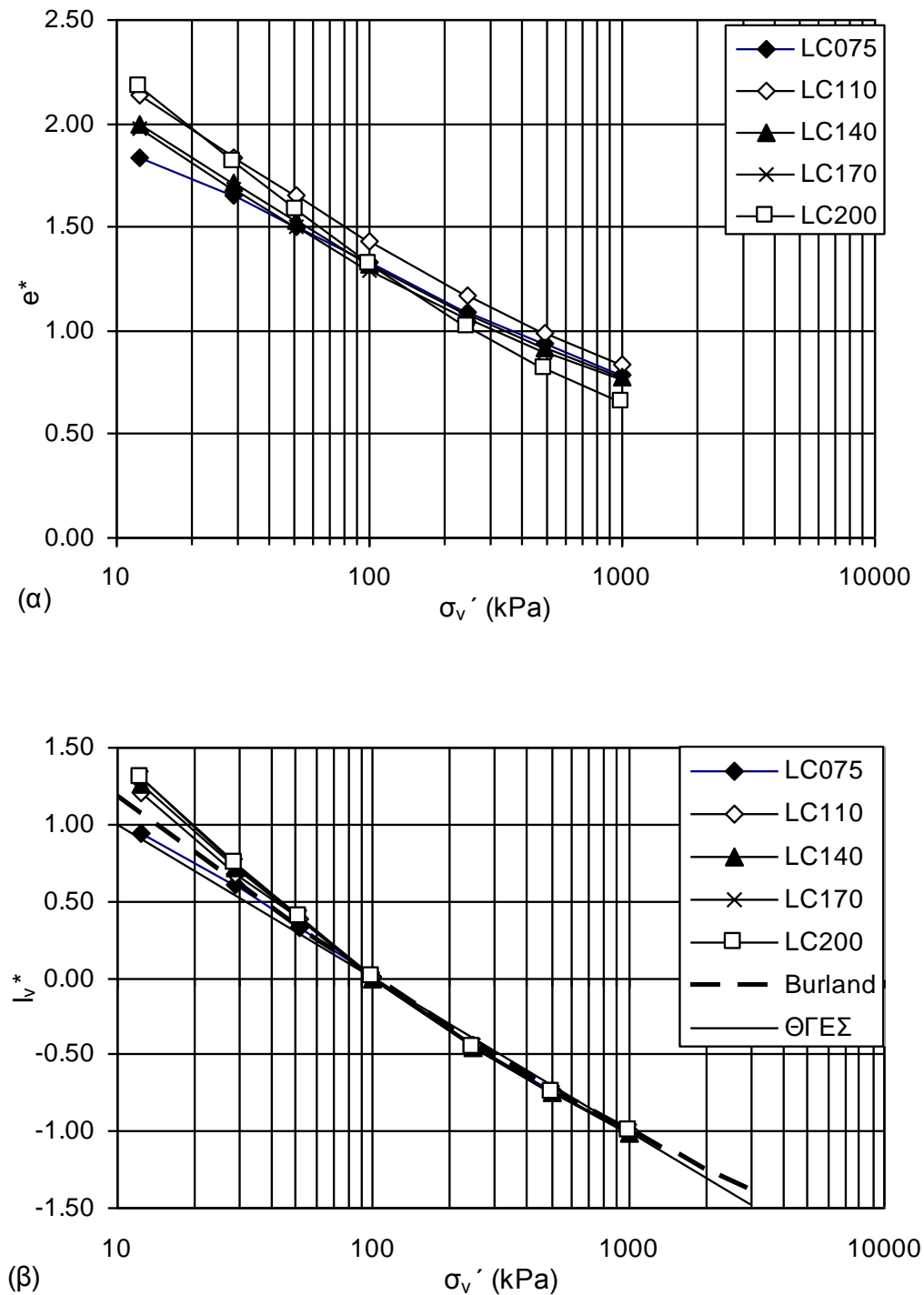
Στο Σχ. 13.25α συσχετίζονται ο δείκτης εγγενούς συμπίεσης και οι τιμές του εγγενούς λόγου κενών στα 100 και 1000 kPa με το αρχικό ποσοστό υγρασίας εκπεφρασμένο ως ποσοστό το ορίου υδαρότητας του υλικού ( $w_L = 79\%$ ). Στο Σχ. 13.25β συσχετίζονται ο δείκτης εγγενούς συμπίεσης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας εκπεφρασμένο ως ποσοστό το ορίου υδαρότητας του υλικού. Οι τιμές των παραμέτρων εγγενούς συμπίεσης παρατίθενται στον Πίν. 13.14. Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.25α, ο εγγενής λόγος κενών στα 100 kPa και στα 1000 kPa,  $e^*_{100}$  και  $e^*_{1000}$  αντίστοιχα, όπως και ο δείκτης συμπίεσης  $C_c^*$  αποτελούν μάλλον σταθερές ανεξάρτητες

---

<sup>18</sup> Βλέπε προβλήματα που εμφανίζονται με έλεγχο του ύψους των δοκιμίων αναζυμωμένων υλικών στην §13.3.2.



του αρχικού ποσοστού υγρασίας για το συγκεκριμένο υλικό (παρόλο που πράγματι υπάρχει μία μικρή αύξησή τους με το ποσοστό υγρασίας). Ειδικά για τον δείκτη εγγενούς συμπίεσης  $C_c^*$  αυτό φαίνεται καλύτερα στο Σχ. 13.25β.



**Σχήμα 13.24.** α) Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, και β) κανονικοποιημένες καμπύλες Αργίλου Λονδίνου από τις δοκιμές με χρονικούς διαχωρισμούς μεταξύ διαδοχικών φορτίων 24h.

Τέλος στον Πίν. 13.15 παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης για την δοκιμή LC-140. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης στρέφει έντονα τα κοίλα προς τα πάνω (αρνητικό  $d^*$ ), ενώ είναι πολύ μεγάλες οι διαφορές που προκύπτουν από την θεωρητική εκτίμηση των  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  (χρήση των Εξ. 10.18 έως 10.22) και την εμπειρική (προσομοίωση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης απευθείας με πολυωνυμική εξίσωση τρίτου βαθμού).

**Πίνακας 13.13.** Αρχικά ποσοστά υγρασίας δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένη Άργιλο Λονδίνου ( $w_L = 79\%$ ).

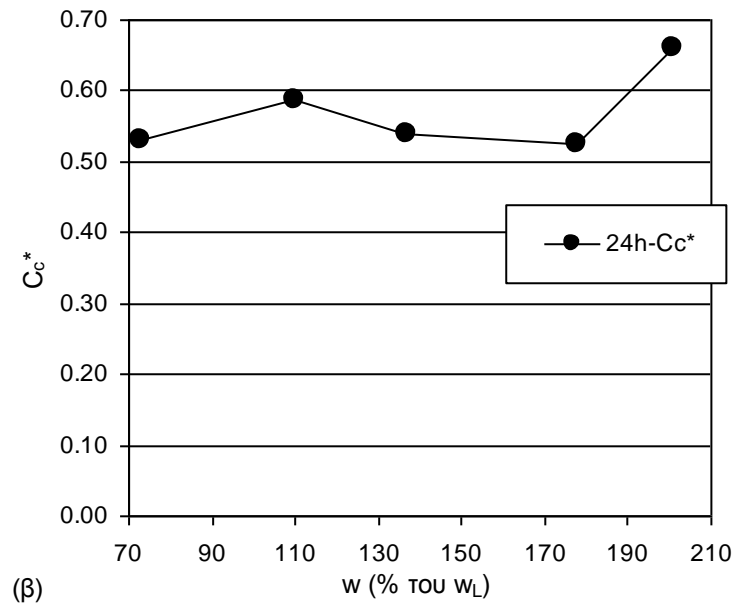
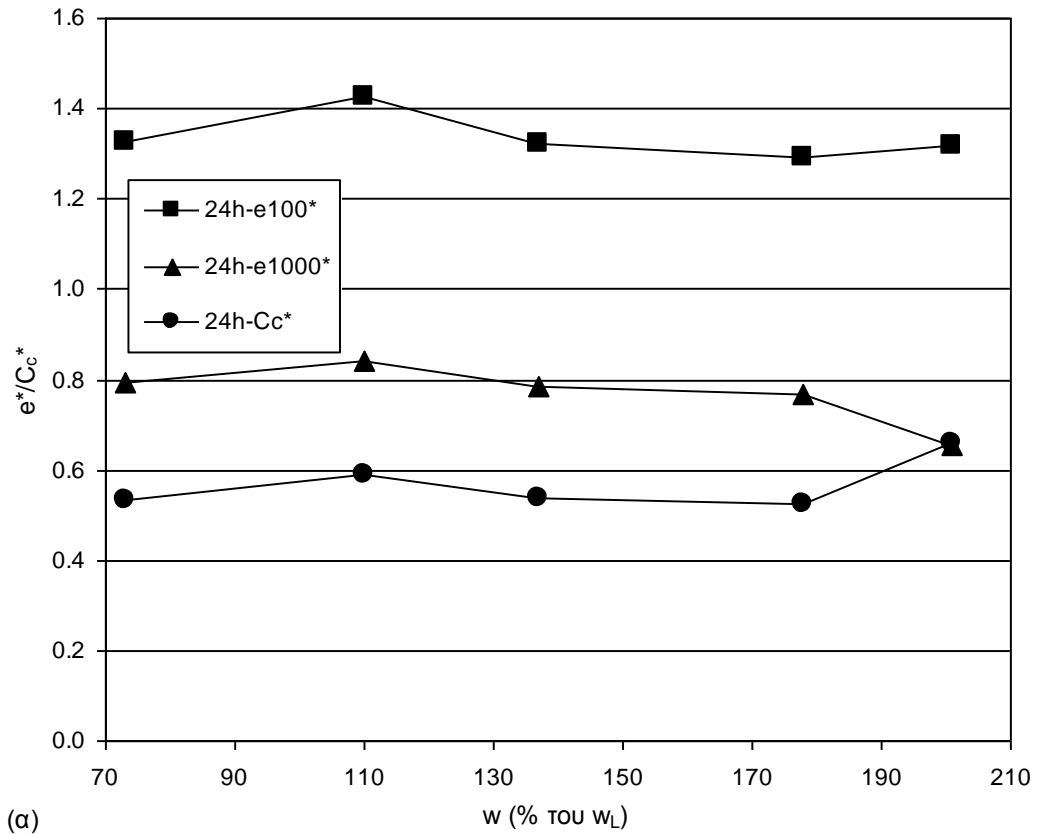
Δοκιμή	Αρχικό ποσοστό υγρασίας στόχος ως ποσοστό του $w_L$	Αρχικό ποσοστό υγρασίας-στόχος	Αρχικό ποσοστό υγρασίας που επιτεύχθηκε	Αρχικό ποσοστό υγρασίας που επιτεύχθηκε ως ποσοστό του $w_L$
	(%)	(%)	(%)	(%)
LC075	75	59.25	58.0	73
LC110	110	86.9	87.0	110
LC140	140	110.6	108.0	137
LC170	170	134.3	141.0	178
LC200	200	158.0	159.0	201

**Πίνακας 13.14.** Παράμετροι εγγενούς συμπιεστότητας από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένη Άργιλο Λονδίνου ( $w_L = 79\%$ ).

Δοκιμή	$e^*_{100}$	$e^*_{1000}$	$C_c^*$
LC075	1.327	0.795	0.532
LC110	1.428	0.840	0.588
LC140	1.322	0.783	0.538
LC170	1.294	0.768	0.526
LC200	1.317	0.656	0.661

**Πίνακας 13.15.** Εγγενείς παράμετροι απόστασης και εμπειρικές τιμές παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  για την δοκιμή LC140 σε αναζυμωμένη Άργιλο Λονδίνου ( $w_L = 79\%$ ).

Δοκιμή	$d^*$ (υπολ.)	$d^*$ (προσέγγιση)		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
LC140	-0.042	-0.030	Από το $d^*$	3.450	-2.382	0.386	-0.029
			Εμπειρικά	2.828	-1.342	-0.149	0.057



**Σχήμα 13.25.** α) Εξέλιξη του εγγενούς λόγου κενών στα 100 και 1000 kPa και του δείκτη εγγενούς συμπίεσης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών εκπεφρασμένο ως ποσοστό του ορίου υδαρότητας, και β) εξέλιξη του δείκτη εγγενούς συμπίεσης με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών εκπεφρασμένο ως ποσοστό του ορίου υδαρότητας, για την Άργιλο Λονδίνου.

### 13.3.9 Συμπεράσματα από τις δοκιμές συμπίεσης σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά

Από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης που πραγματοποιήθηκαν στα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά για την διερεύνηση της επιρροής του αρχικού ποσοστού υγρασίας του πολτού μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- α) Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα συγκεκριμένα εδαφικά υλικά φαίνεται ότι οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης των λιγότερο πλαστικών υλικών (Άργιλος Χανίων, Άργιλος Κορίνθου και Μάργα Πατρών) βρίσκονται πιο κοντά στη θεωρητική γραμμή εγγενούς συμπίεσης παρά στη γραφική παράσταση της γραμμής εγγενούς συμπίεσης όπως εκφράζεται από τις σχέσεις των Burland (1990) και Chandler (2000). Αντίθετα οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης των πιο πλαστικών υλικών (Καολίνης Speswhite και Άργιλος Λονδίνου) παρουσιάζονται πιο κοίλες ακόμα και από τις γραφικές παραστάσεις των σχέσεων αυτών.
- β) Από τα αποτελέσματα των δοκιμών με χρονικούς διαχωρισμούς μεταξύ διαδοχικών φορτίσεων 24 h και χρονικούς διαχωρισμούς μεταξύ φορτίσεων 2 h προκύπτει ότι, για ολοκληρωμένη πρωτεύουσα στερεοποίηση όπως στην περίπτωση των εδαφικών υλικών που πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές αυτές, ο εγγενής δείκτης συμπίεσης και οι τιμές του λόγου κενών στα 100 και στα 1000 kPa προκύπτουν πρακτικά οι ίδιες για τα τρία από τα τέσσερα υλικά (Άργιλος Χανίων, Μάργα Πατρών και Καολίνης Speswhite) και πολύ κοντινές για το τέταρτο (Άργιλος Κορίνθου). Για το πέμπτο υλικό, την Άργιλο Λονδίνου, δεν είχε πρακτική σημασία να πραγματοποιηθούν τέτοιες συγκριτικές δοκιμές αφού η ολοκλήρωση της πρωτεύουσας στερεοποίησης του υλικού αυτή παίρνει πολύ μεγαλύτερο χρόνο από 2h, και τιμές μικρότερων χρονικών διαχωρισμών από τις 24h όπως π.χ. 4h ή 6h δεν έχουν πρακτική σημασία ειδικά όταν χρησιμοποιούνται συμβατικά συμπιεσόμετρα στα οποία απαιτείται παρουσία προσωπικού για την αύξηση του φορτίου.
- γ) Κοινά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών για τα οποία προέκυψε το προηγούμενο συμπέρασμα είναι η μικρή ως μέση πλαστικότητα και η απουσία οργανικών. Ο Καολίνης Speswhite μπορεί να είναι υλικό υψηλής πλαστικότητας αλλά έχει όριο υδαρότητας 64% δηλαδή χαμηλό προς το όριο της ζώνης τιμών ορίου υδαρότητας για υλικά υψηλής πλαστικότητας και συγκεκριμένη ορυκτολογία με ένα μόνο ορυκτό, τον καολινίτη που είναι το αργιλικό ορυκτό με τη μικρότερη πλαστικότητα και δραστηκότητα σε σχέση με τα τρία βασικά αργιλικά ορυκτά.

- δ) Με βάση τα αποτελέσματα αυτά συνάγεται ότι, ιδίως για δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης που αποσκοπούν στην παρασκευή δοκιμών από αναζυμωμένο εδαφικό υλικό με συγκεκριμένη φόρτιση (στις οποίες δεν ενδιαφέρει η ακριβής μέτρηση παραμέτρων αλλά η απόκτηση συγκεκριμένης ιστορίας φόρτισης και η επίτευξη συγκεκριμένου αρχικού λόγου κενών) είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται χρονικοί διαχωρισμοί μικρότεροι των 24 h. Οι χρονικοί διαχωρισμοί αυτοί πρέπει να καθορίζονται με βάση την εμπειρία από αρχικές δοκιμές για τη μελέτη της συμπιεστότητας του αναζυμωμένου εδαφικού υλικού με χρονικούς διαχωρισμούς 24 h ή εφόσον υπάρχει η απαραίτητη εμπειρία στο συγκεκριμένο υλικό να επιλέγονται εξαρχής με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά του.
- ε) Επίσης όπως προέκυψε από τις δοκιμές στην Αργίλο Χανίων, τα αποτελέσματα δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά για διαφορετικές τιμές του λόγου διαμέτρου προς ύψος και του λόγου αύξησης της τάσης προς την υπάρχουσα τάση πρακτικά ταυτίζονται.
- στ) Η σημασία αυτού είναι ότι από κοινού με τα συμπεράσματα σε ό,τι αφορά τη δυνατότητα χρησιμοποίησης χρονικών διαχωρισμών μικρότερων των 24 h παρέχεται η δυνατότητα παρασκευής δοκιμών αναζυμωμένου εδαφικού υλικού δεδομένης ιστορίας φόρτισης το οποίο προορίζεται για χρήση σε άλλη συσκευή σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, για την παρασκευή δοκιμίου αναζυμωμένης Αργίλου Χανίων στερεοποιημένης μέχρι κατακόρυφη τάση 400 kPa θα έπρεπε για χρονικό διαχωρισμό μεταξύ διαδοχικών φορτίσεων 24 h και λόγο αύξησης τάσης προς εφαρμοζόμενη τάση 1 να χρειάζονται για την εκτέλεση της δοκιμής μονοδιάστατης συμπίεσης 8 ημέρες (θεωρώντας μάλιστα ότι η αποφόρτιση γίνεται σε ένα στάδιο και διαρκεί επίσης 24 h):

1<sup>η</sup> ημέρα: Εισαγωγή πολτού στο δοκίμιο και φορτίο σκεπάσματος

2<sup>η</sup> ημέρα: 25 kPa

3<sup>η</sup> ημέρα: 50 kPa

4<sup>η</sup> ημέρα: 100 kPa

5<sup>η</sup> ημέρα: 200 kPa

6<sup>η</sup> ημέρα: 400 kPa

7<sup>η</sup> ημέρα: Αποφόρτιση.

8<sup>η</sup> ημέρα: Εξαγωγή δοκιμίου από την συσκευή προς περαιτέρω χρήση.

Υιοθετώντας λόγο αύξησης τάσης προς εφαρμοζόμενη τάση 3 και χρονικό διαχωρισμό μεταξύ διαδοχικών φορτίσεων 2 h, αφήνοντας την φόρτιση με το σκέπασμα και την

αποφόρτιση (σε ένα στάδιο) να διαρκούν από 24 h, ο απαιτούμενος χρόνος για την εκτέλεση της δοκιμής μονοδιάστατης συμπίεσης για την παρασκευή του δοκιμίου περιορίζεται στις 2 ημέρες:

1<sup>η</sup> ημέρα: Εισαγωγή πολτού στο δοκίμιο και φορτίο σκεπάσματος

2<sup>η</sup> ημέρα: 09.00: 25 kPa – 11.00: 100 kPa – 13.00: 400 kPa – 15.00: Αποφόρτιση

3<sup>η</sup> ημέρα: Εξαγωγή δοκιμίου από την συσκευή προς περαιτέρω χρήση.

Προκειμένου για ακόμα μεγαλύτερες τιμές της τάσης μέχρι τις οποίες πρέπει να συμπιεστεί το δοκίμιο γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι διαφορές στους χρόνους παρασκευής δοκιμίων γίνονται ακόμα μεγαλύτερες. Η σημασία των διαπιστώσεων αυτών υπήρξε κρίσιμης σημασίας για την ταχεία ολοκλήρωση των απαιτούμενων δοκιμών προπαρασκευής δοκιμίων για χρήση σε άλλου είδους δοκιμές όπως δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και ξήρανσης δοκιμίων δεδομένης ιστορίας φόρτισης (βλ. Κεφ. 14).

- ζ) Σε ό,τι αφορά την επιρροή του αρχικού ποσοστού υγρασίας του πολτού, σχεδόν σε όλα τα υλικά φάνηκε ότι παρόλο που οι βασικές παράμετροι εγγενούς συμπιεστότητας ( $e^*_{100}$ ,  $e^*_{1000}$  και  $C_c^*$ ) παραμένουν πρακτικά σταθερές, στην πραγματικότητα έχουν μία τάση αύξησης με την αύξηση του αρχικού ποσοστού υγρασίας του πολτού. Αυτό έγινε ακόμα πιο εμφανές στις δοκιμές που έγιναν στον Καολίνη Speswhite στον οποίο πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και σε πιο χαμηλά ακόμα ποσοστά από το 75% του ορίου υδαρότητας που έγιναν στα υπόλοιπα υλικά.
- η) Ειδικά για τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε πολτούς με σημαντικά χαμηλότερα ποσοστά υγρασίας, υπήρξε εμφανής η απόκλιση των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης λόγω έντονης κύρτωσής τους. Σε ό,τι αφορά τις κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης που προκύπτουν είναι εμφανής η κύρτωση των καμπυλών από τις δοκιμές στους πολτούς με χαμηλότερα ποσοστά υγρασίας (ως αποτέλεσμα του αρχικού μερικού κορεσμού, βλ. §5.5.2) και η καμπύλωση με τα κοίλα προς τα πάνω των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης από τις δοκιμές σε πολτούς με υψηλότερα ποσοστά υγρασίας. Μάλιστα για τις δοκιμές στα υψηλότερα ποσοστά υγρασίας οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης είναι πιο κοίλες και από την Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Burland, 1990) για τα υλικά υψηλότερης πλαστικότητας. Στους πολτούς με αρχικό ποσοστό υγρασίας ακόμα και 110% του ορίου υδαρότητας παρατηρήθηκαν τιμές του βαθμού κορεσμού μικρότερες του 100% (βλ. §13.3.7) Αυτές οι τιμές του αρχικού βαθμού κορεσμού προέκυψαν μετά από ύγρανση (hydration) των

πολτών επί 4 ημέρες<sup>19</sup>. Ενώ αυτός ο χρόνος υπήρξε επαρκής για τα λιγότερο πλαστικά υλικά, αντίθετα για τα πιο πλαστικά δεν επέτρεψε την απόκτηση αρχικού βαθμού κορεσμού 100%. Αυτό αποτελεί πολύ χρήσιμο συμπέρασμα για τη διαδικασία παρασκευής πολτών αναζυμωμένων υλικών αφού ακόμα και για ομολογουμένως πολύ υψηλά ποσοστά υγρασίας (110% του ορίου υδαρότητας ενός υλικού είναι πράγματι πολύ υψηλό ποσοστό υγρασίας για οποιοδήποτε υλικό) και σημαντικούς χρόνους ύγρυνσης δεν είναι απαραίτητο ότι έχει επιτευχθεί ο αρχικός πλήρης κορεσμός πολτών υλικών υψηλής πλαστικότητας όπως ο καολίνης Speswhite και άρα να μπορεί να μελετηθεί η πραγματική εγγενής συμπεριφορά του υλικού που εξαρτάται μόνο από τη φύση του και τίποτα άλλο, όπως στην προκειμένη περίπτωση τον αρχικό βαθμό κορεσμού. Το παράδειγμα της δοκιμής SK110 είναι χαρακτηριστικό. Αν εξεταστεί μόνο αυτή θα διαπιστωθεί ταύτιση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης του καολίνη με την ΘΓΕΣ. Αντίθετα αν εξεταστούν οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης και των πολτών με μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας, προκύπτει ότι αυτές είναι πολύ κοίλες, πιο κοίλες μάλιστα και από την ΓΕΣ του Burland (1990).

- θ) Τέλος, σε ό,τι αφορά την εξέλιξη των διαφόρων παραμέτρων εγγενούς συμπίεσότητας με το αρχικό ποσοστό υγρασίας του πολτού, ο μεν δείκτης αποφόρτισης αποδείχθηκε η λιγότερο ευαίσθητη παράμετρος στην μεταβολή του αρχικού ποσοστού υγρασίας του πολτού, ενώ ο εγγενής λόγος κενών στην κατακόρυφη τάση 1 kPa ( $e^*_1$ ) αποδείχθηκε η πιο ευαίσθητη παράμετρος όλων. Ο εγγενής λόγος κενών στο 1 kPa αποτελεί λοιπόν πράγματι συνάρτηση του ποσοστού υγρασίας (αφού η επιβληθείσα τάση είναι πρακτικά ελάχιστη για να μεταβάλλει ουσιωδώς τον αρχικό λόγο κενών του πολτού που εξαρτάται μόνο από το αρχικό ποσοστό υγρασίας), ενώ αντίθετα ο λόγος κενών στα 100 kPa και στα 1000 kPa,  $e^*_{100}$  και  $e^*_{1000}$  αντίστοιχα, όπως και ο δείκτης συμπίεσης  $C_c^*$  αποτελούν μάλλον σταθερές ανεξάρτητες του αρχικού ποσοστού υγρασίας για όλα τα υλικά (παρόλο που πράγματι υπάρχει μία μικρή αύξησή τους με το ποσοστό υγρασίας).

Συνοψίζοντας τα παραπάνω συμπεράσματα καταλήγουμε ότι η αρχική πρόταση του Burland (1990) για τα αναζυμωμένα εδάφη, ότι αποτελούν υλικά μηχανικά αναμοχλευμένα και αναμεμιγμένα με νερό τόσο ώστε να αποκτήσουν ποσοστό υγρασίας μεταξύ μίας και 1.5 φορές το όριο υδαρότητας του υλικού πρέπει να αναθεωρηθεί προς τα πάνω και να γίνει μεταξύ 1.4 και 2.0 φορές το όριο υδαρότητας. Τιμές του αρχικού ποσοστού υγρασίας των πολτών μάλιστα μικρότερες του ορίου υδαρότητας των υλικών πρέπει να αποφεύγονται οπωσδήποτε αφού

<sup>19</sup> Με παραμονή του πολτού μέσα σε υγρανήρα προκειμένου να μην υπάρχουν απώλειες υγρασίας από τον πολτό.

οδηγούν σε τιμές του αρχικού βαθμού κορεσμού των πολτών τόσο μικρές που μεταβάλλεται ριζικά η μορφή των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης, τόσο μάλιστα ώστε να μεταβάλλεται ακόμα και η φορά που στρέφουν τα κοίλα (προς τα πάνω ή προς τα κάτω). Επίσης στην ίδια κατεύθυνση έχει σημαντικότατο ρόλο ο χρόνος ύγρανσης, ειδικά όσο αυξάνεται η πλαστικότητα των εδαφικών υλικών. Τέλος, είναι καλό να αποφεύγεται η χρήση του εγγενούς λόγου κενών στο 1 kPa αφού αυξάνεται ραγδαία με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών αποτελώντας συνάρτησή του, παρά συνάρτηση της εντατικής κατάστασης στο υλικό.

## **13.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ**

### **13.4.1 Εισαγωγή**

Στα πλαίσια της διερεύνησης των εγγενών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε αναζυμωμένα δοκίμια εδαφικών υλικών. Προκειμένου να διερευνηθεί η χρήση του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων για την αξιολόγηση αποτελεσμάτων δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε φυσικά εδαφικά υλικά αναζητήθηκαν δείγματα φυσικών εδαφικών υλικών για την πραγματοποίηση τέτοιων δοκιμών υψηλής ποιότητας και αξιοπιστίας. Τα εδαφικά υλικά τα οποία κατέστησαν διαθέσιμα κατά την εκτέλεση του προγράμματος εργαστηριακών δοκιμών ήταν η Άργιλος Αμαρουσίου, η Άργιλος και η Μάργα Κηφισιάς και η Μάργα Κορίνθου. Στοιχεία για την προέλευση, τη δειγματοληψία και τα φυσικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 11. Για κάθε φυσικό εδαφικό υλικό πραγματοποιήθηκαν τουλάχιστον δύο δοκιμές σε αδιατάρακτα δείγματα (για επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων) και από μία δοκιμή σε υλικό προερχόμενο από τα τρίμματα που προέκυψαν κατά τη μόρφωση των δοκιμίων, αναζυμωμένο σε ποσοστό υγρασίας ίσο με 1.5 φορά το όριο υδαρότητας (σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της εργαστηριακής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε για τα αναζυμωμένα εδάφη και παρουσιάστηκε στην §13.3). Τα δοκίμια από τα αναζυμωμένα εδαφικά υλικά παρασκευάστηκαν με τη μέθοδο που περιγράφηκε στην §13.3.2 δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στους παράγοντες που επισημάνθηκαν.

Σε ό,τι αφορά τα δοκίμια αδιατάρακτου υλικού αυτά απεκόπησαν με ιδιαίτερη προσοχή από τα διαθέσιμα δείγματα (πυρήνες γεωτρήσεων ή μεγάλα δείγματα χειρωνακτικά αποκομμένα). Οι δακτύλιοι λιπαίνονταν εσωτερικά και στη συνέχεια προσαρμόζονταν με τα αιχμηρά τους χείλη προς το δείγμα οπότε και άρχιζε η αργή προώθησή τους προς αυτό αφού πρώτα κοβόταν το



δείγμα περιμετρικά των χειλιών του δακτυλίου για να περιοριστεί η αντίσταση κατά την προώθηση του δακτυλίου. Όταν τμήμα του δείγματος άρχισε πια να εξέρχεται πάνω από το πάνω μέρος του δακτυλίου άρχισε η προσεκτική αποκοπή του τμήματος που προεξείχε μέχρι να μορφωθεί απολύτως επίπεδη επιφάνεια του δοκιμίου. Στη συνέχεια το δείγμα με τον δακτύλιο προσαρμοσμένο έτσι αναστρεφόταν και επαναλαμβανόταν η ίδια διαδικασία για την άλλη πλευρά του δοκιμίου. Η προσεκτική αποκοπή των δοκιμίων από τα δείγματα και η εξίσου προσεκτική κοπή και μόρφωση των επιφανειών κάθε δοκιμίου εξασφαλίζει ότι οι διαστάσεις του δοκιμίου είναι ακριβώς οι ίδιες με εκείνες της εσωτερικής πλευράς του δακτυλίου (οπότε δεν υφίσταται ανάγκη εξωτερικής μέτρησης του αρχικού ύψους του δοκιμίου όπως στα δοκίμια αναζυμωμένου εδαφικού υλικού). Μόλις τα δείγματα έχουν κοπεί, ζυγίζονται και τοποθετούνται στις κυψέλες φόρτισης οι οποίες συναρμολογούνται και τοποθετούνται επί των συμπιεσομέτρων για να αρχίσει η φόρτιση. Οι κυψέλες γεμίζονται με νερό εντός 1 λεπτού από την έναρξη της φόρτισης.

Δεδομένου ότι επρόκειτο για εδαφικά υλικά με δομή επιδιώχθηκε η συμπίεσή τους μέχρι την υψηλότερη δυνατή τάση που ήταν δυνατόν να επιβληθεί με τα διατιθέμενα στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων συμπιεσόμετρα κατά τον χρόνο πραγματοποίησης των δοκιμών. Όλα τα δείγματα λοιπόν συμπίεστηκαν είτε μέχρι τα 6400 kPa είτε μέχρι τα 4800 kPa ανάλογα με το συμπιεσόμετρο που υπήρχε διαθέσιμο για τη διεξαγωγή της δοκιμής.

#### 13.4.2 Δοκιμές στην Άργιλο Αμαρουσίου

Τα δείγματα της Άργιλου Αμαρουσίου που κατέστησαν διαθέσιμα ήταν τμήματα πυρήνων γεωτρήσεων από βάθος 40 m περίπου από τον πρώην ανοικτό χώρο στάθμευσης των Ολυμπιακών Αθλητικών Εγκαταστάσεων στο Μαρούσι όπου κατασκευάστηκε το Διεθνές Κέντρο Αναμετάδοσης (International Broadcasting Centre, IBC) των Ολυμπιακών Αγώνων του 2004<sup>20</sup>. Τα δείγματα ελήφθησαν με «φραγμό» (κοπή του δείγματος με περιστροφή της κοπτικής κεφαλής και διακοπή της κυκλοφορίας νερού), επρόκειτο δηλαδή για ημιδιαταραγμένα δείγματα με το ποσοστό υγρασίας που έχει το εδαφικό υλικό επιτόπου και την μικρότερη διατάραξη στο κέντρο τους μόνο, και από αυτά μορφώθηκαν δοκίμια για την εκτέλεση δύο δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι κατακόρυφη τάση 4800 kPa και δοκίμιο αναζυμωμένου

<sup>20</sup> Σημερινό εμπορικό κέντρο «Golden Hall».

εδαφικού υλικού για την εκτέλεση μίας δοκιμής μέχρι την ίδια τάση. Το δοκίμιο του αναζυμωμένου υλικού παρασκευάστηκε από το υλικό ως είχε (δηλ. με την φυσική κοκκομετρική του διαβάθμιση), αλλά επειδή στο υλικό αυτό εμφανίζεται και ένα σημαντικό ποσοστό λεπτών χαλίκων, ποσότητα του υλικού ξεράθηκε στον φούρνο των 110 °C και στη συνέχεια θρυμματίστηκε και περάστηκε από το κόσκινο Νο. 40 ώστε να παραμείνει μόνο η λεπτόκοκκη άμμος μαζί με την ιλύ και την άργιλο.

Στο Σχ. 13.26 παρουσιάζονται οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης του φυσικού υλικού και των δύο αναζυμωμένων που παρασκευάστηκαν (με φυσική κοκκομετρική διαβάθμιση και μόνο με την λεπτή άμμο από τα χονδρόκοκκα κλάσματα που περιείχε το συγκεκριμένο υλικό) και στο Σχ. 13.27 οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης (η κανονικοποίηση έγινε με τις παραμέτρους  $e^*_{100}$  και  $C_c^*$  από την δοκιμή στο αναζυμωμένο υλικό με την φυσική κοκκομετρική διαβάθμιση –δοκιμή RAC-Nat). Στους Πιν. 13.16 έως 13.18 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των δοκιμών.

**Πίνακας 13.16.** Χαρακτηριστικά δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής άργιλο Αμαρουσίου.

Δοκιμή	$e_o$	$w_o$ (%)	$S_{ro}$ (%)	$\sigma_{ν,προστ}$ (kPa)	$C_c$	$C_{r,h}$	$C_{r,l}$
	-				-	-	-
NAC-1	0.636	19.71	85.2		0.160	0.025	0.040
NAC-2	0.623	18.33	80.9		0.154	0.024	0.036

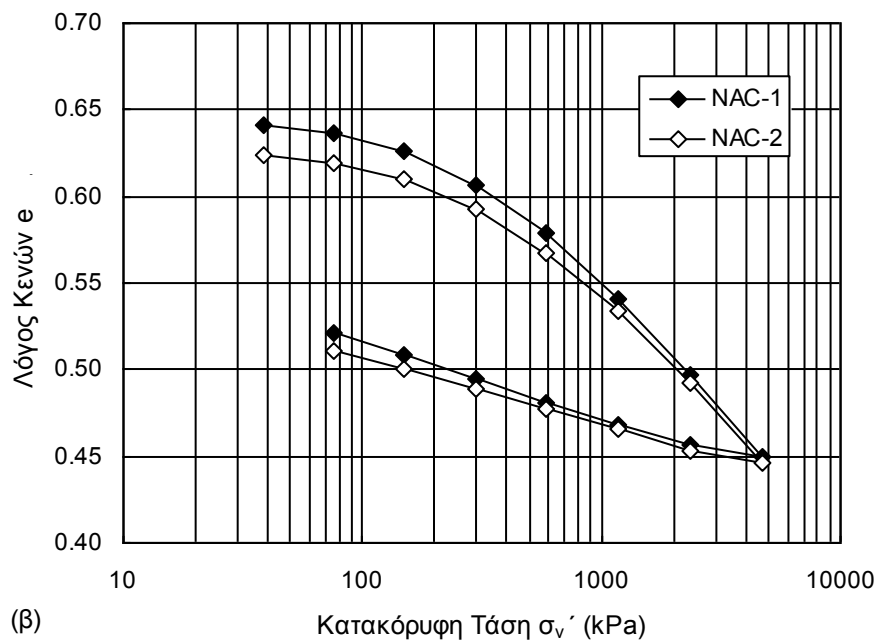
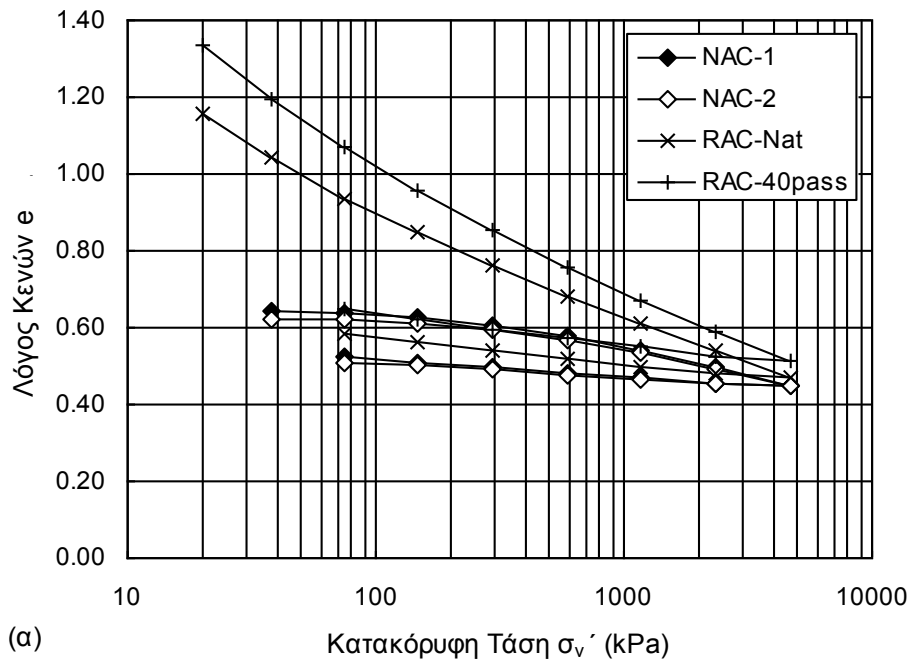
**Πίνακας 13.17.** Παράμετροι εγγενούς συμπιεστότητας από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένη Άργιλο Αμαρουσίου ( $w_L = 47.5\%$ ).

Δοκιμή	$e^*_o$	$e^*_{100}$	$e^*_{1000}$	$C_c^*$	$C_{r,h}$	$C_{r,l}$
RAC-Nat	1.853	0.900	0.627	0.273	0.040	0.062
RAC-40pass	1.934	1.023	0.690	0.333	0.046	0.075

**Πίνακας 13.18.** Εγγενείς παράμετροι απόστασης και εμπειρικές τιμές παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  για την δοκιμή RAC-Nat σε αναζυμωμένη Άργιλο Αμαρουσίου ( $w_L = 47.5\%$ ).

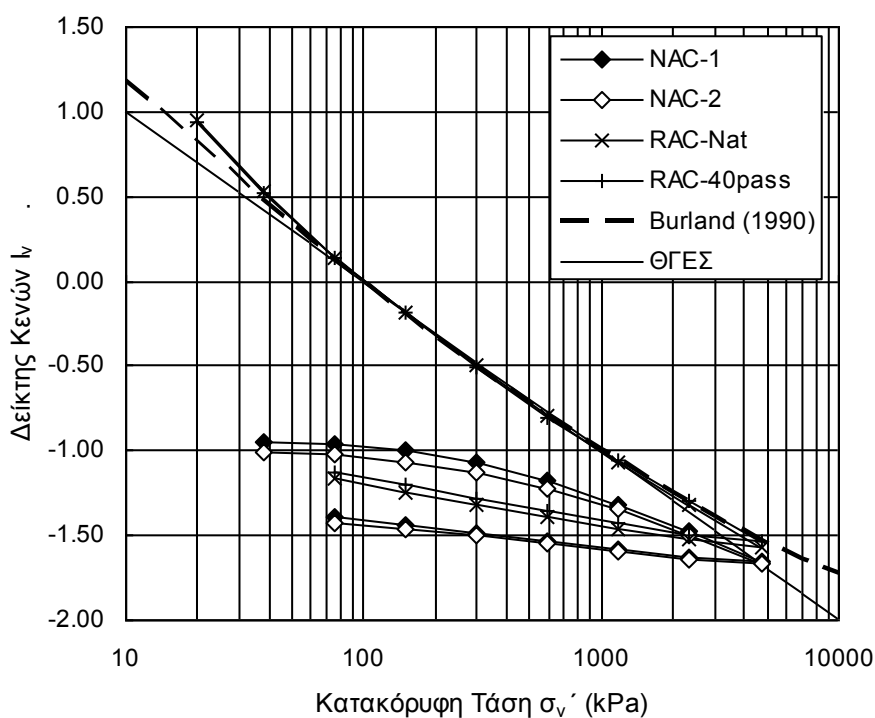
Δοκιμή	$d^*$ (υπολ.)	$d^*$ (προσέγγιση)		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
RAC-Nat	-0.017	-0.028	Από το $d^*$	3.326	-2.256	0.347	-0.025
			Εμπειρικά	3.634	-2.669	0.529	-0.051

Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του Πιν. 13.16 τα δύο δοκίμια φυσικού υλικού είχαν αρκετά χαμηλό αρχικό βαθμό κορεσμού, ο οποίος συνέβαλε πιθανότατα μαζί με την δομή του υλικού στην εμφάνιση τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης περί τα 800 kPa (για τον προσδιορισμό της



**Σχήμα 13.26.** α) Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής Αργίλου Αμαρουσίου (NAC-1 και NAC-2) και αναζυμωμένης (με φυσική κοκκομετρική διαβάθμιση –RAC-Nat- και μόνο με την λεπτή άμμο από τα χονδρόκοκκα κλάσματα που περιείχε το συγκεκριμένο υλικό –RAC-40pass), και β) μόνο οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής Αργίλου Αμαρουσίου για λόγους μεγέθυνσης.

χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Casagrande, 1936). Δεδομένου ότι στην γεώτρηση από όπου ελήφθη το δείγμα απαντήθηκε στάθμη υπόγειου ορίζοντα περί τα 15-20m, η επιτόπου κατακόρυφη τάση μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά περί τα 600 kPa η οποία συνδυαζόμενη με την τάση φαινόμενης προστερεοποίησης οδηγεί σε λόγο τάσης διαρροής περί το 1.30-1.35. Ο συνδυασμός δομής λόγω ιστορίας φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρυνσης και του χαμηλού αρχικού βαθμού κορεσμού των δοκιμίων δεν επέτρεψε την προσέγγιση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης του υλικού παρά την συμπίεση μέχρι πολύ υψηλές τιμές της τάσης (Σχ. 13.26). Σε ό,τι αφορά τις καμπύλες εγγενούς συμπίεσης του υλικού, αυτές προέκυψαν με τα κοίλα προς τα πάνω και με σημαντικές τιμές της εγγενούς παραμέτρου απόστασης. Η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης του υλικού που περιείχε μόνο την λεπτόκοκκη άμμο από τα χονδρόκοκκα κλάσματα του υλικού προβάλλεται υψηλότερα από την καμπύλη εγγενούς συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και έχει και μεγαλύτερη κλίση όπως φαίνεται από τον μεγαλύτερο δείκτη συμπίεσής της, παρόλο που όταν κανονικοποιούνται, οι δύο καμπύλες πρακτικά ταυτίζονται στον χώρο δείκτη κενών-κατακόρυφης τάσης σε λογαριθμική κλίμακα.



**Σχήμα 13.26.** Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής Αργίλου Αμαρουσίου (NAC-1 και NAC-2) και αναζυμωμένης (με φυσική κοκκομετρική διαβάθμιση –RAC-Nat- και μόνο με την λεπτή άμμο από τα χονδρόκοκκα κλάσματα που περιείχε το συγκεκριμένο υλικό –RAC-40pass).

### 13.4.3 Δοκιμές στην Άργιλο Κηφισιάς

Τα δείγματα της Άργιλου Κηφισιάς που κατέστησαν διαθέσιμα ήταν τμήματα πυρήνων γεωτρήσεων από βάθος 30 m περίπου από τον χώρο κατασκευής των Νέων Κτιρίων του Γενικού Ογκολογικού Νοσοκομείου. Τα δείγματα ελήφθησαν με «φραγμό» (κοπή του δείγματος με περιστροφή της κοπτικής κεφαλής και διακοπή της κυκλοφορίας νερού), επρόκειτο δηλαδή για ημιδιαταραγμένα δείγματα με το ποσοστό υγρασίας που έχει το εδαφικό υλικό επιτόπου και την μικρότερη διατάραξη στο κέντρο τους μόνο, και από αυτά μορφώθηκαν δοκίμια για την εκτέλεση δύο δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι κατακόρυφη τάση 6400 kPa και δοκίμιο αναζυμωμένου εδαφικού υλικού για την εκτέλεση μίας δοκιμής μέχρι την ίδια τάση. Το δοκίμιο του αναζυμωμένου υλικού παρασκευάστηκε από το υλικό ως είχε (δηλ. με τη φυσική κοκκομετρική του διαβάθμιση).

Στο Σχ. 13.28 παρουσιάζονται οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης του φυσικού υλικού και του αναζυμωμένου και στο Σχ. 13.29 οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης. Στους Πιν. 13.19 έως 13.21 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των δοκιμών.

**Πίνακας 13.19.** Χαρακτηριστικά δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής αργίλου Κηφισιάς.

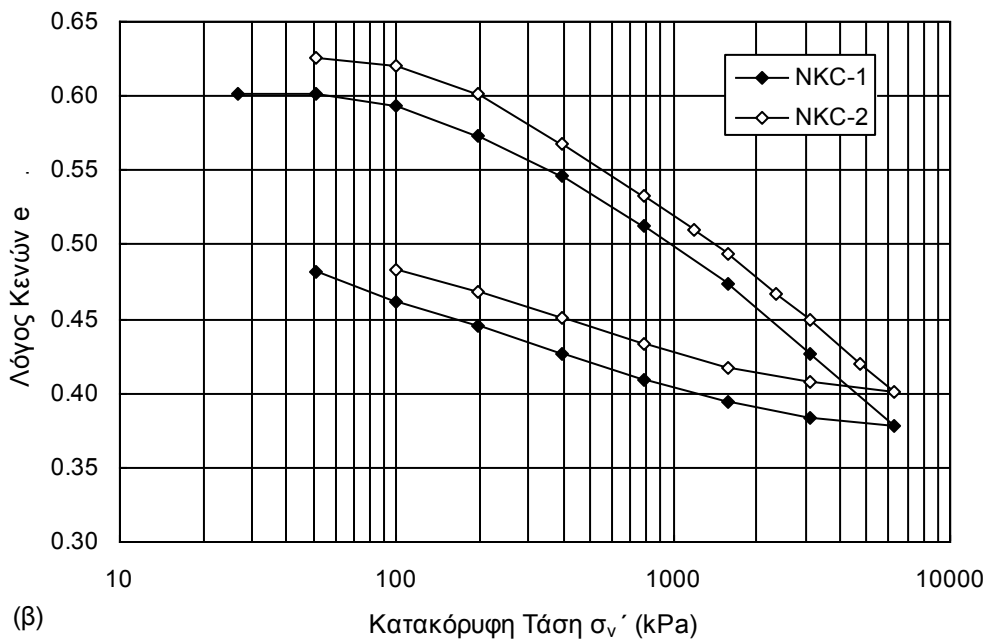
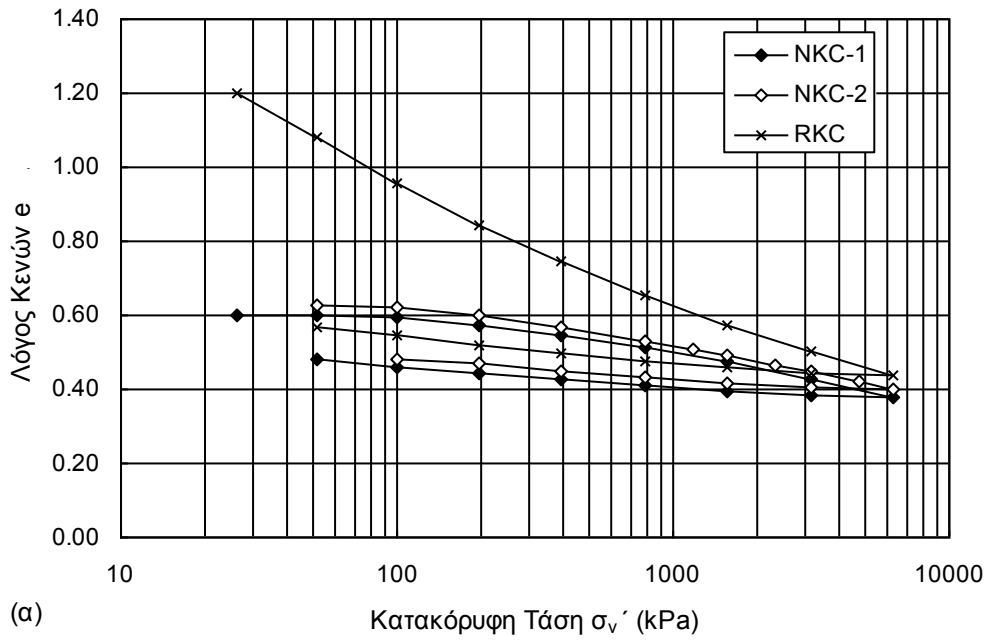
Δοκιμή	$e_o$	$w_o$	$S_{ro}$	$\sigma_{ν,προστ}$	$C_c$	$C_{r,h}$	$C_{r,l}$
	-	(%)	(%)	(kPa)	-	-	-
NKC-1	0.622	18.26	78.4		0.163	0.020	0.050
NKC-2	0.635	18.26	76.7		0.163	0.023	0.046

**Πίνακας 13.20.** Παράμετροι εγγενούς συμπίεσότητας από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένη Άργιλο Κηφισιάς ( $w_L = 40.5\%$ ).

Δοκιμή	$e^*_o$	$e^*_{100}$	$e^*_{1000}$	$C_c^*$	$C_{r,h}$	$C_{r,l}$
RKC	2.401	0.958	0.628	0.331	0.025	0.063

**Πίνακας 13.21.** Εγγενείς παράμετροι απόστασης και εμπειρικές τιμές παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  για την δοκιμή RKC σε αναζυμωμένη Άργιλο Κηφισιάς ( $w_L = 40.5\%$ ).

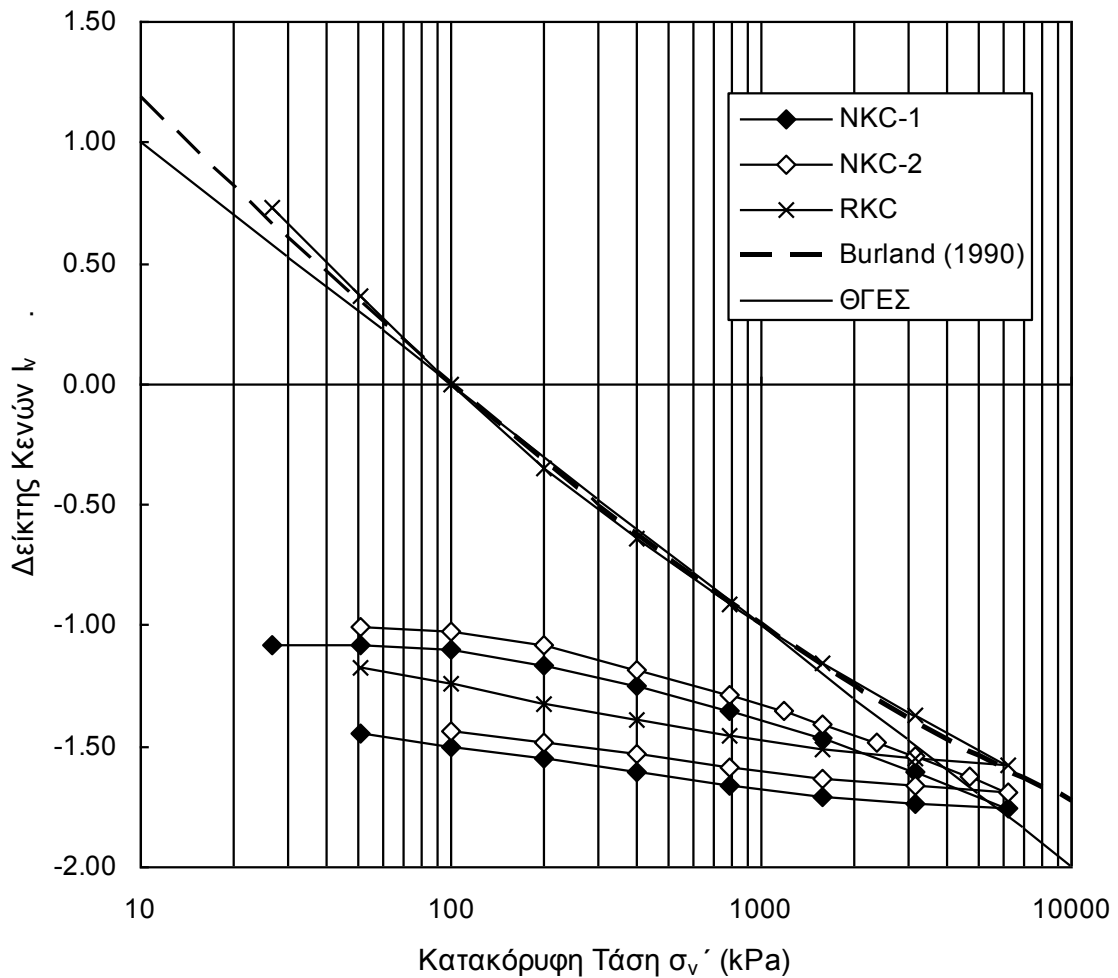
Δοκιμή	$d^*$ (υπολ.)	$d^*$ (προσέγγιση)		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
RKC	-0.034	-0.030	Από το $d^*$	3.450	-2.382	0.386	-0.029
			Εμπειρικά	3.128	-1.990	0.226	-0.008



**Σχήμα 13.28.** α) Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής Αργίλου Κηφισιάς (NKC-1 και NKC-2) και αναζυμωμένης, και β) μόνο οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής Αργίλου Κηφισιάς για λόγους μεγέθυνσης.

Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του Πιν. 13.19 τα δύο δοκίμια φυσικού υλικού είχαν αρκετά χαμηλό αρχικό βαθμό κορεσμού. Αυτός συνέβαλε πιθανότατα μαζί με την δομή του υλικού στην αδυναμία προσέγγισης της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης του υλικού παρά την συμπίεση μέχρι

πολύ υψηλές τιμές της τάσης (Σχ. 13.29). Σε ό,τι αφορά την καμπύλη εγγενούς συμπίεσης του υλικού αυτή προέκυψε με τα κοίλα προς τα πάνω και σημαντική τιμή της εγγενούς παραμέτρου απόστασης. Η διατάραξη των δειγμάτων δυστυχώς δεν επέτρεψε μία σοβαρή εκτίμηση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης του υλικού.



**Σχήμα 13.29.** Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής Αργίλου Κηφισιάς (NKC-1 και NKC-2) και αναζυμωμένης (RKC).

### 13.4.4 Δοκιμές στη Μάργα Κηφισιάς

Τα δείγματα της Μάργας Κηφισιάς που κατέστησαν διαθέσιμα ήταν τμήματα πυρήνων γεωτρήσεων από βάθος 30 m περίπου από τον χώρο κατασκευής των Νέων Κτιρίων του Γενικού Ογκολογικού Νοσοκομείου. Τα δείγματα ελήφθησαν με «φραγμό» (κοπή του δείγματος με περιστροφή της κοπτικής κεφαλής και διακοπή της κυκλοφορίας νερού), επρόκειτο δηλαδή για ημιδιαταραγμένα δείγματα με το ποσοστό υγρασίας που έχει το εδαφικό υλικό επιτόπου και την μικρότερη διατάραξη στο κέντρο τους μόνο, και από αυτά μορφώθηκαν δοκίμια για την εκτέλεση δύο δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι κατακόρυφη τάση 4800 kPa και δοκίμιο αναζυμωμένου εδαφικού υλικού για την εκτέλεση μίας δοκιμής μέχρι την ίδια τάση. Το δοκίμιο του αναζυμωμένου υλικού παρασκευάστηκε από το υλικό ως είχε (δηλ. με τη φυσική κοκκομετρική του διαβάθμιση).

Στο Σχ. 13.30 παρουσιάζονται οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης του φυσικού υλικού και του αναζυμωμένου και στο Σχ. 13.31 οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης. Στους Πιν. 13.22 έως 13.24 συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των δοκιμών.

**Πίνακας 13.22.** Χαρακτηριστικά δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής Μάργας Κηφισιάς.

Δοκιμή	$e_o$	$w_o$	$S_{ro}$	$\sigma_{v,προστ}$	$C_c$	$C_{r,h}$	$C_{r,l}$
	-	(%)	(%)	(kPa)	-	-	-
NKM-1	0.609	15.81	69.1		0.166	0.009	0.028
NKM-2	0.624	19.64	83.7		0.166	0.009	0.032

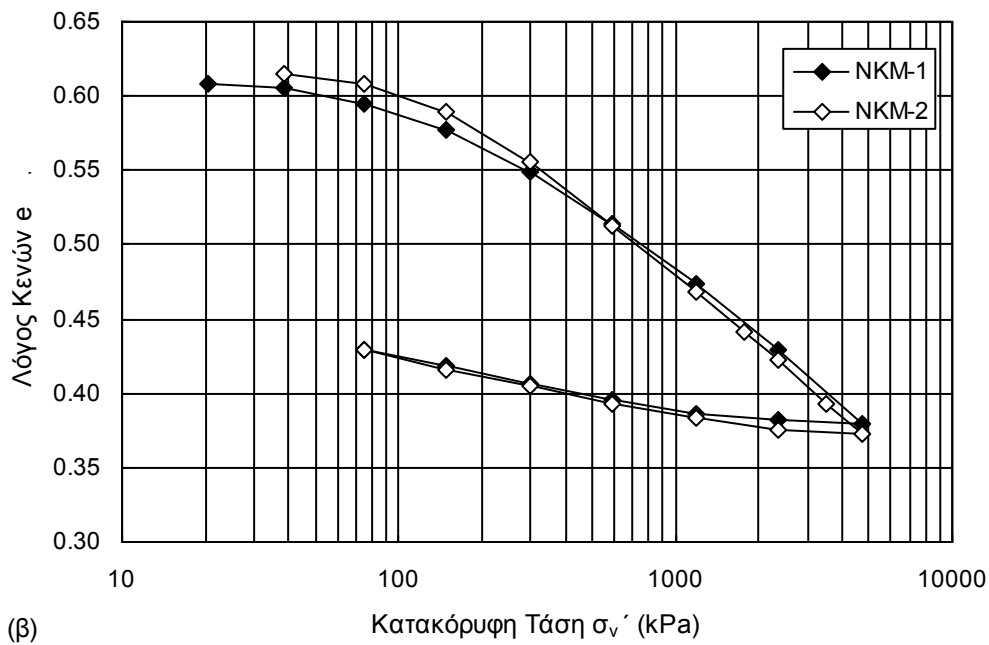
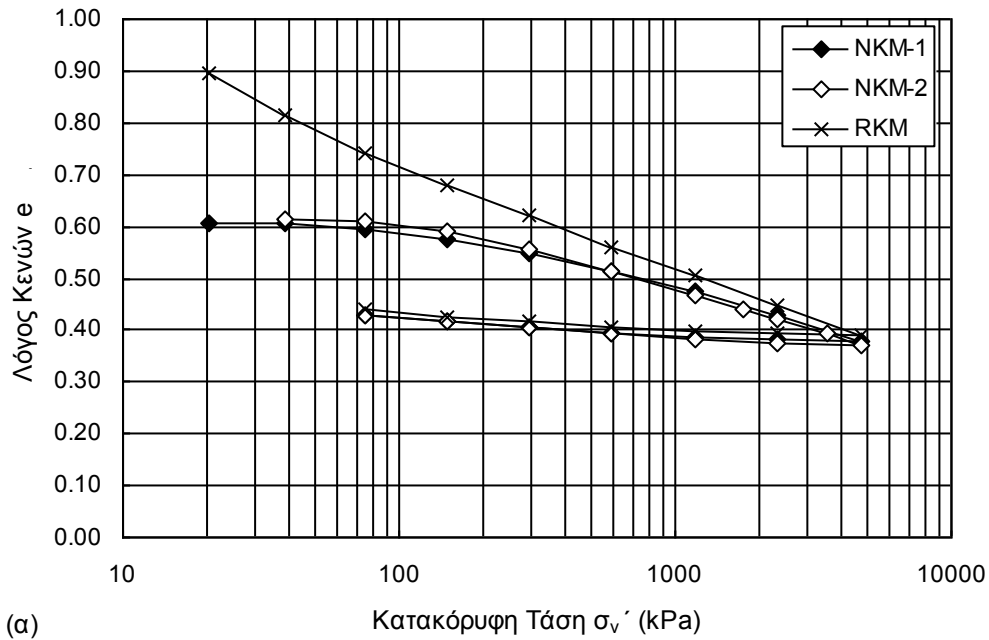
**Πίνακας 13.23.** Παράμετροι εγγενούς συμπίεσότητας από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένη Μάργα Κηφισιάς ( $w_L = 31.5\%$ ).

Δοκιμή	$e^*_o$	$e^*_{100}$	$e^*_{1000}$	$C_c^*$	$C_{r,h}$	$C_{r,l}$
RKM	1.440	0.716	0.518	0.198	0.007	0.026

**Πίνακας 13.24.** Εγγενείς παράμετροι απόστασης και εμπειρικές τιμές παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  για την δοκιμή RKM σε αναζυμωμένη Μάργα Κηφισιάς ( $w_L = 31.5\%$ ).

Δοκιμή	$d^*$ (υπολ.)	$d^*$ (προσέγγιση)		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
RKM	-0.009	-0.022	Από το $d^*$	2.979	-1.909	0.241	-0.016
			Εμπειρικά	3.715	-2.871	0.653	-0.073

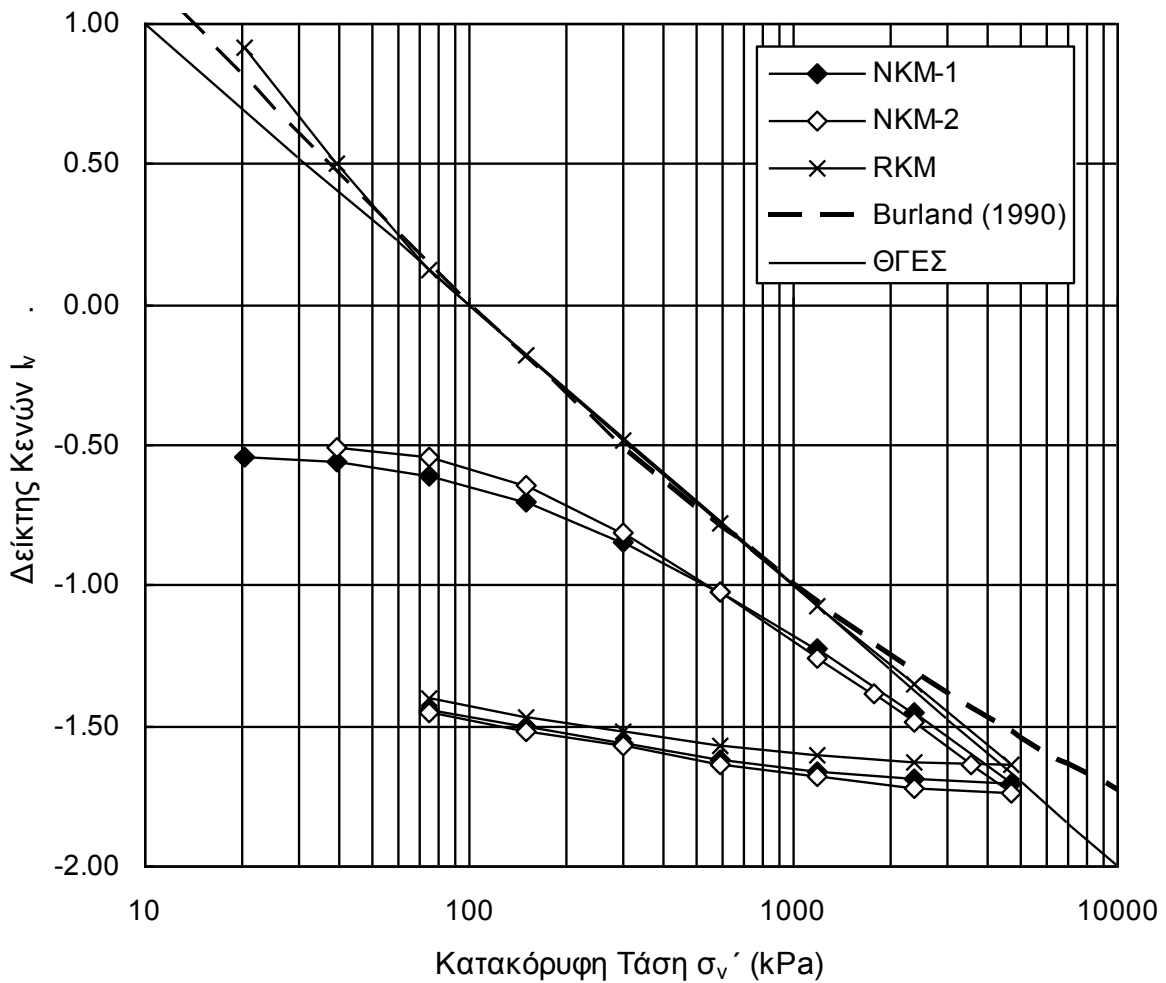




**Σχήμα 13.30.** α) Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής Μάργας Κηφισιάς (NKM-1 και NKM-2) και αναζυμωμένης, και β) μόνο οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής Μάργας Κηφισιάς για λόγους μεγέθυνσης.

Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του Πιν. 13.22 τα δύο δοκίμια φυσικού υλικού είχαν αρκετά χαμηλό αρχικό βαθμό κορεσμού. Αυτός συνέβαλε πιθανότατα μαζί με τη δομή του υλικού στην αδυναμία προσέγγισης της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης του υλικού παρά τη συμπίεση μέχρι

πολύ υψηλές τιμές της τάσης (Σχ. 13.31) –αν και οι καμπύλες του φυσικού υλικού πλησίασαν περισσότερο την καμπύλη του αναζυμωμένου από τα άλλα δύο υλικά που προηγήθηκαν. Σε ό,τι αφορά την καμπύλη εγγενούς συμπίεσης του υλικού αυτή προέκυψε με τα κοίλα προς τα πάνω και σημαντική τιμή της εγγενούς παραμέτρου απόστασης. Η διατάραξη των δειγμάτων δυστυχώς δεν επέτρεψε μία σοβαρή εκτίμηση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης του υλικού.



**Σχήμα 13.31.** Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής Μάργας Κηφισιάς (NMC-1 και NMC-2) και αναζυμωμένης (RMC).

### 13.4.5 Δοκιμές στη Μάργα Κορίνθου

Η μάργα αυτή προέρχεται από το βόρειο πρανές της Διώρυγας της Κορίνθου. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν αποκόπηκαν με προσοχή από προσιτό σημείο του βόρειου πρανούς της διώρυγας στην περιοχή του «Μεγάλου Χαλάσματος» και συνιστούν αδιατάρακτα δείγματα πολύ υψηλής ποιότητας από τα οποία μορφώθηκαν δοκίμια για τη μελέτη της συμπεριφοράς του φυσικού υλικού εκτός από αναζυμωμένα. Τα δείγματα ελήφθησαν από ύψος μικρότερο του 1m από τη στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας. Κατά τη μόρφωση των δοκιμών από τα δείγματα διαπιστώθηκε αρχικά οπτικά και επιβεβαιώθηκε από τις δοκιμές φυσικών χαρακτηριστικών ότι εντός των δειγμάτων εμφανιζόντουσαν δύο είδη της μάργας Κορίνθου: ένα λιγότερο και ένα περισσότερο πλαστικό. Όπως αναφέρεται και στο Κεφ. 11 η λιγότερο πλαστική μάργα (τύπος “L”) είχε όριο υδαρότητας  $w_L=31\%$ ,  $I_P=6\%$  και περίπου 6.5% περιεχόμενη άργιλο (91% περιεχόμενη αργιλοϊλύς), ενώ η πιο πλαστική μάργα (τύπος “H”) είχε όριο υδαρότητας  $w_L=34\%$ ,  $I_P=12\%$  και περίπου 11% περιεχόμενη άργιλο (97% περιεχόμενη αργιλοϊλύς). Με δεδομένη την εμφάνιση δύο ειδών της μάργας πραγματοποιήθηκαν από 2 δοκιμές στο φυσικό υλικό κάθε είδους και από μία δοκιμή στο υλικό κάθε είδους αναζυμωμένο. Τα βασικά χαρακτηριστικά των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στους Πιν. 13.25 έως 13.27 ενώ οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης των υλικών παρουσιάζονται στα Σχ. 13.32 και 13.33.

**Πίνακας 13.25.** Χαρακτηριστικά δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής Μάργας Κορίνθου.

Είδος μάργας	Δοκιμή	$e_o$	$w_o$	$S_{r0}$	$\sigma_{v,προστ}$	$C_c$	$C_{r,h}$	$C_{r,l}$
		-	(%)	(%)	(kPa)	-	-	-
“L”	NCM-LP-50-1	0.689	23.73	91.9		0.180	0.004	0.005
	NCM-LP-50-2	0.663	22.00	88.6		0.161	0.004	0.005
“H”	NCM-HP-50-1	0.851	29.20	91.6		0.234	0.005	0.017
	NCM-HP-50-2	0.825	27.85	90.1		0.229	0.003	0.018

**Πίνακας 13.26.** Παράμετροι εγγενούς συμπίεσότητας από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένη Μάργα Κορίνθου.

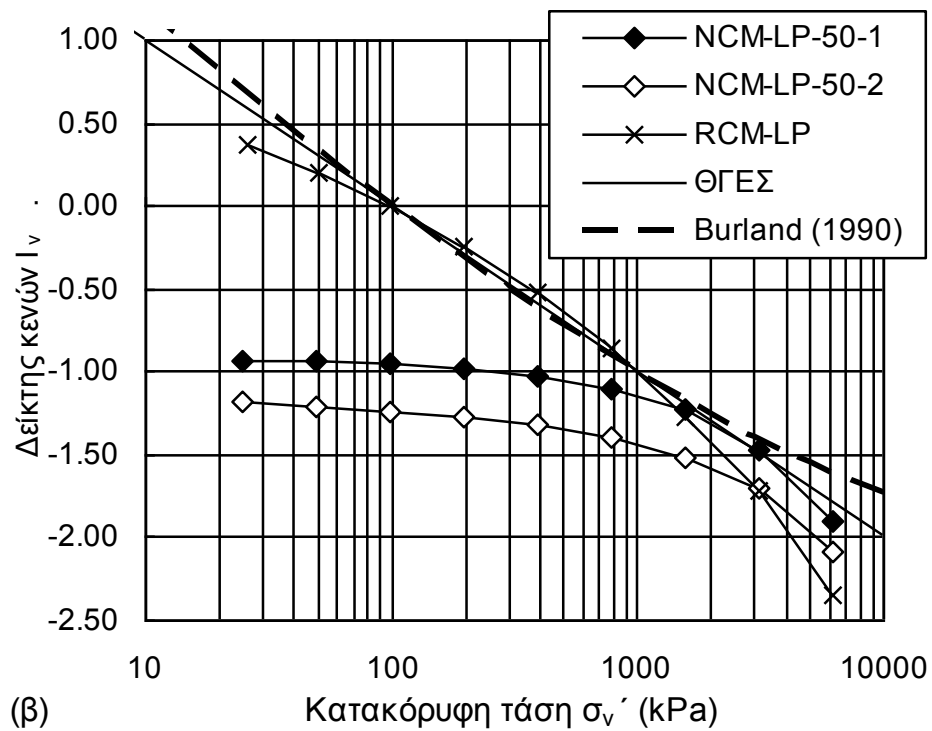
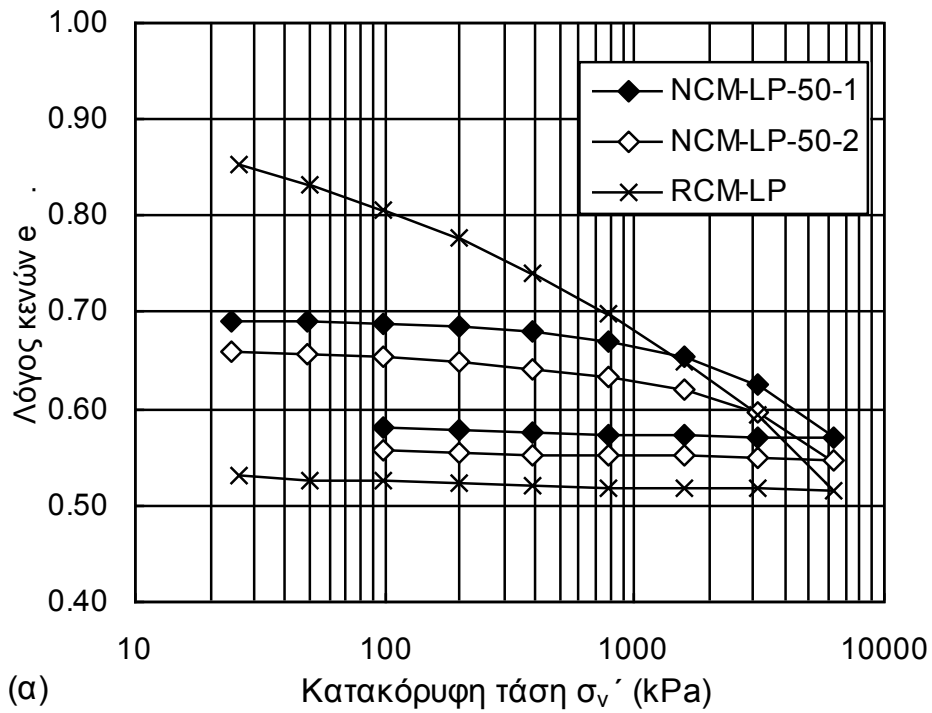
Είδος μάργας	Δοκιμή	$e^*_o$	$e^*_{100}$	$e^*_{1000}$	$C_c^*$	$C_{r,h}$	$C_{r,l}$
“L”	RCM-LP	1.128	0.806	0.682	0.124	0.004	0.006
“H”	RCM-HP	1.487	0.819	0.635	0.184	0.022	0.018

**Πίνακας 13.27.** Εγγενείς παράμετροι απόστασης και εμπειρικές τιμές παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  για τα δύο είδη αναζυμωμένης Μάργας Κορίνθου.

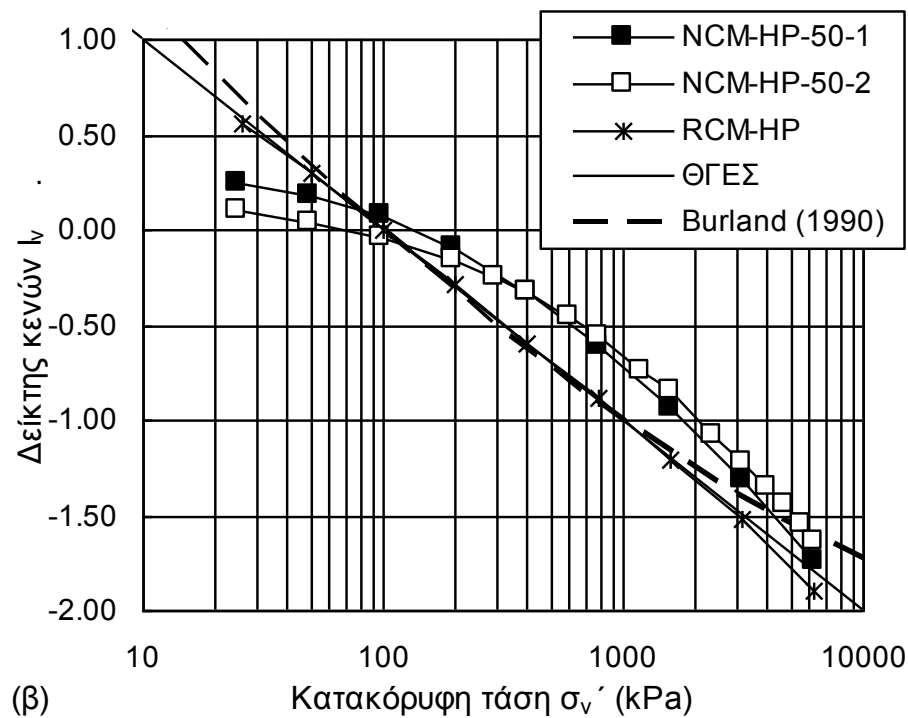
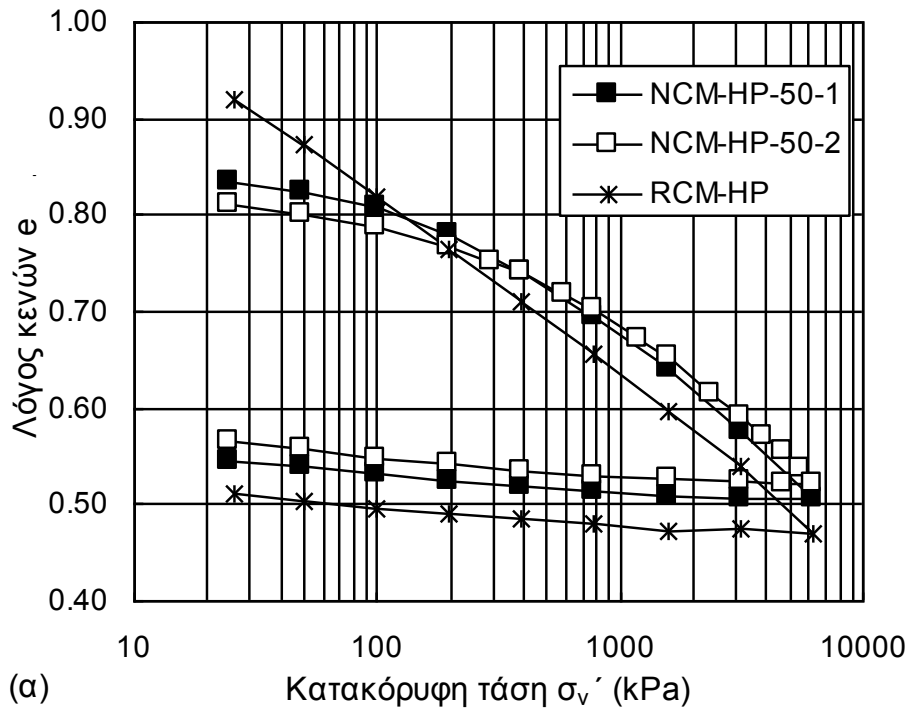
Είδος μάργας	Δοκιμή	$d^*$ (υπολ.)	$d^*$ (προσέγγιση)		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
“L”	RCM-LP	0.048	0.045	Από το $d^*$	1.459	-0.941	0.236	-0.065
				Εμπειρικά	1.282	-0.842	0.243	-0.072
“H”	RCM-HP	0.003	0.001	Από το $d^*$	1.967	-0.972	-0.005	0.000
				Εμπειρικά	2.017	-1.134	0.101	-0.019

Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του Πιν. 13.26 και τα δύο είδη φυσικού υλικού είχαν μέτρια χαμηλό αρχικό βαθμό κορεσμού, ο οποίος συνέβαλε πιθανότατα μαζί με την σιμέντωση του υλικού στην εμφάνιση τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης μεταξύ 2000 και 3000 kPa (για τον προσδιορισμό της χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Casagrande, 1936). Η επιτόπου κατακόρυφη τάση μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά περί τα 800 kPa η οποία συνδυαζόμενη με την τάση φαινόμενης προστερεοποίησης οδηγεί σε λόγο τάσης διαρροής μεταξύ 2.5 και 3.75. Ο συνδυασμός δομής λόγω σιμέντωσης και του χαμηλού αρχικού βαθμού κορεσμού των δοκιμών δεν επέτρεψε την προσέγγιση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης είτε του ενός είδους του υλικού είτε του άλλου, αλλά αυτήν την φορά από την πάνω πλευρά της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης, παρά την συμπίεση μέχρι πολύ υψηλές τιμές της τάσης (Σχ. 13.31 και 13.32). Σε ό,τι αφορά την καμπύλη εγγενούς συμπίεσης του υλικού αυτή προέκυψε με τα κοίλα προς τα κάτω και σημαντική τιμή της εγγενούς παραμέτρου εγγενούς απόστασης για την λιγότερο πλαστική μάργα και πρακτικά μηδενική για την πιο πλαστική.

Οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης των δύο ειδών του υλικού λοιπόν, όχι μόνο δεν στρέφουν τα κοίλα προς τα πάνω αλλά προς τα κάτω, με αποτέλεσμα, αν οι κανονικοποιημένες καμπύλες συμπίεσης του φυσικού υλικού Τύπου L συγκριθούν με την ΘΓΕΣ (πολλώ δε μάλλον με την εμπειρική ΓΕΣ του Burland, 1990, που στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω) δεν έχουν φυσικό νόημα αφού αρχικά διέρχονται πάνω από την ΓΕΣ (υποδηλώνει παρουσία σιμέντωσης στο υλικό) και στη συνέχεια ξαναβρίσκονται κάτω από αυτήν (Σχ. 13.31β και 13.32β). Αντίθετα συγκρινόμενες με την πραγματική καμπύλη συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού όπως μετρήθηκε, αφενός έχουν φυσικό νόημα, αφού παραμένουν πάνω από αυτήν μέχρι τη μέγιστη τάση των δοκιμών και έχουν τάση σύγκλισης και όχι διέλευσης κάτω από αυτήν, και αφετέρου επιδεικνύουν την αδυναμία πλήρους αποδόμησης (destruction) της μάργας υπό συνθήκες  $K_0$ -φόρτισης μέχρι και την μέγιστη τάση των 6.4 MPa των δοκιμών.



**Σχήμα 13.31.** α) Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής και αναζυμωμένης Μάργας Κορίνθου χαμηλής πλαστικότητας, και β) οι ίδιες καμπύλες κανονικοποιημένες στον χώρο δείκτη κενών-κατακόρυφης τάσης μαζί με την ΘΓΕΣ και την γραφική παράσταση της εμπειρικής συσχέτισης του Burland (1990) για την γραμμή εγγενούς συμπίεσης.



**Σχήμα 13.32.** α) Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε δοκίμια φυσικής και αναζυμωμένης Μάργας Κορίνθου υψηλής πλαστικότητας, και β) οι ίδιες καμπύλες κανονικοποιημένες στον χώρο δείκτη κενών-κατακόρυφης τάσης μαζί με την ΘΓΕΣ και την γραφική παράσταση της εμπειρικής συσχέτισης του Burland (1990) για την γραμμή εγγενούς συμπίεσης.

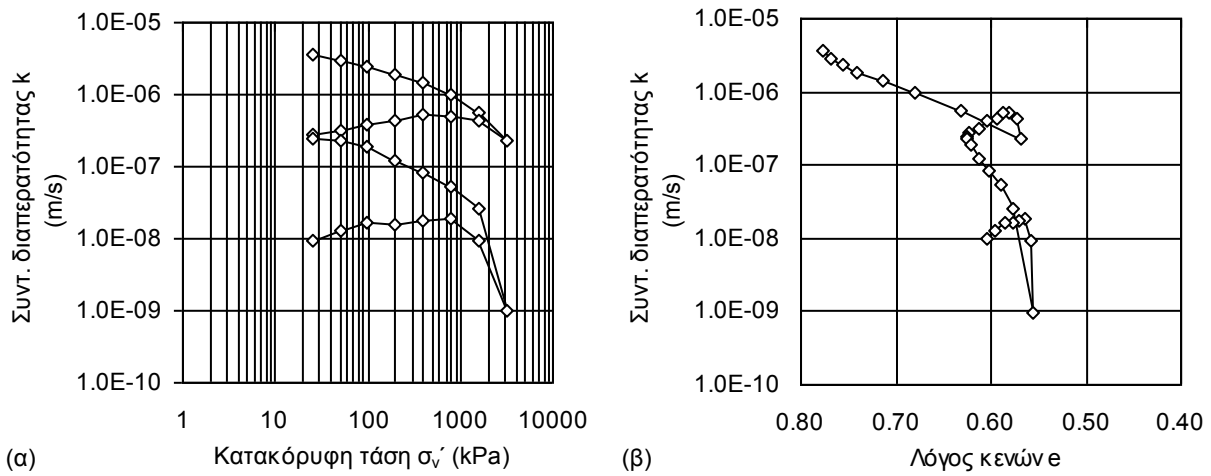
Τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης για την Μάργα Κορίνθου είναι καταλυτικά για την επίδειξη της σημασίας αφενός της ΘΓΕΣ και αφετέρου της Γενικευμένης ΓΕΣ που περιγράφηκε στο Κεφ. 10, όπως επίσης και της προσοχής που πρέπει να επιδεικνύεται όταν χρησιμοποιούνται εμπειρικές συσχετίσεις για την γραμμή εγγενούς συμπίεσης.

Καταρχάς και τα δύο είδη της Μάργας Κορίνθου έχουν καμπύλες εγγενούς συμπίεσης που στρέφουν τα κοίλα προς τα κάτω. Και τα δύο είδη στην φυσική τους κατάσταση είναι τόσο ισχυρά σιμεντωμένα που η καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσής τους περνάει πάνω από την καμπύλη εγγενούς συμπίεσης του υλικού και αυξανομένης της τάσης τείνει προς αυτήν. Αυτό αποτελεί τυπική συμπεριφορά ενός σιμεντωμένου εδάφους, η δομή του οποίου καταλύεται με επιβολή κατακόρυφης τάσης υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης.

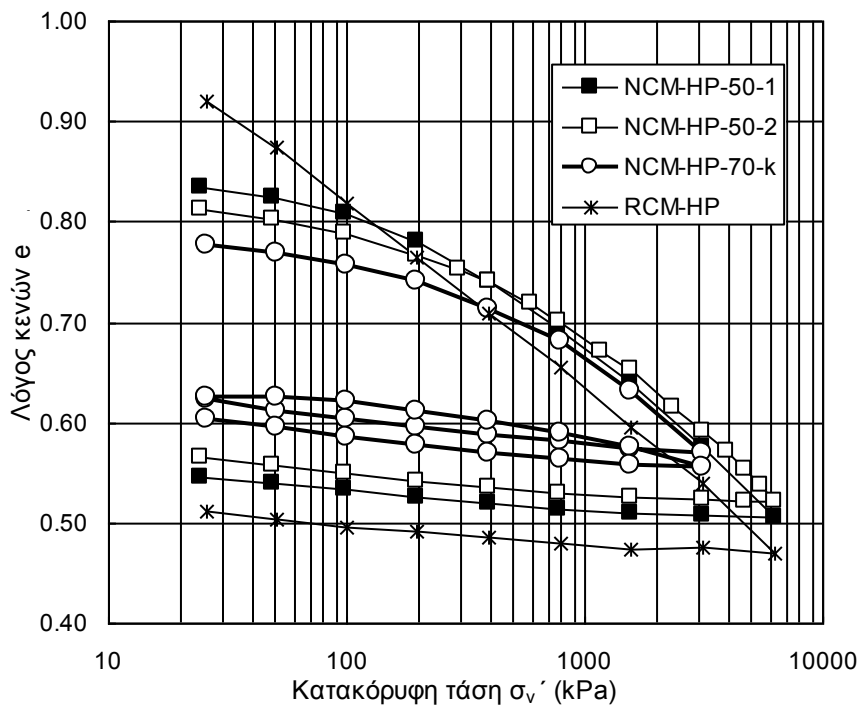
Η κρίσιμη διαφορά στην περίπτωση της Μάργας Κορίνθου είναι ότι η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης είναι έντονα κυρτή και το φαινόμενο ακολουθεί την κύρτωση αυτή της καμπύλης. Αν λοιπόν κανείς προέβλεπε τις παραμέτρους εγγενούς συμπίεστότητας από τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού και στη συνέχεια τα χρησιμοποιούσε για να κανονικοποιήσει τα αποτελέσματα των δοκιμών στο φυσικό υλικό και να τα συγκρίνει με την εμπειρική συσχέτιση για την γραμμή εγγενούς συμπίεσης του Burland (1990) ή του Chandler (2000) ή ακόμα και με την ΘΓΕΣ θα προέκυπταν μη λογικά αποτελέσματα αφού οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης αρχικά διέρχονται πάνω από την ΓΕΣ και στη συνέχεια ξαναβρίσκονται κάτω από αυτήν.

Εκτός από τις προαναφερθείσες δοκιμές, στην πιο πλαστική Μάργα Κορίνθου πραγματοποιήθηκε και μία δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης με μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας σε κάθε τάση. Στο Σχ. 13.33α παρουσιάζεται η καμπύλη  $k-s_v'$  και στο Σχ. 13.33β η καμπύλη  $k-e$ . Κατά την δοκιμή αυτή έγινε φόρτιση μέχρι μέγιστη κατακόρυφη τάση 3200 kPa και αποφόρτιση και επαναφόρτιση ως τα 25 kPa δύο φορές. Η αρχική τιμή του συντελεστή διαπερατότητας ήταν  $3.7 \cdot 10^{-6}$  m/s και για να επέλθει μείωση του κατά μία τάξη μεγέθους στα  $2.3 \cdot 10^{-7}$  m/s απαιτείται μεταβολή της κατακόρυφης τάσης κατά 3200 kPa (η μεταβολή αυτή αντιστοιχεί σε μείωση του λόγου κενών κατά 0.22). Κατά την αποφόρτιση ο συντελεστής διαπερατότητας μένει πρακτικά σταθερός με μείωση κατά 2 τάξεις μεγέθους να επέρχεται στη δεύτερη φόρτιση (στα  $9.7 \cdot 10^{-10}$  m/s) παρόλο που η μείωση του λόγου κενών αυτή τη φορά είναι μόνο 0.07. Μείωση κατά μία τάξη μεγέθους επήλθε μόνο στο στάδιο της φόρτισης για δεύτερη φορά από τα 1600 στα 3200 kPa (μείωση του λόγου κενών κατά 0.02) η οποία και αναιρέθηκε με την αποφόρτιση στα 1600 kPa. Στο Σχ. 13.34 παρουσιάζεται η καμπύλη

μονοδιάστατης συμπίεσης της δοκιμής αυτής μαζί με τις άλλες δύο δοκιμές στα αδιατάρακτα δείγματα της πιο πλαστικής μάργας και την δοκιμή στην αναζυμωμένη για σύγκριση.



Σχήμα 13.33. Καμπύλη k- $\sigma'_v$  (α) και k-e (β) για την πιο πλαστική Μάργα Κορίνθου.



Σχήμα 13.34. Καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης για την δοκιμή στην πιο πλαστική Μάργα Κορίνθου με μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας σε κάθε τάση μαζί με τις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης και από τις άλλες δύο δοκιμές στο ίδιο υλικό αδιατάρακτο και την καμπύλη από την δοκιμή στο αναζυμωμένο υλικό.



### 13.4.6 Συμπεράσματα από τις δοκιμές συμπίεσης σε φυσικά εδαφικά υλικά

Από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε αδιατάρακτα και αναζυμωμένα δοκίμια από φυσικά εδαφικά υλικά προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Ο συνδυασμός δομής και σχετικά χαμηλού αρχικού βαθμού κορεσμού μπορεί να οδηγήσει τις κανονικοποιημένες καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης κάτω από τη γραμμή εγγενούς συμπίεσης του υλικού, ακόμα και αν η συμπίεση έχει γίνει μέχρι πολύ υψηλές τιμές της κατακόρυφης τάσης όπως στις δοκιμές που παρουσιάστηκαν.
2. Η σιμέντωση των υλικών από την άλλη πλευρά, ακόμα και αν πάλι ο αρχικός βαθμός κορεσμού είναι σχετικά χαμηλός, θα οδηγήσει την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης πάνω από την καμπύλη εγγενούς συμπίεσης και στη συνέχεια, αυξανομένης της τάσης, προοδευτικά προς την καμπύλη εγγενούς συμπίεσης.
3. Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα των δοκιμών στην Μάργα Κορίνθου είναι κρίσιμης σημασίας η σύγκριση των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης φυσικών υλικών με τις καμπύλες εγγενούς συμπίεσης που έχουν μετρηθεί στο ίδιο ακριβώς υλικό. Η χρήση εμπειρικών συσχετίσεων μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε αποτελέσματα που στερούνται φυσικού νοήματος, ενώ η αδυναμία διαχωρισμού μεταξύ επιμέρους ειδών ενός υλικού ακόμα και στο επίπεδο δείγματος μπορεί να μην επιτρέψει τη σύγκριση μεταξύ του σωστού ζεύγους καμπυλών (π.χ. έστω ότι δεν είχαν αξιολογηθεί οι διαφορές μεταξύ Μάργας Κορίνθου χαμηλής και υψηλής πλαστικότητας και επιχειρείτο σύγκριση των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης σε αδιατάρακτα δοκίμια του ενός είδους με την καμπύλη εγγενούς συμπίεσης του άλλου είδους).
4. Τα αποτελέσματα των δοκιμών και σε αυτά τα υλικά σε αναζυμωμένα δοκίμια μαζί με τα αποτελέσματα από τις δοκιμές που διερευνήθηκε η επιρροή του αρχικού ποσοστού υγρασίας των πολτών έχουν διευρύνει πάρα πολύ τη βάση δεδομένων για καμπύλες εγγενούς συμπίεσης εδαφικών υλικών από τον ελλαδικό χώρο και κυρίως υλικών με κυρτές καμπύλες εγγενούς συμπίεσης ενισχύοντας ακόμα περισσότερο την αξία της προταθείσας στο Κεφ. 10 γενικευμένης γραμμής εγγενούς συμπίεσης. Η κύρτωση μάλιστα των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης της Μάργας Κορίνθου γέννησε την ανάγκη διερεύνησης της εγγενούς συμπίεστότητας και άλλων υλικών εξίσου αν όχι και περισσότερο χαμηλής πλαστικότητας.

## **13.5 ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΕ ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ**

### **13.5.1 Εισαγωγή**

Στα πλαίσια της διερεύνησης των εγγενών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε αναζυμωμένα δοκίμια των εδαφικών υλικών που προαναφέρθηκαν. Κατά τη διερεύνηση της συμπεριφοράς των φυσικών εδαφικών υλικών που ακολούθησε διαπιστώθηκε για το χαμηλότερης πλαστικότητας υλικό που δοκιμάστηκε, τη Μάργα Κορίνθου, ότι οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για το υλικό αυτό ήταν έντονα κυρτές, αντίθετα μάλιστα με την πλειοψηφία των μέχρι σήμερα παρατηρήσεων.

Προς διερεύνηση αυτού αναζητήθηκε αρχικά ένα εδαφικό υλικό φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης εξίσου αν όχι και μικρότερης πλαστικότητας από τη Μάργα Κορίνθου, καθώς και η δημιουργία μειγμάτων εδαφικών υλικών τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης με την επιθυμητή πλαστικότητα. Το εδαφικό υλικό φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης με μικρότερη πλαστικότητα από τη Μάργα Κορίνθου που κατέστη διαθέσιμο στη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής ήταν η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων. Από αυτή μάλιστα παρασκευάστηκε αμιγής ιλύς (το διερχόμενο της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων από το κόσκινο Νο 200) και αμιγής πολύ λεπτή άμμος (το διερχόμενο από το κόσκινο Νο 100 και συγκρατούμενο στο κόσκινο Νο 200). Η αμιγής πολύ λεπτή άμμος που παρασκευάστηκε χρησιμοποιήθηκε και για την παρασκευή μειγμάτων με αμιγείς αργίλους συγκεκριμένης ορυκτολογικής σύστασης όπως ο Καολίνης τύπου Speswhite και ο Μπεντονίτης Μήλου.

Η αναζήτηση ενός ακόμα λιγότερο πλαστικού υλικού από τη Μάργα Κορίνθου επιδιώχθηκε προς συμπλήρωση του εύρους πλαστικότητας των εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης στα οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές. Η παρασκευή μειγμάτων με διάφορες περιεκτικότητες σε λεπτόκοκκο υλικό συγκεκριμένης ορυκτολογικής σύστασης και η πραγματοποίηση δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε αυτά κρίθηκε απαραίτητη προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή της ορυκτολογικής σύστασης και η δυνατότητα αναπαραγωγής υπό ελεγχόμενες συνθήκες των αποτελεσμάτων για τα αργιλικά εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης.

### 13.5.2 Δοκιμές στην Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων και εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης που παρασκευάστηκαν από αυτήν

Με δεδομένα τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης στην αναζυμωμένη Μάργα Κορίνθου και την έντονη καμπυλότητα με τα κοίλα προς τα κάτω στο χώρο λόγου κενών - κατακόρυφης τάσης (σε λογ. κλίμακα) και στο χώρο δείκτη κενών – κατακόρυφης τάσης (σε λογ. κλίμακα) αναζητήθηκαν αρχικά εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και ορυκτολογικής σύστασης με ακόμα χαμηλότερη πλαστικότητα και από τη Μάργα Κορίνθου. Ένα τέτοιο εδαφικό υλικό που κατέστη διαθέσιμο στη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής ήταν η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων. Στοιχεία για τη γεωλογική της προέλευση, τα φυσικά και ορυκτολογικά της χαρακτηριστικά παρατίθενται στο Κεφάλαιο 11. Υπενθυμίζεται ότι έχει  $w_L = 24\%$  και  $I_p = 1\%$ . Στην Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές σε αναζυμωμένο υλικό σε αρχικό ποσοστό υγρασίας ίσο με 1.5 φορές το όριο υδαρότητάς του, οι RILS-01 και RILS-02. Εκτός από τις δοκιμές στην ίδια την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης και σε εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης που παρασκευάστηκαν από αυτήν. Αυτά ήταν το διερχόμενο από το κόσκινο No 200 ( $w_L = 25\%$  και  $I_p = 3\%$ ), στο οποίο πραγματοποιήθηκε μία δοκιμή, η PSI-01, και το διερχόμενο από το κόσκινο No 100 και συγκρατούμενο στο κόσκινο No 200 μετά από πολύ καλό πλύσιμο (αμιγής πολύ λεπτόκοκκη άμμος), στο οποίο πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές, οι PVFS-01 και PVFS-02.

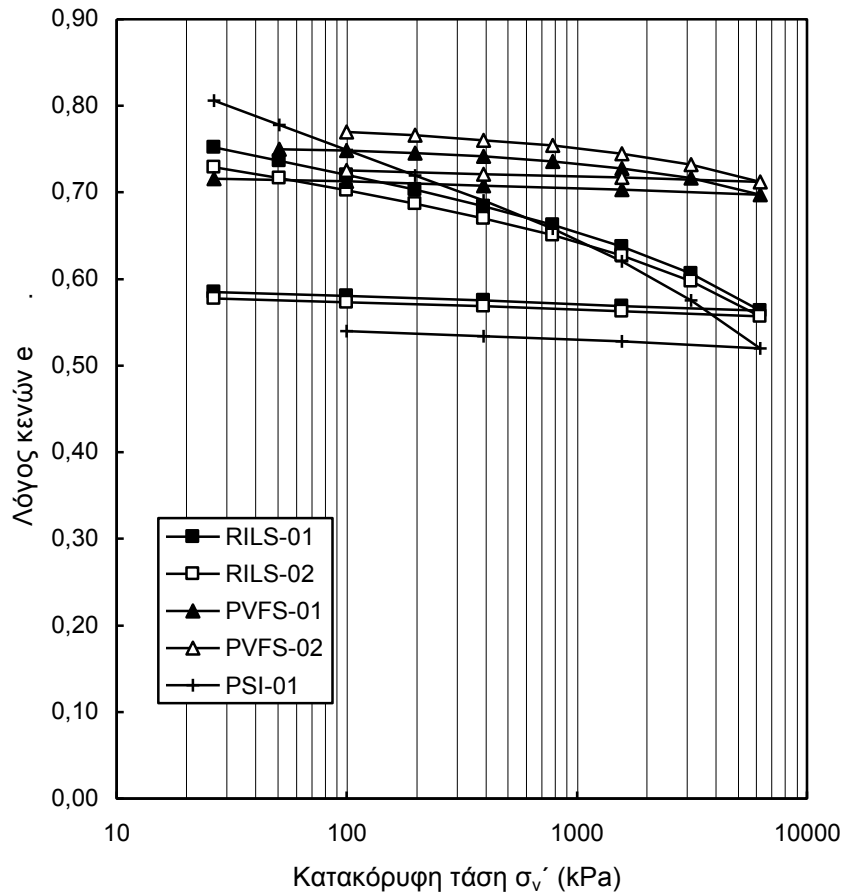
Όλες οι δοκιμές της σειράς αυτής πραγματοποιήθηκαν μέχρι μέγιστη κατακόρυφη τάση 6400 kPa. Οι δοκιμές στην πολύ λεπτόκοκκη άμμο επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν προκειμένου να διαπιστωθεί η συμπεριφορά υπό μονοδιάστατη συμπίεση του πλέον λεπτόκοκκου υλικού που δεν είναι ιλύς ή άργιλος. Αναζητώντας δε την επιρροή έστω και του μικρότερου δυνατού ποσοστού λεπτοκόκκων η δοκιμή PVFS-02 πραγματοποιήθηκε με το ίδιο ακριβώς υλικό της δοκιμής PVFS-01 υποθέτοντας ότι λόγω θραύσης (ή έναρξης θραύσης) των κόκκων της άμμου μέχρι την τάση των 6400 kPa της προηγούμενης δοκιμής θα πρέπει να υπήρχαν πλέον κάποια λεπτόκοκκα (χαλαζιτικής προέλευσης μάλιστα ως προϊόντα θραύσης των κόκκων της άμμου) παρά το προηγούμενο αρχικό καλό πλύσιμο. Πράγματι η κοκκομέτρηση που έγινε μετά την ολοκλήρωση και της δοκιμής PVFS-02 έδειξε παρουσία λεπτοκόκκων σε ποσοστό περί το 1%. Η δημιουργία λεπτόκοκκου υλικού λόγω θραύσης κόκκων ανά δοκιμή λοιπόν μπορεί να θεωρηθεί ότι ανέρχεται περίπου στο μισό, δηλαδή 0.5% για κάθε κύκλο φόρτισης ως τα 6400 kPa. Προφανώς δεν πραγματοποιήθηκε κοκκομέτρηση αμέσως μετά την δοκιμή PVFS-01 αφού

υπήρχε η βάσιμη υποψία ότι το ποσοστό των λεπτόκοκκων θα ήταν πολύ μικρό και θα ήταν ιδιαίτερα δύσκολη η κατάλληλη ανάμειξή του με την υπόλοιπη λεπτόκοκκη άμμο από την οποία προήλθε. Σε ό,τι αφορά τη λεπτόκοκκη άμμο πριν τις δοκιμές η παρουσία λεπτοκόκκων μετά από καλό πλύσιμο ήταν μικρότερη του 0.1%. Οι διαφορές αυτές στην κοκκομετρική διαβάθμιση της πολύ λεπτόκοκκης άμμου μετά και την δοκιμή PVFS-02 επιβεβαιώνουν ότι η συγκεκριμένη άμμος χαρακτηρίζεται από πολύ μικρή δημιουργία λεπτόκοκκου κλάσματος κατά τη συμπίεσή της μέχρι μεγάλες τιμές της κατακόρυφης τάσης και κατά συνέπεια αποτελεί καταλληλότερο υλικό ως συστατικό σε μείγματα άμμου-αργίλων. Αυτό οφείλεται μάλλον στο ότι οι κόκκοι της είναι αποστρογγυλευμένοι αφού προέρχεται από φυσική λιμναία απόθεση και γι' αυτό τελικά προτιμήθηκε σε σχέση με την προμήθεια μίας τυποποιημένης άμμου εμπορίου, η οποία όμως θα ήταν προϊόν θραύσης αδρανών και άρα πιο επιρρεπής στη δημιουργία λεπτόκοκκου κλάσματος κατά τη συμπίεσή της μέχρι υψηλές τιμές της κατακόρυφης τάσης<sup>21</sup>.

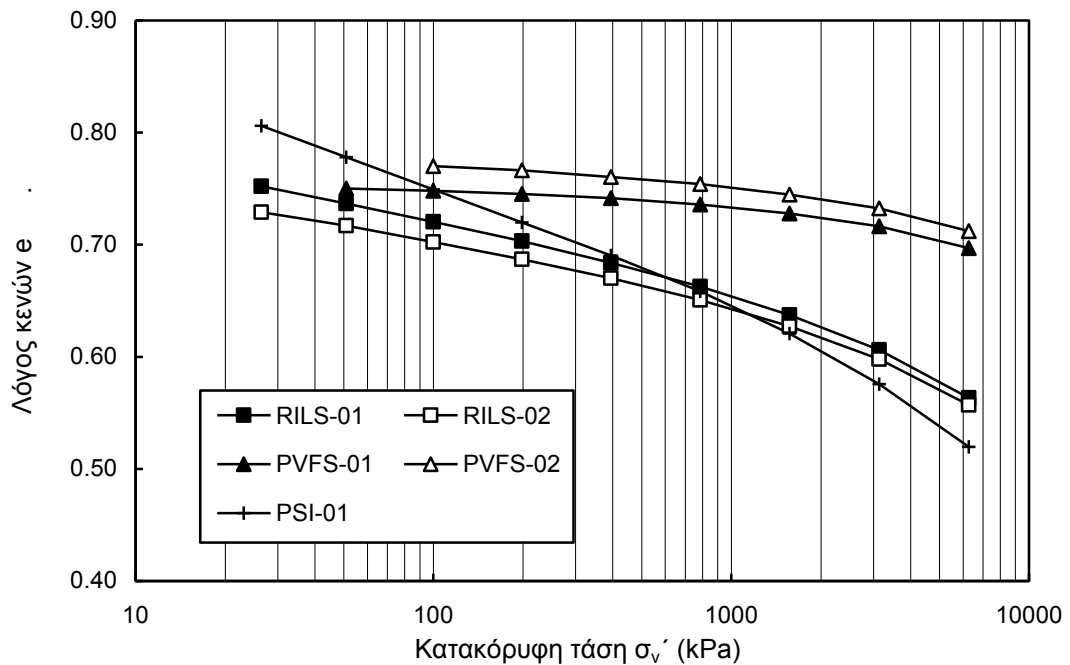
Στον Πίν. 13.28 παρουσιάζονται οι σπουδαιότερες τιμές παραμέτρων που προσδιορίστηκαν από τις δοκιμές στην Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων και τα εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης που παρασκευάστηκαν από αυτήν. Στο Σχ. 13.35α παρουσιάζονται οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης που προσδιορίστηκαν μαζί με τους κλάδους αποφόρτισης και στο Σχ. 13.35β χωρίς τον κλάδο αποφόρτισης και σε μεγέθυνση (άξονας λόγου κενών  $e$  μεταξύ 0.40 και 0.90). Στο Σχ. 13.36α παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης όπου προβάλλεται επίσης και η Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης και στο Σχ. 13.36β οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης σε μεγέθυνση του άξονα της κατακόρυφης τάσης μεταξύ 100 και 1000 kPa και του άξονα του δείκτη κενών μεταξύ  $-1$  και  $0$ .

Όπως προκύπτει από τη μορφή των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης (απλών και κανονικοποιημένων) στα Σχ. 13.35 και 13.36, οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης και των τριών υλικών είναι κυρτές με τα κοίλα προς τα κάτω. Όπως προκύπτει δε από το Σχ. 13.36 με τις κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, πιο κυρτή είναι η κανονικοποιημένη καμπύλη της πολύ λεπτόκοκκης άμμου, αμέσως λιγότερο κυρτή η καμπύλη της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων και λιγότερο κυρτή από όλες η καμπύλη της αμιγούς ιλύος. Αυξανόμενη της πλαστικότητας λοιπόν μειώνεται η κυρτότητα των κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης.

<sup>21</sup> Παρόλο βέβαια που θα είχε το πλεονέκτημα της μεγαλύτερης ομοιογένειας ως τυποποιημένο υλικό. Προκειμένου για την άμμο από την ιλύ λίμνης Ιωαννίνων που χρησιμοποιήθηκε τελικά η ομοιογένειά της εξασφαλίστηκε με την παραγωγή μεγάλης ποσότητας μέσω κοσκινίσματος και την πολύ καλή ανάδευση πριν την έναρξη των δοκιμών.

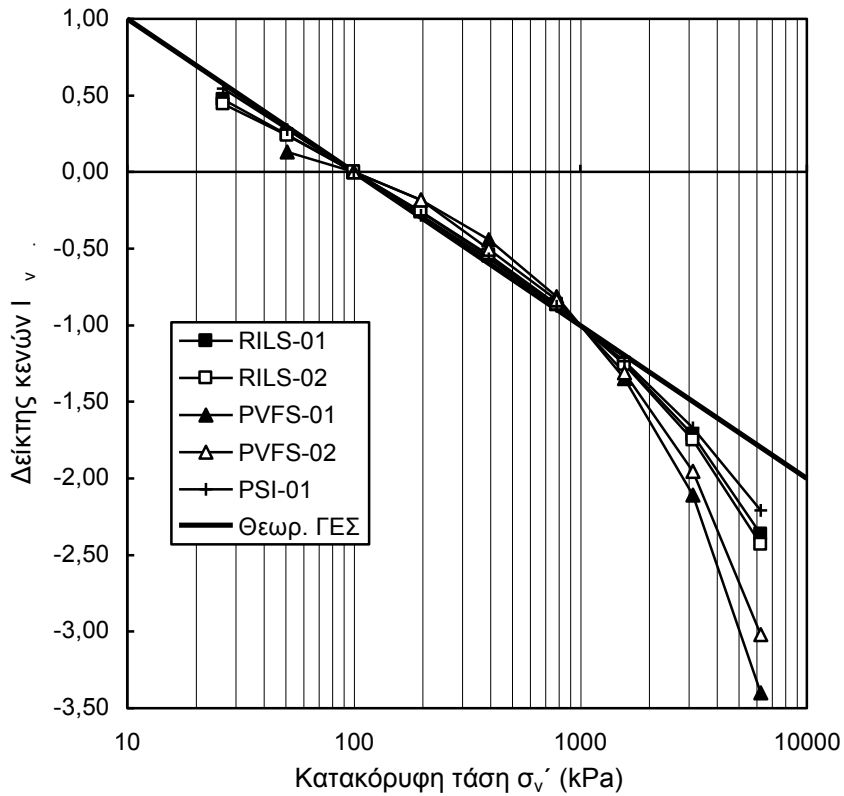


(α)

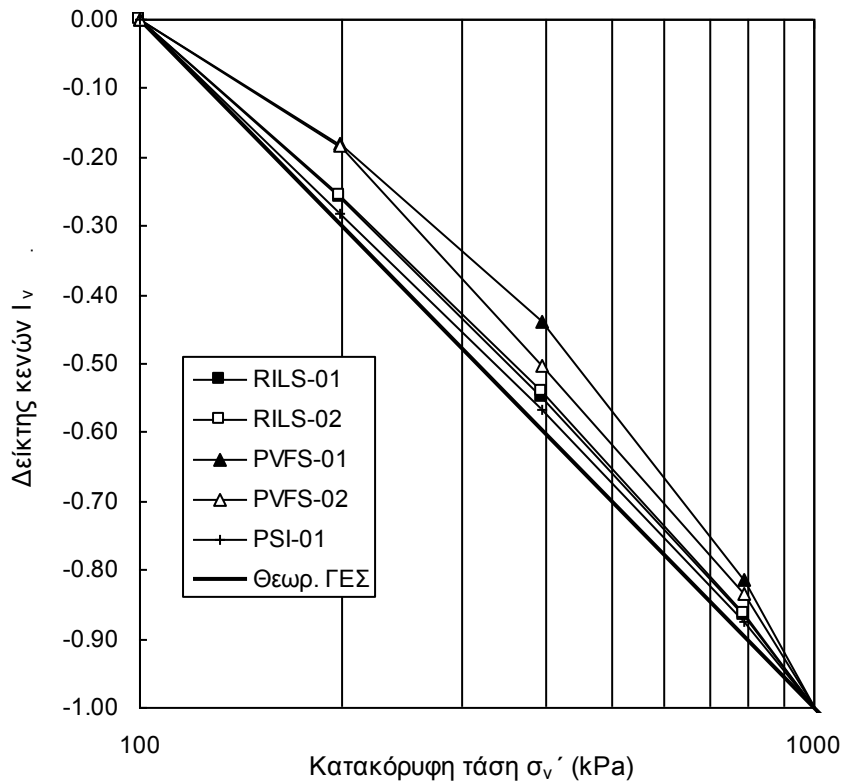


(β)

**Σχήμα 13.35.** α) Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης με τον κλάδο αποφόρτισης για την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, την αμιγή ιλύ και την αμιγή πολύ λεπτόκοκκη άμμο που προήλθαν από αυτήν, και β) οι ίδιες καμπύλες σε μεγέθυνση ως προς τον άξονα του λόγου κενών.



(α)



(β)

**Σχήμα 13.36.** α) Κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, την αμιγή ιλύ και την αμιγή πολύ λεπτόκοκκη άμμο που προήλθαν από αυτήν, και β) οι ίδιες καμπύλες σε μεγέθυνση ως προς τον άξονα του δείκτη κενών.

**Πίνακας 13.28.** Παράμετροι εγγενούς συμπίεστος από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων (αναζυμωμένη και διαταραγμένη στη φυσική της υγρασία) και αναζυμωμένη αμιγή ιλύ και πολύ λεπτόκοκκη άμμο που παρήχθησαν από αυτήν.

Δοκιμή	w <sub>o</sub> στόχος (%)	w <sub>o</sub> που επιτεύχθηκε (%)	e* <sub>o</sub>	e* <sub>1</sub>	e* <sub>100</sub>	e* <sub>1000</sub>	C <sub>c</sub> *	C <sub>r,h</sub>	C <sub>r,l</sub>
RILS-01	36.0	37.0	0.936	0.934	0.721	0.654	0.067	0.010	0.009
RILS-02	36.0	37.0	0.926	0.807	0.703	0.643	0.060	0.009	0.009
PSI-01	37.5	41.32	1.250	0.929	0.749	0.645	0.104	0.015	0.011
PVFS-01	-	-	0.755	0.755	0.748	0.733	0.015	0.011	0.008
PVFS-02	-	-	0.787	0.787	0.770	0.751	0.019	0.009	0.007

**Πίνακας 13.29.** Εγγενείς παράμετροι απόστασης και εμπειρικές τιμές παραμέτρων α, β, γ και δ για την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων (αναζυμωμένη) και αναζυμωμένη αμιγή ιλύ και πολύ λεπτόκοκκη άμμο που παρήχθησαν από αυτήν.

Δοκιμή	d* (υπολ.)	d* (προσέγγιση)		α	β	γ	δ
RILS-01	0.030	0.048	Από το d*	1.495	-1.025	0.288	-0.074
			Εμπειρικά	2.675	-2.424	0.820	-0.139
PSI-01	0.018	0.036	Από το d*	1.407	-0.756	0.110	-0.042
			Εμπειρικά	2.917	-2.490	0.752	-0.119
PVFS-01	0.108	0.106	Από το d*	4.133	-5.035	2.237	-0.376
			Εμπειρικά	5.103	-6.402	2.829	-0.456

### 13.5.3 Δοκιμές σε μείγματα Καολίνη Speswhite - Άμμου

Μετά και από τα αποτελέσματα των δοκιμών στην Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων και τη διαπίστωση της επιρροής του ορίου υδαρότητας και της πλαστικότητας στη μονοδιάστατη συμπίεση αναζυμωμένων εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, η διερεύνηση της εγγενούς συμπίεστότητας συνεχίστηκε και για μείγματα αργίλων-άμμων. Τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν μέχρι αυτό το σημείο επιβεβαιώνουν την επιρροή της πλαστικότητας αλλά δεδομένου ότι η διερεύνηση έγινε για εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, άρα για εδαφικά υλικά μη ελεγχόμενης και ανομοιόμορφης ορυκτολογικής σύστασης, διερευνήθηκε η επιρροή της πλαστικότητας για δεδομένη ορυκτολογική σύσταση. Έτσι παρασκευάστηκαν μείγματα εδαφικών υλικών τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης για την περαιτέρω διερεύνηση της πλαστικότητας των εδαφικών υλικών και του περιεχόμενου ποσοστού αργιλικού υλικού στην εγγενή συμπίεστοτητα των εδαφικών υλικών για δεδομένη πλέον ορυκτολογική σύσταση.

Αρχικά παρασκευάστηκαν μείγματα καολίνη-άμμου με διαφορετική περιεκτικότητα σε καολίνη. Ο καολίνης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο καολίνης τύπου Speswhite που υπήρχε άμεσα διαθέσιμος, ήταν γνωστά τα φυσικά του χαρακτηριστικά και η ορυκτολογική του σύσταση είναι δεδομένη, οπότε τα παρατηρούμενα φαινόμενα οφείλονται στην παρουσία ενός και μόνο αργιλικού ορυκτού. Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η πολύ λεπτή άμμος που περιέχεται στην Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων και παρουσιάστηκαν ήδη τα αποτελέσματα μονοδιάστατης συμπίεσης σε αυτήν στην §13.5.2. Αποτελεί το διερχόμενο από το κόσκινο Νο 100 και το συγκρατούμενο στο κόσκινο Νο 200 της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων (μετά από πολύ καλό πλύσιμο) και είναι χαλαζιτική.

Από τα δύο αυτά υλικά παρασκευάστηκαν πέντε μείγματα με διαφορετικές περιεκτικότητες σε καολίνη τύπου Speswhite για τα οποία προσδιορίστηκαν τα φυσικά τους χαρακτηριστικά (βλ. Κεφ. 11) και οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσής τους. Τα μείγματα αυτά ήταν: SK-05 με 5% καολίνη, SK-10 με 10% καολίνη, SK-20 με 20% καολίνη, SK-35 με 35% καολίνη και SK-50 με 50% καολίνη. Τα μείγματα SK-05 και SK-10 συμπεριφέρονται ως μη πλαστικά υλικά αφού δεν κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός τιμών ορίων Atterberg για αυτά. Το μείγμα SK-20 είναι ένα υλικό οριακά πλαστικό με  $w_L = 19.5\%$  και  $w_P = 18.8\%$ , δηλαδή δείκτη πλαστικότητας  $I_P = 0.7\%$ . Το μείγμα αυτό αντιπροσωπεύει μεταξύ των υλικών τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης το αντίστοιχο της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων από τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Τέλος, τα μείγματα SK-35 και SK-50 συνιστούν αργίλους χαμηλής πλαστικότητας



αφού έχουν  $w_L = 21.5\%$  και  $I_P = 6\%$  και  $w_L = 26.5\%$  και  $I_P = 8.5\%$  αντίστοιχα. Ο δε αμιγής καολίνης τύπου Speswhite είναι μία άργιλος υψηλής πλαστικότητας με  $w_L = 64\%$  και  $I_P = 32\%$ .

Οι δοκιμές της σειράς αυτής πραγματοποιήθηκαν μέχρι μέγιστη κατακόρυφη τάση 6400 kPa εκτός από τη δοκιμή SK-50 που πραγματοποιήθηκε μέχρι μέγιστη τάση 4800 kPa και τη δοκιμή SK200 που πραγματοποιήθηκε μέχρι μέγιστη τάση 1600 kPa και ανήκει στη σειρά δοκιμών στον αναζυμωμένο καολίνη με διαφορετικές τιμές του αρχικού ποσοστού υγρασίας (βλ. σχετικά §13.3.7 -γι' αυτό και το 200 εδώ δηλώνει το αρχικό ποσοστό υγρασίας ως προς το όριο υδαρότητας του υλικού).

Στον Πίν. 13.30 παρουσιάζονται οι σπουδαιότερες τιμές παραμέτρων που προσδιορίστηκαν από τις δοκιμές στα μείγματα καολίνη-άμμου. Στο Σχ. 13.37α παρουσιάζονται οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης που προσδιορίστηκαν μαζί με τους κλάδους αποφόρτισης και στο Σχ. 13.37β χωρίς τον κλάδο αποφόρτισης και σε μεγέθυνση (άξονας λόγου κενών  $e$  μεταξύ 0.30 και 1.30). Στο Σχ. 13.38α παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης όπου προβάλλεται επίσης και η Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης και στο Σχ. 13.38β οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης σε μεγέθυνση του άξονα της κατακόρυφης τάσης μεταξύ 100 και 1000 kPa και του άξονα του δείκτη κενών μεταξύ  $-1$  και 0.

Όπως προκύπτει από τη μορφή των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης (απλών και κανονικοποιημένων) στα Σχ. 13.37 και 13.38, οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης και της αμιγούς άμμου και των μειγμάτων SK-05, SK-10 και SK-20 είναι κυρτές με τα κοίλα προς τα κάτω, ενώ οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης των μειγμάτων SK-35 και SK-50 και του αμιγούς καολίνης είναι κοίλες με τα κοίλα προς τα πάνω. Όπως προκύπτει δε από το Σχ. 13.38 με τις κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, πιο κυρτή είναι η κανονικοποιημένη καμπύλη της πολύ λεπτής άμμου, αμέσως λιγότερο κυρτή η καμπύλη του μείγματος SK-05, λιγότερο κυρτή η καμπύλη του μείγματος SK-10, ακόμα λιγότερο κυρτή η καμπύλη του μείγματος SK-20 και η καμπύλη του μείγματος SK-35 είναι η πρώτη που γίνεται κοίλη με την καμπύλη του μείγματος SK-50 να γίνεται περισσότερο κοίλη και την καμπύλη του αμιγούς καολίνης να είναι η πιο κοίλη από όλες. Αυξανόμενης της πλαστικότητας λοιπόν, ως αποτέλεσμα της αύξησης της περιεκτικότητας των μειγμάτων σε καολίνη, μειώνεται αρχικά η κυρτότητα των κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης. Από ένα όριο περιεκτικότητας σε καολίνη περί το 27% φαίνεται ότι οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης παύουν πλέον να είναι κυρτές και γίνονται κοίλες, τόσο πιο κοίλες δε όσο αυξάνεται η πλαστικότητα ως αποτέλεσμα της

περιεκτικότητας σε καολίνη. Στον Πιν. 13.31 συνοψίζονται οι τιμές των εγγενών παραμέτρων απόστασης για τις δοκιμές που περιγράφηκαν μαζί με τις τιμές των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  που προκύπτουν απευθείας από την εγγενή παράμετρο απόστασης και την προσομοίωση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης.

Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.38α, μια βασική διαφορά ανάμεσα στις καμπύλες που στρέφουν τα κοίλα προς τα κάτω σε σχέση με τις καμπύλες που στρέφουν τα κοίλα προς τα πάνω είναι ότι μετά την τάση των 1000 kPa, οι κυρτές καμπύλες απομακρύνονται πολύ περισσότερο από την ΘΓΕΣ σε σχέση με τις καμπύλες που στρέφουν τα κοίλα προς τα πάνω. Αυτή η βασική ποιοτική διαφοροποίηση τονίζει ακόμα περισσότερο την σημασία της διαπίστωσης ότι υπάρχουν καμπύλες εγγενούς συμπίεσης που στρέφουν τα κοίλα προς τα πάνω και άρα της πρότασης για την γενικευμένη γραμμή εγγενούς συμπίεσης (βλ. Κεφ. 10) αφού οι επιπτώσεις της παραδοχής για χρήση της ΘΓΕΣ ή κάποιας εμπειρικής συσχέτισης για την ΓΕΣ θα είναι μικρότερες στις περιπτώσεις των καμπυλών που στρέφουν τα κοίλα προς τα πάνω (αφού είναι μικρότερη η απόστασή τους από κάποια από αυτές τις γραμμές αναφοράς με την αύξηση της τάσης πάνω από τα 1000 kPa) παρά στις περιπτώσεις των κυρτών καμπυλών εγγενούς συμπίεσης.

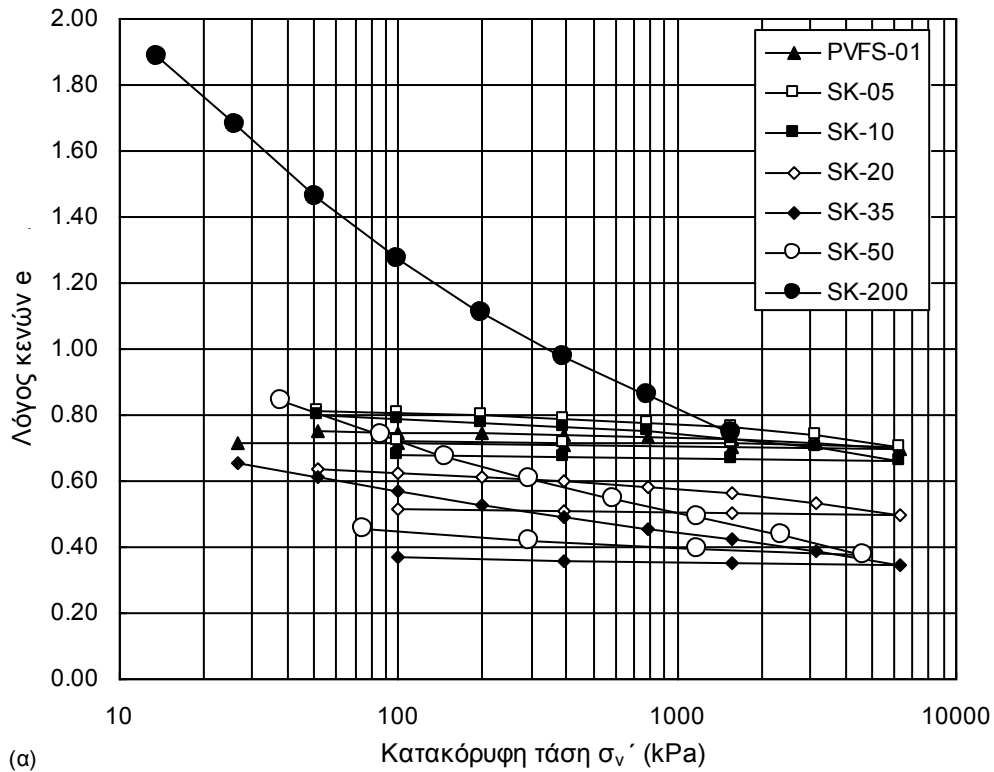
Τέλος σε ό,τι αφορά το Σχ. 13.38β επισημαίνεται η ομοιότητά του με την θεωρητική εξέλιξη που επιδείχθηκε στο Σχ. 10.2β στο Κεφ. 10 καθώς διακρίνεται αφενός η συμμετρία των κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης ως προς την κάθετο στην ΘΓΕΣ αλλά και η εξέλιξη της κύρτωσής τους ως προς την μία ή την άλλη πλευρά της ΘΓΕΣ ανάλογα με την περιεκτικότητα σε καολίνη.

**Πίνακας 13.30.** Παράμετροι εγγενούς συμπίεστος από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αμιγή πολύ λεπτόκοκκη άμμο που προήλθε από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, αμιγή καολίνη τύπου Speswhite, αναζυμωμένο σε αρχικό ποσοστό υγρασίας 200% του ορίου υδαρότητάς του και μείγματα των δύο υλικών με διαφορετική περιεκτικότητα σε καολίνη.

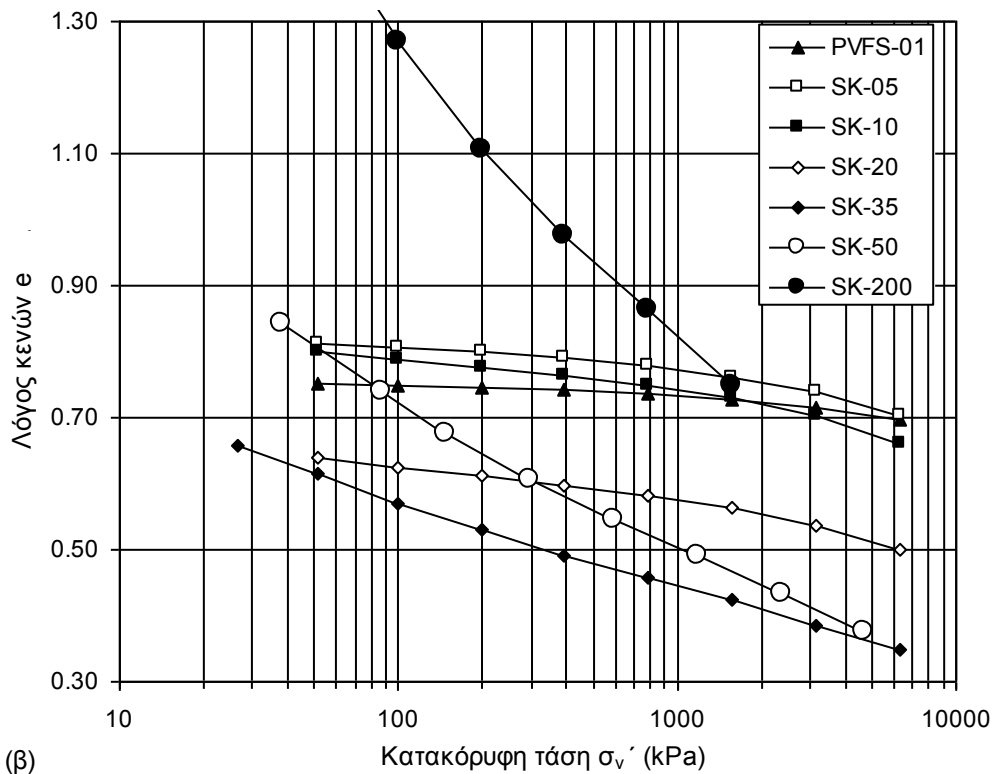
Δοκιμή	w <sub>o</sub> στόχος (%)	w <sub>o</sub> που επιτεύχθηκε (%)	e* <sub>o</sub>	e* <sub>1</sub>	e* <sub>100</sub>	e* <sub>1000</sub>	C <sub>c</sub> *	C <sub>r,h</sub>	C <sub>r,l</sub>
PVFS-01	-	-	0.755	0.755	0.748	0.733	0.015	0.011	0.008
SK-05	-	38.72	0.830	0.830	0.807	0.772	0.035	0.014	0.011
SK-10	-	43.34	0.883	0.848	0.789	0.742	0.047	0.010	0.010
SK-20	>30	48.27	0.904	0.815	0.625	0.575	0.050	0.010	0.008
SK-35	>33	39.36	1.112	0.930	0.571	0.445	0.125	0.009	0.013
SK-50	>40	63.25	1.726	1.442	0.723	0.504	0.219	0.035	0.043
SK-200	128	139	3.457	2.806	1.269	0.865	0.404	0.076	0.092

**Πίνακας 13.31.** Εγγενείς παράμετροι απόστασης από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αμιγή πολύ λεπτόκοκκη άμμο που προήλθε από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, αμιγή καολίνη τύπου Speswhite, αναζυμωμένο σε αρχικό ποσοστό υγρασίας 200% του ορίου υδαρότητάς του και μείγματα των δύο υλικών με διαφορετική περιεκτικότητα σε καολίνη.

Δοκιμή	d* (υπολ.)	d* (προσέγγιση)		α	β	γ	δ
PVFS-01	0.108	0.106	Από το d*	4.133	-5.035	2.237	-0.376
			Εμπειρικά	5.103	-6.402	2.829	-0.456
SK-05	0.065	0.085	Από το d*	2.729	-3.036	1.312	-0.238
			Εμπειρικά	4.684	-5.386	2.213	-0.349
SK-10	0.038	0.072	Από το d*	2.123	-2.119	0.867	-0.169
			Εμπειρικά	4.696	-5.132	1.994	-0.305
SK-20	0.040	0.059	Από το d*	1.706	-1.433	0.516	-0.113
			Εμπειρικά	4.336	-4.446	1.626	-0.245
SK-35	-0.029	-0.010	Από το d*	2.387	-1.342	0.081	-0.003
			Εμπειρικά	3.241	-2.343	0.462	-0.051
SK-50	-0.048	-0.026	Από το d*	3.207	-2.136	0.310	-0.022
			Εμπειρικά	4.374	-3.524	0.841	-0.088
SK-200	-0.055	-0.031	Από το d*	3.513	-2.446	0.407	-0.031
			Εμπειρικά	3.023	-1.253	-0.299	0.089

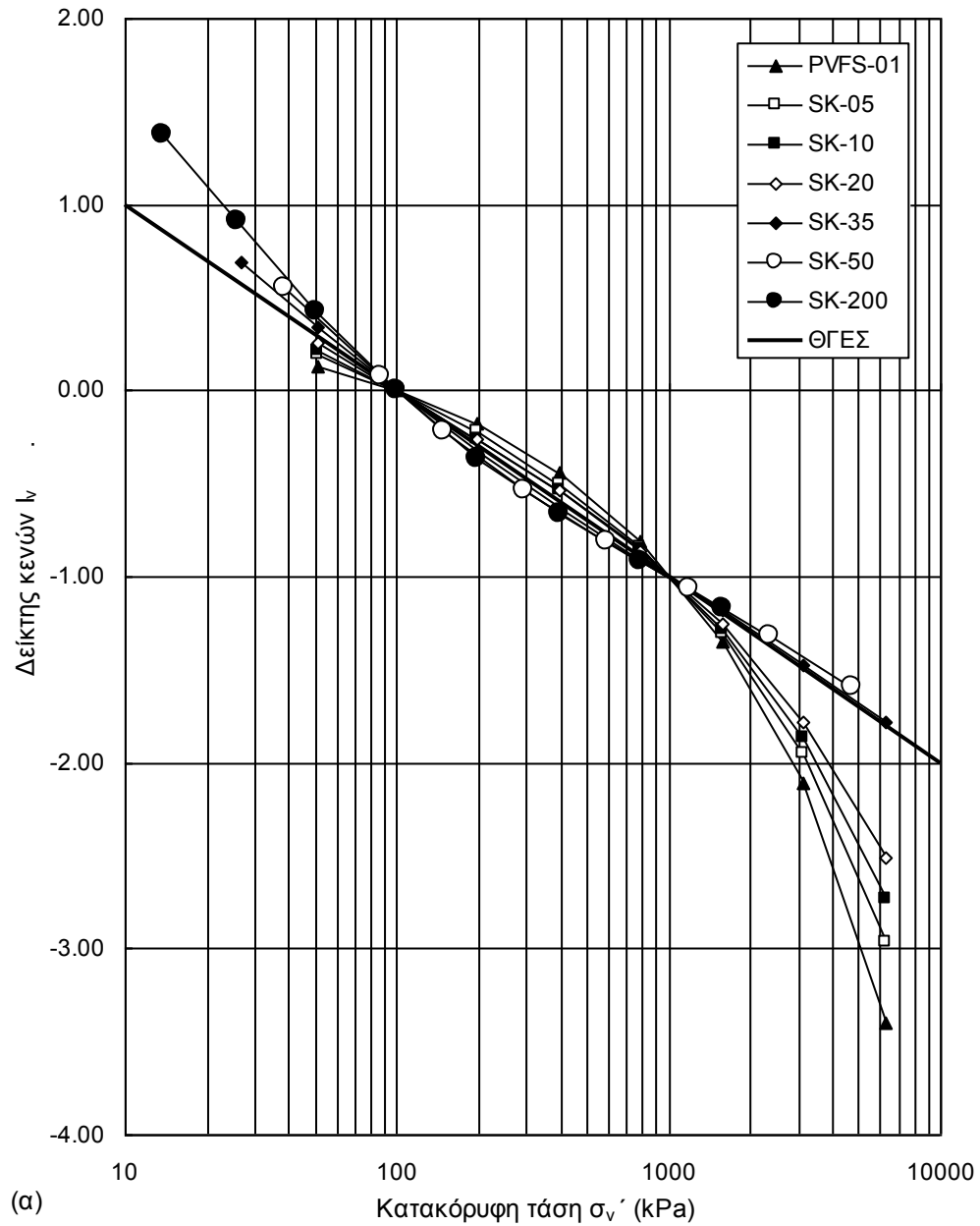


(α)

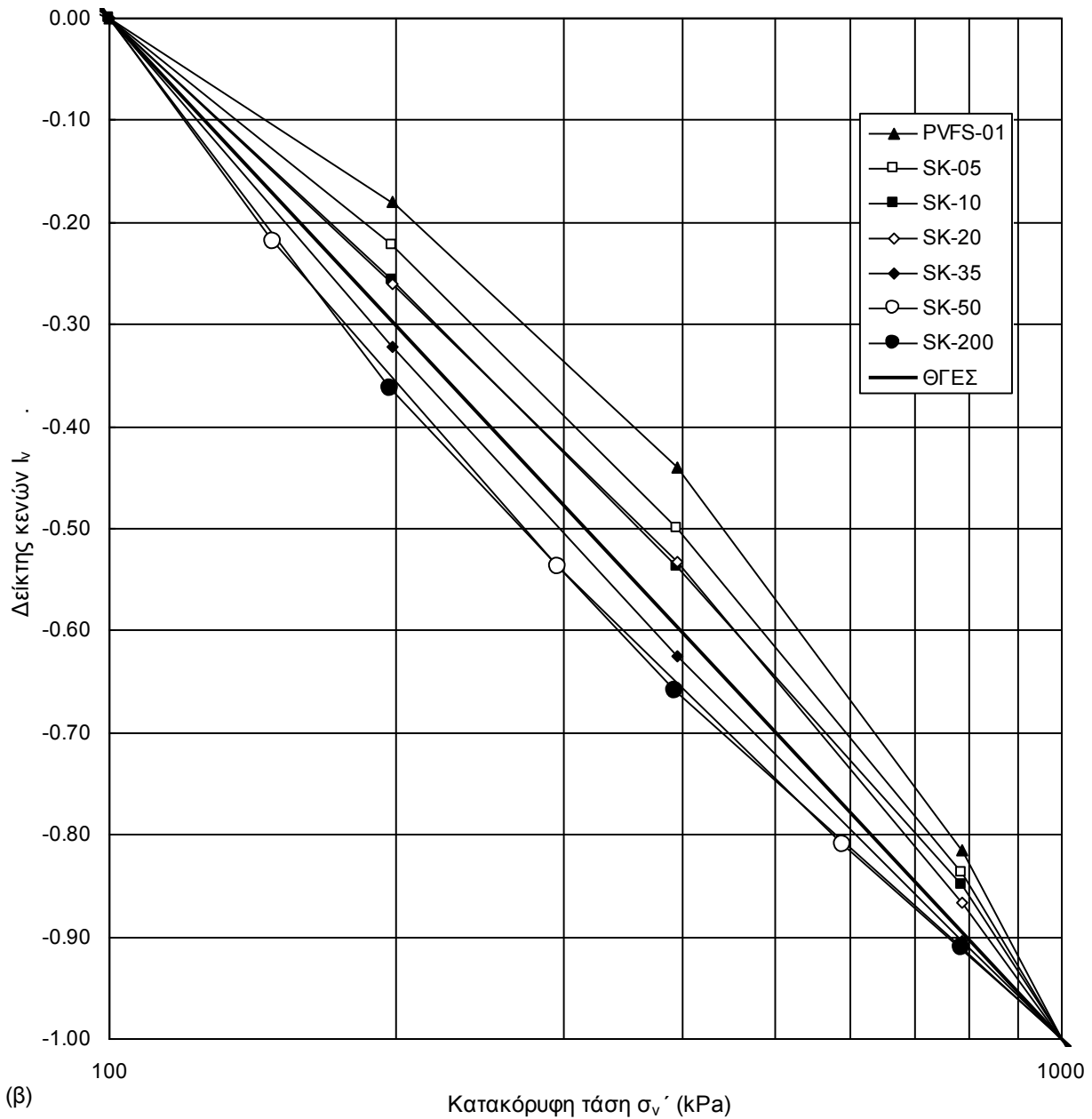


(β)

**Σχήμα 13.37.** α) Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης με τον κλάδο αποφόρτισης για την αμιγή λεπτόκοκκη άμμο από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, τον αμιγή καολίνη τύπου Speswhite και τα μείγματα αυτών, β) οι ίδιες καμπύλες σε μεγέθυνση ως προς τον άξονα του λόγου κενών.

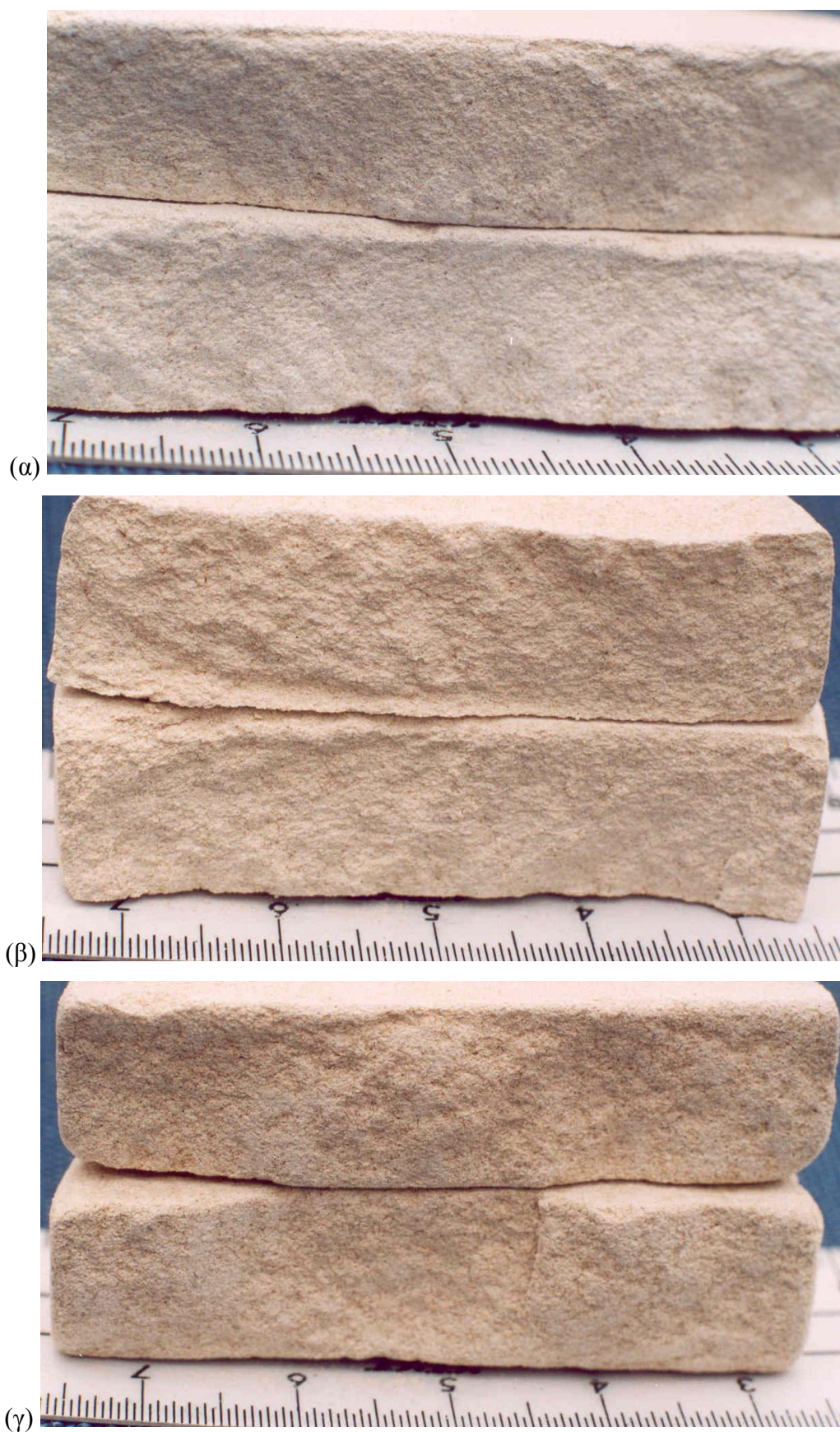


**Σχήμα 13.38.** α) Κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για την αμιγή λεπτόκοκκη άμμο από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, τον αμιγή καολίνη τύπου Speswhite και τα μείγματα αυτών.



**Σχήμα 13.38.** β) Κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για την αμιγή λεπτόκοκκη άμμο από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, τον αμιγή καολίνη τύπου Speswhite και τα μείγματα αυτών με μεγέθυνση του άξονα του δείκτη κενών μεταξύ -1 και 0 και του άξονα της κατακόρυφης τάσης μεταξύ 100 και 1000 kPa.

Στις Φωτ. 13.1 παρουσιάζεται πολύ κοντινή άποψη των τεμαχισμένων μειγμάτων SK-50 (Φωτ. 13.1α), SK-35 (Φωτ. 13.1β) και SK-20 (Φωτ. 13.1γ). Τα μείγματα SK-05 και SK-10 ήταν πολύ ψαθυρά και διέλυαν αμέσως μετά την ξήρανό τους οπότε δεν κατέστη δυνατή η φωτογράφησή τους.



**Φωτογραφία 13.1.** α) Δοκίμιο μείγματος SK-50, β) μείγματος SK-35, και γ) μείγματος SK-20.

### 13.5.4 Δοκιμές σε μείγματα Μπεντονίτη - Άμμου

Μετά από την ολοκλήρωση των δοκιμών σε μείγματα καολίνη-άμμου παρασκευάστηκαν μείγματα μπεντονίτη-άμμου με διαφορετική περιεκτικότητα σε μπεντονίτη (τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών προέρχονται από τον Αναστασίου, 2004<sup>22</sup>). Ο μπεντονίτης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο μπεντονίτης Μήλου που υπήρχε άμεσα διαθέσιμος στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων (προέλευσης ΚΕΔΕ) και η άμμος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η πολύ λεπτή άμμος που περιέχεται στην Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων.

Από τα δύο αυτά υλικά παρασκευάστηκαν πέντε μείγματα με διαφορετικές περιεκτικότητες σε μπεντονίτη για τα οποία προσδιορίστηκαν τα φυσικά τους χαρακτηριστικά (βλ. Κεφ. 11) και οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσής τους. Τα μείγματα αυτά ήταν: SB-02 με 2% μπεντονίτη, SB-04 με 4% μπεντονίτη, SB-07 με 7% μπεντονίτη, SB-10 με 10% μπεντονίτη και SB-15 με 15% μπεντονίτη. Το μείγμα SB-02 συμπεριφέρεται ως μη πλαστικό υλικό αφού δεν κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός τιμών ορίων Atterberg για αυτό. Τα μείγματα SB-04 και SB-07 συνιστούν αργίλους χαμηλής πλαστικότητας αφού έχουν  $w_L = 32.5\%$  και  $I_P = 5.5\%$  και  $w_L = 40.5\%$  και  $I_P = 11\%$  αντίστοιχα. Τέλος τα μείγματα SB-10 και SB-15 συνιστούν αργίλους υψηλής πλαστικότητας αφού έχουν  $w_L = 53\%$  και  $I_P = 20\%$  και  $w_L = 55\%$  και  $I_P = 24\%$  αντίστοιχα. Ο δε αμιγής μπεντονίτης Μήλου είναι μία άργιλος παρά πολύ υψηλής πλαστικότητας με  $w_L = 565\%$  και  $I_P = 525\%$ .

Στον Πίν. 13.32 παρουσιάζονται οι σπουδαιότερες τιμές παραμέτρων που προσδιορίστηκαν από τις δοκιμές στα μείγματα μπεντονίτη-άμμου. Στο Σχ. 13.39 παρουσιάζονται οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης που προσδιορίστηκαν. Στο Σχ. 13.40α παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης όπου προβάλλεται επίσης και η Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης και στο Σχ. 13.40β οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης σε μεγέθυνση του άξονα της κατακόρυφης τάσης μεταξύ 100 και 1000 kPa και του άξονα του δείκτη κενών μεταξύ -1 και 0. Οι καμπύλες που παρουσιάζονται για τα μείγματα SB-02, SB-04, SB-07 και SB-10 αποτελούν μέσους όρους δύο δοκιμών που εκτελέστηκαν σε κάθε δείγμα. Επίσης επιχειρήθηκε η εκτέλεση δοκιμής σε μείγμα με 20% μπεντονίτη και 80% άμμο αλλά το μείγμα αυτό αποδείχθηκε τόσο συμπιεστό που ήταν αδύνατη η υπέρβαση κατακόρυφης τάσης μεγαλύτερης από 200 kPa γιατί ο βραχίονας επαύξησης του κατακόρυφου φορτίου στο

---

<sup>22</sup> Διπλωματική εργασία στον Τομέα Γεωτεχνικής η οποία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του γράφοντος.



συμπιεσόμετρο ακουμπούσε στην κλίνη του συμπιεσομέτρου, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να ολοκληρωθεί η δοκιμή μέχρι τη ζητούμενη τάση.

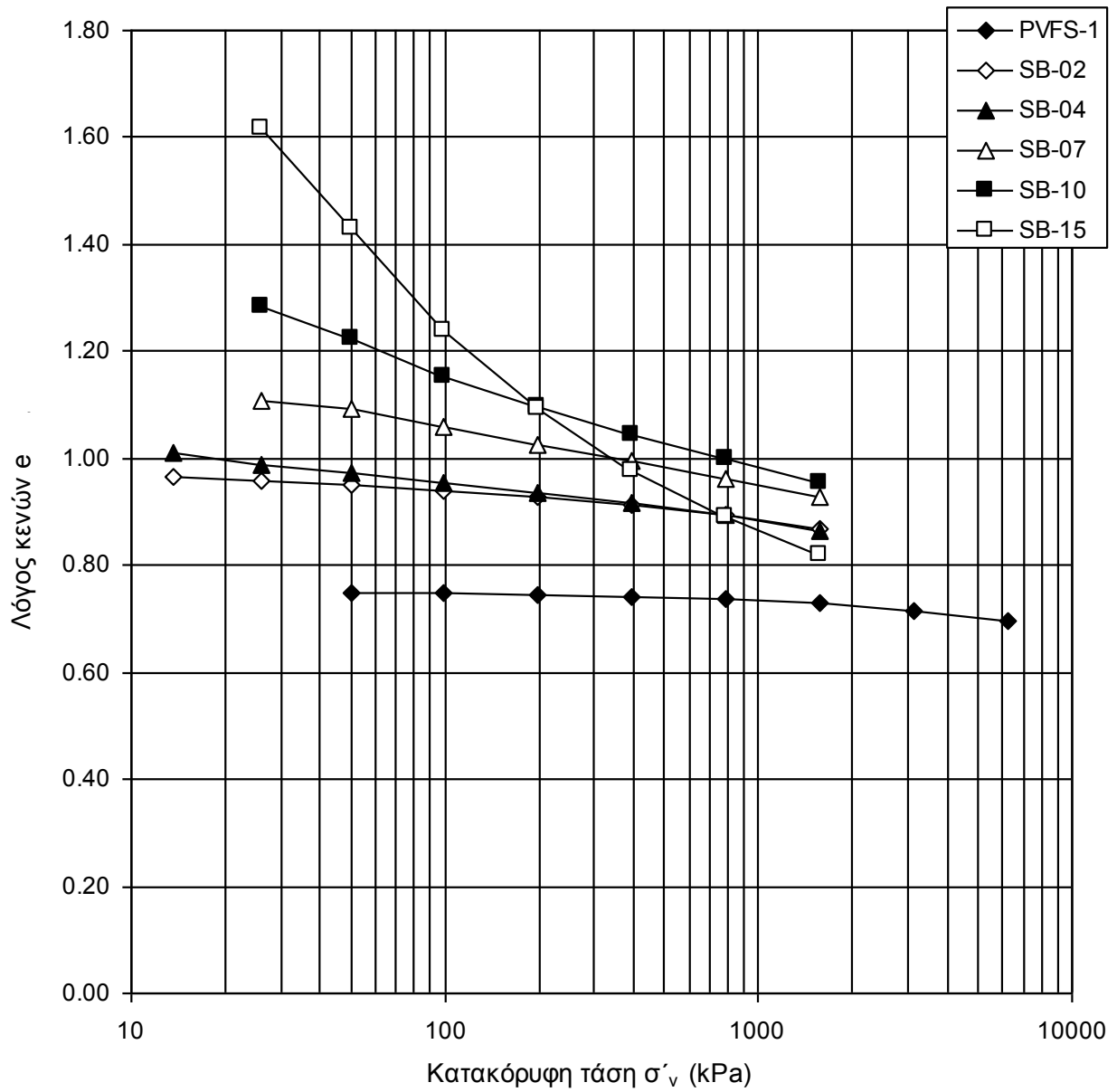
Όπως προκύπτει από τη μορφή των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης (απλών και κανονικοποιημένων) στα Σχ. 13.39 και 13.40, οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης και της αμιγούς άμμου και των μειγμάτων SB-02 και SB-04 είναι κυρτές, ενώ οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης των μειγμάτων SB-10 και SB-15 είναι κοίλες με τα κοίλα προς τα πάνω. Η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης του μείγματος SB-07 προκύπτει πρακτικά επί της ΘΓΕΣ υποδεικνύοντας ότι το όριο μεταβολής της συμπεριφοράς είναι στο ποσοστό 7% του μπεντονίτη. Προφανώς λόγω της μεγαλύτερης δραστηριότητας αυτού του αργιλικού ορυκτού το ποσοστό αυτό είναι πολύ μικρότερο από το 27% που αποτελεί το όριο μεταβολής στα μείγματα καολίνη-άμμου. Όπως προκύπτει δε από το Σχ. 13.40 με τις κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης, πιο κυρτή είναι η κανονικοποιημένη καμπύλη της πολύ λεπτής άμμου, αμέσως λιγότερο κυρτή η καμπύλη του μείγματος SB-02, λιγότερο κυρτή η καμπύλη του μείγματος SB-04, πρακτικά ευθεία η καμπύλη του μείγματος SB-07 και η καμπύλη του μείγματος SB-10 είναι η πρώτη που γίνεται κοίλη με την καμπύλη του μείγματος SB-15 να γίνεται και την καμπύλη του αμιγούς καολίνη να είναι η πιο κοίλη από όλες. Όπως και με τα μείγματα καολίνη-άμμου λοιπόν, αυξανόμενης της πλαστικότητας, ως αποτέλεσμα της αύξησης της περιεκτικότητας των μειγμάτων σε μπεντονίτη, μειώνεται αρχικά η κυρτότητα των κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης. Από ένα όριο περιεκτικότητας σε μπεντονίτη 7% και πάνω οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης παύουν πλέον να είναι κυρτές και γίνονται κοίλες, τόσο πιο κοίλες δε όσο αυξάνεται η πλαστικότητα ως αποτέλεσμα της περιεκτικότητας σε μπεντονίτη. Στον Πιν. 13.33 συνοψίζονται οι τιμές των εγγενών παραμέτρων απόστασης για τις δοκιμές που περιγράφηκαν μαζί με τις τιμές των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  που προκύπτουν απευθείας από την εγγενή παράμετρο απόστασης και εμπειρικά από την προσομοίωση της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης.

**Πίνακας 13.32.** Παράμετροι εγγενούς συμπίεστος από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αμιγή πολύ λεπτόκοκκη άμμο που προήλθε από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων, αμιγή καολίνη τύπου Speswhite, αναζυμωμένο σε αρχικό ποσοστό υγρασίας 200% του ορίου υδαρότητάς του και μείγματα των δύο υλικών με διαφορετική περιεκτικότητα σε καολίνη.

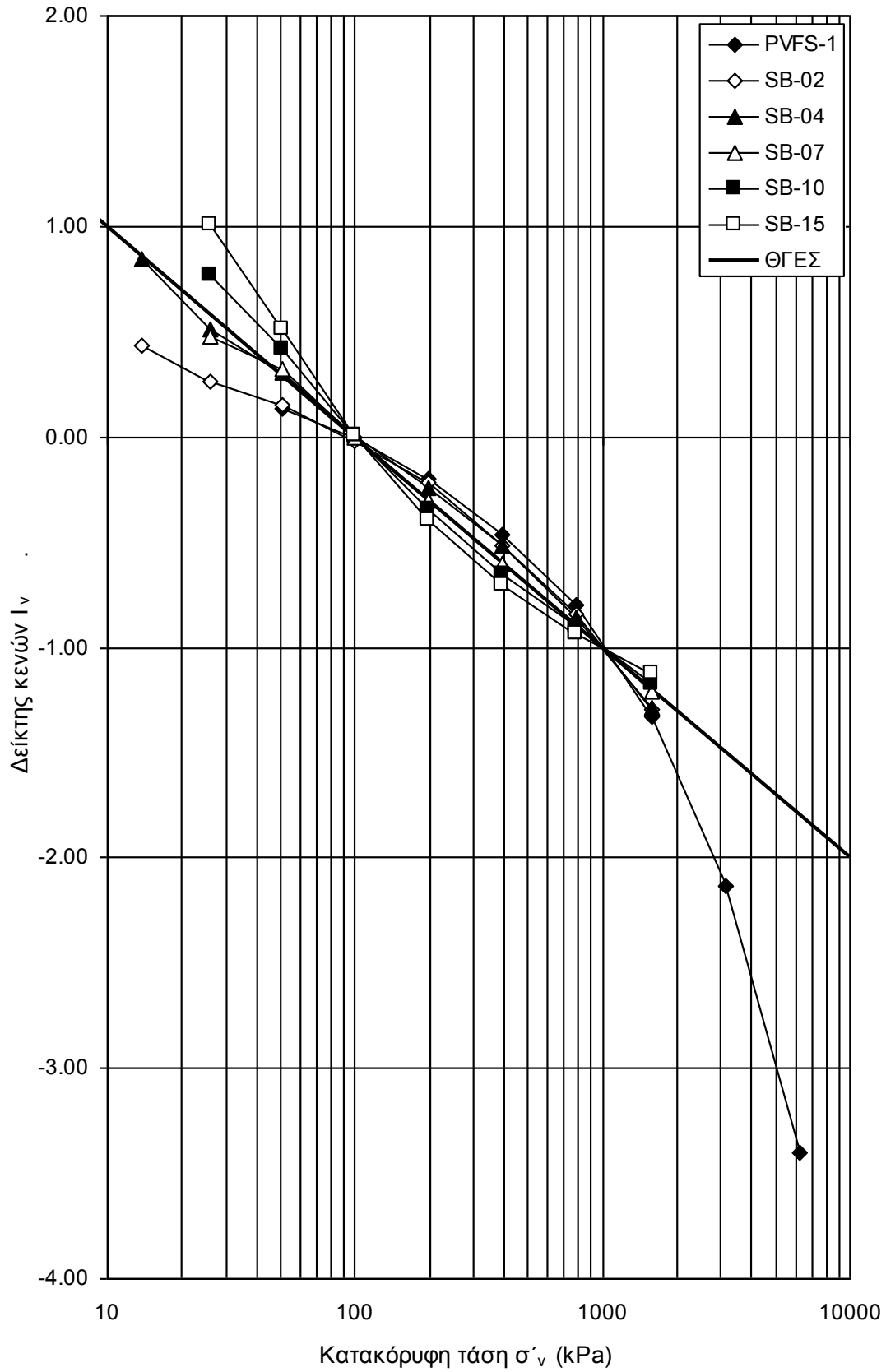
Δοκιμή	$e^*_o$	$e^*_{100}$	$e^*_{1000}$	$C_c^*$	$C_{r,h}$	$C_{r,l}$
PVFS-01	0.755	0.748	0.733	0.015	0.011	0.008
SB-02	1.139	0.942	0.885	0.057	0.000	0.004
SB-04	1.231	0.952	0.883	0.069	0.007	0.006
SB-07	1.594	1.058	0.952	0.106	0.004	0.006
SB-10	2.034	1.153	0.984	0.169	0.003	0.006
SB-15	2.653	1.239	0.866	0.373	0.010	0.026

**Πίνακας 13.33.** Εγγενείς παράμετροι απόστασης και εμπειρικές τιμές παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  για την καθαρή πολύ λεπτή άμμο από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων και τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου.

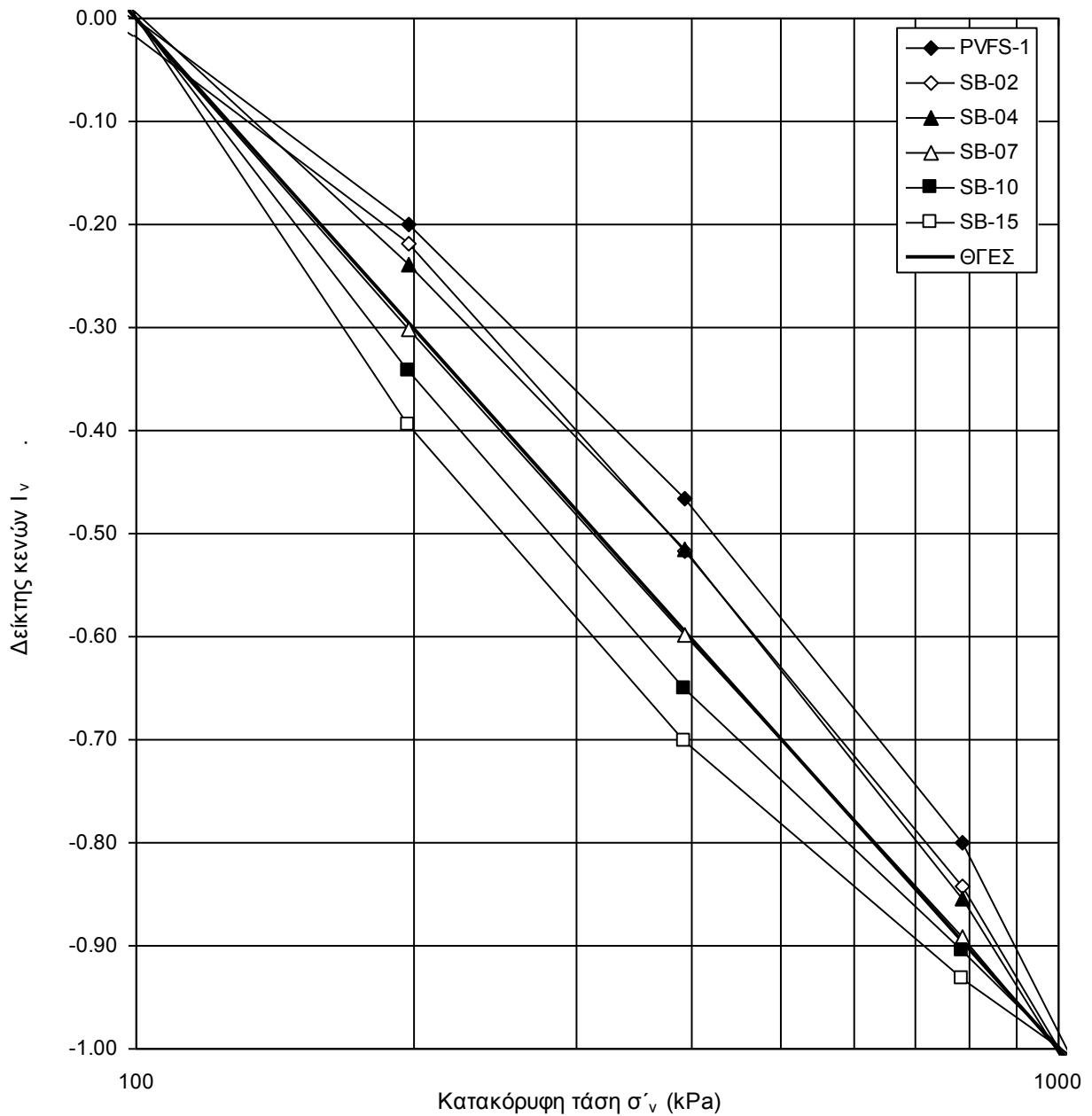
Δοκιμή	$d^*$ από υπολογισμό	$d^*$ από προσέγγιση καμπύλης		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
PVFS-1	0.108	0.106	Από το $d^*$	4.133	-5.035	2.237	-0.376
			Εμπειρικά	5.103	-6.402	2.829	-0.456
SB-02	0.055	0.066	Από το $d^*$	1.908	-1.774	0.694	-0.142
			Εμπειρικά	1.319	-1.232	0.533	-0.126
SB-04	0.054	0.008	Από το $d^*$	1.759	-0.812	-0.030	-0.002
			Εμπειρικά	3.019	-2.855	1.022	-0.172
SB-07	-0.003	0.015	Από το $d^*$	1.599	-0.709	-0.031	-0.007
			Εμπειρικά	3.333	-2.645	0.665	-0.088
SB-10	-0.037	-0.031	Από το $d^*$	3.513	-2.446	0.407	-0.031
			Εμπειρικά	2.833	-1.484	-0.023	0.030
SB-15	-0.073	-0.063	Από το $d^*$	6.057	-5.155	1.321	-0.129
			Εμπειρικά	4.738	-3.291	0.476	-0.006



**Σχήμα 13.39.** Καμπύλες εγγενούς συμπίεσης με τον κλάδο αποφόρτισης για την αμιγή λεπτόκοκκη άμμο από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων και τα μείγματα αυτής με τον μπεντονίτη.



**Σχήμα 13.40.** α) Κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για την αμγή λεπτόκοκκη άμμο από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων και τα μείγματα αυτής με τον μπεντονίτη.



**Σχήμα 13.40.** β) Κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για την αμιγή λεπτόκοκκη άμμο από την Ιλό Λίμνης Ιωαννίνων και τα μείγματα αυτής με τον μπεντονίτη με μεγέθυνση του άξονα του δείκτη κενών μεταξύ -1 και 0 και του άξονα της κατακόρυφης τάσης μεταξύ 100 και 1000 kPa.

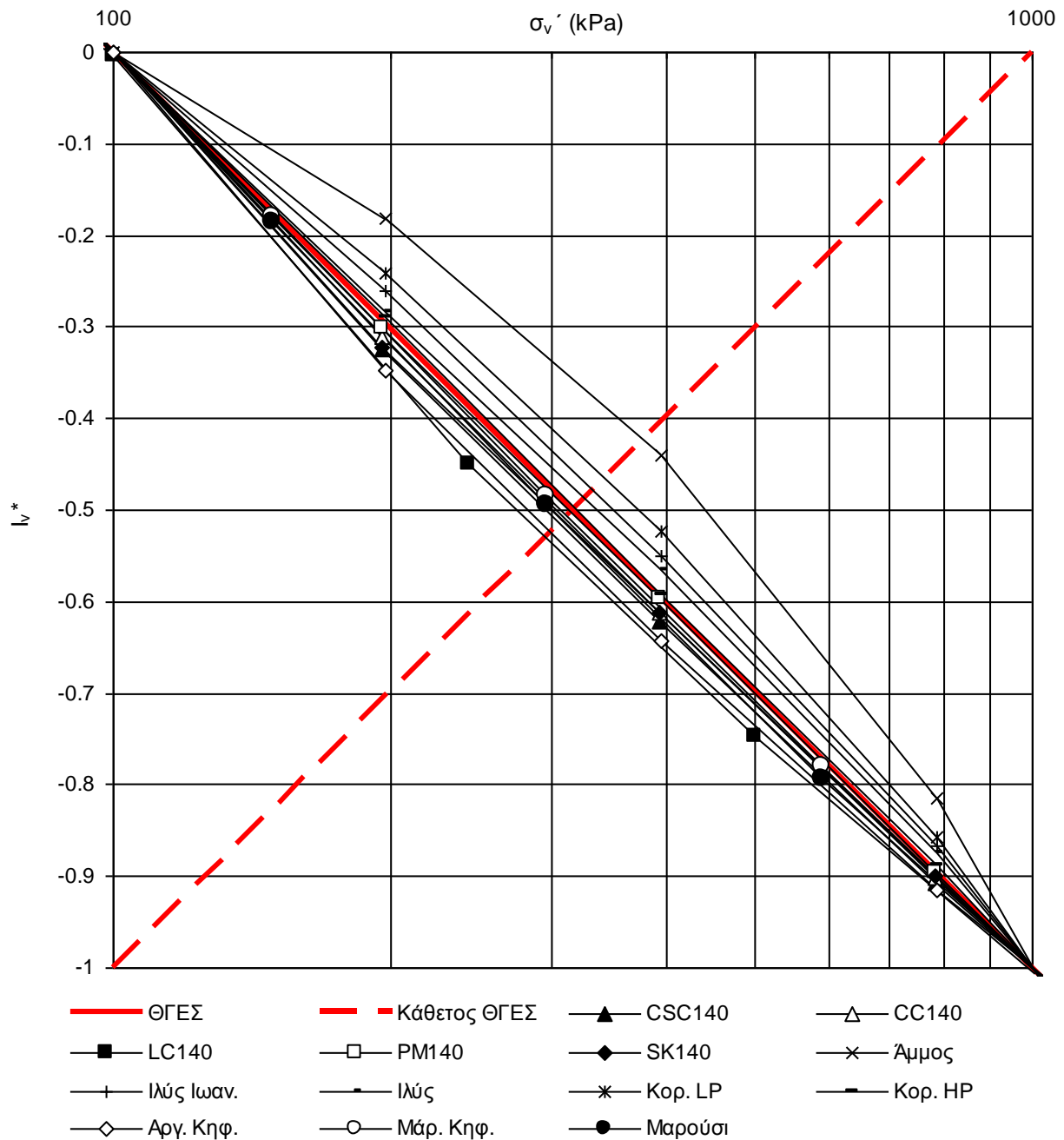
### **13.5.5 Συμπεράσματα από τις δοκιμές συμπίεσης σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά φυσικής και τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης**

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των συμπληρωματικών δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης που πραγματοποιήθηκαν μετά από τις παρατηρήσεις επί της μονοδιάστατης συμπίεσης της Μάργας Κορίνθου. Επιλέχθηκε αρχικά εδαφικό υλικό φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης με ακόμα χαμηλότερη πλαστικότητα και από τη Μάργα Κορίνθου, όπως η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων, και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και σε εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης, όπως το διερχόμενο της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων από το κόσκινο Νο 200 και η περιεχόμενη σε αυτήν πολύ λεπτή άμμος καθώς και μείγματα της λεπτής αυτής άμμου με αμιγή καολίνη και αμιγή μπεντονίτη. Τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε αυτά τα εδαφικά υλικά έδειξαν ότι η κυρτότητα των κανονικοποιημένων καμπυλών εγγενούς συμπίεσης εξαρτάται από την πλαστικότητα (προκειμένου για εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης) και την πλαστικότητα και το ποσοστό περιεχόμενης αργίλου προκειμένου για μείγματα άμμου-αργίλου.

Στο Σχ. 13.41 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης από όλα τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης καθώς και της αμιγούς ιλύος και της πολύ λεπτής άμμου που παρήχθησαν από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων με μεγέθυνση του άξονα της κατακόρυφης τάσης μεταξύ 100 και 1000 kPa και του άξονα του δείκτη κενών μεταξύ -1 και 0. Στο ίδιο σχήμα προβάλλεται εκτός από την ΘΓΕΣ και η κάθετος σε αυτήν όπως ορίστηκε στο Κεφ. 10. Στα Σχ. 13.42 και 13.43 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για τα μείγματα καολίνη-άμμου και μπεντονίτη-άμμου αντίστοιχα με τις ίδιες μεγεθύνσεις στον άξονα της κατακόρυφης τάσης και ταυτόχρονη παρουσίαση εκτός της ΘΓΕΣ και της καθέτου σε αυτήν όπως ορίστηκε στο Κεφ. 10.

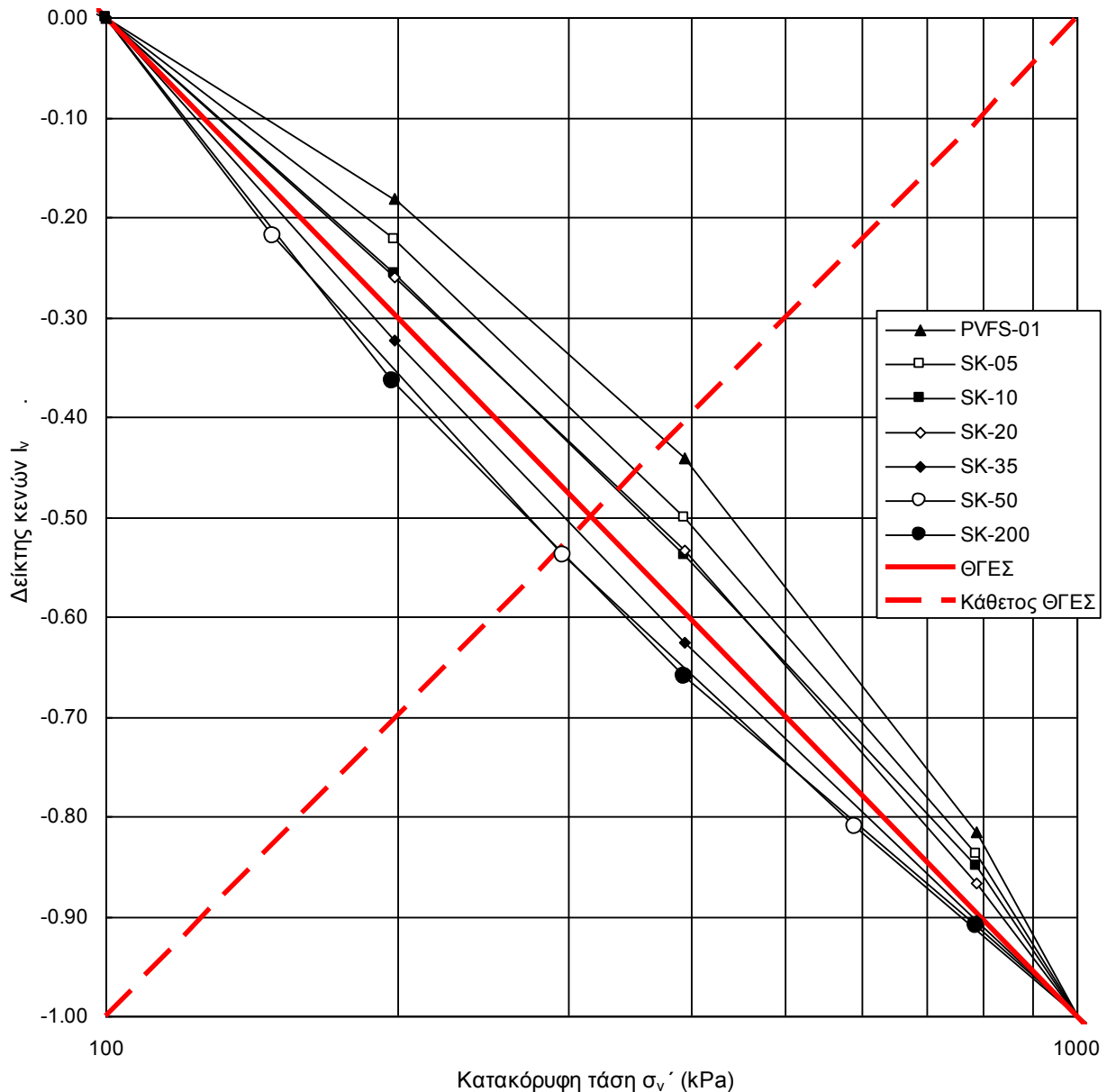
Καταρχάς και τα τρία σχήματα (13.41 έως 13.43) παρουσιάζουν γεωμετρική ομοιότητα και μεταξύ τους αλλά και με το Σχ. 10.2 στο Κεφ. 10 όπου εισήχθη η έννοια της εγγενούς παραμέτρου απόστασης. Από το Σχ. 13.41 παρατηρείται ότι όσο μειώνεται ο δείκτης πλαστικότητας και αυξάνεται το ποσοστό των χονδροκόκκων, τόσο περισσότερο οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης στρέφουν τα κοίλα προς τα κάτω με αποκορύφωμα την πολύ λεπτή άμμο που δεν έχει πλαστικότητα. Το αντίθετο συμβαίνει όσο αυξάνει η πλαστικότητα και μειώνεται το ποσοστό των χονδροκόκκων. Τα συμπεράσματα από τα πειραματικά αυτά αποτελέσματα επιδεικνύουν την προφανή επιρροή της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της πλαστικότητας, αλλά όχι

με τη ζητούμενη καθαρότητα, αφού στα υλικά αυτά δεν ήταν δυνατόν να ελεγχθεί η ορυκτολογική τους σύσταση.



**Σχήμα 13.41.** Κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για όλα τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης καθώς και της αμιγούς ιλύος και της πολύ λεπτής άμμου που παρήχθησαν από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων με μεγέθυνση του άξονα του δείκτη κενών μεταξύ -1 και 0 και του άξονα της κατακόρυφης τάσης μεταξύ 100 και 1000 kPa.

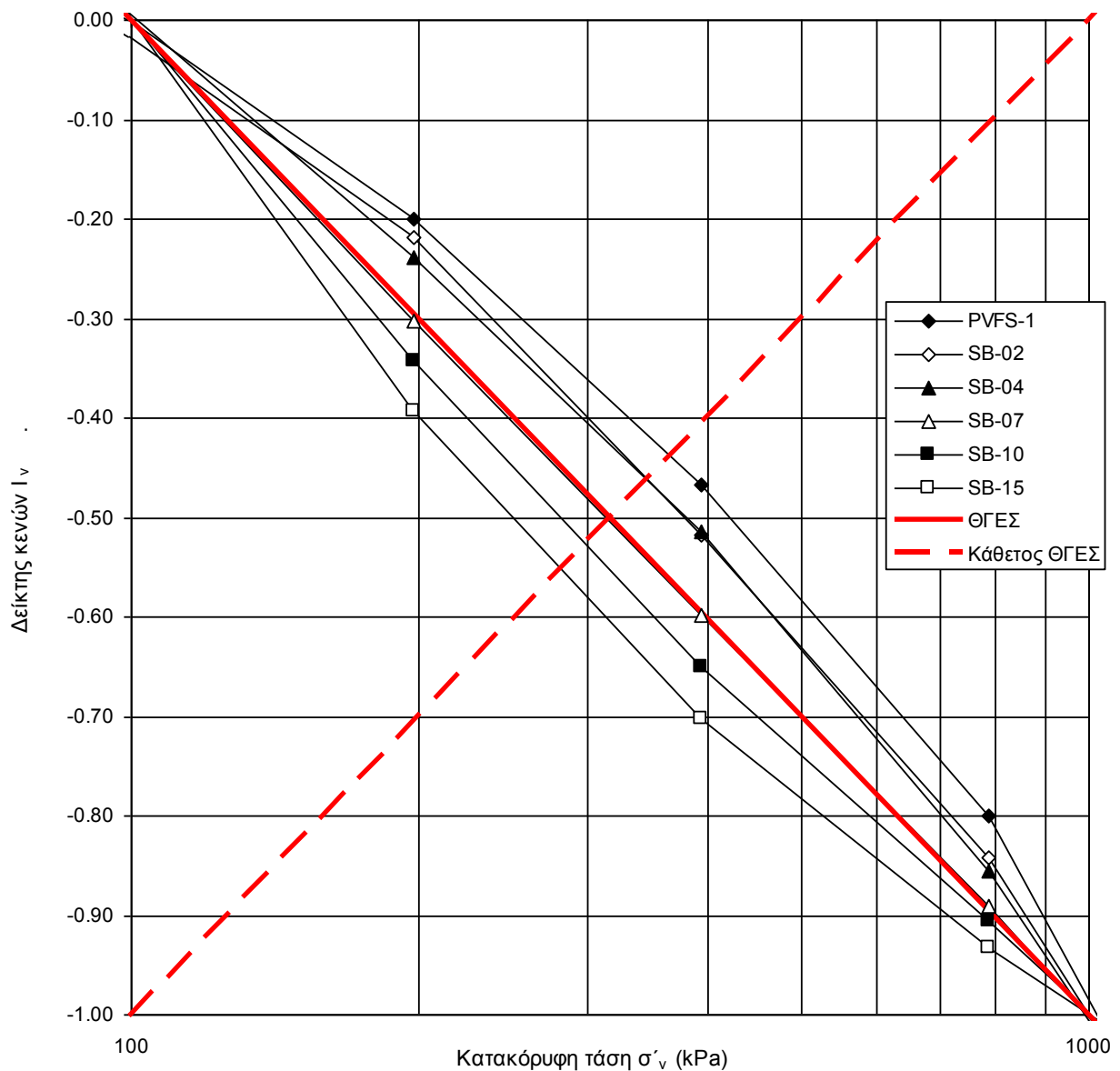
Η ίδια ακριβώς επιρροή που παρατηρήθηκε και για τα υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης προκύπτει και για τα μείγματα αργίλου-άμμου, είτε αυτά είναι μείγματα καολίνη-άμμου (Σχ. 13.42), είτε είναι μείγματα μπεντονίτη-άμμου (Σχ. 13.43). Όσο μειώνεται ο δείκτης πλαστικότητας και αυξάνεται το ποσοστό των χονδροκόκκων, τόσο περισσότερο οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης στρέφουν τα κοίλα προς τα κάτω. Το αντίθετο συμβαίνει όσο αυξάνεται η πλαστικότητα και μειώνεται το ποσοστό των χονδροκόκκων. Για πρακτικά ίδια κοκκομετρική



**Σχήμα 13.42.** Κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για την αμιγή λεπτόκοκκη άμμο από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων και τα μείγματα αυτής με τον καολίνη Speswhite με μεγέθυνση του άξονα του δείκτη κενών μεταξύ -1 και 0 και του άξονα της κατακόρυφης τάσης μεταξύ 100 και 1000 kPa.



διαβάθμιση (μείγματα SK-10 και SB-10) παρατηρείται ότι όσο πιο δραστικό είναι το περιεχόμενο αργιλικό ορυκτό, τόσο περισσότερο αλλάζει η μορφή της καμπύλης εγγενούς συμπίεσης. Το μείγμα SK-10 είναι μία αργιλώδης άμμος χωρίς πλαστικότητα και η καμπύλη εγγενούς συμπίεσής του στρέφει έντονα τα κοίλα προς τα κάτω, ενώ αντίθετα το μίγμα SB-10 αν και επίσης χαρακτηριζόμενο ως αργιλώδης άμμος έχει όρια Atterberg που το κατατάσσουν ως υλικό υψηλής πλαστικότητας και η καμπύλη εγγενούς συμπίεσής του στρέφει έντονα τα κοίλα προς τα πάνω.



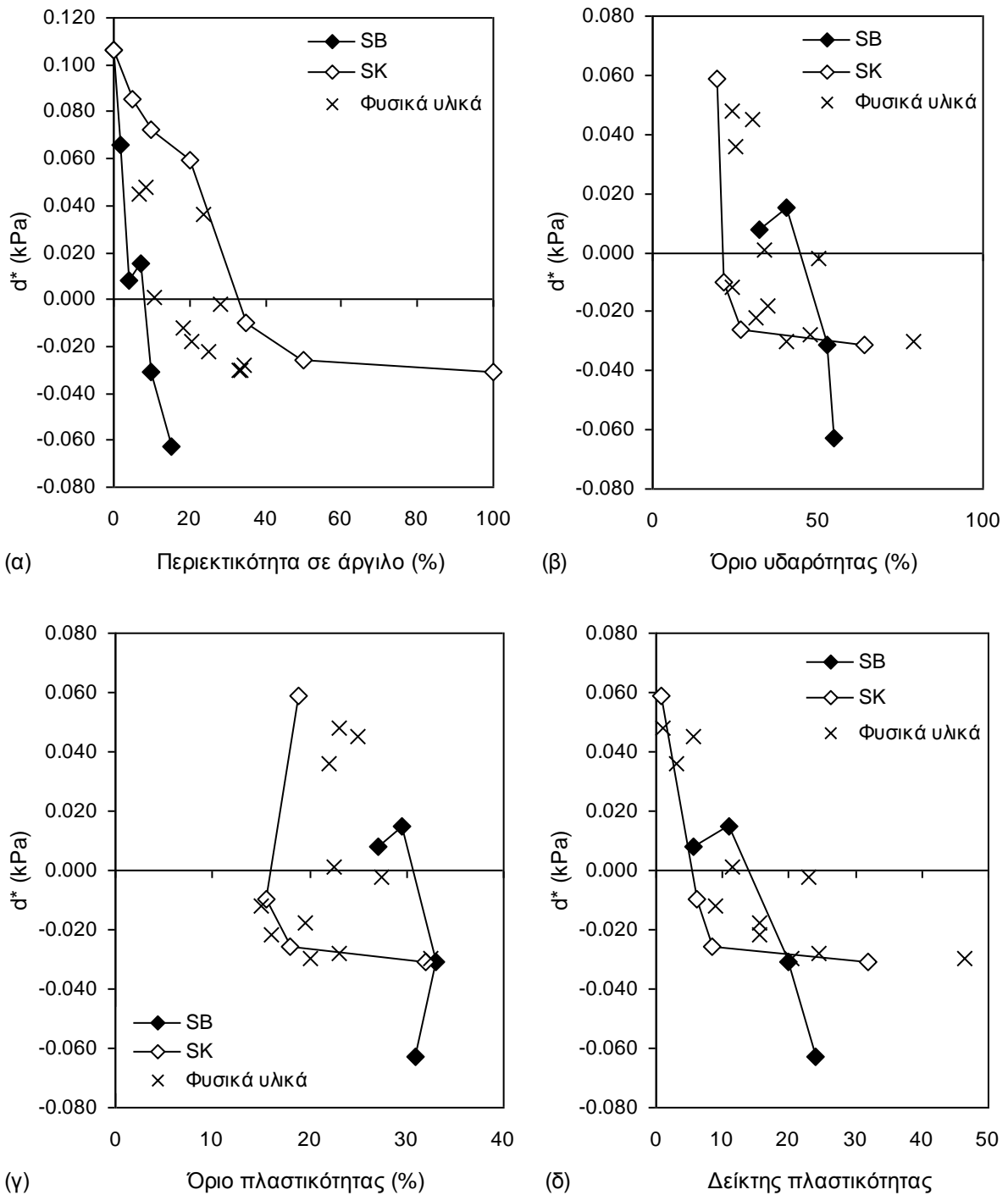
**Σχήμα 13.43.** Κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσης για την αμιγή λεπτόκοκκη άμμο από την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων και τα μείγματα αυτής με τον μπεντονίτη με μεγέθυνση του άξονα του δείκτη κενών μεταξύ -1 και 0 και του άξονα της κατακόρυφης τάσης μεταξύ 100 και 1000 kPa.

Για να γίνουν αυτά καλύτερα αντιληπτά παρουσιάζεται το Σχ. 13.44. Στο σχήμα αυτό χρησιμοποιείται η εγγενής παράμετρος απόστασης ως μέσο έκφρασης του μεγέθους και της φοράς της καμπυλότητας των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης και συσχετίζεται στο Σχ. 13.44α με την περιεκτικότητα σε άργιλο των υλικών, στο Σχ. 13.44β με το όριο υδαρότητάς τους, στο Σχ. 13.44γ με το όριο πλαστικότητάς τους και στο Σχ. 13.44δ με τον δείκτη πλαστικότητας. Σε κάθε ένα από τα επιμέρους σχήματα προβάλλονται σε διαφορετικές ομάδες τα στοιχεία από τα υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, από τα μείγματα καολίνη-άμμου και από τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου.

Στο Σχ. 13.44α φαίνεται ότι αυξανομένης της περιεκτικότητας σε άργιλο, η εγγενής παράμετρος απόστασης μειώνεται ξεκινώντας από θετικές τιμές αρχικά οι οποίες γίνονται αρνητικές στην συνέχεια. Η εικόνα αυτή είναι σαφής για τα μείγματα καολίνη-άμμου και μπεντονίτη-άμμου, οι γραφικές παραστάσεις των οποίων μάλιστα περικλείουν με σαφήνεια το σύνολο των στοιχείων από τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, στα οποία επίσης παρατηρείται μείωση της εγγενούς παραμέτρου απόστασης με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άργιλο παρά την πολύ μεγαλύτερη διασπορά των σημείων. Τα σημεία για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου αποτελούν το αριστερό όριο του σμήνους των σημείων, ενώ τα σημεία για τα μείγματα καολίνη-άμμου το δεξιό όριο του σμήνους των σημείων. Από την τοποθέτηση αυτή των ορίων των σημείων για τα δύο είδη μειγμάτων προκύπτει αυτό που αναμενόταν, ότι όσο πιο δραστικό το περιεχόμενο αργιλικό ορυκτό τόσο πιο ραγδαία μειώνεται η τιμή της εγγενούς παραμέτρου απόστασης των υλικών. Έτσι το σύνολο των σημείων για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου δείχνει πολύ ραγδαία μείωση της εγγενούς παραμέτρου απόστασης με την αύξηση της περιεκτικότητας σε άργιλο, ενώ το σύνολο των σημείων για τα μείγματα καολίνη-άμμου την πιο βαθμιαία. Θα αναμενόταν λοιπόν ότι εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης με πιο δραστικά αργιλικά ορυκτά θα βρίσκονται εγγύτερα στα σημεία για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου, ενώ εκείνα με τα λιγότερο δραστικά αργιλικά ορυκτά εγγύτερα στα σημεία για τα μείγματα καολίνη-άμμου. Αυτό όμως δεν προέκυψε για όλα τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης αφού π.χ. η Άργιλος Λονδίνου, ένα δραστικό υλικό, βρίσκεται εγγύτερα στην καμπύλη για τα μείγματα καολίνη-άμμου. Η αξία των ευρημάτων από το Σχ. 13.44α είναι μεγαλύτερη αφού στο σχήμα αυτό προβάλλεται το σύνολο των στοιχείων. Αντίθετα στα άλλα σχήματα προβάλλονται μόνο τα σημεία εκείνα που αντιστοιχούν σε υλικά με πλαστικότητα.

Έτσι σε ό,τι αφορά τα Σχ. 13.44β, 13.44γ και 13.44δ, κοινό χαρακτηριστικό τους αποτελεί ότι το σύνολο των σημείων για τα μείγματα καολίνη-άμμου και μπεντονίτη-άμμου περίπου

περικλείουν το σύνολο των σημείων για τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, περισσότερο δε στο Σχ. 13.44γ όπου η εγγενής παράμετρος απόστασης συσχετίζεται με το όριο πλαστικότητας. Σε αυτό ωστόσο το σχήμα δεν παρουσιάζεται καμμία σαφής εξέλιξη της

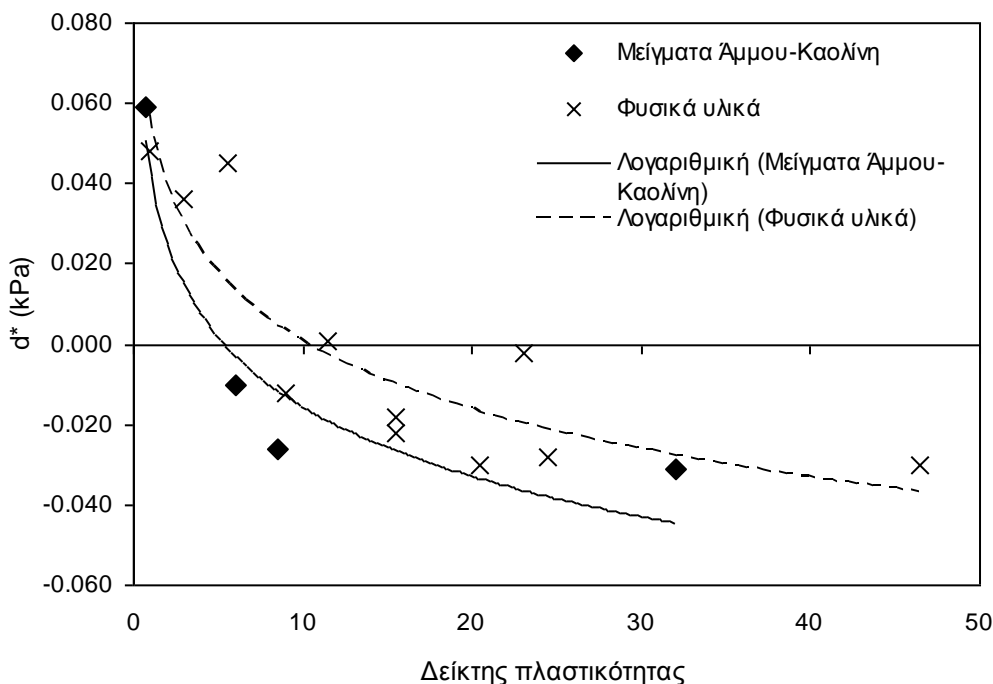


**Σχήμα 13.44.** Συσχέτιση της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$  α) με την περιεκτικότητα των υλικών σε άργιλο, β) με το όριο υδαρότητας, γ) με το όριο πλαστικότητας, και δ) με τον δείκτη πλαστικότητας.

εγγενούς παραμέτρου απόστασης με το όριο πλαστικότητας. Το ίδιο μπορεί να ειπωθεί και για το Σχ. 13.44β όπου απεικονίζεται η συσχέτιση με το όριο υδαρότητας. Αντίθετα στο Σχ. 13.44δ παρουσιάζεται ενδεικτική εξέλιξη για τα μείγματα καολίνη-άμμου και τα υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, όχι όμως και για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου. Για τα υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης μπορεί να διατυπωθεί μια ενδεικτική εμπειρική συσχέτιση μεταξύ εγγενούς παραμέτρου απόστασης και δείκτη πλαστικότητας που εκφράζεται από την Εξ. 13.1 με συντελεστή συσχέτισης  $R^2=0.78$ . Παρόμοιας μορφής συσχέτιση διατυπώθηκε και για τα μείγματα καολίνη-άμμου (Εξ. 13.2), η οποία μάλιστα παρουσιάζει πιο μεγάλο συντελεστή συσχέτισης ( $R^2=0.90$ ) αλλά δεν θεωρείται σημαντική, αφενός γιατί προέκυψε από μόλις 4 πειραματικά σημεία, και αφετέρου γιατί αφορά σε πολύ συγκεκριμένη ορυκτολογική σύσταση χωρίς γενικότερο ενδιαφέρον. Για τα μείγματα μπεντονίτη-άμμου δεν κατέστη δυνατή η διατύπωση κάποιας εμπειρικής συσχέτισης. Στο Σχ. 13.45 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των Εξ. 13.1 και 13.2 μαζί με τα πειραματικά σημεία για τα οποία προέκυψαν. Επισημαίνεται ότι αυτές είναι ενδεικτικές και απαιτούνται και επιπλέον πειραματικά σημεία.

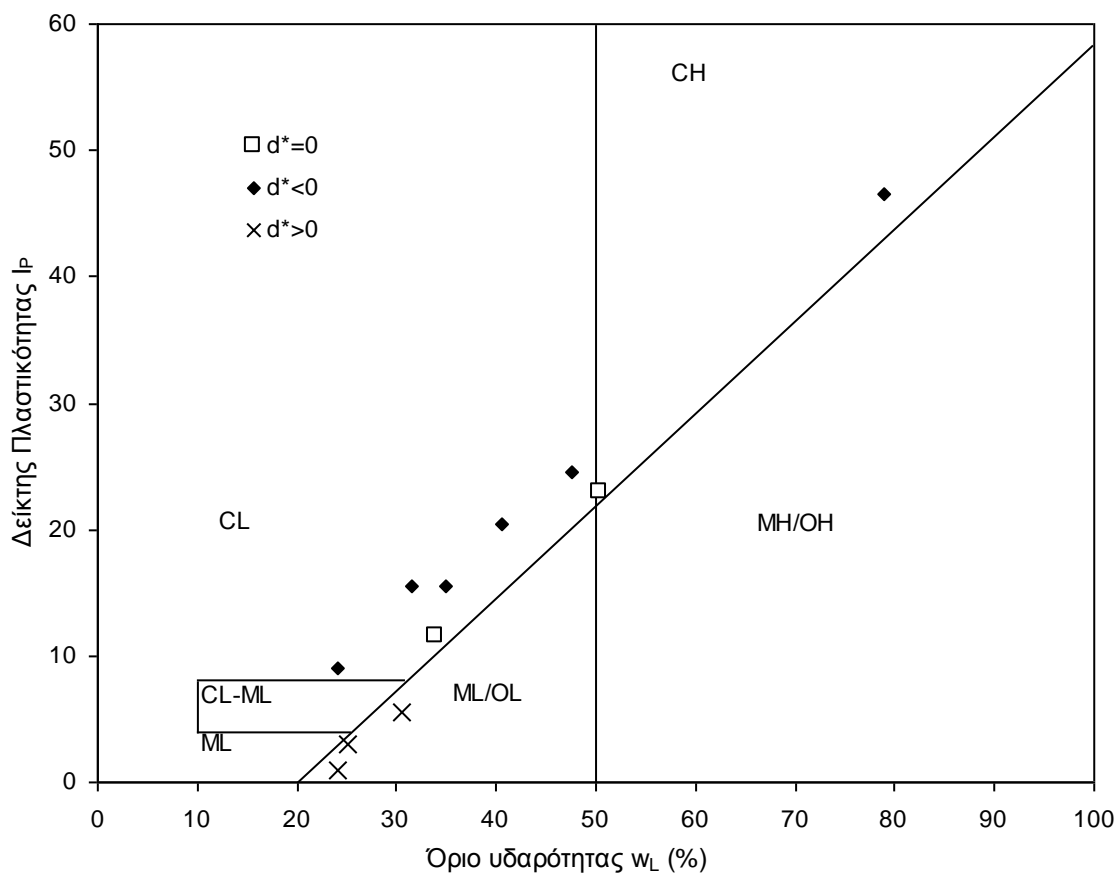
$$d^* = 0.0571 - 0.0245 \cdot \ln(I_p) \quad (13.1)$$

$$d^* = 0.0419 - 0.0249 \cdot \ln(I_p) \quad (13.2)$$



**Σχήμα 13.45.** Συσχέτιση της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$  με τον δείκτη πλαστικότητας και γραφικές παραστάσεις των Εξ. 13.1 και 13.2.

Τέλος σε ό,τι αφορά την θέση στην οποία προβάλλονται στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande τα υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης που χρησιμοποιήθηκαν ανάλογα με το μέγεθος και το πρόσημο της εγγενούς παραμέτρου απόστασής τους σχεδιάστηκε το Σχ. 13.46. Τα εδαφικά υλικά που έχουν αρνητική εγγενή παράμετρο απόστασης προβάλλονται σε απόσταση από την Γραμμή «Α» διατεταγμένα πρακτικά παράλληλα με αυτήν, εκείνα που έχουν πρακτικά μηδενική τιμή προβάλλονται εγγύτερα στην Γραμμή «Α» (και επίσης παράλληλα προς αυτήν, αν όχι μάλιστα πρακτικώς επί αυτής), και τέλος εκείνα που έχουν θετική τιμή κάτω από την Γραμμή «Α».



**Σχήμα 13.46.** Διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande με ομαδοποιημένα τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης της πειραματικής διερεύνησης ανάλογα με το μέγεθος και το πρόσημο της εγγενούς παραμέτρου απόστασης  $d^*$ .

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα από τις δοκιμές σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά σε ό,τι αφορά την γενικευμένη γραμμή εγγενούς συμπίεσης και την εγγενή παράμετρο απόστασης, μπορούν να διατυπωθούν τα εξής (σε συνδυασμό πλέον και με την θεωρητική επεξεργασία του Κεφ. 10):

- Η γραμμή εγγενούς συμπίεσης δεν είναι μοναδική γραμμή και δεν πρέπει να θεωρείται τέτοια. Αν έχει νόημα μία γραμμή στον χώρο δείκτη κενών-κατακόρυφης τάσης (λογαριθμική κλίμακα), αυτή είναι η Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης ως μία μοναδική γραμμή αναφοράς που επιτρέπει την αξιολόγηση των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης ως προς την φορά και το μέγεθος της καμπυλότητάς τους.
- Για τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και με ακόμα μεγαλύτερη σαφήνεια για τα εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης προέκυψε ότι οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσής τους έχουν καμπυλότητα φοράς και μεγέθους (εκφραζόμενα με επιτυχία από το πρόσημο και το απόλυτο μέγεθος της εγγενούς παραμέτρου απόστασης) που εξαρτώνται από την περιεκτικότητα σε άργιλο των εδαφικών υλικών και την δραστικότητα του περιεχόμενου αργιλικού ορυκτού (Σχ. 13.44α) και τον δείκτη πλαστικότητας των υλικών (Σχ. 13.44δ). Ειδικά σε ό,τι αφορά την τελευταία παράμετρο συσχέτισης διατυπώθηκε και η εμπειρική συσχέτιση που εκφράζεται από την Εξ. 13.1, για τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης μάλιστα. Η χρήση αυτής της εξίσωσης αποτελεί εργαλείο πρόβλεψης της εγγενούς παραμέτρου απόστασης, από την οποία προβλέπονται με την σειρά τους οι παράμετροι περιγραφής της γενικευμένης γραμμής εγγενούς συμπίεσης  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  από τις Εξ. 10.18 έως 10.22 του Κεφ. 10.
- Όπως επιδείχθηκε από τις δοκιμές σε αδιατάρακτα δοκίμια φυσικών εδαφικών υλικών με δομή και ειδικά τις δοκιμές στην Μάργα Κορίνθου, εάν δεν χρησιμοποιηθεί η πραγματική καμπύλη εγγενούς συμπίεσης του ίδιου του υλικού σε αδιατάρακτο δοκίμιο του οποίου έγινε η δοκιμή, μπορεί να προκύψουν ακόμα και αποτελέσματα στερούμενα φυσικού νοήματος αν η σύγκριση της κανονικοποιημένης καμπύλης γίνει με κάποια από τις υφιστάμενες εμπειρικές συσχετίσεις για την γραμμή εγγενούς συμπίεσης (π.χ. Burland, 1990, Chandler, 2000), ή ακόμα και την ΘΓΕΣ. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί το σπουδαιότερο λόγο που τεκμηριώνει την αξία της γενικευμένης γραμμής εγγενούς συμπίεσης και της εγγενούς παραμέτρου απόστασης ως μέσο έκφρασης της γραμμής αυτής. Η ίδια η γενικευμένη γραμμή εγγενούς συμπίεσης δε, επεκτείνει το εύρος της ισχύος και δυνατότητας χρησιμοποίησης του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών, όπως πρωτοδιατυπώθηκε για αργιλικά εδαφικά υλικά, ακόμα και για φυσικά ιλυώδη (π.χ. η Μάργα Κορίνθου) ή και πολύ λεπτόκοκκα αμμώδη εδάφη με δομή.

### **13.6 ΤΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΘΕΙΣΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ. ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ ΚΑΙ ΜΕ ΤΙΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.**

Στην §13.5.5 έγινε συνόψιση των συμπερασμάτων που αφορούσαν στη γενικευμένη γραμμή εγγενούς συμπίεσης και στην εγγενή παράμετρο απόστασης με τις αντίστοιχες εμπειρικές συσχετίσεις. Στην παράγραφο αυτή συνοψίζονται οι τιμές των παραμέτρων μονοδιάστατης συμπίεσης που προσδιορίστηκαν για όλα τα εδαφικά υλικά στα οποία πραγματοποιήθηκαν δοκιμές. Σκοπός της συγκέντρωσης αυτής είναι η ανακεφαλαίωση των προσδιορισθεισών τιμών παραμέτρων και η διατύπωση συσχετίσεων μεταξύ τους αλλά και με τις φυσικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών.

#### **13.6.1 Εγγενής δείκτης συμπίεσης – δείκτης αποφόρτισης – όρια Atterberg**

Οι Μπαρδάνης & Καβουνίδης (2001α & 2001β) παρουσίασαν τις μέχρι τότε διατυπωθείσες συσχετίσεις του δείκτη συμπίεσης με τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών διεθνώς και προχώρησαν μάλιστα και στην αξιολόγησή τους για εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο χρησιμοποιώντας μία μεγάλη βάση πειραματικών δεδομένων από δοκιμές που είχαν εκτελεστεί σε εμπορικά εργαστήρια. Μία από τις βασικές παρατηρήσεις τους ήταν ότι οι δοκιμές αυτές είχαν εκτελεστεί μέχρι αναλογικά πολύ χαμηλές τιμές της κατακόρυφης τάσης (800 ή 1000 kPa το πολύ) και εξέφραζαν σοβαρές αμφιβολίες κατά πόσο προσδιοριζόταν ο «πραγματικός» δείκτης συμπίεσης από τις δοκιμές αυτές. Το σύνολο αυτής της επεξεργασίας όπως και της επέκτασής της από τους Bardanis & Kanvadas (2003b) παρουσιάζεται στην §5.6 στο Κεφ. 5 του πρώτου μέρους της διατριβής. Η εκτέλεση των δοκιμών που παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 13 επιτρέπει την επέκταση αυτής της επεξεργασίας και κυρίως την διατύπωση εμπειρικών συσχετίσεων για τα πολύ πιο αξιόπιστα (και μέχρι μεγάλες τιμές της κατακόρυφης τάσης) πειραματικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν.

Στο Σχ. 13.47α παρουσιάζεται η συσχέτιση του δείκτη συμπίεσης με το όριο υδαρότητας και στο Σχ. 13.47β με τον δείκτη πλαστικότητας. Η βέλτιστη προσέγγιση έχει προσδιοριστεί σε κάθε σχήμα για το σμήνος των σημείων φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης συμπεριλαμβανομένης της αμιγούς ιλύος και του καολίνη τύπου Speswhite, ενώ σε κάθε σχήμα προβάλλεται ξεχωριστά το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα άμμου-καολίνη και μπεντονίτη-άμμου, το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα αδιατάρακτα δείγματα και δύο διαθέσιμες

εμπειρικές συσχετίσεις για κάθε παράμετρο συσχέτισης. Προκειμένου για το όριο υδαρότητας αυτές ήταν η συσχέτιση του Skempton (1944) και των Matsui & Sakagami (1995) και προκειμένου για τον δείκτη πλαστικότητας η συσχέτιση των Schofield & Wroth (1968) και των Nakase et al. (1988). Και οι τέσσερις αυτές εμπειρικές συσχετίσεις έχουν διατυπωθεί για αναζυμωμένα εδαφικά υλικά και εκφράζονται από τις Εξ. 13.3 έως 13.6.

$$C_c = 0.007 \cdot (w_L - 10) \quad (13.3)$$

$$C_c = 0.0066 \cdot (w_L - 9.8) \quad (13.4)$$

$$C_c = 0.0135 \cdot I_p \quad (13.5)$$

$$C_c = 0.046 + 0.0104 \cdot I_p \quad (13.6)$$

Όπως παρατηρείται, στο Σχ. 13.47α η βέλτιστη προσέγγιση για το σμήνος των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης προβάλλεται ψηλότερα από τις γραφικές παραστάσεις των Εξ. 13.3 και 13.4 (προβλέποντας υψηλότερες τιμές του δείκτη συμπίεσης από αυτές για την ίδια τιμή του ορίου υδαρότητας). Το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα καολίνη-άμμου προβάλλεται υψηλότερα από αυτό του σμήνους των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα μπεντονίτη-άμμου (με εξαίρεση αυτό που αντιστοιχεί στην δοκιμή SB-15). Τέλος τα σημεία που αντιστοιχούν στις δοκιμές στα δοκίμια φυσικών υλικών είναι τόσο λίγα που δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση ή σαφής διαφοροποίηση από το σμήνος των δεδομένων από δοκιμές σε αναζυμωμένα εδάφη. Η εμπειρική συσχέτιση που προέκυψε για τον δείκτη συμπίεσης με το όριο υδαρότητας εκφράζεται από την Εξ. 13.7 και έχει συντελεστή συσχέτισης 0.90. Η συσχέτιση αυτή βρίσκεται πολύ κοντά στην συσχέτιση του Skempton (1944) και των Matsui & Sakagami (1995).

$$C_c = 0.007 \cdot (w_L - 9.7) \quad (13.7)$$

Σε ό,τι αφορά το Σχ. 13.47β παρατηρείται ότι η βέλτιστη προσέγγιση για το σμήνος των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης προβάλλεται πολύ κοντά στην γραφική παράσταση της Εξ. 13.6 (Nakase, et al., 1988) τέμνοντας την Εξ. 13.5 (Schofield & Wroth, 1968). Το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα καολίνη-



άμμου προβάλλεται πρακτικά στην ίδια θέση με αυτή του σμήνους των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, ενώ το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα μπεντονίτη-άμμου προβάλλεται χαμηλότερα (με εξαίρεση αυτό που αντιστοιχεί στην δοκιμή SB-15). Τέλος τα σημεία που αντιστοιχούν στις δοκιμές στα δοκίμια φυσικών υλικών είναι τόσο λίγα που δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση ή σαφής διαφοροποίηση από το σμήνος των δεδομένων από δοκιμές σε αναζυμωμένα εδάφη. Η εμπειρική συσχέτιση που προέκυψε για τον δείκτη συμπίεσης με το όριο υδαρότητας εκφράζεται από την Εξ. 13.8 και έχει συντελεστή συσχέτισης 0.93 με πολύ καλή ταύτιση πειραματικών δεδομένων και δείκτη πλαστικότητας στις χαμηλές και στις υψηλές τιμές της παραμέτρου συσχέτισης.

$$C_c = 0.062 + 0.010 \cdot I_p \quad (13.8)$$

Στο Σχ. 13.48 παρουσιάζεται η συσχέτιση του δείκτη συμπίεσης με τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας. Η βέλτιστη προσέγγιση έχει προσδιοριστεί για το σμήνος των σημείων φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης συμπεριλαμβανομένης της αμιγούς ιλύος και του καολίνη τύπου Speswhite, ενώ προβάλλεται ξεχωριστά το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα άμμου-καολίνη και μπεντονίτη-άμμου, το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα αδιατάρακτα δείγματα και η μία μόνο διαθέσιμη εμπειρική συσχέτιση. Αυτή ήταν η συσχέτιση του Burland (1990) η οποία έχει διατυπωθεί επίσης για αναζυμωμένα εδαφικά υλικά και εκφράζεται από την Εξ. 13.9.

$$C_c = 0.256 \cdot e_L - 0.04 \quad (13.9)$$

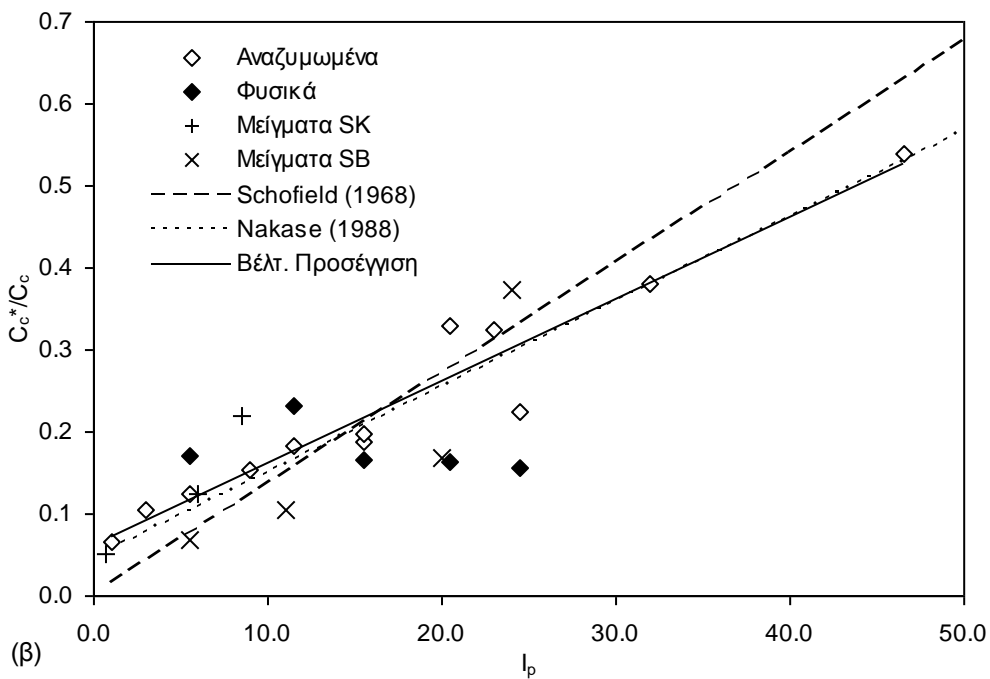
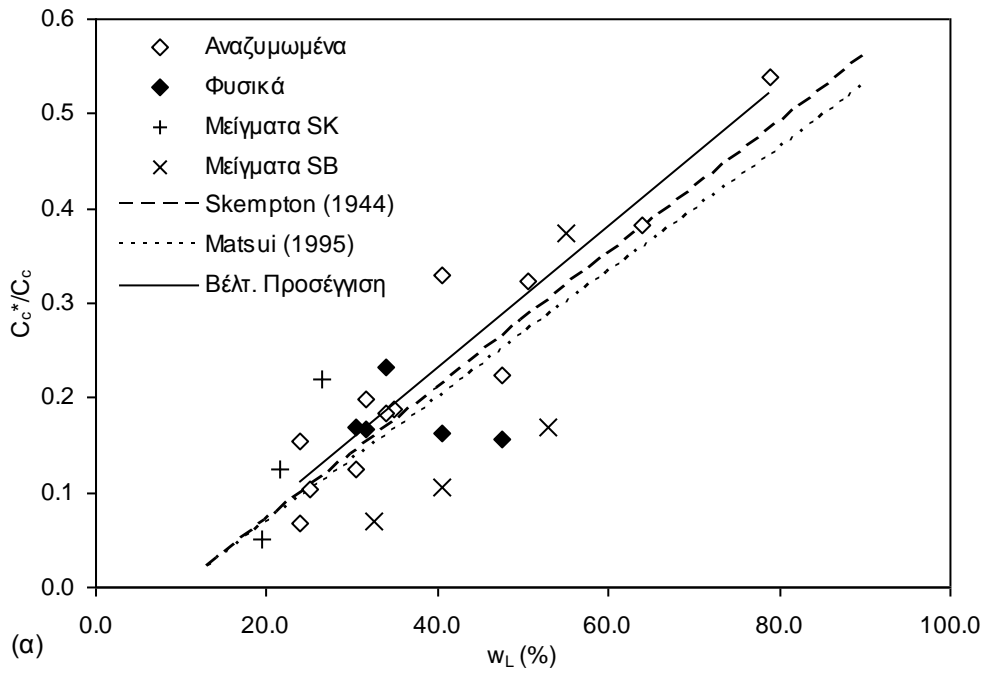
Όπως παρατηρείται, στο Σχ. 13.48 η βέλτιστη προσέγγιση για το σμήνος των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης βρίσκεται πρακτικά στην ίδια θέση με την γραφική παράσταση της Εξ. 13.9. Για τιμές του λόγου κενών στο όριο υδαρότητας μικρότερες της μονάδας προβλέπει ελαφρώς μικρότερες τιμές του δείκτη συμπίεσης από την συσχέτιση του Burland (1990), ενώ για τιμές του λόγου κενών στο όριο υδαρότητας μεγαλύτερες της μονάδας μεγαλύτερες. Το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα καολίνη-άμμου προβάλλεται υψηλότερα από αυτό του σμήνους των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα μπεντονίτη-άμμου (με εξαίρεση αυτό που αντιστοιχεί στην δοκιμή SB-15). Τέλος τα σημεία που αντιστοιχούν στις δοκιμές στα δοκίμια φυσικών υλικών είναι τόσο λίγα που δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση ή σαφής διαφοροποίηση

από το σμήνος των δεδομένων από δοκιμές σε αναζυμωμένα εδάφη. Η εμπειρική συσχέτιση που προέκυψε για τον δείκτη συμπίεσης με τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας εκφράζεται από την Εξ. 13.10 και έχει συντελεστή συσχέτισης 0.90.

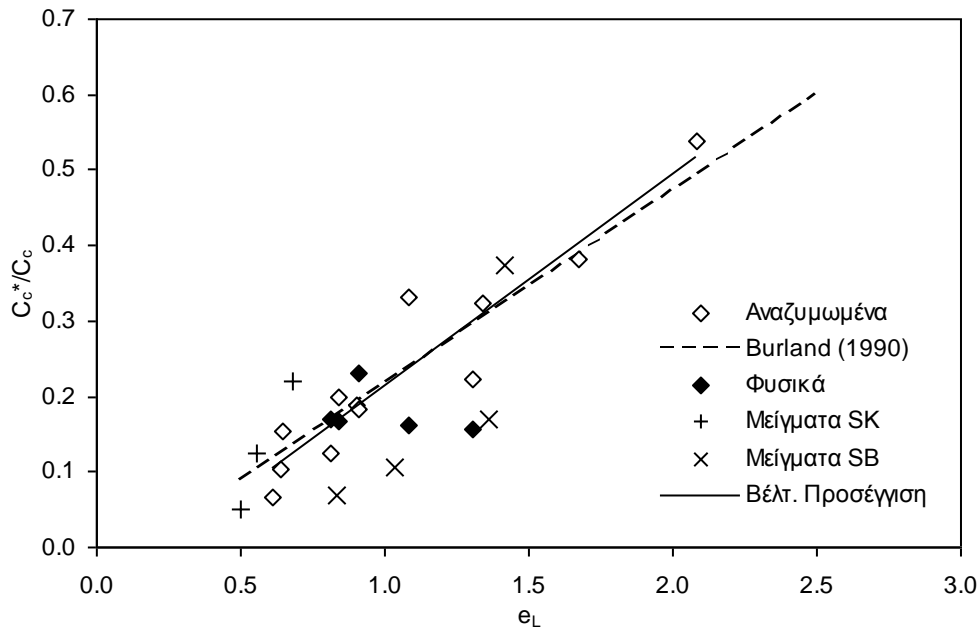
$$C_c = 0.281 \cdot e_L - 0.066 \quad (13.10)$$

Για τον δείκτη συμπίεσης των φυσικών εδαφικών υλικών, ο αριθμός των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων δεν επέτρεψε τη διατύπωση κάποιας συσχέτισης. Ωστόσο το γεγονός ότι οι δοκιμές αυτές εκτελέστηκαν μέχρι πολύ μεγάλες τιμές της κατακόρυφης τάσης επέτρεψε τη σύγκριση του δείκτη συμπίεσης που θα προέκυπτε αν οι δοκιμές είχαν σταματήσει στα 800 kPa (όπως συμβαίνει στα περισσότερα εμπορικά εργαστήρια) με την τιμή του δείκτη συμπίεσης που μετρήθηκε στις δοκιμές όπως εκτελέστηκαν. Για το σκοπό αυτό συντάχθηκε το Σχ. 13.49 από το οποίο προκύπτει ότι ο δείκτης συμπίεσης όταν οι δοκιμές σε φυσικά εδαφικά υλικά με δομή και αρχικό κορεσμό αρκετά μικρότερο του 100% δεν φτάνουν μέχρι πολύ υψηλές τιμές της τάσης μπορεί να είναι ακόμα και πάρα πολύ μικρότερος του «πραγματικού». Ο όρος παρατίθεται εσκεμμένα εντός εισαγωγικών αφού και πάλι παρά την υψηλή τάση που επιβλήθηκε (6.4 MPa και 4.8 MPa, ανάλογα το διαθέσιμο συμπιεσόμετρο) ο δείκτης συμπίεσης δεν είναι απαραίτητο ότι προσδιορίστηκε σωστά. Ειδικά μάλιστα για τις δοκιμές στη Μάργα Κορίνθου πιο χαμηλής πλαστικότητας εκφράζονται σοβαρές αμφιβολίες ότι η μέγιστη τάση που επιβλήθηκε ήταν αρκετή για να επιφέρει την πλήρη αποδόμηση (destruction) του υλικού. Οι παρατηρήσεις από το Σχ. 13.49 βρίσκονται σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις των Μπαρδάνη & Καβουνίδη (2001β) αλλά και των Μπαρδάνη & Γρίφιζα (2014).

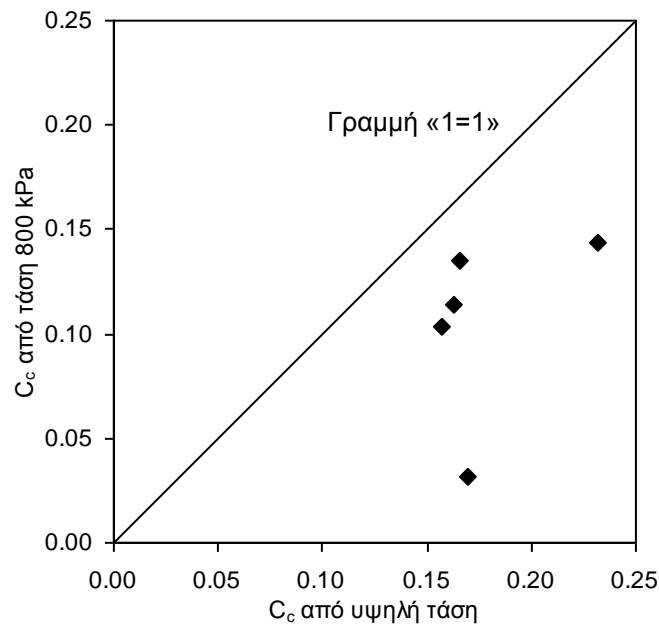
Εκτός από τις συσχετίσεις για τον δείκτη συμπίεσης διερευνήθηκε και η ύπαρξη συσχετίσεων του δείκτη αποφόρτισης με τα φυσικά χαρακτηριστικά. Ως δείκτης αποφόρτισης  $C_{r,l}$  ορίστηκε ο δείκτης που προκύπτει από τη διαφορά του λόγου κενών ανάμεσα στη μέγιστη τάση και την ελάχιστη τάση κατά την αποφόρτιση. Η τιμή αυτή είναι πολύ πιο αντιπροσωπευτική της μέσης κλίσης του κλάδου αποφόρτισης. Συχνά ωστόσο μπορεί να ενδιαφέρουν σε πρακτικά προβλήματα οι μεταβολές του λόγου κενών που συμβαίνουν για μικρές μόνο μειώσεις της τάσης από τη μέγιστη τιμή που έχει λάβει. Ορίστηκε λοιπόν και ο δείκτης αποφόρτισης για μικρές μεταβολές της τάσης από τη μέγιστη  $C_{r,h}$  ως ο δείκτης συμπίεσης που προκύπτει από τη διαφορά του λόγου κενών ανάμεσα στη μέγιστη τάση και την αμέσως μικρότερη τάση κατά την αποφόρτιση.



**Σχήμα 13.47.** Συσχέτιση του δείκτη συμπίεσης α) με το όριο υδαρότητας, και β) με τον δείκτη πλαστικότητας με προβολή των γραφικών παραστάσεων των Εξ. 13.3 έως 13.8.



**Σχήμα 13.48.** Συσχέτιση του δείκτη συμπίεσης με τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας με προβολή των γραφικών παραστάσεων των Εξ. 13.9 και 13.10.



**Σχήμα 13.49.** Συσχέτιση του δείκτη συμπίεσης όπως προκύπτει από την διαφορά του λόγου κενών μεταξύ 400 και 800 kPa κατακόρυφης τάσης με τον δείκτη συμπίεσης από την διαφορά του λόγου κενών μεταξύ της μέγιστης κατακόρυφης τάσης και της προηγούμενής της.

Στο Σχ. 13.50α παρουσιάζεται η συσχέτιση του δείκτη αποφόρτισης  $C_{r,1}$  με το όριο υδαρότητας και στο Σχ. 13.50β με τον δείκτη πλαστικότητας. Η βέλτιστη προσέγγιση έχει προσδιοριστεί σε κάθε σχήμα για το σμήνος των σημείων φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης συμπεριλαμβανομένης της αμιγούς ιλύος και του καολίνη τύπου Speswhite, ενώ σε κάθε σχήμα προβάλλεται ξεχωριστά το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα άμμου-καολίνη και μπεντονίτη-άμμου καθώς και το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα αδιατάρακτα δείγματα.

Η βέλτιστη προσέγγιση για το σμήνος των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης στο Σχ. 13.50α εκφράζεται από την Εξ. 13.11 και έχει συντελεστή συσχέτισης 0.91. Η εξίσωση αυτή δεν έχει νόημα για τιμές του ορίου υδαρότητας μικρότερες του 26% αφού σε αυτήν την περίπτωση προβλέπει αρνητικές τιμές. Το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα καολίνη-άμμου προβάλλεται υψηλότερα από αυτό του σμήνους των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα μπεντονίτη-άμμου. Τέλος τα σημεία που αντιστοιχούν στις δοκιμές στα δοκίμια φυσικών υλικών είναι τόσο λίγα που δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση ή σαφής διαφοροποίηση από το σμήνος των δεδομένων από δοκιμές σε αναζυμωμένα εδάφη.

$$C_{r,1} = 0.002 \cdot (w_L - 26) \quad (13.11)$$

Η βέλτιστη προσέγγιση για το σμήνος των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης στο Σχ. 13.50β εκφράζεται από την Εξ. 13.12 και έχει συντελεστή συσχέτισης 0.87. Εάν επιχειρηθεί η υποχρεωτική διέλευση της βέλτιστης προσέγγισης από την αρχή των αξόνων, τότε προκύπτει η Εξ. 13.13 με συντελεστή συσχέτισης 0.85. Η εξίσωση αυτή δεν έχει νόημα για τιμές του δείκτη πλαστικότητας μικρότερες του 2.7 αφού σε αυτήν την περίπτωση προβλέπει αρνητικές τιμές. Το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα καολίνη-άμμου προβάλλεται υψηλότερα από αυτό του σμήνους των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα μπεντονίτη-άμμου. Τέλος τα σημεία που αντιστοιχούν στις δοκιμές στα δοκίμια φυσικών υλικών είναι μεν πολύ λίγα αλλά μοιάζουν να ακολουθούν μία τάση πολύ κοντά σε αυτή των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης.

$$C_{r,l} = 0.003 \cdot (I_p - 2.7) \quad (13.12)$$

$$C_{r,l} = 0.0026 \cdot I_p \quad (13.13)$$

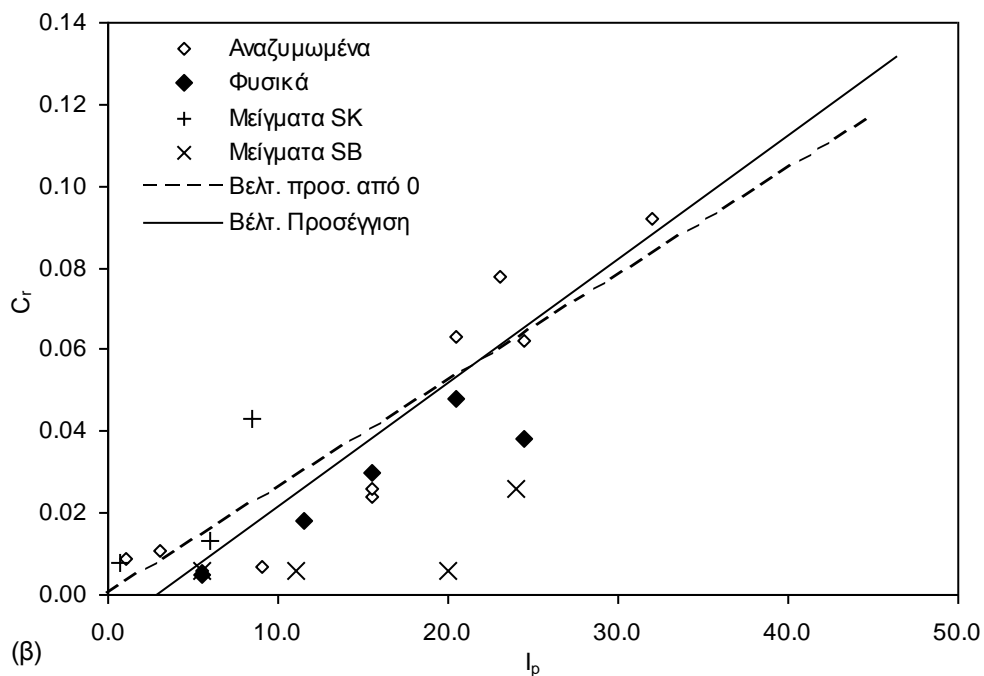
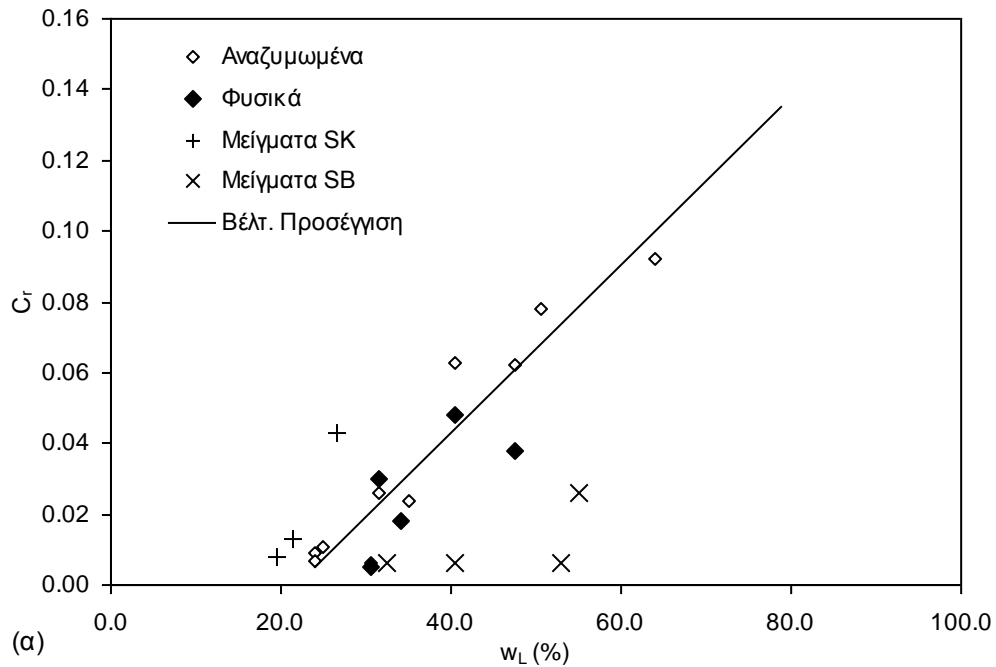
Στο Σχ. 13.51 συσχετίζεται ο δείκτης αποφόρτισης  $C_{r,l}$  με τον δείκτη συμπίεσης. Η βέλτιστη προσέγγιση έχει προσδιοριστεί για το σμήνος των σημείων φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης συμπεριλαμβανομένης της αμιγούς ιλύος και του καολίνη τύπου Speswhite, ενώ προβάλλεται ξεχωριστά το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα άμμου-καολίνη και μπεντονίτη-άμμου καθώς και το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα αδιατάρακτα δείγματα.

Η βέλτιστη προσέγγιση για το σμήνος των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης στο Σχ. 13.51 εκφράζεται από την Εξ. 13.14 και έχει συντελεστή συσχέτισης 0.87. Η εξίσωση αυτή δεν έχει νόημα για τιμές του δείκτη συμπίεσης μικρότερες του 0.085 αφού σε αυτήν την περίπτωση προβλέπει αρνητικές τιμές. Το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα καολίνη-άμμου προβάλλεται πολύ κοντά σε αυτό του σμήνους των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, όπως συμβαίνει και για το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα μπεντονίτη-άμμου (με εξαίρεση το σημείο που αντιστοιχεί στην δοκιμή SB-15). Τέλος τα σημεία που αντιστοιχούν στις δοκιμές στα δοκίμια φυσικών υλικών είναι τόσο λίγα που δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση ή σαφής διαφοροποίηση από το σμήνος των δεδομένων από δοκιμές σε αναζυμωμένα εδάφη.

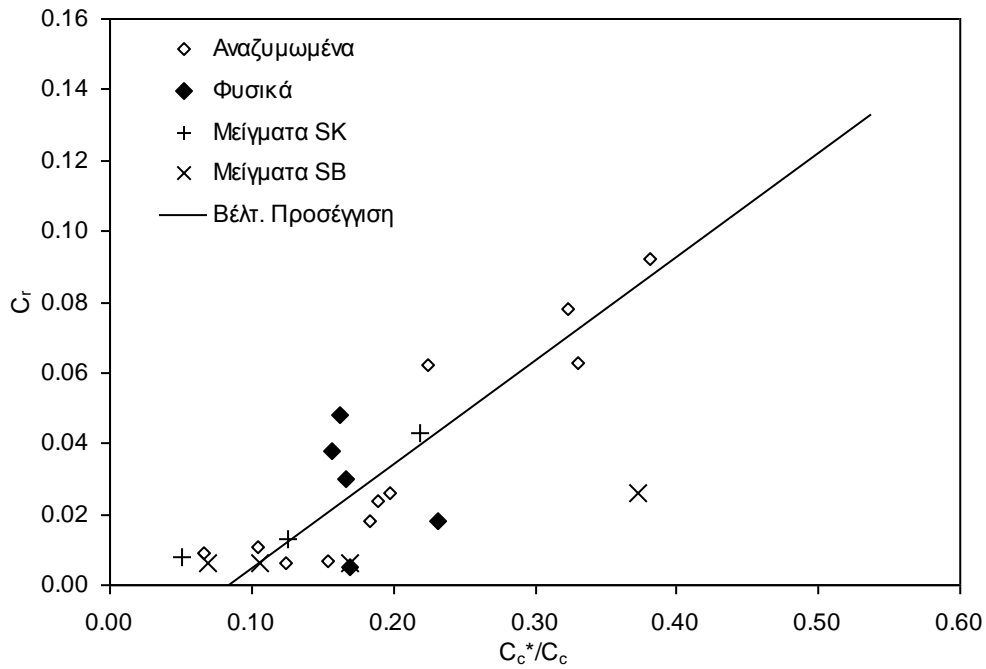
$$C_{r,l} = 0.294 \cdot C_c - 0.025 \quad (13.14)$$

Τέλος στο Σχ. 13.52 συσχετίζεται ο δείκτης αποφόρτισης  $C_{r,h}$  για μικρές μεταβολές της τάσης από την μέγιστη επιβληθείσα με τον δείκτη αποφόρτισης  $C_{r,l}$ . Η βέλτιστη προσέγγιση έχει προσδιοριστεί για το σμήνος των σημείων φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης συμπεριλαμβανομένης της αμιγούς ιλύος και του καολίνη τύπου Speswhite, ενώ προβάλλεται ξεχωριστά το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα άμμου-καολίνη και μπεντονίτη-άμμου καθώς και το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα αδιατάρακτα δείγματα.

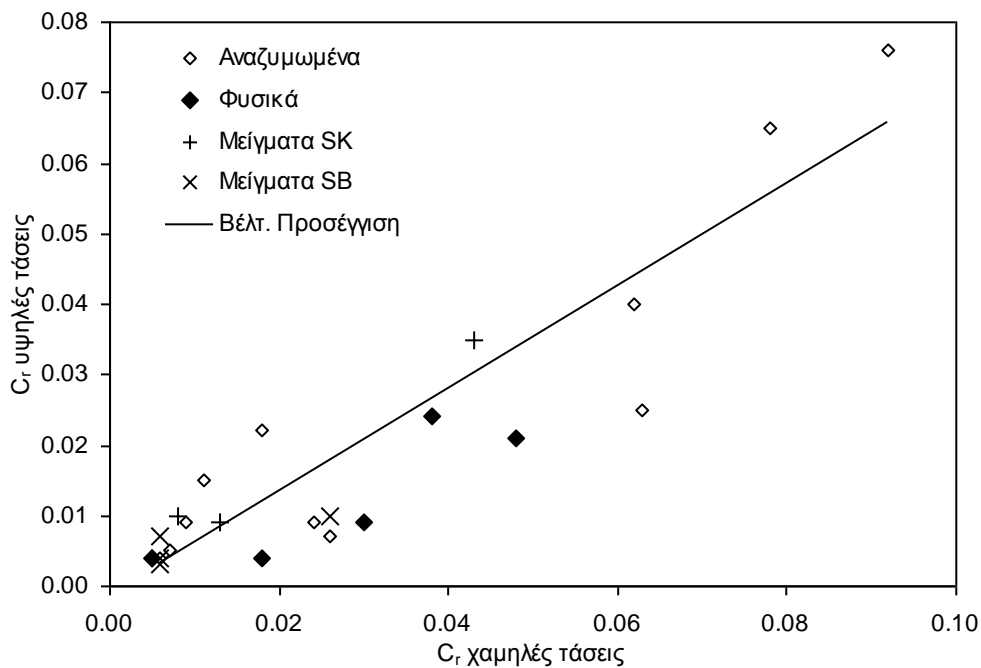
Η βέλτιστη προσέγγιση για το σμήνος των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης στο Σχ. 13.52 εκφράζεται από την Εξ. 13.15 και έχει συντελεστή συσχέτισης 0.85. Η εξίσωση αυτή δεν έχει νόημα για τιμές του δείκτη αποφόρτισης  $C_{r,l}$  μικρότε-



**Σχήμα 13.50.** Συσχέτιση του δείκτη αποφόρτισης α) με το όριο υδαρότητας, και β) με τον δείκτη πλαστικότητας με προβολή των γραφικών παραστάσεων των Εξ. 13.11 έως 13.13.



**Σχήμα 13.51.** Συσχέτιση του δείκτη αποφόρτισης με τον δείκτη συμπίεσης με προβολή της γραφικής παράστασης της Εξ. 13.14.



**Σχήμα 13.52.** Συσχέτιση του δείκτη αποφόρτισης  $C_{r,h}$  για μικρές μεταβολές της τάσης από την μέγιστη επιβληθείσα με τον δείκτη αποφόρτισης  $C_{r,l}$  με προβολή της γραφικής παράστασης της Εξ. 13.15.



ρες του 0.0014 αφού σε αυτήν την περίπτωση προβλέπει αρνητικές τιμές. Το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα καολίνη-άμμου προβάλλεται πολύ κοντά σε αυτό του σμήνους των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, όπως συμβαίνει και για το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα μπεντονίτη-άμμου (με εξαίρεση το σημείο που αντιστοιχεί στην δοκιμή SB-15). Τέλος τα σημεία που αντιστοιχούν στις δοκιμές στα δοκίμια φυσικών υλικών είναι τόσο λίγα που δεν προκύπτει κάποια συσχέτιση ή σαφής διαφοροποίηση από το σμήνος των δεδομένων από δοκιμές σε αναζυμωμένα εδάφη (πέραν ίσως του ότι προβάλλονται συστηματικά χαμηλότερα από την βέλτιστη προσέγγιση που διατυπώθηκε).

$$C_{r,l} = 0.727 \cdot C_{r,l} - 0.001 \quad (13.15)$$

### 13.6.2 Χαρακτηριστικές τιμές του εγγενούς λόγου κενών – όρια Atterberg

Το άλλο είδος εμπειρικών συσχετίσεων που ενδιαφέρουν είναι αυτό κατά τα οποίο συσχετίζονται οι χαρακτηριστικές τιμές του εγγενούς λόγου κενών με τα φυσικά χαρακτηριστικά. Στο Σχ. 13.53 συσχετίζεται ο εγγενής λόγος κενών στα 100 kPa  $e^*_{100}$  με τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας. Η βέλτιστη προσέγγιση έχει προσδιοριστεί για το σμήνος των σημείων φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης συμπεριλαμβανομένης της αμιγούς ιλύος και του καολίνη τύπου Speswhite, ενώ προβάλλεται ξεχωριστά το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα καολίνη-άμμου και μπεντονίτη-άμμου. Στο ίδιο σχήμα προβάλλεται και η γραφική παράσταση της μίας διαθέσιμης εμπειρικής συσχέτισης η οποία εκφράζεται από την Εξ. 13.16 (Burland, 1990).

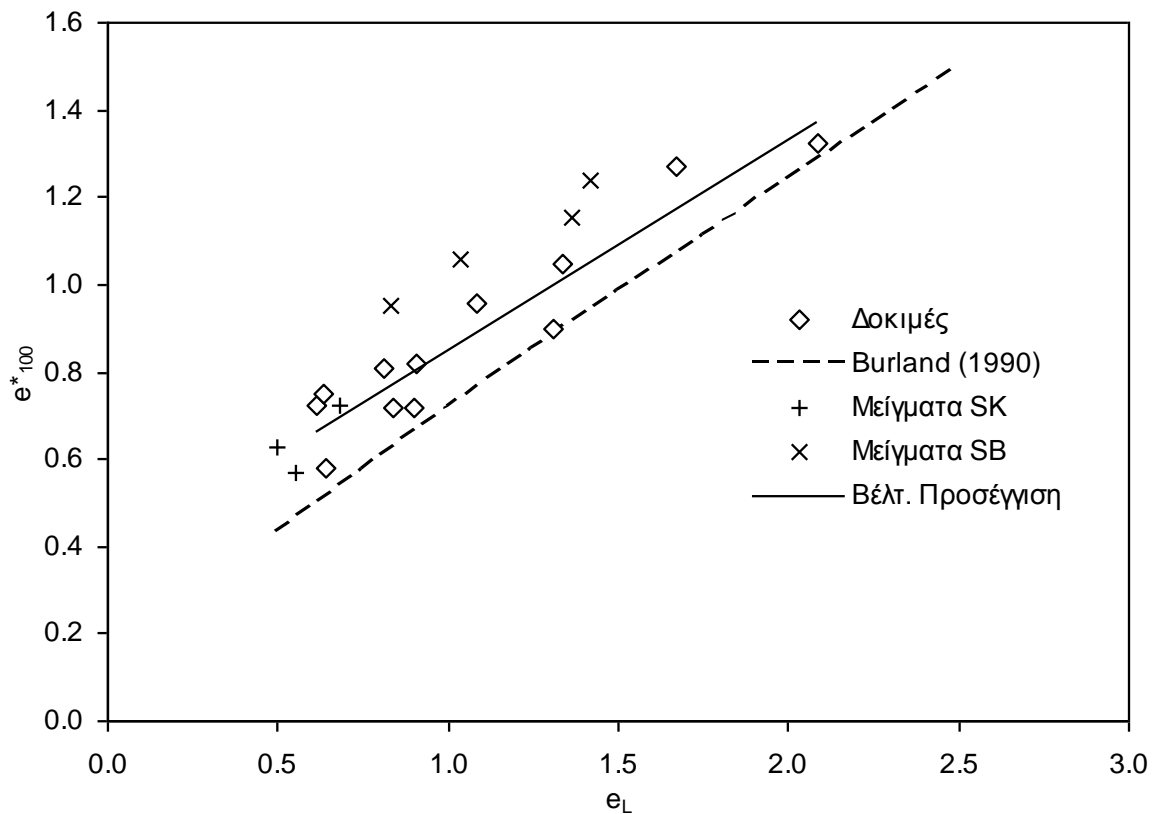
$$e^*_{100} = 0.109 + 0.679 \cdot e_L - 0.089 \cdot e_L^2 + 0.016 \cdot e_L^3 \quad (13.16)$$

Η βέλτιστη προσέγγιση για το σμήνος των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης στο Σχ. 13.53 εκφράζεται από την Εξ. 13.17 και έχει συντελεστή συσχέτισης 0.90. Το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα καολίνη-άμμου προβάλλεται πολύ κοντά σε αυτό του σμήνους των σημείων των αναζυμωμένων υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, ενώ το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στα μείγματα μπεντονίτη-άμμου προβάλλεται συστηματικά υψηλότερα από το σύνολο των υπόλοιπων πειραματικών σημείων. Γενικά οι τιμές από το σύνολο των πειραματικών σημείων προκύπτουν

συστηματικά υψηλότερες από αυτές που προβλέπονται από την εμπειρική συσχέτιση του Burland (1990) –όπως άλλωστε προέβλεπε και ο ίδιος όταν χρησιμοποιούνται εδαφικά υλικά χαμηλότερης πλαστικότητας από αυτά του δικού του στατιστικού δείγματος (βλ. Παράρτημα Α).

$$e^*_{100} = 0.372 + 0.478 \cdot e_L \tag{13.17}$$

Η βέλτιστη προσέγγιση επιλέχθηκε να είναι μία απλή γραμμική συσχέτιση πρώτου βαθμού με το όριο υδαρότητας αφού το πλήθος των πειραματικών σημείων και η παρατηρούμενη εξέλιξη του  $e^*_{100}$  με τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας δεν δικαιολογούσε μια πιο πολύπλοκη συσχέτιση.



**Σχήμα 13.53.** Συσχέτιση του δείκτη συμπίεσης με τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας με προβολή των γραφικών παραστάσεων των Εξ. 13.15 και 13.16.

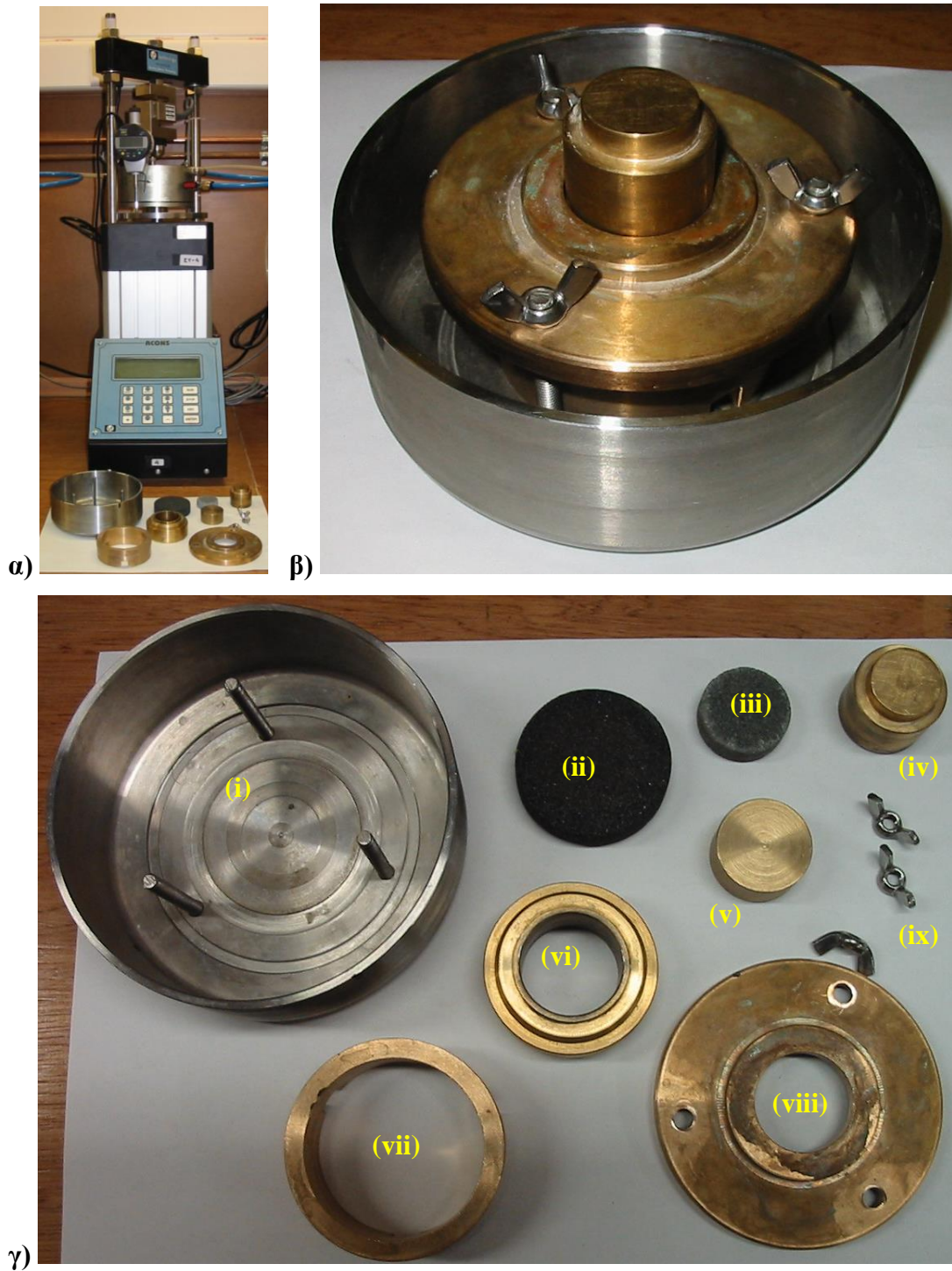
### 13.7 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΗ ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΓΙΑ ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΑ ΥΛΙΚΑ

Στο Κεφ. 13 μέχρι αυτό το σημείο επιδείχθηκε κατ' επανάληψη πως οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης μπορούν να γίνουν κυρτές για διάφορα εδαφικά υλικά καθώς και πόσο μεγάλη είναι η σημασία αυτής της κύρτωσης για την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των φυσικών εδαφικών υλικών και πως αυτά χάνουν την δομή τους κατά την φόρτισή τους μέχρι υψηλές τιμές της τάσης. Όπως όμως αναφέρθηκε και στην §5.2 στο 1<sup>ο</sup> Μέρος της διατριβής, οι καμπύλες λόγου κενών-τάσης (με την τάση σε λογαριθμική κλίμακα) στρέφουν τα κοίλα προς τα κάτω, μόνο για το εύρος των τιμών της τάσης που δεν γίνεται θραύση των κόκκων τους. Εάν η τάση φτάσει σε τόσο υψηλές τιμές (κατά τάξη μεγέθους μερικές δεκάδες MPa) τότε στην περιοχή της τάσης που αντιστοιχεί σε θραύση των κόκκων, η καμπύλη λόγου κενών-τάσης (ή παραμόρφωσης-τάσης) στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω ως αποτέλεσμα της μεταβολής της κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού και της πλήρωσης προηγούμενα άδειων κενών που προκύπτει από την θραύση των κόκκων, οι οποίοι περιέρχονται σε νέα διάταξη μικρότερου πορώδους. Τονίστηκε δε ότι για να εμφανιστεί η γεωμετρική αυτή μορφή της καμπύλης παραμόρφωσης-τάσης των κοκκωδών εδαφικών υλικών, οι τιμές της τάσης πρέπει να είναι πάρα πολύ μεγάλες, και πάλι ενδέχεται αυτή να μην μπορεί να διαφανεί τόσο ξεκάθαρα, ανάλογα με το ποσοστό των λεπτοκόκκων, την μορφή των κόκκων (στρογγυλευμένοι ή γωνιώδεις), την κοκκομετρική διαβάθμιση του χονδροκόκκου μέρους (καλή ή κακή) και την ορυκτολογική σύσταση των χονδροκόκκων. Κατά συνέπεια πέρα από τις διερευνήσεις που παρουσιάστηκαν ήδη σε αυτό το κεφάλαιο, θεωρήθηκε σκόπιμη και μια ακόμα, αυτή ως προς το μέγεθος της κατακόρυφης τάσης.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής λοιπόν παραγγέλθηκε μία νέα κυψέλη εφαρμογής υψηλών τάσεων (μέχρι 21.2 MPa στα διατιθέμενα στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. συμπιεσόμετρα) και πραγματοποιήθηκαν οι σχετικές δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης που παρουσιάζονται παρακάτω. Η κυψέλη κατασκευάστηκε από το μηχανουργείο ΥΦΑΝΤΙΔΗΣ και έχει διάμετρο 30mm και ύψος δοκιμίου 15mm (λόγος διαμέτρου προς ύψος 2). Ο λόγος αυτός είναι σύμφωνος με τα σχετικά διεθνή πρότυπα αλλά η διάμετρος είναι σαφώς μικρότερη από το ελάχιστο που τα ίδια πρότυπα καθορίζουν (συνήθως 50mm ή 2"). Το σκεπτικό των προτύπων είναι σαφές αφού έχουν καθοριστεί κύρια με γνώμονα την εκτέλεση δοκιμών σε δοκίμια από αδιατάρακτα δείγματα. Σε αυτά μία ελάχιστη διάμετρος (άσχετα από την συζήτηση

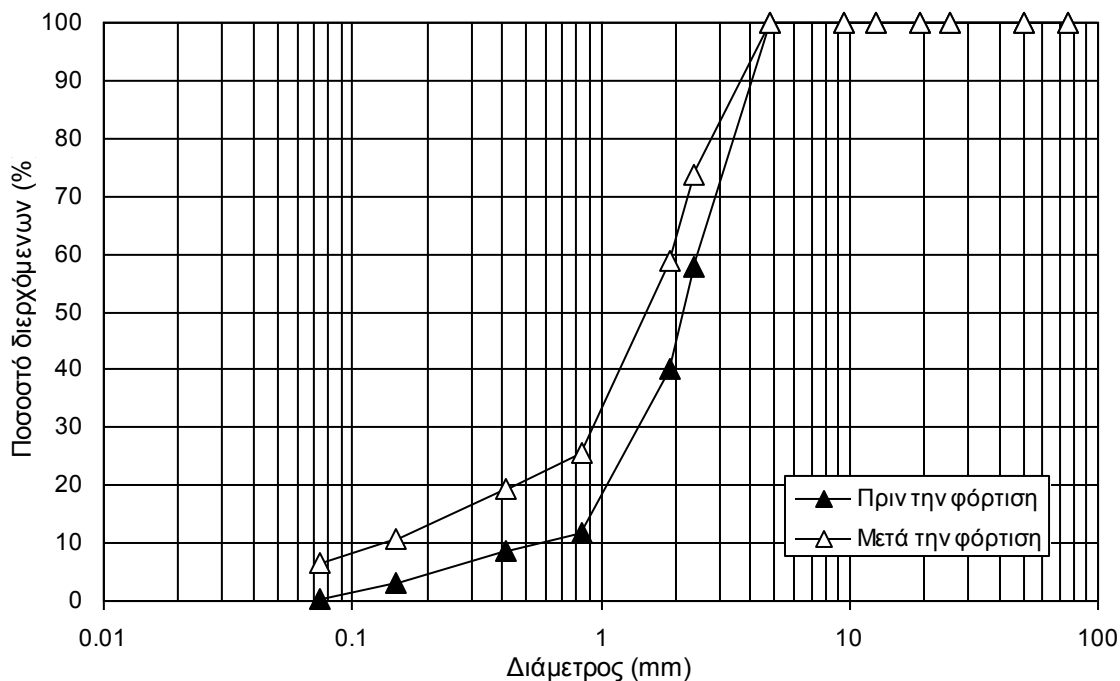
και την έρευνα που θα καθόριζε για διάφορα είδη εδαφών και μεθόδων δειγματοληψίας ποια θα έπρεπε να είναι αυτή η ελάχιστη διάμετρος) έχει το σκεπτικό ότι διασφαλίζει ένα ελάχιστο επίπεδο διατάραξης αυτού καθεαυτού του δοκιμίου, το οποίο ως γνωστόν διαταράσσεται από τη διαδικασία της εισαγωγής του κοπτικού δακτυλίου μέσα στο δείγμα για τη μόρφωση του δοκιμίου (όσο αιχμηρός και αν είναι ο κοπτικός δακτύλιος εν διατομή). Η νέα κυψέλη όμως είχε σκοπό την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς *αναζυμωμένων* εδαφικών υλικών. Κατά συνέπεια, δεδομένου ότι το δοκίμιο τοποθετείται εντός της κυψέλης, και δεν αποκόπτεται, η τήρηση του ελάχιστου απαιτούμενου λόγου είναι το σημαντικό και όχι η τήρηση της διαμέτρου, η οποία μειούμενη επιτρέπει την επίτευξη μεγαλύτερων τιμών της κατακόρυφης τάσης σε υφιστάμενα συμπίεσόμετρα ικανότητας επιβολής δεδομένης δύναμης. Στην Φωτ. 13.2 απεικονίζεται ένα αυτόματο ψηφιακό συμπίεσόμετρο κατασκευής VJTech του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. στο οποίο τοποθετήθηκε η νέα κυψέλη (ικανότητας εφαρμογής κατακόρυφης δύναμης 15 kN), η νέα κυψέλη συναρμολογημένη και αποσυναρμολογημένη στα απάρτιά της.

Στη νέα αυτή κυψέλη εκτελέστηκαν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης στη θραυστή χονδρόκοκκη άμμος («ρυζάκι») που αναφέρθηκε στο Κεφ. 11 (η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης μίας από τις εκτελεσθείσες δοκιμές έχει ήδη παρουσιαστεί στο Κεφ. 5 του 1<sup>ου</sup> Μέρους, Σχ. 5.11). Το σκεπτικό πίσω από την επιλογή του συγκεκριμένου υλικού ήταν ότι επειδή είχαν ήδη δοκιμαστεί υλικά όπως η πολύ λεπτόκοκκη άμμος μέχρι πολύ υψηλές τάσης χωρίς η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης να αρχίσει να στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω μετά την αρχική κύρτωση, έπρεπε να επιλεγεί ένα πιο χονδρόκοκκο υλικό για το οποίο υπήρχε η ελπίδα ότι θα εμφανιζόταν το φαινόμενο. Έτσι επιλέχθηκε η θραυστή χονδρόκοκκη άμμος («ρυζάκι») παρόλο που το υλικό αυτό είναι αρκετά χονδρόκοκκο για το ύψος του δοκιμίου της κυψέλης. Το υλικό αυτό είναι μια κυρίως χονδρόκοκκη άμμος με αρκετό μεσόκοκκο και λεπτόκοκκο κλάσμα και μόλις 0.4% διερχόμενο από το κόσκινο No. 200 στην μορφή με την οποία γίνεται η προμήθεια του συγκεκριμένου υλικού. Στο Σχ. 13.54 παρουσιάζεται η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού που χρησιμοποιήθηκε καθώς και του συγκεκριμένου υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην δοκιμή μετά την φόρτισή του μέχρι την κατακόρυφη τάση των 21.2 MPa. Ο συντελεστής ομοιομορφίας του υλικού ως έχει είναι 4.36 και ο συντελεστής καμπυλότητας 1.28, καθιστώντας το υλικό κακά διαβαθμισμένο λόγω συντελεστή ομοιομορφίας (<6), ενώ τα ίδια μεγέθη για το ίδιο υλικό μετά την φόρτισή του γίνονται 15.83 και 3.63 αντίστοιχα, καθιστώντας το υλικό κακά διαβαθμισμένο λόγω συντελεστή καμπυλότητας (>3). Το κρίσιμο είναι όμως ότι το υλικό που υποβλήθηκε στην φόρτιση είναι πλέον ένα πιο λεπτόκοκκο υλικό στο οποίο η χονδρόκοκκη άμμος είναι πια 41 αντί για 60%, η μεσόκοκκη 39.5 αντί για 31.5%, η

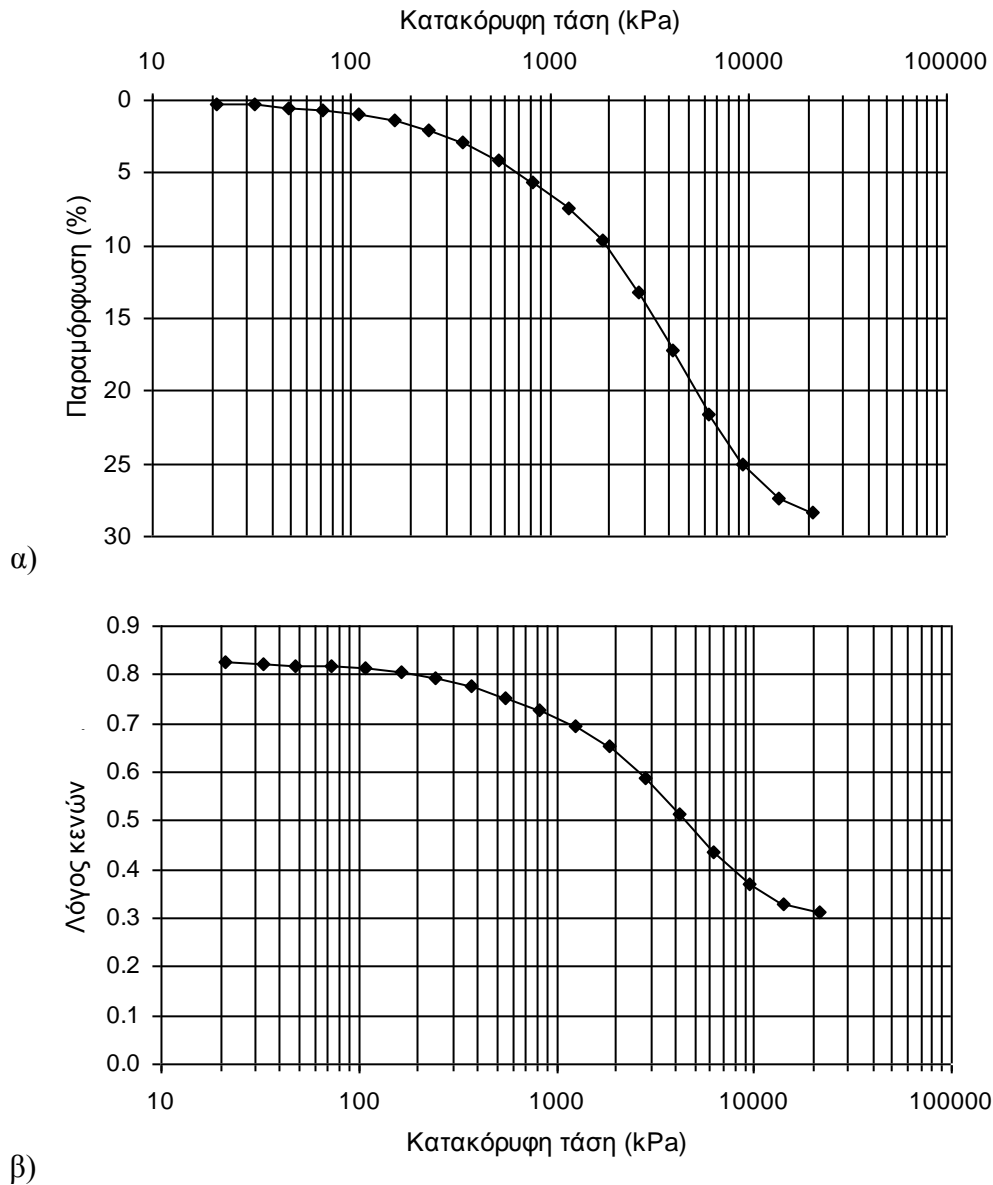


**Φωτογραφία 13.2.** α) Αυτόματο ψηφιακό συμπιεσόμετρο κατασκευής VJTech του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. με την κλασική κυψέλη που το συνοδεύει επί αυτού και την νέα κυψέλη που αναπτύχθηκε αποσυναρμολογημένη μπροστά του, β) η νέα κυψέλη συναρμολογημένη με ορειχάλκινο δοκίμιο στο εσωτερικό της, και γ) η νέα κυψέλη αποσυναρμολογημένη στα απάρτιά της: i) μήτρα, ii) κάτω πορόλιθος, iii) άνω πορόλιθος, iv) καπάκι, v) ορειχάλκινο δοκίμιο εκτέλεσης δοκιμών συμμόρφωσης, vi) δακτύλιος τοποθέτησης δοκιμίου, vii) δακτύλιος σταθεροποίησης κάτω πορολίθου, viii) άνω δακτύλιος σταθεροποίησης, και ix) «παξιμάδια» σταθεροποίησης.

λεπτόκοκκη 13 αντί για 8.5% και το διερχόμενο από το κόσκινο Νο. 200 6.63 αντί για 0.40%. Στο Σχ. 13.55 παρουσιάζεται η καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης του υλικού σε όρους κατακόρυφης παραμόρφωσης-κατακόρυφης τάσης και σε όρους λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης. Η δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης έγινε με βήμα αύξησης φορτίου 1.5 και το υλικό αρχικά ξηρό μέχρι και τα 21.2 MPa οπότε έγινε και η διαβροχή για να παρατηρηθεί αν υπάρχει κατάρρευση (βλ. Κεφ. 15). Από την καμπύλη εγγενούς συμπίεσης υπολογίστηκαν οι τιμές του εγγενούς λόγου κενών στα 100 και στα 1000 kPa και υπολογίστηκε ο δείκτης κενών για κάθε τιμή της τάσης. Στο Σχ. 13.56 παρουσιάζεται η κανονικοποιημένη καμπύλη εγγενούς συμπίεσης για την θραυστή χονδρόκοκκη άμμο (ΘΧΑ) έχοντας αφήσει στο ίδιο σχήμα και την ΘΓΕΣ αλλά και την κανονικοποιημένη καμπύλη εγγενούς συμπίεσης της πολύ λεπτόκοκκης άμμου (PVFS-01). Όπως προκύπτει από το Σχ. 13.56 η πιο χονδρόκοκκη άμμος από την πολύ λεπτόκοκκη παρουσιάζεται πιο κυρτή ακόμα στο εύρος τιμών τάσης μεταξύ 100 και 1000 kPa, παραμένει γενικά κυρτή μέχρι πολύ υψηλές τιμές της κατακόρυφης τάσης (6.3 έως 9.4 MPa) και στη συνέχεια από τα 9.4 MPa και μετά αρχίζει να γίνεται έντονα κοίλη με τάσεις αν είχε επιτευχθεί και μεγαλύτερη κατακόρυφη τάση να μπορούσε να έχει γίνει και ακόμα πιο κοίλη.

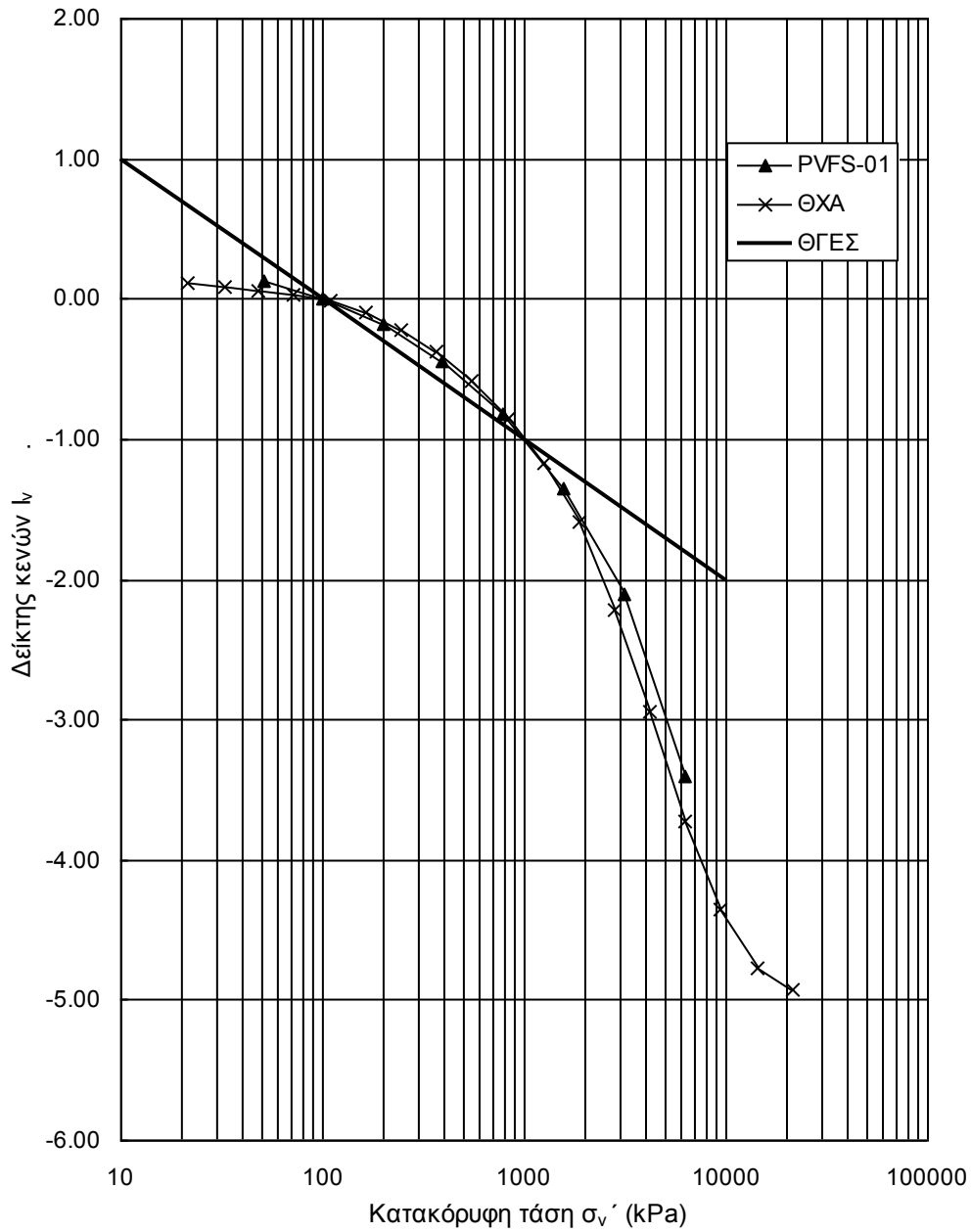


**Σχήμα 13.54.** Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης θραυστής χονδρόκοκκης άμμου πριν και μετά την φόρτισή της υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως ως τα 21.2 MPa.



**Σχήμα 13.55.** Καμπύλη α) κατακόρυφης παραμόρφωσης-κατακόρυφης τάσης και β) εγγενούς συμπίεσης για την δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης στην θραυστή χονδρόκοκκη άμμο στην νέα κυψέλη υψηλής τάσης.

Από την δοκιμή αυτή λοιπόν εξάγεται το συμπέρασμα ότι η κυρτότητα των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης υπάρχει και παραμένει σε χονδρόκοκκα εδάφη (γενικεύοντας και σε λεπτόκοκκα εδάφη χαμηλής πλαστικότητας) μέχρι πολύ υψηλές τιμές της κατακόρυφης τάσης κατά την μονοδιάστατη συμπίεση αλλά μετά από αυτές μεταβάλλεται οπότε αυτό αποτελεί και το όριο ως προς την κατακόρυφη τάση του τροποποιημένου θεωρητικού πλαισίου εγγενούς συμπίεστότητας που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο.



**Σχήμα 13.56.** Κανονικοποιημένη καμπύλη εγγενούς συμπίεσης της θραυστής χονδρόκοκκης άμμου (ΘΧΑ). Στο ίδιο σχήμα έχουν σχεδιαστεί και η ΘΓΕΣ και η κανονικοποιημένη καμπύλη εγγενούς συμπίεσης της πολύ λεπτόκοκκης άμμου (PVFS-01).



### 13.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πειραματική διερεύνηση της εγγενούς συμπίεστικότητας των εδαφικών υλικών υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως που εκτελέστηκε περιελάμβανε συνολικά 80 δοκιμές σε 10 υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και 14 τεχνητής. Στα συμπεράσματά της περιλαμβάνονται η εμπέδωση καταρχάς, καθώς και η περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνογνωσίας που συνοδεύει την παρασκευή αναζυμωμένων εδαφικών υλικών και την εκτέλεση δοκιμών σε αυτά (βλ. παρ. 13.3.2 και 13.3.9). Αυτή καθεαυτή η βάση πειραματικών δεδομένων για αναζυμωμένα εδαφικά υλικά διευρύνθηκε για εδαφικά υλικά μάλιστα από τον ελλαδικό χώρο αλλά και τα όρια για τα οποία διατυπώθηκε για πρώτη φορά το θεωρητικό πλαίσιο της εγγενούς συμπίεστικότητας (Burland, 1990). Ειδικά η σειρά των δοκιμών με την οποία διερευνήθηκε η επιρροή του αρχικού ποσοστού υγρασίας των πολτών αναζυμωμένων εδαφικών υλικών (βλ. παρ. 13.3) επέτρεψε την επαναδιατύπωση του βασικού ορισμού των αναζυμωμένων εδαφικών υλικών αφού η αρχική πρόταση του Burland (1990) για τα αναζυμωμένα εδάφη, ότι αποτελούν υλικά μηχανικά αναμοχλευμένα και αναμειγμένα με νερό τόσο ώστε να αποκτήσουν ποσοστό υγρασίας μεταξύ μίας και 1.5 φορές το όριο υδαρότητας του υλικού, πρέπει να αναθεωρηθεί προς τα πάνω και να γίνει μεταξύ 1.4 και 2.0 φορές το όριο υδαρότητας. Τιμές του αρχικού ποσοστού υγρασίας των πολτών μάλιστα μικρότερες του ορίου υδαρότητας των υλικών πρέπει να αποφεύγονται οπωσδήποτε αφού οδηγούν σε τιμές του αρχικού βαθμού κορεσμού των πολτών τόσο μικρές που μεταβάλλεται ριζικά η μορφή των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης, τόσο μάλιστα ώστε να μεταβάλλεται ακόμα και η φορά που στρέφουν τα κοίλα (προς τα πάνω ή προς τα κάτω). Επίσης στην ίδια κατεύθυνση έχει σημαντικότερο ρόλο ο χρόνος ύγρυνσης, ειδικά όσο αυξάνεται η πλαστικότητα των εδαφικών υλικών. Τέλος, είναι καλό να αποφεύγεται η χρήση του εγγενούς λόγου κενών στο 1 kPa αφού αυξάνεται ραγδαία με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών αποτελώντας συνάρτησή του, παρά συνάρτηση της εντατικής κατάστασης στο υλικό, σε αντίθεση με τις τιμές του λόγου κενών στα 100 kPa και 1000 kPa καθώς και του δείκτη συμπίεσης και του δείκτη αποφόρτισης που αποτελούν σταθερές κάθε υλικού εξαρτώμενες μόνο από την φύση του.

Σε ό,τι αφορά την γενικευμένη γραμμή εγγενούς συμπίεσης και την εγγενή παράμετρο απόστασης (σε συνδυασμό και με την θεωρητική επεξεργασία του Κεφ. 10), προκύπτει σαφώς ότι η γραμμή εγγενούς συμπίεσης δεν είναι μοναδική γραμμή και δεν πρέπει να θεωρείται τέτοια. Αν έχει νόημα μία γραμμή στον χώρο δείκτη κενών-κατακόρυφης τάσης (λογαριθμική κλίμακα), αυτή είναι η Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης ως μία μοναδική γραμμή

αναφοράς που επιτρέπει την αξιολόγηση των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης ως προς την φορά και το μέγεθος της καμπυλότητάς τους. Για τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και με ακόμα μεγαλύτερη σαφήνεια για τα εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης προέκυψε ότι οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσής τους έχουν καμπυλότητα φοράς και μεγέθους (εκφραζόμενα με επιτυχία από το πρόσημο και το απόλυτο μέγεθος της εγγενούς παραμέτρου απόστασης) που εξαρτώνται από την περιεκτικότητα σε άργιλο των εδαφικών υλικών και την δραστικότητα του περιεχόμενου αργιλικού ορυκτού και τον δείκτη πλαστικότητας των υλικών. Όσο πιο μικρή γίνεται η περιεκτικότητα σε άργιλο των εδαφικών υλικών και όσο περισσότερο μειώνεται η δραστικότητα του περιεχόμενου αργιλικού ορυκτού, τόσο οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης μεταβάλλονται από κοίλες σε κυρτές. Η κυρτότητα αυτή να περιορίζεται όπως φάνηκε από την δοκιμή σε θραυστή χονδρόκοκκη άμμο στην νέα κυψέλη εφαρμογής υψηλών τάσεων για πολύ υψηλές τιμές της κατακόρυφης τάσης, μέχρι τις οποίες ισχύει η μεταβολή αυτή στο γεωμετρικό σχήμα των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης.

Όπως επιδείχθηκε από τις δοκιμές σε αδιατάρακτα δοκίμια φυσικών εδαφικών υλικών με δομή και ειδικά τις δοκιμές στην Μάργα Κορίνθου, εάν δεν χρησιμοποιηθεί η πραγματική καμπύλη εγγενούς συμπίεσης του ίδιου του υλικού σε αδιατάρακτο δοκίμιο του οποίου έγινε η δοκιμή, μπορεί να προκύψουν ακόμα και αποτελέσματα στερούμενα φυσικού νοήματος αν η σύγκριση της κανονικοποιημένης καμπύλης γίνει με κάποια από τις υφιστάμενες εμπειρικές συσχετίσεις για την γραμμή εγγενούς συμπίεσης (π.χ. Burland, 1990, Chandler, 2000), ή ακόμα και την ΘΓΕΣ. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί το σπουδαιότερο λόγο που τεκμηριώνει την αξία της γενικευμένης γραμμής εγγενούς συμπίεσης και της εγγενούς παραμέτρου απόστασης ως μέσο έκφρασης της γραμμής αυτής, δικαιολογώντας την εκπόνηση της πειραματικής διερεύνησης που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό. Η ίδια η γενικευμένη γραμμή εγγενούς συμπίεσης δε, επεκτείνει το εύρος της ισχύος και δυνατότητας χρησιμοποίησης του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών, όπως πρωτοδιατυπώθηκε για αργιλικά εδαφικά υλικά, ακόμα και για φυσικά ιλυώδη (π.χ. η Μάργα Κορίνθου) ή και πολύ λεπτόκοκκα αμμώδη εδάφη με δομή.

Η σχετική πειραματική διερεύνηση μπορεί να συνεχιστεί και στο μέλλον με επιπλέον εδαφικά υλικά φυσικών χαρακτηριστικών διαφορετικών από αυτά των υλικών της διερεύνησης που παρουσιάστηκε (πολύ υψηλής πλαστικότητας, οργανικά κλπ) καθώς και άλλες εντατικές καταστάσεις (π.χ. συνθήκες ισοτροπικής συμπίεσης) και επίπεδα εφαρμοζόμενης τάσης.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 14

## ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ

### 14.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε δεκατέσσερα (14) διαφορετικά εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο. Τα εδαφικά αυτά υλικά ήταν η Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων, η Άργιλος Χανίων, η Άργιλος Λιβαδερού Δράμας, η Άργιλος Κηφισιάς, η Άργιλος Μελίτης Φλώρινας, η Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου, η Άργιλος Αμφιλοχίας, η Μάργα Κορίνθου, η Μάργα Κηφισιάς, η Μάργα Χαλκουτσίου, ο αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου, ο αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας, ο αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου και η Άργιλος Αμαρουσίου. Στα εδαφικά αυτά υλικά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού με χρήση θαλάμου μύζησης και κορεσμένων υδατικών διαλυμάτων αλάτων, αλλά και προσδιορισμός καμπυλών ξήρανσης με τοποθέτηση των δοκιμίων των εδαφικών υλικών στον φούρνο ή άφεσή τους στην ατμόσφαιρα.

Σε όλα τα υλικά πλην του αποσαθρωμένου Σερπεντινίτη έγιναν οι δοκιμές που προαναφέρθηκαν σε δείγματα αναζυμωμένα αρχικά και προσυμπιεσμένα στη συνέχεια, και σε τρία υλικά (τη Μάργα Κορίνθου, τη Μάργα Χαλκουτσίου και τον αργιλοποιημένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας) και σε αδιατάρακτα δείγματά τους. Στον αποσαθρωμένο Σερπεντινίτη οι δοκιμές αυτές έγιναν σε δείγματα συμπυκνωμένα σε τρεις διαφορετικές υγρασίες, «ξηρά» από τη βέλτιστη, στη βέλτιστη και «υγρά» από τη βέλτιστη (το ίδιο έγινε και για την Άργιλο Αμαρουσίου, εκτός από τις δοκιμές σε αναζυμωμένα και αναζυμωμένα αρχικά και προσυμπιεσμένα στη συνέχεια δείγματά της). Ειδικά οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού των δύο αυτών υλικών σε συμπυκνωμένα δείγματα παρουσιάζονται στο Κεφ. 15. Σε όλα τα υλικά πλην της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων και της Μάργας Κορίνθου στη φυσική της κατάσταση, η χαρακτηριστική καμπύλη

εδάφους-νερού σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης μετρήθηκε και επί μοναδικού δοκιμίου και επί διαφορετικών δοκιμίων στα οποία μετρείτο και η πυκνότητά τους μέσω της μεθόδου εμβάπτισης σε παραφίνη. Στον Πιν. 14.1 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε όλα τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν.

Τα φυσικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των εδαφικών αυτών υλικών παρατίθενται στο Κεφάλαιο 11 του παρόντος μέρους, ενώ τα χαρακτηριστικά της συμπιεστότητας ορισμένων εξ αυτών υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 13 και 15. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται η εργαστηριακή διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού, οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που προσδιορίστηκαν για τα προαναφερθέντα εδαφικά υλικά (πλην εκείνων σε συμπυκνωμένα εδάφη), οι σχετικές παράμετροι μηχανικής συμπεριφοράς και τα συμπεράσματα που προκύπτουν. Παρουσιάζεται επίσης η σύγκριση των ογκομετρικών μεταβολών κατά τις μεταβολές μύζησης και κατά τη μονοδιάστατη συμπίεση. Τέλος παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης μετά από τοποθέτηση των δοκιμίων στο φούρνο και άφεσή τους στην ατμόσφαιρα του εργαστηρίου με παρακολούθηση της απώλειας ύδατος.

**Πίνακας 14.1.** Χαρακτηριστικά δοκιμών προσδιορισμού χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού (ΧΚΕΝ).

Υλικό	Κατάσταση υλικού κατά τον προσδιορισμό της ΧΚΕΝ	Έλεγχος μύζησης με την μέθοδο μετατόπισης άξονα (0-1500 kPa)	Έλεγχος μύζησης με την μέθοδο υδατικών διαλυμάτων	Μετρήσεις μεταβολών ποσοστού υγρασίας	Μετρήσεις μεταβολών όγκου	Μέτρηση ΧΚΕΝ και με μοναδικό δοκίμιο για όλες τις τιμές της μύζησης
Ίλος Λίμνης Ιωαννίνων	Αναζυμωμένο/προσυμπίεσμένο	✓	-	✓	✓	-
Αργίλος Χανίων	Αναζυμωμένο/προσυμπίεσμένο	✓	✓	✓	✓	✓
Αργίλος Λιβαδερού Δράμας	Αναζυμωμένο/προσυμπίεσμένο	✓	✓	✓	✓	✓
Αργίλος Μελίτης Φλώρινας	Αναζυμωμένο/προσυμπίεσμένο	✓	✓	✓	✓	-
Αργίλος Κηφισιάς	Αναζυμωμένο/προσυμπίεσμένο	✓	✓	✓	✓	✓
Αργίλος Ορεστιάδας Έβρου	Αναζυμωμένο/προσυμπίεσμένο	✓	✓	✓	✓	-
Αργίλος Αμφιλοχίας	Αναζυμωμένο/προσυμπίεσμένο	✓	✓	✓	✓	✓
Μάργα Κορίνθου	Φυσικό	✓	-	✓	✓	-
Μάργα Κορίνθου	Αναζυμωμένο/προσυμπίεσμένο	✓	✓	✓	✓	✓
Μάργα Κηφισιάς	Αναζυμωμένο/προσυμπίεσμένο	✓	✓	✓	✓	✓
Μάργα Χαλκουτσίου	Φυσικό	✓	✓	✓	✓	-
Μάργα Χαλκουτσίου	Αναζυμωμένο/προσυμπίεσμένο	✓	✓	✓	✓	-
Αργιλοποιημένος Ίλυόλιθος Πάρνηθας	Φυσικό	✓	✓	✓	✓	-
Αργιλοποιημένος Ίλυόλιθος Πάρνηθας	Αναζυμωμένο/προσυμπίεσμένο	✓	✓	✓	✓	-
Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου	Αναζυμωμένο/προσυμπίεσμένο	✓	✓	✓	✓	-
Αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου	Συμπυκνωμένο σε διάφορες υγρασίες συμπίκνωσης	✓	✓	✓	-	✓
Αργίλος Αμαρουσίου	Συμπυκνωμένο σε διάφορες υγρασίες συμπίκνωσης	✓	✓	✓	✓	✓

## 14.2 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

### 14.2.1 Εισαγωγή

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι ελέγχου της μύζησης: η μέθοδος μετατόπισης άξονα όπως υλοποιείται σε θάλαμο μύζησης και η μέθοδος ελέγχου της μύζησης με χρήση κορεσμένων υδατικών διαλυμάτων αλάτων. Η πρώτη επιτρέπει τον έλεγχο της μύζησης εδαφικού σκελετού στο εύρος τιμών 0-1500 kPa και η δεύτερη σε πολύ μεγάλες τιμές της ολικής μύζησης.

### 14.2.2 Μέθοδος μετατόπισης άξονα – Θάλαμοι μύζησης

Η μέθοδος μετατόπισης άξονα υλοποιήθηκε σε θάλαμο μύζησης (pressure extractor) της SoilMoisture Inc με κεραμικούς πορολίθους (pressure plates) πίεσης διείσδυσης αέρα 15 Bar (Φωτ. 14.1 & 14.2). Η βασική αρχή της μεθόδου έχει ήδη περιγραφεί στα Κεφάλαια 3 και 4 του



**Φωτογραφία 14.1.** Ο θάλαμος μύζησης του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής (Soil Moisture Inc.) με κεραμικό πορολίθο πίεσης διείσδυσης αέρα 15 Bar. Αριστερά διακρίνεται ανοικτός με το σκέπασμα του δεξιά (α). Μεταξύ του λευκού πορολίθου και του περιβάλλοντος μαύρου ελαστικού βρίσκεται το δοχείο του νερού που επικοινωνεί με το εξωτερικό με τον λεπτό σωλήνα (A), ενώ διακρίνεται και ο χοντρότερος άσπρος σωλήνας (B) από τον οποίο εισέρχεται στον αεροστεγώς κλεισμένο θάλαμο (β) ο αέρας υπό πίεση.



(α)



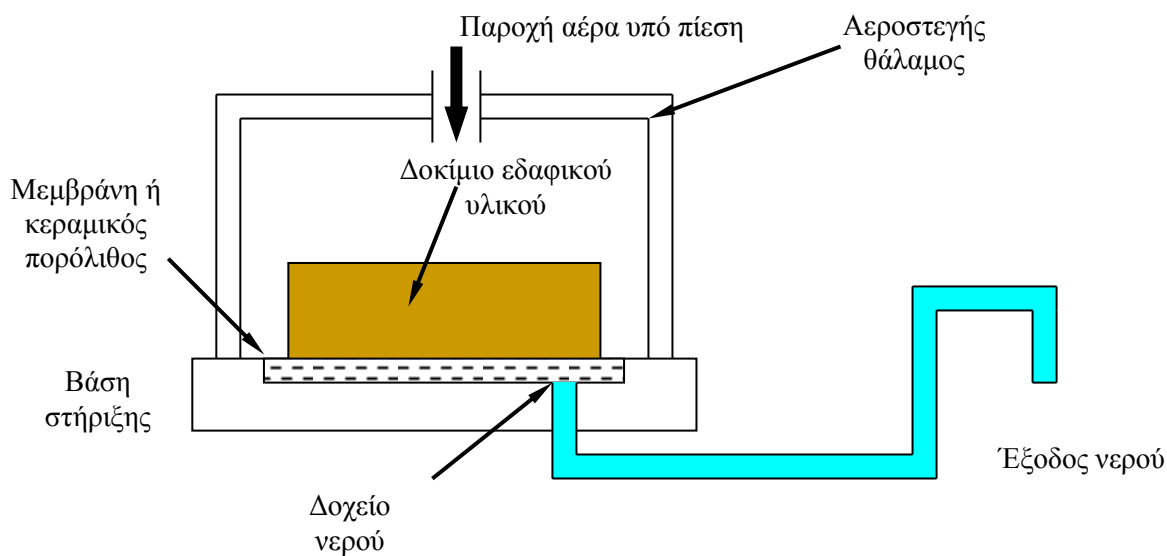
(β)

**Φωτογραφία 14.2.** Ο θάλαμος μύζησης του Εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. (Soil Moisture Inc.) με κεραμικό πορόλιθο πίεσης διείσδυσης αέρα 15 Bar. Αριστερά διακρίνονται οι τέσσερις έξοδοι αέρα από τις οποίες κατά την λήψη της φωτογραφίας χρησιμοποιείτο η μία (Α). Δεξιά διακρίνεται η είσοδος του αέρα υπό πίεση με τη βαλβίδα εκτόνωσης της πίεσης για περισσότερη ασφάλεια.

πρώτου μέρους όπου παρατίθεται και σύγκριση της μεθόδου αυτής με άλλες εργαστηριακές μεθόδους προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Στην παράγραφο αυτή, η μέθοδος επεξηγείται αναλυτικότερα, στη συγκεκριμένη μάλιστα παραλλαγή της που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος εργαστηριακών δοκιμών της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στο Σχ. 14.1 παρατίθεται η χρησιμοποιηθείσα διάταξη σε απλοποιημένη μορφή. Το δοκίμιο του εδαφικού υλικού αποτίθεται πάνω σε ειδικό κεραμικό πορόλιθο όπως στην περίπτωση της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε (ή μεμβράνη σελοουλόζης σε άλλες συσκευές –cellulose membrane), η οποία επικοινωνεί με το εξωτερικό του θαλάμου και στη συνέχεια και τα δύο (δοκίμιο και πλάκα ή μεμβράνη) κλείνονται αεροστεγώς μέσα στον θάλαμο. Ο θάλαμος αυτός

(θάλαμος μύζησης) έχει τρεις εισόδους/εξόδους: μία από όπου εισέρχεται αέρας υπό πίεση, μία από όπου ο πορόλιθος ή η μεμβράνη βρίσκεται σε επαφή με το εξωτερικό του θαλάμου για την έξοδο ή είσοδο νερού ή για την προσαρμογή μανομέτρου για τη μέτρηση της πίεσης του νερού στο δοχείο νερού κάτω από τον κεραμικό πορόλιθο ή τη μεμβράνη (χρησιμοποιείται στην περίπτωση που χρησιμοποιείται η μέθοδος μετατόπισης άξονα όπως υλοποιείται στη συγκεκριμένη συσκευή για τη μέτρηση της μύζησης, ιδέ σχετικά Κεφάλαιο 2, Μέρους Ι), και μία για την εκκένωση του θαλάμου μύζησης. Στο εργαστηριακό πρόγραμμα που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής χρησιμοποιήθηκε ένας κεραμικός πορόλιθος. Στη συσκευή του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής μπορούν να τοποθετηθούν μέχρι και τρεις ταυτόχρονα ενώ στη συσκευή του Εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. μέχρι και τέσσερις ταυτόχρονα (φιλοξενώντας ακόμα περισσότερα δοκίμια) οπότε τότε αυξάνεται ο αριθμός των εξόδων του νερού (μία για κάθε κεραμικό πορόλιθο).



**Σχήμα 14.1.** Σκαρίφημα εργαστηριακής διάταξης προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού με χρήση της μεθόδου μετατόπισης άξονα όπως υλοποιείται στον θάλαμο μύζησης του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής και του Εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.

Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η διάταξη του θαλάμου μύζησης για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ακολουθείται η εξής διαδικασία. Το δοκίμιο τοποθετείται επί του πορόλιθου ή της μεμβράνης, ο θάλαμος μύζησης σφραγίζεται και η πίεση



του αέρα αρχίζει να αυξάνεται σε βήματα με την έξοδο νερού του πορολίθου ή της μεμβράνης ανοικτή. Η έξοδος νερού από τον πορολίθο ή τη μεμβράνη μπορεί να καταλήγει απλώς σε ένα δοχείο συλλογής του νερού ή σε ογκομετρικό σωλήνα για τη μέτρηση του όγκου του νερού που εξέρχεται. Όταν επέλθει υδραυλική ισορροπία για κάθε βήμα αύξησης της πίεσης του αέρα η μύζηση του δοκιμίου ισούται με την πίεση του αέρα στην αντίστοιχη είσοδο, εφόσον η μύζηση του δοκιμίου ήταν μηδενική αρχικά. Εάν η μύζηση του δοκιμίου δεν ήταν μηδενική αρχικά, τότε η μύζησή του μετά την ισορροπία σε κάθε βήμα αύξησης της πίεσης του αέρα είναι όση η πίεση του αέρα συν την αρχική μύζηση του δοκιμίου.

Στην περίπτωση που μέσα στο θάλαμο μύζησης βρίσκεται μόνο ένα δοκίμιο, τότε μπορεί είτε να μετρείται η ποσότητα του νερού που εξήλθε στο αντίστοιχο βήμα αύξησης της πίεσης του αέρα, είτε να ζυγίζεται ολόκληρη η συσκευή με το δοκίμιο μέσα (εφόσον πρόκειται από τις αρκετά ελαφρές εκδόσεις των θαλάμων μύζησης που είναι κατασκευασμένες συνήθως από πλαστικό) και με γνωστό το αρχικό ποσοστό υγρασίας του δοκιμίου να υπολογίζεται το ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί σε κάθε τιμή της μύζησης. Αυτό εξασφαλίζει τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού με τη χρήση ενός δοκιμίου μόνο, οπότε η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι πολύ μικρή και εξαρτάται μόνο από την ποιότητα του συστήματος ρύθμισης της πίεσης αέρα. Το υπολογιζόμενο μέγεθος ωστόσο συναρτήσει της μύζησης είναι μόνο το ποσοστό υγρασίας σε όρους μάζας, η με την παραδοχή σταθερού όγκου δοκιμίου κατά την ξήρανση, και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας. Η παραδοχή σταθερού όγκου δοκιμίου κατά την ξήρανση μπορεί πράγματι να ισχύει για κοκκώδη εδαφικά υλικά ή ακόμα και μη πλαστικές ή μικρής πλαστικότητας ιλεις (δεδομένου άλλωστε ότι το εύρος τιμών μύζησης όπου πρακτικά επιτυγχάνεται το παραμένον ποσοστό υγρασίας είναι πολύ μικρό) αλλά δεν ισχύει για αργιλικά εδαφικά υλικά όπου οι ογκομετρικές μεταβολές κατά την ξήρανση και την ύγρανση μπορεί να είναι αρκετά σημαντικές (ιδέ Κεφ. 4 καθώς και Ng & Pang, 2000, Μπαρδάνης & Καββαδάς, 2005). Κατά τον προσδιορισμό λοιπόν της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού αργιλικών εδαφικών υλικών, απλές μετρήσεις της μεταβολής του περιεχόμενου στο δοκίμιο ύδατος δίνουν μόνο τις τιμές του ποσοστού υγρασίας και δεν υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού και της μεταβολής όγκου του δοκιμίου κατά την ξήρανση. Επίσης δεσμεύεται μία συσκευή ανά εδαφικό υλικό καθ'όλη τη διάρκεια της δοκιμής, οπότε καθίσταται ιδιαίτερα χρονοβόρα η ολοκλήρωση ενός προγράμματος δοκιμών σε διάφορα υλικά (αφού λόγω του αυξημένου κόστους συνήθως υπάρχει μικρός αριθμός θαλάμων μύζησης σε ένα εργαστήριο). Στην περίπτωση δε που οι υπολογισμοί βασίζονται στη ζύγιση του βάρους του νερού που εξέρχεται από τον θάλαμο μύζησης και όχι τη ζύγιση ολόκληρου του θαλάμου μύζησης πρέπει

να ληφθούν υπόψη δύο ακόμα σημεία. Το πρώτο σημείο είναι ότι πρέπει να ληφθεί μέριμνα για την εξάτμιση του νερού από το δοχείο εντός του οποίου συλλέγεται μετά την έξοδό του από το θάλαμο μύζησης. Αυτό συνήθως γίνεται με τη χρήση μπιρέτας, εντός της οποίας η ελεύθερη επιφάνεια του νερού καλύπτεται από λάδι σιλικόνης ώστε να μη διαφεύγει καθόλου νερό μέσω εξάτμισης. Παρόλο που η χρήση της διάταξης αυτής λύνει το πρόβλημα της εξάτμισης και παρέχει και τη δυνατότητα ογκομέτρησης του νερού που εξέρχεται (και άρα έμμεσου υπολογισμού του βάρους του νερού που εξέρχεται για γνωστή θερμοκρασία) αντί για ζύγιση του<sup>1</sup>, δημιουργεί ένα άλλο πρόβλημα το οποίο δεν υπάρχει στην περίπτωση που θα ήταν δυνατόν να χρησιμοποιούνται σκεύη μεγαλύτερης διατομής για τη συλλογή του νερού που εξέρχεται. Το πρόβλημα είναι αυτό της ανάγκης διατήρησης της στάθμης εντός της μπιρέτας στο ίδιο ύψος με αυτό το οποίο βρίσκεται το δοκίμιο εντός της συσκευής. Αν η στάθμη του νερού εντός της μπιρέτας δεν βρίσκεται στο ίδιο ύψος με το δοκίμιο εντός του θαλάμου μύζησης, ασκεί μία θετική πίεση προς το δοκίμιο, αν βρίσκεται ψηλότερα από το δοκίμιο, ή μία επιπλέον αρνητική πίεση, αν βρίσκεται χαμηλότερα από το δοκίμιο<sup>2</sup>. Οι διαφορές αυτές είναι ομολογουμένως μικρές αλλά αν δεν ληφθεί μέριμνα εισάγουν συστηματικά λάθη. Για να αποφευχθεί και αυτό το πρόβλημα πρέπει οι μπιρέτες να διαθέτουν και βαλβίδα εκκένωσής τους μέχρι την επιθυμητή στάθμη εντός αυτών αν απαιτείται ταπείνωσή της, ή ακόμα δυσκολότερα πρέπει να χρησιμοποιείται κάποιο σύστημα εισαγωγής νερού στην περίπτωση που απαιτείται ανύψωση της στάθμης (Σχ. 14.2). Γίνεται εύκολα αντιληπτή η απαίτηση για ιδιαίτερα προσεκτικούς χειρισμούς σε όλα τα στάδια αυτών των λεπτεπίλεπτων διαδικασιών.

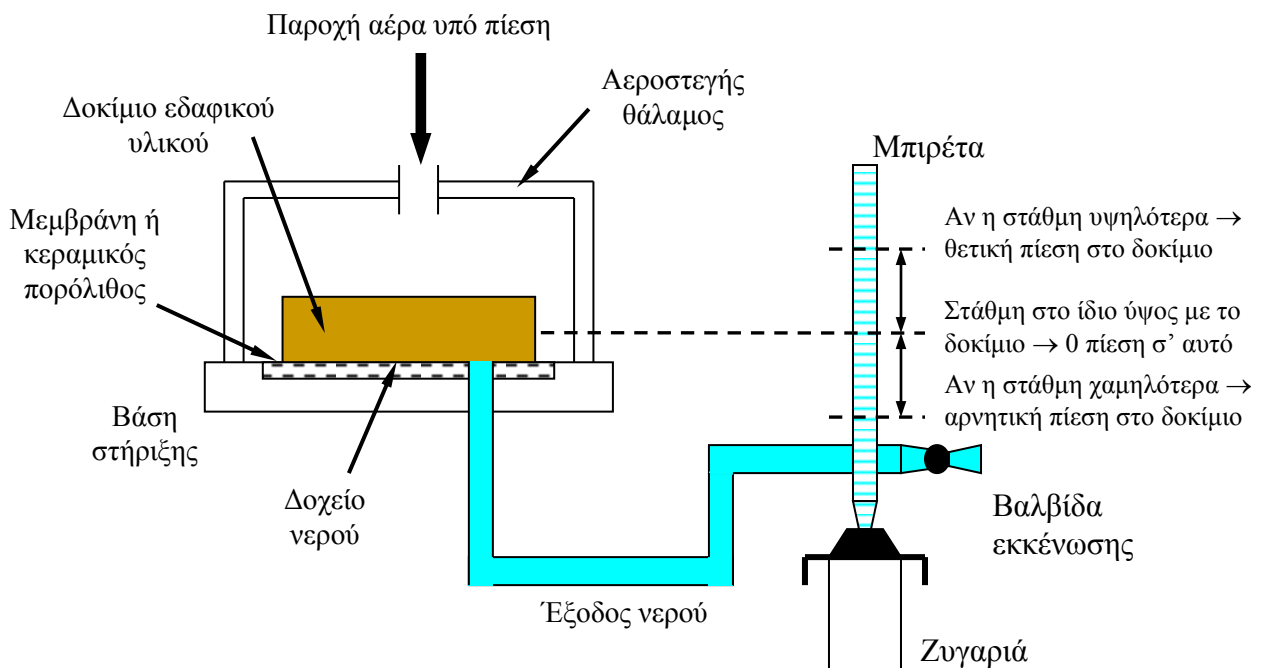
Λόγω των παραπάνω δυσκολιών έχουν αναπτυχθεί θάλαμοι μύζησης εντός των οποίων μπορούν να τοποθετηθούν μεγαλύτεροι ή περισσότεροι του ενός κεραμικοί πορόλιθοι οπότε να φιλοξενηθούν περισσότερα του ενός δοκίμια εδαφικού υλικού ή δοκίμια περισσότερων εδαφικών υλικών. Τέτοιοι θάλαμοι μύζησης είναι και αυτοί του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής εντός του οποίου μπορούν να τοποθετηθούν μέχρι τρεις κεραμικοί πορόλιθοι και συνολικά μέχρι και 30-40 δοκίμια (ανάλογα το μέγεθος των δοκιμίων) και του Εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. εντός του οποίου μπορούν να τοποθετηθούν μέχρι τέσσερις κεραμικοί πορόλιθοι και συνολικά μέχρι και 35-50 δοκίμια. Στην περίπτωση αυτή ωστόσο δεν έχει νόημα η μέτρηση της ποσότητας του εξερχόμενου ύδατος αφού αυτό αντιστοιχεί σε

---

<sup>1</sup> Η οποία προφανώς για αποφυγή μετακινήσεων της μπιρέτας θα σήμαινε συνεχή τοποθέτησή της επί ζυγού ακριβείας καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος και άρα δέσμευση ενός ζυγού για όσο διαρκεί η δοκιμή.

<sup>2</sup> Προφανώς το ίδιο πρόβλημα ισχύει και στην περίπτωση ενός δοχείου συλλογής μεγαλύτερης διατομής. Τότε όμως οι μεταβολές στην στάθμη εντός αυτού (δεδομένου ότι η ποσότητα του νερού που εξέρχεται από ένα μόνο δοκίμιο είναι μικρή) είναι πολύ μικρότερες για να εισάγουν άξιες λόγου διαφορές πίεσης.

περισσότερα του ενός δοκίμια ή και εδαφικά υλικά χωρίς να είναι γνωστή οποιαδήποτε κατανομή αυτού ως προς τα δοκίμια<sup>3</sup>. Η μέθοδος λοιπόν που ακολουθείται είναι ότι χρησιμοποιείται άλλο δοκίμιο εδαφικού υλικού για κάθε διαφορετικό βήμα αύξησης της πίεσης του αέρα. Έτσι τα δοκίμια τοποθετούνται μέσα στο θάλαμο μύζησης, η πίεση του αέρα αυξάνεται στην επιθυμητή τιμή και διατηρείται μέχρι την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας και στη συνέχεια όταν πια αυτή έχει επιτευχθεί, η πίεση μηδενίζεται απότομα, τα δοκίμια ζυγίζονται για τον υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας και, εφόσον επιθυμείται, εμβαπτίζονται σε παραφίνη για τον υπολογισμό της υγρής πυκνότητας από την οποία σε συνδυασμό με το ποσοστό υγρασίας και το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών υπολογίζονται ο λόγος κενών, ο βαθμός κορεσμού και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας. Η μέθοδος αυτή ακολουθήθηκε κατά το πρόγραμμα δοκιμών που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, αφού εξασφαλίζει ταυτόχρονο προσδιορισμό χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού για περισσότερα εδαφικά υλικά μαζί και υπολογισμό παραμορφωσιακών μεταβλητών όπως ο λόγος



**Σχήμα 14.2.** Σκαρίφημα εργαστηριακής διάταξης προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (θάλαμος μύζησης) στην περίπτωση χρησιμοποίησης μπιρέτας για την μέτρηση του νερού που εξέρχεται από τα δοκίμια.

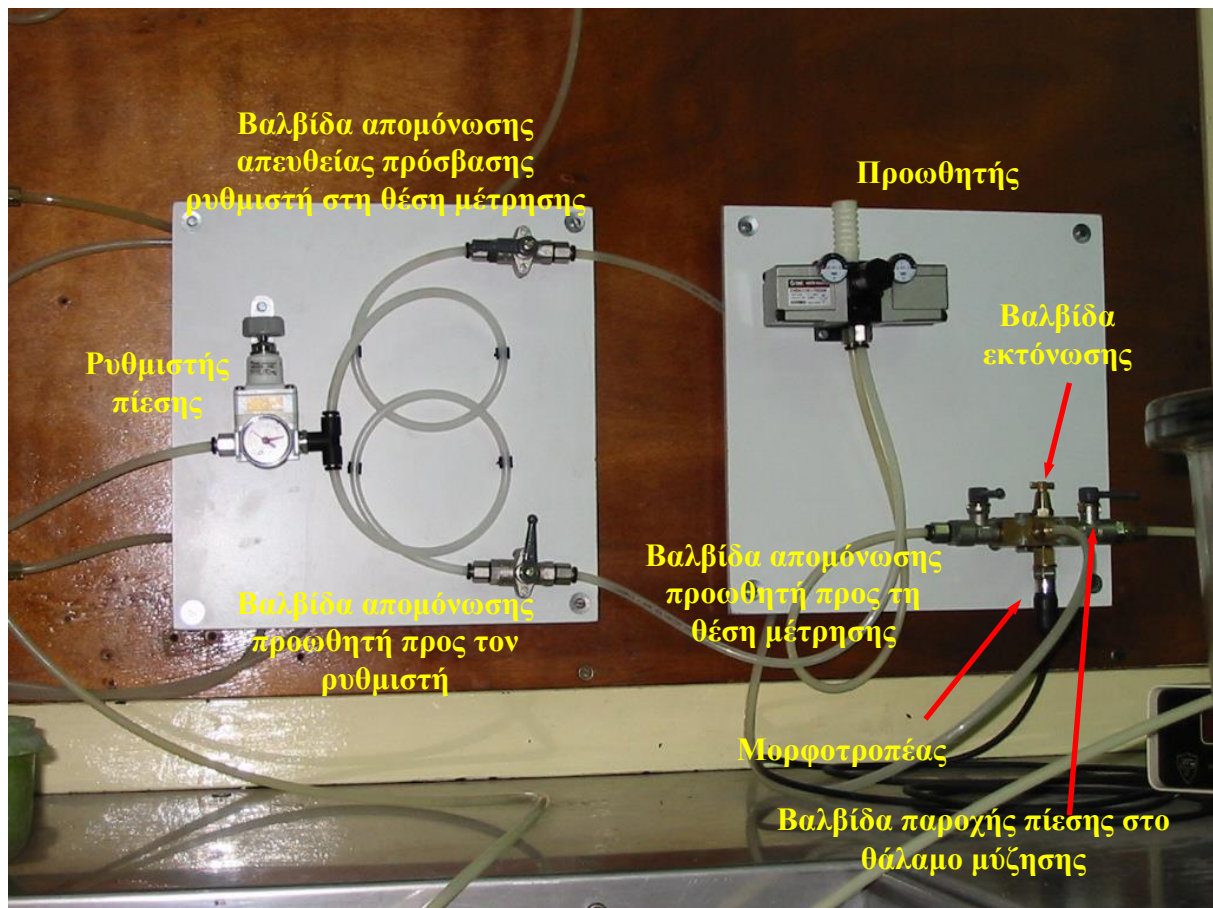
<sup>3</sup> Εκτός και εάν τοποθετείτο μόνο μέχρι ένα δοκίμιο ανά διαφορετικό πορόλιθο οπότε η διαφορετική ποσότητα που εξέρχεται παρακολουθείται στην έξοδο του νερού από το δοχείο κάθε πορόλιθου.

κενών. Το μειονέκτημά της είναι ότι στις προσδιοριζόμενες καμπύλες προστίθεται και το σφάλμα που προκύπτει από την ανομοιογένεια των χρησιμοποιούμενων δοκιμίων, το οποίο δεν υπάρχει στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ένα δοκίμιο για τον προσδιορισμό ολόκληρης της καμπύλης. Αυτό αποδείχτηκε ότι στην περίπτωση των αναζυμωμένων/προσυμπιεσμένων δοκιμίων δεν είχε μεγάλη επιρροή αφού η επιτυγχανόμενη ομοιογένεια ήταν πολύ μεγάλη, ενώ είχε μεγαλύτερη σημασία στην περίπτωση των φυσικών υλικών που δοκιμάστηκαν (της Μάργας Κορίνθου, της Μάργας Χαλκουτσίου και του αργιλοποιημένου Ιλυόλιθου Πάρνηθας) αφού εδώ κάθε δοκίμιο αποτελούσε ξεχωριστό κομμάτι του φυσικού εδαφικού υλικού και αντικατόπτριζε τη φυσική ανομοιογένεια του υλικού.

Σε ό,τι αφορά την εφαρμογή της πίεσης αέρα στον θάλαμο μύζησης χρησιμοποιήθηκε η κεντρική παροχή ξηρού αέρα υπό πίεση του κάθε εργαστηρίου. Η μέγιστη ονομαστική παρεχόμενη πίεση είναι ύψους 8-10 Bar. Για την ανύψωσή της στις επιθυμητές τιμές πίεσης για πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων των θαλάμων μύζησης χρησιμοποιήθηκε προωθητής (booster) μέγιστης ονομαστικής ικανότητας 2× (στην πράξη περί το 1.8× ως 1.9×). Και στις δύο διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν υπήρχε ρυθμιστής πίεσης (μέγιστης εισερχόμενης πίεσης 8 έως 10 Bar) για τη ρύθμιση της πίεσης μέχρι τη διακλάδωση προς τον προωθητή. Αν οι επιθυμητές τιμές μύζησης στον θάλαμο μύζησης ήταν μικρότερες των 8 Bar, ο προωθητής απομονωνόταν και ο αέρας καθοδηγείτο απευθείας στη θέση μέτρησης της εφαρμοζόμενης πίεσης μέσω μορφοτροπέα (transducer) ή συμβατικού μανομέτρου. Εφόσον η μετρούμενη πίεση εκεί ήταν η επιθυμητή, ανοιγόταν η βαλβίδα παροχής αέρα στο θάλαμο μύζησης. Αν οι επιθυμητές τιμές μύζησης στον θάλαμο μύζησης ήταν μεγαλύτερες των 8 Bar, ρυθμιζόταν η πίεση στα 8 Bar από το ρυθμιστή πίεσης και τότε ο αέρας καθοδηγείτο στον προωθητή και από εκεί στη θέση μέτρησης της εφαρμοζόμενης πίεσης. Χρησιμοποιώντας τον ρυθμιστή του προωθητή και την ανάγνωση ακριβείας στον μορφοτροπέα ή το μανόμετρο, η πίεση ρυθμιζόταν στην επιθυμητή ανυψωμένη τιμή και τότε ανοιγόταν η βαλβίδα παροχής αέρα στο θάλαμο μύζησης. Η διάταξη αυτή όπως υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής απεικονίζεται στην Φωτ. 14.3 και στο Σχ. 14.3, ενώ όπως υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. στην Φωτ. 14.4.

Συμπληρωματικά των δοκιμών σε κάθε υλικό με χρήση ξεχωριστών δοκιμίων, έγιναν και από μία δοκιμή με χρήση μοναδικού δοκιμίου και μέτρηση της εξέλιξης του ολικού του βάρους για την Άργιλο Χανίων, την Άργιλο και τη Μάργα Κηφισιάς καθώς και τη Μάργα Κορίνθου. Οι δοκιμές αυτές έγιναν σε δοκίμια αναζυμωμένου και επανασυμπιεσμένου υλικού για τον έλεγχο

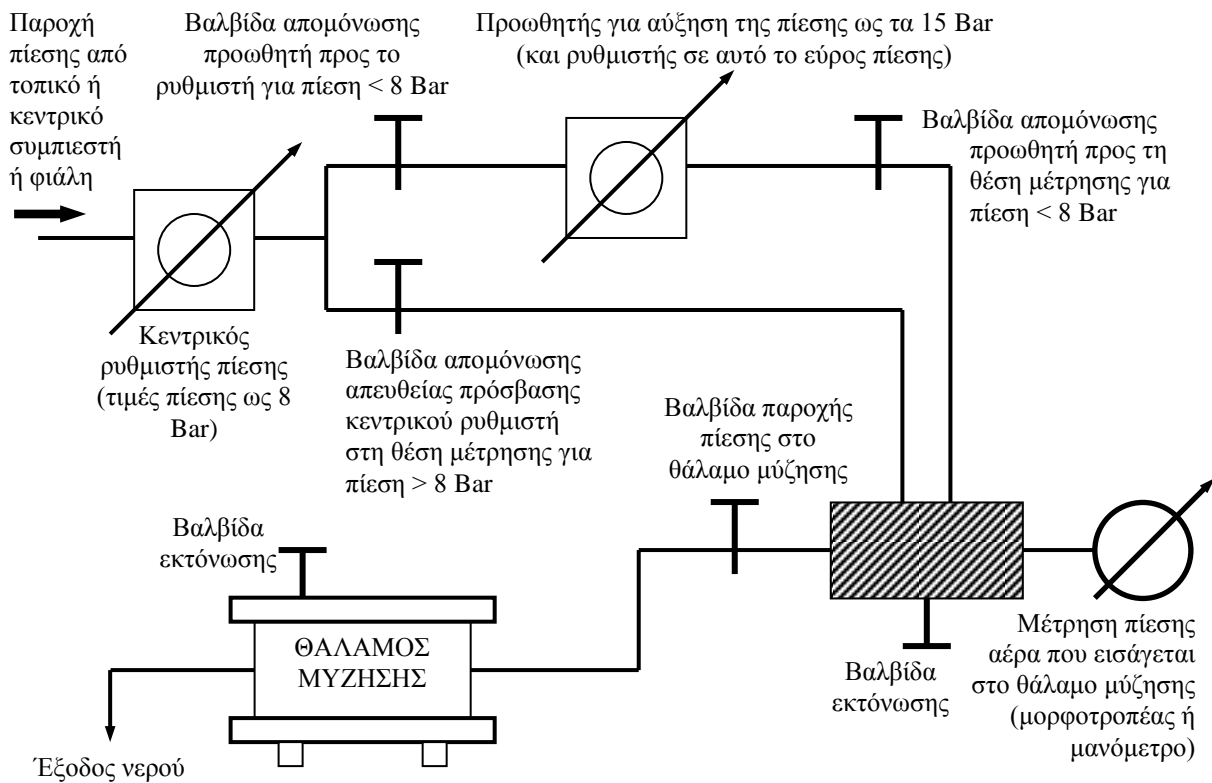
των δοκιμών με ξεχωριστά δοκίμια αλλά και συνέχιση του προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού μέχρι το εύρος τιμών που ελέγχονται με τη μέθοδο κορεσμένων υδατικών διαλυμάτων αλάτων. Η μέθοδος αυτή κατέστη διαθέσιμη αρκετά αργότερα στην εξέλιξη της πειραματικής διερεύνησης και μόνο στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε., όταν όμως πια είχαν περιοριστεί πάρα πολύ οι διαθέσιμες ποσότητες όλων των υλικών (και ειδικά μάλιστα των αδιατάρακτων δειγμάτων της Μάργας Κορίνθου για να μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος αυτή και σε αυτά τα δείγματα). Η μέθοδος των κορεσμένων υδατικών διαλυμάτων αλάτων όπως υλοποιήθηκε και συνδυάστηκε με τη μέθοδο μέτρησης της ολικής μύζησης με υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου παρουσιάζεται στην Παρ. 14.2.3.



**Φωτογραφία 14.3.** Διάταξη ρύθμισης πίεσης αέρα στον θάλαμο μύζησης του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής με ρυθμιστή πίεσης, προωθητή, μορφοτροπέα για τη μέτρηση της πίεσης και βαλβίδες απομόνωσης τμημάτων της διάταξης. Κάτω δεξιά διακρίνεται και το καταγραφικό ανάγνωσης/αποθήκευσης των μετρήσεων του μορφοτροπέα.



**Φωτογραφία 14.4.** Διάταξη ρύθμισης πίεσης αέρα στον θάλαμο μύζησης του Εργαστηρίου της ΕΛΑΦΟΣ Α.Ε. με ρυθμιστή πίεσης, προωθητή, μανόμετρα για την μέτρηση της πίεσης και βαλβίδες απομόνωσης τμημάτων της διάταξης. Κάτω διακρίνεται ο θάλαμος μύζησης με την είσοδο του αέρα υπό πίεση και την έξοδο του δοχείου νερού κάτω από τον πορόλιθο με ποτήρι ζέσεως για την συλλογή του νερού.



**Σχήμα 14.3.** Σκαρίφημα διάταξης ρύθμισης πίεσης αέρα στον θάλαμο μύζησης του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής με ρυθμιστή πίεσης, προωθητή, μορφοτροπέα για τη μέτρηση της πίεσης και βαλβίδες απομόνωσης τμημάτων της διάταξης. Η διαφορά της διάταξης όπως υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. είναι ότι είναι πλήρως ξεχωριστά τα τμήματα του δικτύου για έλεγχο των πιέσεων μέχρι 8 Bar και για μεγαλύτερες τιμές με ανεξάρτητη μέτρηση της υλοποιούμενης πίεσης με μανόμετρα αντί για κοινή μέτρηση της ελεγχόμενης πίεσης και από τα δύο τμήματα με μορφοτροπέα.

### 14.2.3 Μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης με κορεσμένα υδατικά διαλύματα αλάτων – Υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου

Η μέθοδος αυτή έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στην §4.3.6 στο Κεφ. 4 του πρώτου μέρους. Η μέθοδος αυτή ελέγχει ουσιαστικά τη σχετική υγρασία που αναπτύσσεται στον αέρα μέσα σε ένα αεροστεγώς κλεισμένο δοχείο στη βάση του οποίου υπάρχει κορεσμένο (συνήθως) υδατικό διάλυμα ενός άλατος (σπανιότερα ενδεχομένως και κάποιας άλλης ουσίας). Εάν ένα δοκίμιο εδαφικού υλικού τοποθετηθεί και αφεθεί σε αυτό το περιβάλλον θα συνεχίσει να ανταλλάσει νερό με τον αέρα μέσα στο δοχείο μέχρι να επέλθει υδραυλική ισορροπία ανάμεσα στη σχετική

υγρασία του αέρα και την ολική μύζηση στο εδαφικό υλικό κατά τις προβλέψεις του Νόμου του Kelvin (Εξ. 2.11 έως 2.13 στο Κεφ. 2). Για την εφαρμογή της μεθόδου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ακόρεστα διαλύματα αλλά γενικώς προτιμώνται τα κορεσμένα αφού σε αυτά η ανταλλαγή υγρασίας με τον υπερκείμενο αέρα δεν αλλοιώνει τη συγκέντρωσή των διαλυμάτων και κατά συνέπεια τη σχετική υγρασία που μπορούν να δημιουργήσουν. Στη συγκεκριμένη πειραματική διερεύνηση χρησιμοποιήθηκαν 6 κορεσμένα υδατικά διαλύματα διαφορετικών αλάτων. Τα άλατα επιλέχθηκαν με βάση την ολική μύζηση που μπορεί να δημιουργήσει η σχετική υγρασία που αναπτύσσουν τα κορεσμένα υδατικά διαλύματά τους (βλ. Πιν. 4.1 Κεφ. 4 πρώτου μέρους) και μετρήθηκε ότι όντως επιτυγχάνεται με το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου (βλ. §3.6.5). Επίσης πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μεταβολής της συγκέντρωσης μέχρι επίτευξης κορεσμού των υδατικών διαλυμάτων. Η συγκέντρωσή των διαλυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της μύζησης ρυθμίστηκε στο +1M για κάθε διάλυμα. Τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιηθέντων διαλυμάτων παρουσιάζονται στον Πιν. 14.21.

Η χρήση του υγρομέτρου ψυχρού κατόπτρου του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Decagon Devices Inc. κρίθηκε απαραίτητη προκειμένου να επιβεβαιώνεται κάθε φορά η επιτευχθείσα μύζηση εντός των θαλάμων διατήρησης των υδατικών διαλυμάτων, αλλά και να είναι δυνατή η μέτρηση της ολικής μύζησης και σε ενδιάμεσες καταστάσεις πριν την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας εντός των θαλάμων αυτών.

**Πίνακας 14.2.** Χαρακτηριστικά χρησιμοποιηθέντων στο Εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κορεσμένων υδατικών διαλυμάτων αλάτων.

Διάλυμα	Σχετική υγρασία από Πιν. 4.1 (25° C) (%)	Μύζηση από Πιν. 4.1 (25° C) (MPa)	Μύζηση όπως μετρήθηκε με το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου (MPa)	Συγκέντρωση επίτευξης κορεσμού διαλύματος (M)	Συγκέντρωση δημιουργηθέντων διαλυμάτων (M)
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97.0	4.18	4.1	1	2
BaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	90.3	14.0	14.1	2	3
KCl	84.2	23.6	23.6	5	6
NaCl	75.1	39.3	39.0	6	7
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	52.8	87.7	85.5	9	10
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	32.7	153.5	151.7	15	16



Στη Φωτ. 14.5 παρουσιάζονται τα ποτήρια ζέσεως με τα πέντε από τα έξι διαλύματα όταν πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές επίτευξης κορεσμού των διαλυμάτων στα συγκεκριμένα πέντε (το διάλυμα  $K_2SO_4$  παρασκευάστηκε αργότερα). Στην ίδια φωτογραφία διακρίνεται το ίζημα που έχει εμφανιστεί στον πυθμένα τους. Μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών προσδιορισμού της συγκέντρωσης επίτευξης κορεσμού των διαλυμάτων, οι απαραίτητες ποσότητες παρήχθησαν εντός των θαλάμων που απεικονίζονται στις Φωτ. 14.6 και 14.7. Ως θάλαμοι παρασκευής και διατήρησης των υδατικών διαλυμάτων χρησιμοποιήθηκαν υγραντήρες του μεγαλύτερου δυνατού μεγέθους με τάπα κενού. Το μεγάλο μέγεθος ήταν ζητούμενο προκειμένου να είναι δυνατό να χωρέσουν οι περισσότεροι δυνατοί δειγματολήπτες με δοκίμια εντός αυτών (Φωτ. 14.6 και 14.7). Η ύπαρξη τάπας κενού επέτρεψε την μόνιμη τοποθέτηση θερμομέτρων εντός κάθε θαλάμου προκειμένου να είναι δυνατόν να παρακολουθείται η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στον αέρα που υπέρκειται των υδατικών διαλυμάτων, ώστε αν απαιτείται να γίνουν οι απαραίτη-



**Φωτογραφία 14.5.** Ποτήρια ζέσεως με τα κορεσμένα υδατικά διαλύματα μετά την ολοκλήρωση των δοκιμών επίτευξης κορεσμού των διαλυμάτων. Διακρίνονται οι καρτέλες με το περιεχόμενο του καθενός καθώς και το σχηματισμένο ίζημα στον πυθμένα τους.



**Φωτογραφία 14.6.** Θάλαμοι διατήρησης κορεσμένων υδατικών διαλυμάτων. Τα δοκίμια που ζητείται να δημιουργηθεί η μύζηση τοποθετούνται στο απομονωμένο περιβάλλον του αέρα πάνω από τα υδατικά διαλύματα που βρίσκονται στον πυθμένα. Διακρίνονται τα θερμόμετρα που μετρούν την θερμοκρασία του αέρα πάνω από τα υδατικά διαλύματα για διόρθωση των τιμών της σχετικής υγρασίας και άρα της ολικής μύζησης.



**Φωτογραφία 14.7.** Θάλαμος διατήρησης κορεσμένου υδατικού διαλύματος  $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Διακρίνεται η κεφαλή του θερμομέτρου και δοκίμια συμπυκνωμένου αποσαθρωμένου Σερπεντινίτη Σκύρου (βλ. Κεφ. 15) στα οποία ρυθμίστηκε επίσης η ολική μύζηση.

τες διορθώσεις στην τιμή της υλοποιούμενης σχετικής υγρασίας (βλ. Πιν. 4.1 και 4.2 Κεφ. 4 του πρώτου μέρους). Στην πορεία προτιμήθηκε τελικά να χρησιμοποιείται το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου προκειμένου να επιβεβαιώνεται κάθε φορά η επιτευχθείσα μύζηση σε κάθε δοκίμιο που είχε τοποθετηθεί εντός των θαλάμων διατήρησης των υδατικών διαλυμάτων αλλά και να είναι δυνατή η μέτρηση της ολικής μύζησης και σε ενδιάμεσες καταστάσεις πριν την επίτευξη υδραυλικής ισορροπίας εντός των θαλάμων αυτών. Αυτό αποδείχθηκε ότι βοηθάει ιδιαίτερα στην πράξη, ειδικά όταν εντός των θαλάμων διατήρησης υδατικών διαλυμάτων βρίσκονται δοκίμια σε διαφορετικό στάδιο ξήρανσης ή και επανύγρυνσης, οπότε σταθεροποίηση του ολικού βάρους ενός δοκιμίου δεν μεταφράζεται απαραίτητα και σε εξισορρόπηση της ολικής του μύζησης στη μύζηση που αντιστοιχεί στη σχετική υγρασία που δημιουργεί κάθε διάλυμα. Εκτός αυτού, το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου επέτρεψε τη μέτρηση της ολικής μύζησης δοκιμίων που είχαν αφεθεί για ξήρανση στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου αλλά και μετά από ενδιάμεσες καταστάσεις ξήρανσης ή επανύγρυνσης.



**Φωτογραφία 14.8.** Το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Decagon Devices, Inc. Διακρίνεται με ανοικτό τον θάλαμο εισαγωγής δοκιμίου.

## **14.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ**

### **14.3.1 Εισαγωγή**

Όπως προαναφέρθηκε, οι δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκαν στα εξής εδαφικά υλικά:

- Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων
- Άργιλος Χανίων
- Άργιλος Λιβαδερού Δράμας
- Άργιλος Κηφισιάς
- Άργιλος Μελίτης Φλώρινας
- Άργιλος Αμαρουσίου (όχι οι δοκιμές στα συμπυκνωμένα δείγματα, βλ. Κεφ. 15 γι' αυτές)
- Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου
- Άργιλος Αμφιλοχίας
- Μάργα Κορίνθου
- Μάργα Κηφισιάς
- Μάργα Χαλκουτσίου
- Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου
- Αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών στο κάθε εδαφικό υλικό από τα προαναφερθέντα.

### 14.3.2 Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων

Τα δείγματα της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων ήταν αναμοχλευμένα, προερχόμενα από προϊόντα εκσκαφής, οπότε δεν υπήρχε δυνατότητα προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του φυσικού εδαφικού υλικού. Άλλωστε το μεγάλο περιεχόμενο ποσοστό άμμου δεν θα επέτρεπε την απόληψη πραγματικά αδιατάρακτων δειγμάτων, είτε μέσω γεώτρησης, είτε από εκσκαφή, παρά μόνο μέσω ειδικών πολυδάπανων δειγματοληπτών και επίπονων μεθόδων δειγματοληψίας.

Αρχικά παρασκευάζονταν πολτοί του υλικού σε αρχικό ποσοστό υγρασίας ίσο με 1.5 φορές το όριο υδαρότητας και στη συνέχεια από αυτούς τους πολτούς προσυμπιεσμένα δοκίμια μέχρι κατακόρυφη τάση 100 kPa (υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως). Το μικρό βάθος προέλευσης των δειγμάτων και η ανυπαρξία προηγούμενων υπερκειμένων κατά τη γεωλογική ιστορία του εδαφικού υλικού καθιστούν εύλογη την επιλογή μιας μάλλον χαμηλής τιμής της τάσης. Αν και τα 100 kPa κατακόρυφης τάσης είναι μάλλον υψηλή τιμή για το βάθος προέλευσης των δειγμάτων δεν επιλέχθηκε ακόμα χαμηλότερη τιμή της τάσης γιατί τότε δεν θα ήταν δυνατόν να εξασφαλιστεί η μηχανική ακεραιότητα των προετοιμασμένων δοκιμίων κατά τη μεταφορά τους από τη μία συσκευή στην άλλη (από τα συμπιεσόμετρα μετά την εξαγωγή των δοκιμών από τις κυψέλες στο θάλαμο μύζησης).

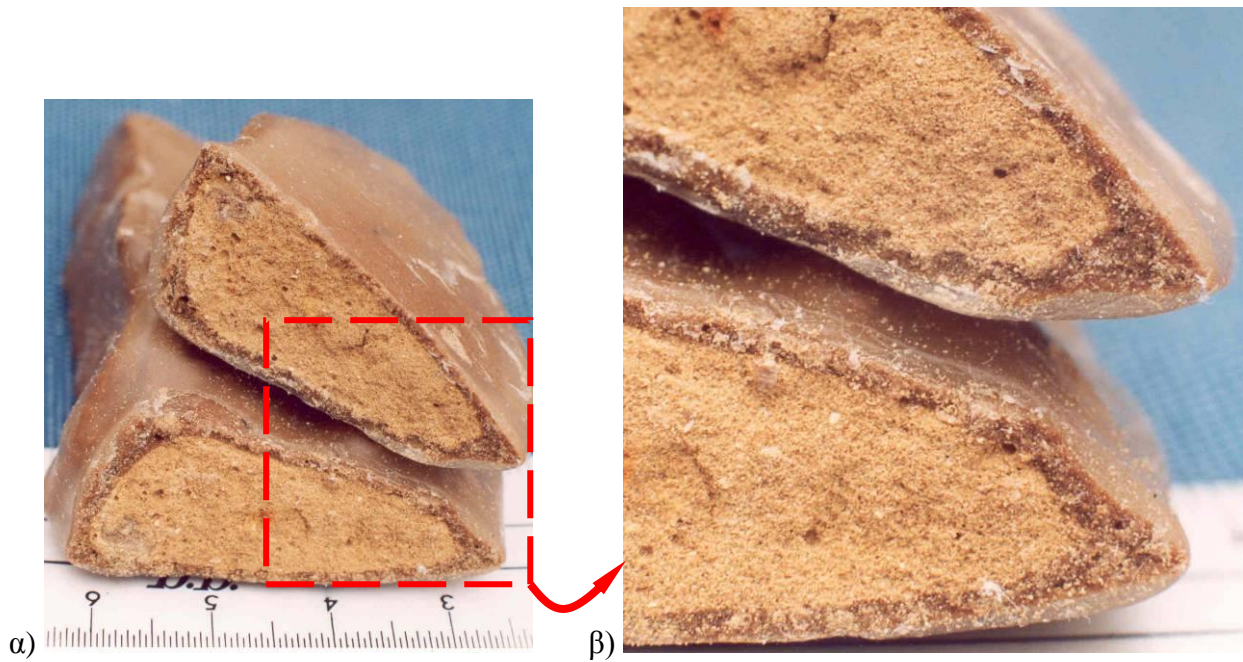
Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων που προσδιορίστηκε αποτελείται από 30 σημεία. Στο Σχ. 14.4 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων. Όπως προκύπτει από τα Σχ. 14.4α και 14.4β (μύζηση-λόγος κενών και ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών αντίστοιχα) ο λόγος κενών του εδαφικού αυτού υλικού κατά την απώλεια υγρασίας του μένει πρακτικά σταθερός κυμαινόμενος από 0.56 έως 0.63 με μόνο δύο σημεία να βγαίνουν εκτός του εύρους αυτού ( $e=0.54$  για μύζηση 1010 kPa και  $e=0.66$  για μύζηση 1210 kPa). Οι διαφορές αυτές είναι αρκετά μικρές (στα όρια της ακρίβειας υπολογισμού του λόγου κενών με χρήση της μεθόδου εμβάπτισης σε παραφίνη), γεγονός το οποίο συνδυαζόμενο με την απουσία σαφούς τάσης εξέλιξης υποδηλώνει ότι πρακτικά δεν υπάρχει μείωση του λόγου κενών με την αύξηση της μύζησης (όπως άλλωστε αναμενόταν δεδομένου ότι το υλικό είναι λεπτόκοκκο και ελάχιστα συμπιεστό). Το υλικό αυτό είναι μάλλον το πιο χονδρόκοκκο στο οποίο μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος μέτρησης του ολικού όγκου των δοκιμίων με εμβάπτιση σε υγρή παραφίνη. Όπως φαίνεται και από την Φωτ. 14.9 όπου απεικονίζεται τομή δοκιμίου Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων μετά την παραφίνωση, η υγρή

παραφίνη είχε διεισδύσει σε σημαντικό βάθος μέσα στο υλικό αντί να παραμείνει μόνο στην εξωτερική πλευρά της επιφάνειας του δοκιμίου. Το φαινόμενο αυτό προφανώς εισάγει λάθη, όχι κατ' ανάγκην συστηματικά, αφού το βάθος διείσδυσης εξαρτάται και από τοπικές μεταβολές της κοκκομετρικής διαβάθμισης εντός των δοκιμίων αλλά και τη θερμοκρασία της υγρής παραφίνης κατά την εμφύσηση του δοκιμίου σε αυτήν. Το φαινόμενο της διείσδυσης υγρής παραφίνης δεν εμφανίστηκε στα άλλα εδαφικά υλικά αφού ήταν πιο λεπτόκοκκα.

Από το Σχ. 14.4γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) προκύπτει ότι ο αποκορεσμός (desaturation) συμβαίνει μεταξύ 25 και 30 kPa (δηλαδή η πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού είναι μεταξύ 25 και 30 kPa) και το δεύτερο σημείο καμπής εντοπίζεται μεταξύ 150 και 200 kPa προσδιορίζοντας τον παραμένοντα βαθμό κορεσμού μεταξύ 45 και 50 %. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα αυτά με τα Σχ. 14.4β, 14.4δ και 14.4ε προκύπτει ότι το ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί στην πίεση διείσδυσης αέρα είναι περίπου 23% και το ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί στον παραμένοντα βαθμό κορεσμού είναι περίπου 11%. Τέλος από το Σχ. 14.4στ προκύπτει ότι το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί στην πίεση διείσδυσης αέρα είναι περίπου 0.38. Στα Σχ. 14.4β και 14.4δ έχουν σχεδιαστεί και δύο θεωρητικές ευθείες. Στο Σχ. 14.4β έχει σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της συσχέτισης μεταξύ λόγου κενών και ποσοστού υγρασίας για υπόθεση πλήρους κορεσμού. Ως γνωστόν το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών  $G_s$ , το ποσοστό υγρασίας  $w$ , ο βαθμός κορεσμού  $S_r$  και ο λόγος κενών  $e$  συνδέονται μέσω της Εξ. 14.1.

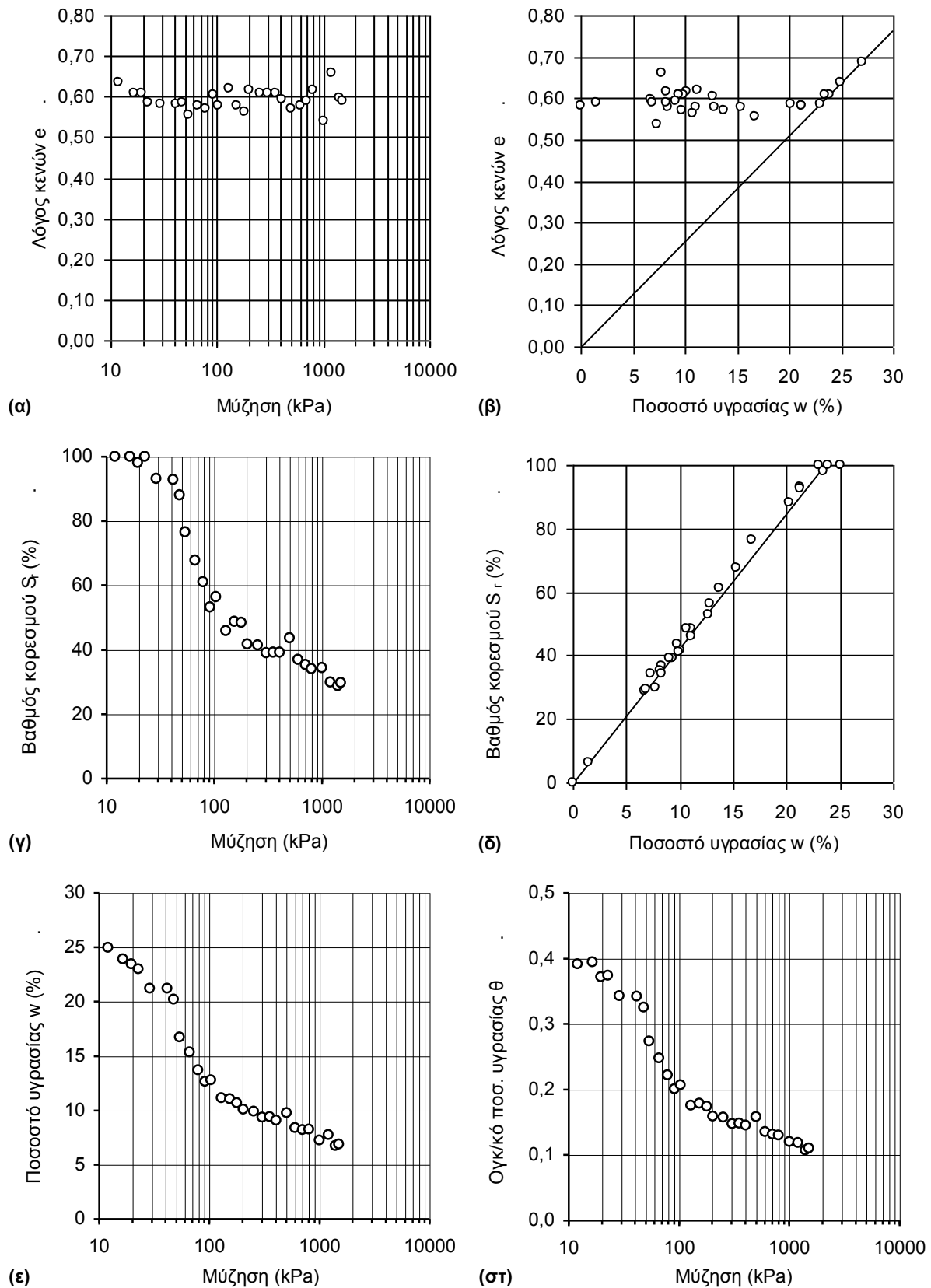
$$G_s \cdot w = S_r \cdot e \quad (14.1)$$

Με υπόθεση διατήρησης πλήρους κορεσμού λοιπόν, το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών  $G_s$  είναι η κλίση της ευθείας που προκύπτει στο χώρο  $e-w$ . Η χρησιμότητά της έγκειται στο ότι όσο το εδαφικό υλικό παραμένει πλήρως κορεσμένο, τα πειραματικά σημεία βρίσκονται επί αυτής της ευθείας, ενώ όταν πια γίνεται ο αποκορεσμός τα πειραματικά σημεία αρχίζουν να αποκλίνουν μέχρι που συμπίπτουν με την ευθεία  $e = \text{const} = e_s$ , που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών μετά από ξήρανση. Έτσι εντοπίζεται ευκολότερα το ποσοστό υγρασίας που γίνεται ο αποκορεσμός του υλικού. Σε ό,τι αφορά την ευθεία που έχει σχεδιαστεί στο Σχ. 14.4δ, με βάση την Εξ. 14.1 προκύπτει ότι αν βρισκόμαστε πια στο όριο συρρίκνωσης οπότε ο λόγος κενών έχει σταθεροποιηθεί και είναι ίσος με τον λόγο κενών στο όριο συρρίκνωσης  $e_s$ , τότε ο –σταθερής τιμής πλέον– λόγος  $G_s/e_s$  είναι η κλίση της ευθείας που εκφράζει τη γραμμική σχέση μεταξύ βαθμού κορεσμού  $S_r$  και ποσοστού υγρασίας  $w$  μετά τον αποκορεσμό. Η χρησιμότητά της έγκειται στον προσδιορισμό της τιμής του ποσοστού υγρασίας στον αποκορεσμό αλλά και στον



**Φωτογραφία 14.9.** Κοντινή άποψη τομής δοκιμίου Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων μετά την παραφίνωσή του: α) άποψη και των δύο τεμαχίων του δοκιμίου μετά την τομή με επισήμανση της λεπτομέρειας που παρουσιάζεται στην άποψη (β) και κλίμακα σε cm.

έλεγχο της ίδιας της εργαστηριακής μεθόδου σε ό,τι αφορά τη μύζηση επίτευξης αποκορεσμού, όπως επιδεικνύεται στην επόμενη παράγραφο. Σε ό,τι αφορά την τιμή του παραμένοντος βαθμού κορεσμού μεταξύ 45 και 50% που προαναφέρθηκε, αυτή είναι μάλλον πολύ υψηλή για να είναι η πραγματική «παραμένουσα» τιμή του βαθμού κορεσμού, παρόλο που προκύπτει σαφώς από το δεύτερο σημείο καμπής στο Σχ. 14.4γ. Άλλωστε σε δοκίμια του υλικού που αφέθηκαν να ξεραθούν στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου μετρήθηκε τιμή του βαθμού κορεσμού κατά μέσο όρο 7%. Η τιμή αυτή είναι μάλλον πιο αντιπροσωπευτική της πραγματικής παραμένουσας κατάστασης του υλικού ενώ η τιμή 45-50% που παρατηρήθηκε επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που μετρήθηκε με την μέθοδο μετατόπισης άξονα αντιστοιχεί πιθανότατα στο σημείο που η καμπύλη αρχίζει να καθορίζεται από το λεπτότερο κλάσμα του υλικού. Η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού (Σχ. 11.2α) είναι μάλλον βαθμιδωτή, αν και λίγο, και μόνο για το μικρό ποσοστό που διέρχεται από το κόσκινο No. 200. Ακόμα και έτσι ωστόσο, αυτός ο τύπος καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης θα δικαιολογούσε μία χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού με περισσότερα από δύο σημεία καμπής (βλ. §4.2.5 στο Κεφ. 4 του πρώτου μέρους) με το πρώτο σημείο καμπής στην πίεση διείσδυσης αέρα των 25 έως 30 kPa, το δεύτερο στον βαθμό κορεσμού μεταξύ 45 και 50%, το τρίτο σε κάποια τιμή της μύζησης μεγαλύτερη των 1500 kPa και το τέταρτο στον βαθμό κορεσμού περί το 7%.



**Σχήμα 14.4.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων. Οι γραμμές στα σχήματα (β) και (δ) αναπαριστούν τις θεωρητικές καμπύλες που αντιστοιχούν στο ανεγμένο ειδικό βάρος στερεών του υλικού (2.55) και το λόγο κενών του στο όριο συρρίκνωσης (σταθερός εδώ).

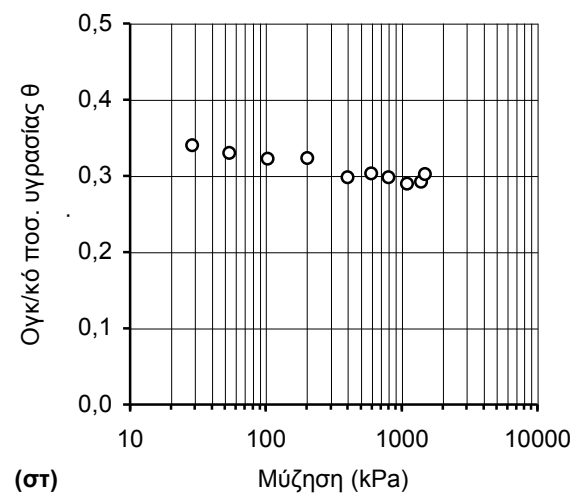
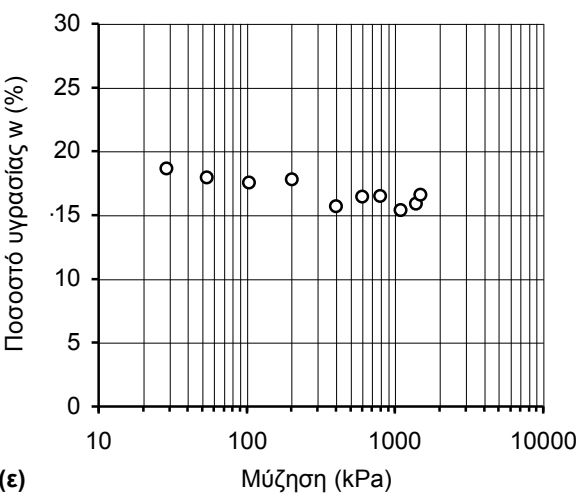
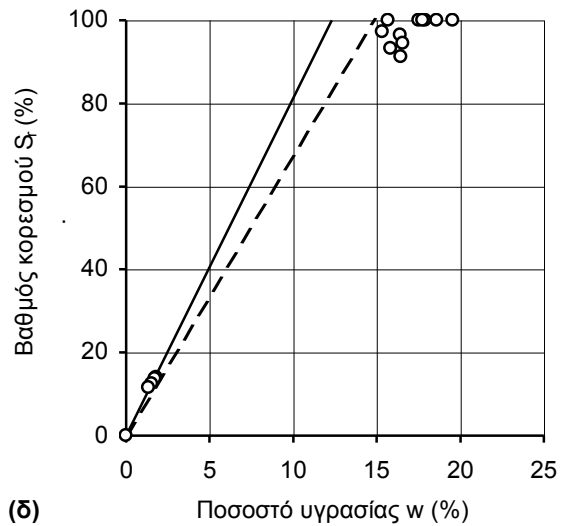
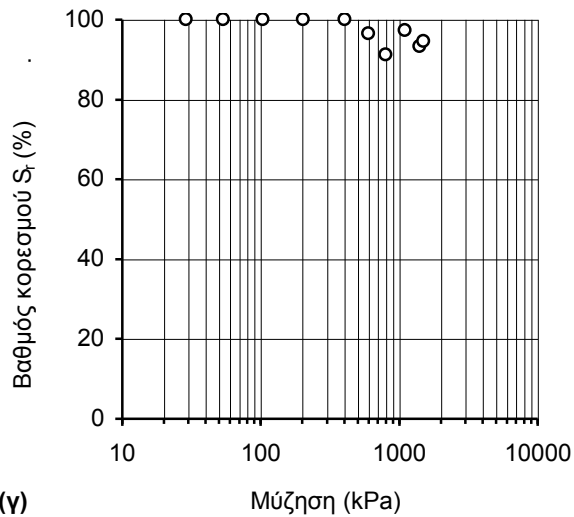
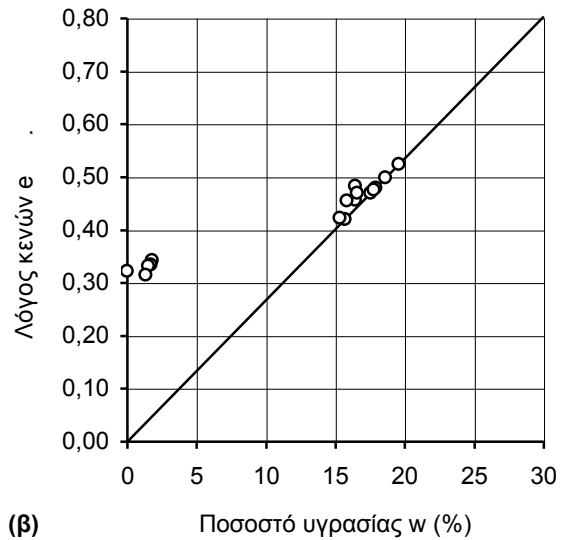
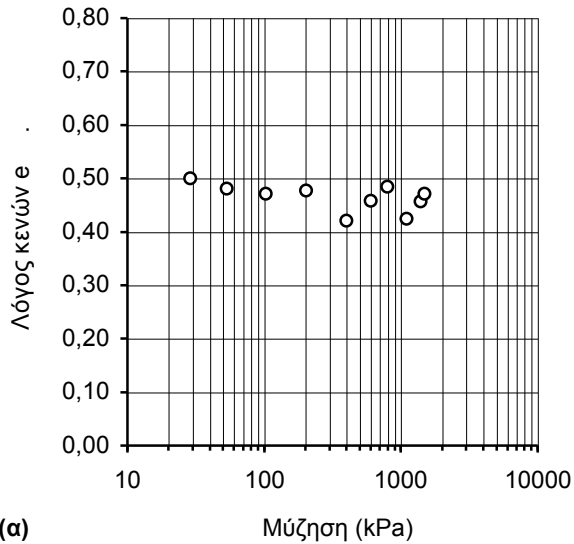


### 14.3.3 Αργίλος Χανίων

Τα δείγματα της Αργίλου Χανίων προέρχονται από γεωτρήσεις και ελήφθησαν με «φραγμό». Όταν όμως έγινε η προμήθειά τους αυτά ήταν μάλλον υπερβολικά διαταραγμένα οπότε δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του φυσικού εδαφικού υλικού. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την παρασκευή αναζυμωμένων και επανασυμπιεσμένων δοκιμίων των οποίων υπολογίστηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού.

Αρχικά παρασκευάζονταν πολτοί του υλικού σε αρχικό ποσοστό υγρασίας ίσο με 1.5 φορές το όριο υδαρότητας και στη συνέχεια από αυτούς τους πολτούς προσυμπιεσμένα δοκίμια μέχρι κατακόρυφη τάση 200 kPa. Το βάθος προέλευσης των δειγμάτων και η ανυπαρξία προηγούμενων υπερκειμένων κατά τη γεωλογική ιστορία του εδαφικού υλικού καθιστούν εύλογη την επιλογή αυτής της τιμής της τάσης.

Στο Σχ. 14.5 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Χανίων. Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.5α (μύζηση-λόγος κενών) ο λόγος κενών του εδαφικού αυτού υλικού κατά την απώλεια υγρασίας του φαίνεται να μειώνεται με την μύζηση με μικρό ρυθμό. Ξεκινάει από 0.50 για 29 kPa μύζηση και καταλήγει σε τιμές μεταξύ 0.42 και 0.47 αλλά με σημαντική διακύμανση για τιμές της μύζησης από 400 έως 1500 kPa. Όπως φαίνεται από τα Σχ. 14.5β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.5γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) μάλλον δεν έγινε αποκορεσμός. Για τιμές της μύζησης μετά τα 600 kPa μετρήθηκαν τιμές του βαθμού κορεσμού μικρότερες του 100%, οι οποίες αντιστοιχούσαν και σε σημεία λόγου κενών-ποσοστού υγρασίας οριακά απομακρυσμένα από την ευθεία πλήρους κορεσμού στο Σχ. 14.5β. Επί τη βάση αυτών θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι είχε αρχίσει να εμφανίζεται αποκορεσμός στο υλικό αυτό για τις υψηλές τιμές της μύζησης. Όπως προκύπτει όμως από το Σχ. 14.5δ, αυτό δεν ισχύει. Στο σχήμα αυτό φαίνονται τα σημεία βαθμού κορεσμού-ποσοστού υγρασίας με βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100% αλλά δεν ταυτίζεται η θέση τους με την αρχή της θεωρητικής ευθείας που αντιστοιχεί στον προσδιορισθέντα παραμένοντα λόγο κενών  $e_s$  (0.33). Η ευθεία αυτή είναι η συνεχής γραμμή στο Σχ. 14.5δ. Για να είχε ξεκινήσει πράγματι αποκορεσμός και οι μετρήσεις του βαθμού κορεσμού που προέκυψαν μικρότερες του 100% να αντιστοιχούν πράγματι σε αυτόν, θα έπρεπε ο λόγος κενών στο όριο συρρίκνωσης να είναι αρκετά μεγαλύτερος (0.40, αντιστοιχεί στη διακεκομμένη ευθεία στο Σχ. 14.5δ). Κάτι τέτοιο όμως δεν φαίνεται πιθανό αφού η προσδιορισθείσα τιμή του παραμένοντα λόγου κενών μετρήθηκε σε τέσσερα



**Σχήμα 14.5.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Χανίων. Οι γραμμές στα σχήματα (β) και (δ) αναπαριστούν τις θεωρητικές καμπύλες που αντιστοιχούν στο ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών του υλικού (2.68) και το λόγο κενών του στο όριο συρρίκνωσης (ιδέ κείμενο).

διαφορετικά δοκίμια και βρέθηκε να απέχει μόλις 0.015 από την μέση τιμή του 0.33, όπως επίσης και να είναι πολύ κοντινή και στην τιμή του λόγου κενών του εντελώς ξηρού δοκιμίου (0.32). Κατά συνέπεια οι προσδιορισθείσες τιμές του βαθμού κορεσμού που ήταν μικρότερες του 100% είναι μάλλον ανακριβείς, οφειλόμενες στα μειονεκτήματα της μεθόδου υπολογισμού φαινόμενου βάρους με εμβάπτιση σε παραφίνη και άρα η Αργίλος Χανίων έχει σημείο αποκορεσμού μεγαλύτερο των 1500 kPa. Ενδεχόμενη παρουσία καμπύλου τμήματος κατά την μετάβαση από την ευθεία  $S_r = 100\%$  στην ευθεία  $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$  δεν μπορεί να αποκλειστεί, αλλά σε κάθε περίπτωση το σημείο αποκορεσμού εκτιμάται ότι πρέπει να είναι μεγαλύτερο των 1200-1300 kPa.

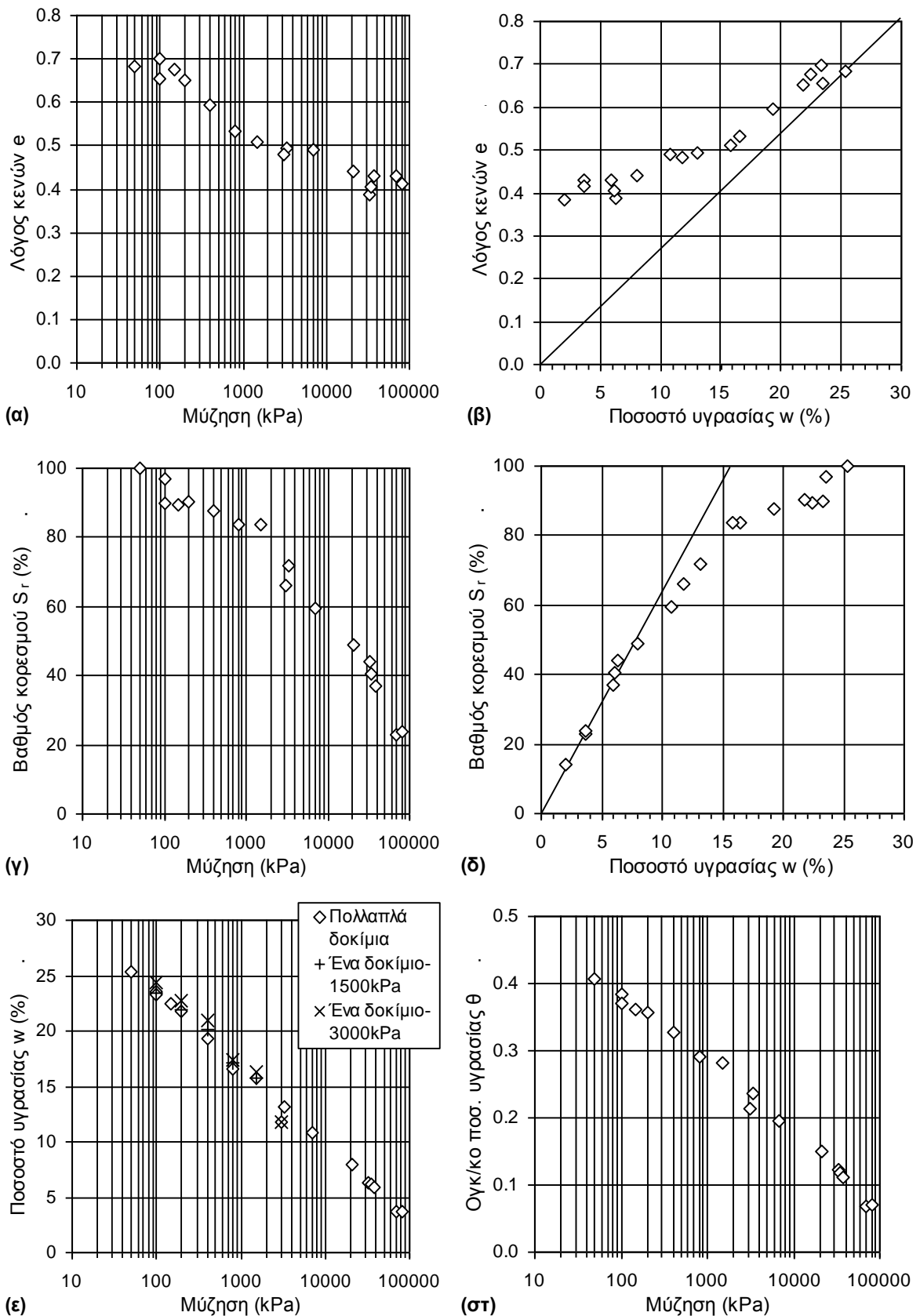
Τέλος από τα Σχ. 14.5ε και 14.5στ προκύπτει ότι και το ποσοστό υγρασίας και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνονται με τη μύζηση με μικρό ρυθμό, όμοιο μάλιστα του ρυθμού μείωσης του λόγου κενών για υπόθεση πλήρους κορεσμού.

#### 14.3.4 Αργίλος Λιβαδερού Δράμας

Τα δείγματα της Αργίλου Λιβαδερού Δράμας ήταν αναμοχλευμένα, προερχόμενα από προϊόντα εκσκαφής ερευνητικού φρέατος, οπότε δεν υπήρχε δυνατότητα προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του φυσικού εδαφικού υλικού. Αρχικά παρασκευάζονταν πολτοί του υλικού σε αρχικό ποσοστό υγρασίας ίσο με 1.5 φορές το όριο υδαρότητας και στη συνέχεια από αυτούς τους πολτούς προσημειωμένα δοκίμια μέχρι κατακόρυφη τάση 62.5 kPa (υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως). Το μικρό βάθος προέλευσης των δειγμάτων και η ανυπαρξία προηγούμενων υπερκειμένων κατά τη γεωλογική ιστορία του εδαφικού υλικού καθιστούν εύλογη την επιλογή μιας μάλλον χαμηλής τιμής της τάσης. Αν και τα 62.5 kPa κατακόρυφης τάσης είναι μάλλον υψηλή τιμή για το βάθος προέλευσης των δειγμάτων δεν επιλέχθηκε ακόμα χαμηλότερη τιμή της τάσης γιατί τότε δεν θα ήταν δυνατόν να εξασφαλιστεί η μηχανική ακεραιότητα των προετοιμασμένων δοκιμίων κατά τη μεταφορά τους από τη μία συσκευή στην άλλη (από τα συμπιεσόμετρα μετά την εξαγωγή των δοκιμών από τις κυψέλες στο θάλαμο μύζησης) δεδομένης και της σημαντικής περιεκτικότητας σε άμμο. Στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν εφαρμόστηκε και η μέθοδος μετατόπισης άξονα αλλά και η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω κορεσμένων υδατικών διαλυμάτων αλάτων (εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.), η οποία είχε καταστεί πλέον διαθέσιμη κατά τον χρόνο απόκτησης πρόσβασης στο συγκεκριμένο εδαφικό υλικό. Η δεύτερη μέθοδος

συνδυάστηκε και με τη μέτρηση της ολικής μύζησης στο υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου μετά από την παραμονή των δοκιμίων για επαρκές χρονικό διάστημα στους θαλάμους των υδατικών διαλυμάτων αλάτων. Για την περαιτέρω πύκνωση μεταξύ τελευταίας τιμής μύζησης με τη μέθοδο μετατόπισης άξονα και της πρώτης με τη μέθοδο ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω υδατικών διαλυμάτων αλάτων αφέθηκαν και δύο δοκίμια στον αέρα για μία και δύο ώρες (μετά την έξοδο από τον θάλαμο μύζησης ως τα 1500 kPa) και μετά τυλίχτηκαν για εξισορρόπηση του ποσοστού υγρασίας και στη συνέχεια μέτρηση όλων των ιδιοτήτων τους και της μύζησης τους (στο υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου).

Στο Σχ. 14.6 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Λιβαδερού Δράμας. Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.6α (μύζηση-λόγος κενών) ο λόγος κενών του εδαφικού αυτού υλικού κατά την απώλεια υγρασίας του φαίνεται να μειώνεται με την μύζηση με σημαντικό ρυθμό. Ξεκινάει από 0.70 για 50-100 kPa μύζηση και καταλήγει σε τιμές μεταξύ 0.39 και 0.43 αλλά με σημαντική διακύμανση για τιμές της μύζησης από 10 έως 100 MPa. Όπως φαίνεται από τα Σχ. 14.6β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.6γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) έγινε αποκορεσμός για τιμές της μύζησης μεταξύ 100 και 150 kPa. Όπως προκύπτει όμως από το Σχ. 14.6δ συνέβη πράγματι ο αποκορεσμός αλλά είναι σταδιακή η μετάβαση από την ευθεία  $S_r = 100\%$  στην ευθεία κλίσης  $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$ . Για αυτό το εδαφικό υλικό λοιπόν πράγματι υπάρχει καμπύλο τμήμα κατά την μετάβαση από την ευθεία  $S_r = 100\%$  στην ευθεία  $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$ , αλλά σε κάθε περίπτωση το σημείο αποκορεσμού εκτιμάται ότι βρίσκεται σαφώς μεταξύ 100 και 150 kPa παρά και το ενδεχόμενο εμφάνισης και δεύτερου σημείου καμπής μεταξύ 1.5 και 6 MPa. Τέλος από τα Σχ. 14.6ε και 14.6στ προκύπτει ότι και το ποσοστό υγρασίας και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνονται με την μύζηση με σημαντικό ρυθμό. Σημειώνονται δύο παρατηρήσεις: α) και οι δύο καμπύλες παρουσιάζονται σχεδόν ευθύγραμμες, συγκρινόμενες με τις εμφανώς μη ευθύγραμμες καμπύλες λόγου κενών-μύζησης και βαθμού κορεσμού-μύζησης, ανατρέποντας την αντίληψη περί όμοιας γεωμετρικής μορφής και των καμπυλών αυτών αλλά και της καμπύλης ποσοστού υγρασίας-μύζησης, και β) την ταύτιση πρακτικά σε ό,τι αφορά την καμπύλη ποσοστού υγρασίας-μύζησης και από τη μέθοδο με μέτρηση του ποσοστού υγρασίας σε διαφορετικά δοκίμια αλλά και από τη μέθοδο με παρακολούθηση του συνολικού βάρους ενός μόνο δοκίμιου και υπολογισμό των τιμών του ποσοστού υγρασίας σε κάθε τιμή της μύζησης πριν από εκείνη στην οποία μετρήθηκε το ποσοστό υγρασίας στο δοκίμιο τελικά (εδώ μάλιστα έγινε για δύο μεμονωμένα δοκίμια: εκείνο που μετρήθηκε το ποσοστό υγρασίας του στα 1500 kPa και εκείνο που μετρήθηκε το ποσοστό υγρασίας του περίπου στα 3000 kPa).

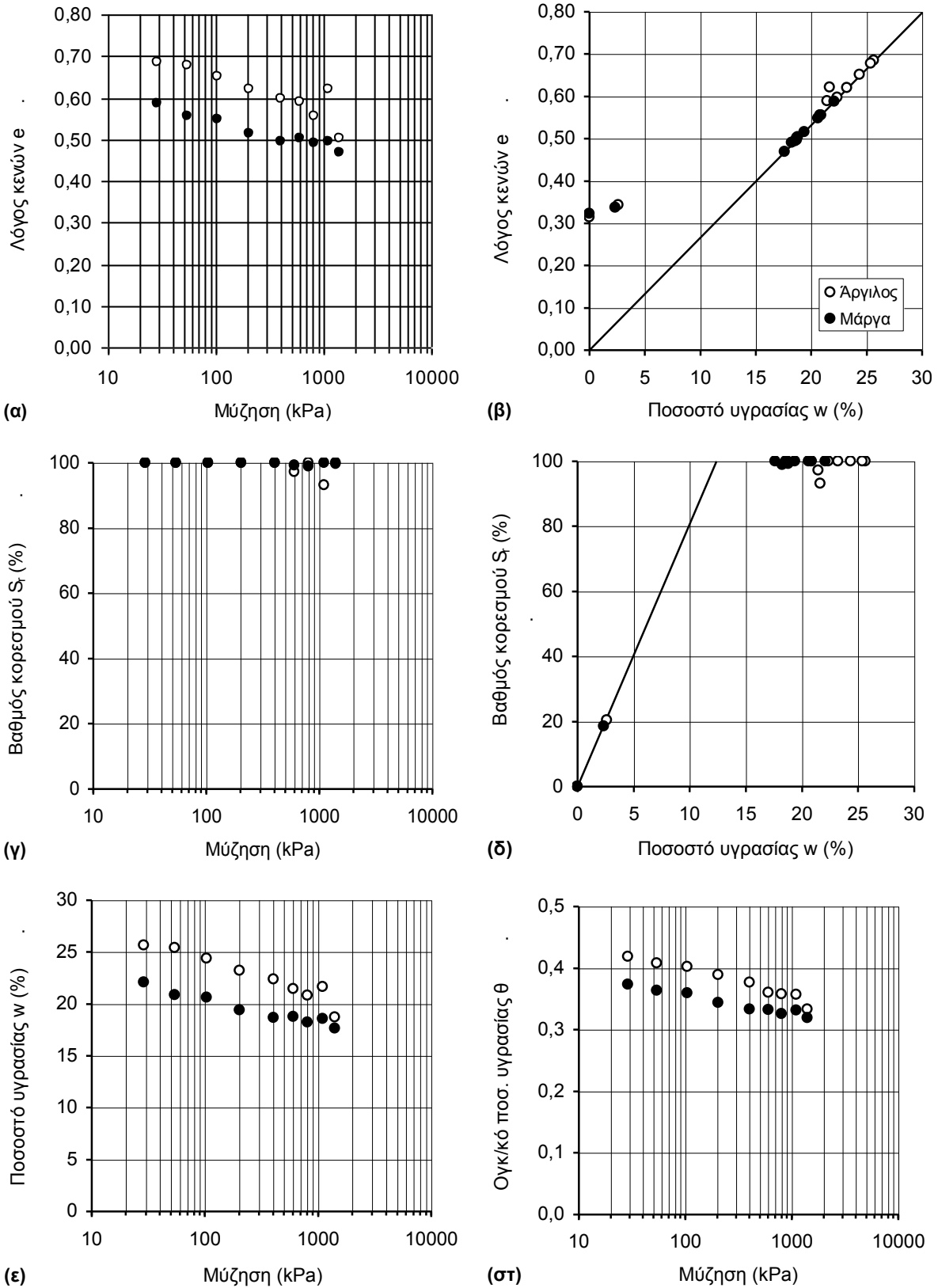


**Σχήμα 14.6.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Λιβαδερού Δράμας. Οι γραμμές στα σχήματα (β) και (δ) αναπαριστούν τις θεωρητικές καμπύλες που αντιστοιχούν στο ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών του υλικού (2.68) και το λόγο κενών του στο όριο συρρίκνωσης (ιδέ κείμενο).

### 14.3.5 Άργιλος και Μάργα Κηφισιάς

Τα δείγματα της Αργίλου και της Μάργας Κηφισιάς είχαν υποστεί μικρή διατάραξη αλλά χρησιμοποιήθηκαν ως είχαν για την πραγματοποίηση των δοκιμών μονοδιάστατης στερεοποίησης. Το υπόλοιπο υλικό που υπήρχε διαθέσιμο ήταν αρκετά διαταραγμένο οπότε και πάλι δεν υπήρχε η δυνατότητα προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του φυσικού εδαφικού υλικού. Έτσι επιλέχθηκε όπως και στην περίπτωση της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων και της Αργίλου Χανίων να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού των υλικών αυτών μετά από αναζύμωση και επανασυμπιέσή τους στην εκτιμώμενη τάση που είχαν επιτόπου. Αρχικά παρασκευάζονταν πολτοί του κάθε υλικού σε αρχικό ποσοστό υγρασίας ίσο με 1.5 φορές το όριο υδαρότητας και στη συνέχεια από αυτούς τους πολτούς προσυμπιεσμένα δοκίμια μέχρι κατακόρυφη τάση 600 kPa. Το βάθος προέλευσης των δειγμάτων και η ανυπαρξία σημαντικών προηγούμενων υπερκειμένων κατά την γεωλογική ιστορία των εδαφικών υλικών καθιστούν εύλογη την επιλογή αυτής της τιμής της τάσης.

Στο Σχ. 14.7 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού και των δύο υλικών. Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.7α (μύζηση-λόγος κενών) η Άργιλος Κηφισιάς διατηρεί μεγαλύτερο αρχικό λόγο κενών από την Μάργα Κηφισιάς, προφανώς ως αποτέλεσμα του υψηλότερου ορίου υδαρότητας, του υψηλότερου ποσοστού περιεχόμενης αργίλου και της διαφορετικής ορυκτολογικής σύστασης. Η μείωση δε του λόγου κενών είναι μεγαλύτερη για την άργιλο απ' ότι για τη μάργα με αποτέλεσμα για μύζηση 1500 kPa πρακτικά να συμπίπτουν οι τιμές τους (ένα σημείο σημαντικά υψηλότερου λόγου κενών για την Άργιλο Κηφισιάς στα 1100 kPa οφείλεται μάλλον σε σφάλμα μέτρησης). Όπως φαίνεται από τα Σχ. 14.7β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.7γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) δεν έγινε αποκορεσμός για κανένα από τα δύο υλικά. Για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες των 600 kPa μετρήθηκαν τιμές του βαθμού κορεσμού μικρότερες του 100% για την Άργιλο Κηφισιάς, οι οποίες αντιστοιχούσαν και σε σημεία λόγου κενών-ποσοστού υγρασίας οριακά απομακρυσμένα από την ευθεία πλήρους κορεσμού στο Σχ. 14.7β. Όπως προκύπτει όμως από το Σχ. 14.7δ αυτό δεν ισχύει. Στο σχήμα αυτό φαίνονται τα σημεία βαθμού κορεσμού-ποσοστού υγρασίας με βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100% αλλά δεν ταυτίζεται η θέση τους με την αρχή της θεωρητικής ευθείας που αντιστοιχεί στον προσδιορισθέντα λόγο κενών στο όριο συρρίκνωσης (0.33 πολύ κοντινός, πρακτικά κοινός και για τα δύο υλικά). Η ευθεία αυτή είναι η γραμμή που έχει σχεδιαστεί στο Σχ. 14.7δ. Για να είχε ξεκινήσει πράγματι αποκορεσμός και οι μετρήσεις του βαθμού κορεσμού που προέκυψαν μικρότερες του 100% να αντιστοιχούν πράγματι σε αυτό, θα έπρεπε ο



**Σχήμα 14.7.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου και της Μάργας Κηφισιάς. Οι γραμμές στα σχήματα (β) και (δ) αναπαριστούν τις θεωρητικές καμπύλες που αντιστοιχούν στο ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών του κάθε υλικού και τον λόγο κενών τους στο όριο συρρίκνωσης.

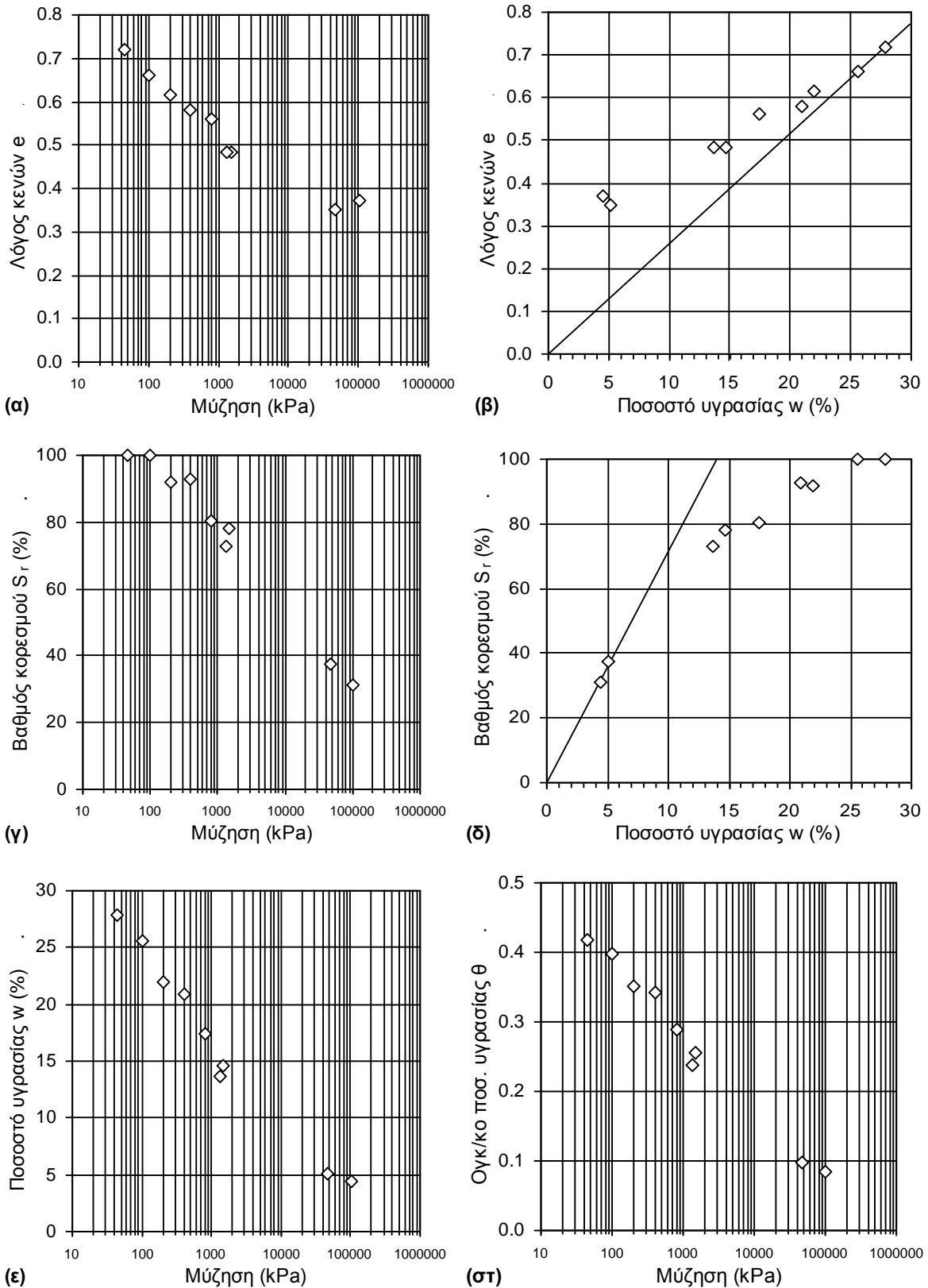
παραμένον λόγος κενών να είναι αρκετά μεγαλύτερος. Κατά συνέπεια οι προσδιορισθείσες τιμές του βαθμού κορεσμού που ήταν μικρότερες του 100% είναι μάλλον ανακριβείς, οφειλόμενες στα μειονεκτήματα της μεθόδου υπολογισμού φαινόμενου βάρους με εμβάπτιση σε παραφίνη και άρα η Άργιλος και η Μάργα Κηφισιάς έχουν σημείο αποκορεσμού μεγαλύτερο των 1500 kPa. Τέλος από τα Σχ. 14.7ε και 14.7στ προκύπτει ότι και το ποσοστό υγρασίας και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνονται με τη μύζηση με μικρό ρυθμό, όμοιο μάλιστα του ρυθμού μείωσης του λόγου κενών για υπόθεση πλήρους κορεσμού.

### 14.3.6 Άργιλος Μελίτης Φλώρινας

Τα δείγματα της Αργίλου Μελίτης Φλώρινας προήλθαν από γεώτρηση και είχαν ληφθεί με φραγμό. Αρχικά παρασκευάζονταν πολτοί του υλικού σε αρχικό ποσοστό υγρασίας ίσο με 1.5 φορές το όριο υδαρότητας και στη συνέχεια από αυτούς τους πολτούς προσυμπιεσμένα δοκίμια μέχρι κατακόρυφη τάση 125 kPa (υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως). Το μικρό βάθος προέλευσης των δειγμάτων και η ανυπαρξία προηγούμενων υπερκειμένων κατά τη γεωλογική ιστορία του εδαφικού υλικού καθιστούν εύλογη την επιλογή μιας μάλλον χαμηλής τιμής της τάσης. Στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν εφαρμόστηκε και η μέθοδος μετατόπισης άξονα αλλά και η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω υδατικών διαλυμάτων αλάτων (εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.), η οποία είχε καταστεί πλέον διαθέσιμη κατά τον χρόνο απόκτησης πρόσβασης στο συγκεκριμένο εδαφικό υλικό. Η δεύτερη μέθοδος συνδυάστηκε και με τη μέτρηση της ολικής μύζησης στο υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου μετά από την παραμονή των δοκιμίων για επαρκές χρονικό διάστημα στους θαλάμους των υδατικών διαλυμάτων αλάτων.

Στο Σχ. 14.8 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Μελίτης Φλώρινας. Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.8α (μύζηση-λόγος κενών) ο λόγος κενών του εδαφικού αυτού υλικού κατά την απώλεια υγρασίας του φαίνεται να μειώνεται με τη μύζηση με σημαντικό ρυθμό. Ξεκινάει από 0.80 και καταλήγει σε τιμές μεταξύ 0.35 και 0.37 για τιμές της μύζησης από 50 έως 100 MPa. Όπως φαίνεται από τα Σχ. 14.8β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.8γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) έγινε αποκορεσμός για τιμές της μύζησης μεταξύ 100 και 150 kPa. Όπως προκύπτει όμως από το Σχ. 14.8δ συνέβη πράγματι ο αποκορεσμός αλλά είναι σταδιακή η μετάβαση από την ευθεία  $S_r = 100\%$  στην ευθεία κλίσης  $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$ . Για αυτό το εδαφικό υλικό λοιπόν πράγματι υπάρχει καμπύλο τμήμα κατά τη μετάβαση από την





**Σχήμα 14.8.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Μελίτης Φλώρινας. Οι γραμμές στα σχήματα (β) και (δ) αναπαριστούν τις θεωρητικές καμπύλες που αντιστοιχούν στο ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών του υλικού και τον λόγο κενών του στο όριο συρρίκνωσης (ιδέ κείμενο).

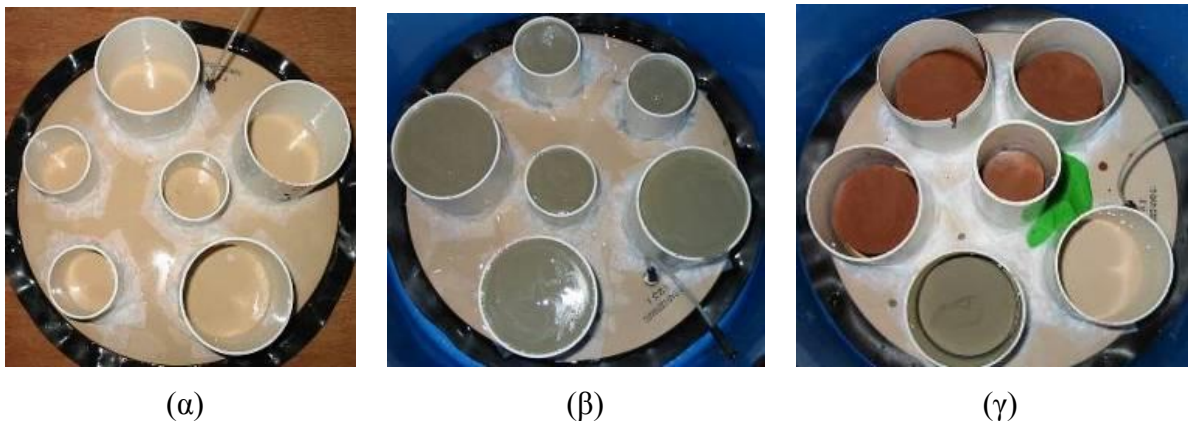
ευθεία  $S_r = 100\%$  στην ευθεία  $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$ , αλλά σε κάθε περίπτωση το σημείο αποκορεσμού εκτιμάται ότι βρίσκεται σαφώς μεταξύ 100 και 150 kPa. Τέλος από τα Σχ. 14.8ε και 14.8στ προκύπτει ότι και το ποσοστό υγρασίας και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνονται με την μύζηση με σημαντικό ρυθμό. Σημειώνονται και για αυτό το εδαφικό υλικό (όπως και για την Αργίλο Λιβαδερού Δράμας) ότι οι δύο καμπύλες παρουσιάζονται σχεδόν ευθύγραμμες, συγκρινόμενες με τις εμφανώς μη ευθύγραμμες καμπύλες λόγου κενών-μύζησης και βαθμού κορεσμού-μύζησης, ανατρέποντας την αντίληψη περί όμοιας γεωμετρικής μορφής και των καμπυλών αυτών αλλά και της καμπύλης ποσοστού υγρασίας-μύζησης.

### 14.3.7 Αργίλος Αμαρουσίου

Η Αργίλος Αμαρουσίου που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από δείγματα γεώτρησης και χρησιμοποιήθηκε και για τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης που περιγράφηκαν ήδη στο Κεφ. 13. Οι ποσότητες του καλής ποιότητας δείγματος ωστόσο δεν επαρκούσαν για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του φυσικού υλικού. Από την άλλη πλευρά, οι σημαντικές ποσότητες του υλικού επέτρεπαν την εκτέλεση περισσότερων δοκιμών, και σε διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης τάσης κατά την μονοδιάστατη συμπίεση αλλά και σε εντελώς διαφορετικές καταστάσεις όπως αυτή των συμπυκνωμένων δοκιμών σε διάφορες υγρασίες συμπύκνωσης ως προς την βέλτιστη υγρασία από την δοκιμή Proctor. Αυτές οι τελευταίες δοκιμές παρουσιάζονται στο Κεφ. 15. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού που έγιναν σε αυτό το εδαφικό υλικό μετά από αναζύμωσή του μόνο (δοκιμή στον πολτό) και μετά από αναζύμωσή του και επανασυμπίεσή του σε τρεις διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης τάσης: 62.5, 500 και 4000 kPa. Σκοπός του προσδιορισμού αυτών των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού στο ίδιο υλικό ήταν να διαπιστωθεί η επιρροή του διαφορετικού αρχικού λόγου κενών.

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος μετατόπισης άξονα αλλά και η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω υδατικών διαλυμάτων αλάτων συνδυαζόμενη με υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου. Για την υλοποίηση των μεθόδων αυτών στον πολτό της αναζυμωμένης Αργίλου Αμαρουσίου χρειάστηκε να τροποποιηθεί ελαφρώς η μέθοδος μετατόπισης άξονα και πρακτικά καθόλου η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω υδατικών διαλυμάτων αλάτων. Στη δεύτερη απλά χρησιμοποιήθηκαν άλλου μεγέθους δειγματολήπτες, οι οποίοι περιείχαν τον πολτό και τοποθετούντο σε κάθε

θάλαμο. Στη μέθοδο μετατόπισης άξονα αντίθετα έπρεπε να κοπούν σωλήνες της ζητούμενης διαμέτρου και στο ζητούμενο ύψος και αυτοί να κολληθούν επιμελώς πάνω στην επιφάνεια του κεραμικού πορολίθου του θαλάμου μύζησης. Αυτή καθεαυτή η συγκόλληση γινόταν με απλή κολλητική ταινία αλλά η κρίσιμη λεπτομέρεια ήταν η απόλυτα ευθύγραμμη κοπή των τμημάτων των σωλήνων (τουλάχιστον της πλευράς που συγκολλήθηκε στον κεραμικό πορολίθο) και η λείανσή της ώστε να μην υπάρχουν κενά έστω και μικρά από τα οποία θα μπορούσε να διαφύγει ο πολτός. Ακόμα και στην περίπτωση που εμφανιζόταν κάποια διαρροή ή υπήρχε εκ των προτέρων ο φόβος ότι από κάποιο σημείο μπορεί να γίνει διαρροή, τότε τοποθετείτο πλαστελίνη η οποία και πιεζόταν πάνω στην κολλητική ταινία, το τεμάχιο του σωλήνα και τον κεραμικό πορολίθο. Η σχετική διάταξη, και με λεπτομέρεια μάλιστα με την τοποθέτηση της πλαστελίνης για αποφυγή διαρροών παρουσιάζεται στην Φωτ. 14.10.



**Φωτογραφία 14.10.** Διάταξη τοποθέτησης τεμαχίων σωλήνων και συγκόλλησής τους στον κεραμικό πορολίθο του θαλάμου μύζησης για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε πολτούς αναζυμωμένων εδαφών: α) πριν την τοποθέτηση του πολτού, β) αμέσως μετά την τοποθέτηση πολτού αναζυμωμένης Μάργας Κορίνθου αλλά πριν την εφαρμογή μύζησης, και γ) μετά την τοποθέτηση πολτού αναζυμωμένης Αργίλου Αμαρουσίου και αναζυμωμένης Μάργας Κορίνθου και την εφαρμογή μύζησης (παρατηρείται η συρρίκνωση των δοκιμίων και αποκόλληση από τα τοιχώματα, καθώς και η τοποθέτηση πλαστελίνης –πράσινο χρώμα- για τη διακοπή διαρροής που είχε παρατηρηθεί στην αρχή).

Στο Σχ. 14.9 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Αμαρουσίου. Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.9α (μύζηση-λόγος κενών) ο λόγος κενών του εδαφικού αυτού υλικού κατά την απώλεια υγρασίας του φαίνεται να μειώνεται με τη μύζηση

τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερη τιμή είχε αρχικά. Προκειμένου για τον πολτό μειώνεται από περίπου 1.7 σε 0.36 (η αρχική υψηλή τιμή δεν φαίνεται στο Σχ. 14.9α), για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 62.5 kPa από το 0.8 στο 0.36, για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 500 kPa από το 0.65 στο 0.33, και τέλος για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 4000 kPa από το 0.54 στο 0.29 (οι καταληκτικές τιμές του λόγου κενών για τιμές της μύζησης από 20 έως 120 MPa). Για να μπορεί να γίνει καλύτερα η αξιολόγηση των καμπυλών λόγου κενών-μύζησης που παρουσιάζονται στο Σχ. 14.9α, στο ίδιο σχήμα δείχνονται ταυτόχρονα και οι καμπύλες λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης για την προετοιμασία των τριών δοκιμών που συμπίεστηκαν ως τα 4000 kPa και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στο θάλαμο μύζησης για εφαρμογή τιμών της μύζησης μεταξύ 50 και 1500 kPa. Καταρχάς οι τρεις αυτές καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης πρακτικά ταυτίζονται μεταξύ τους υποδεικνύοντας πολύ υψηλή ομοιογένεια των παρασκευασθέντων δοκιμών. Η καμπύλη λόγου κενών-μύζησης του πολτού απέχει από το σμήνος των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης αλλά αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί σε διαφορές στην υγρασία του πολτού (άλλος χρησιμοποιήθηκε για τα δοκίμια πολτού που μετρήθηκε η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού του πολτού και άλλος για την παρασκευή των τριών δοκιμών που συμπίεστηκαν ως τα 4000 kPa) και στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τον ένα και τον άλλο πολτό. Και πάλι όμως από τα 200 kPa και μετά μέχρι τα 1500 kPa ταυτίζεται η καμπύλη αυτή με τις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης. Οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμών που συμπίεστηκαν μέχρι κάποια τιμή της τάσης υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως ξεκινούν για χαμηλές τιμές της μύζησης αισθητά μακριά από τις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης παρουσιάζοντας έναν πρώτο κλάδο μικρότερης κλίσης, συνεχίζοντας σε έναν κλάδο μεγαλύτερης κλίσης και καταλήγοντας σε ένα πρακτικά οριζόντιο τμήμα όπου έχει σταθεροποιηθεί ο λόγος κενών στο εύρος τιμών της μύζησης 20 έως 120 MPa. Στις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης παρατίθεται εκτός από τον κλάδο της φόρτισης και ο κλάδος της αποφόρτισης. Ειδικά οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμών που είχαν συμπιεστεί μέχρι τα 500 και τα 4000 kPa, μοιάζουν να έχουν, η μεν πρώτη έναν κλάδο μέχρι τα 500 kPa μύζησης με κλίση παρόμοια με αυτή του κλάδου αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης<sup>4</sup> και μετά έναν κλάδο που ακολουθεί τους κλάδους φόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης, η δε δεύτερη μοιάζει να έχει μόνο έναν κλάδο που αντιστοιχεί στην «επαναφόρτιση» από τον κλάδο αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι μηδενική τιμή της κατακόρυφης τάσης<sup>4</sup>. Περισσότερα για αυτές τις συγκρίσεις παρατίθενται για όλα τα εδαφικά υλικά στα οποία μετρήθηκαν χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού στην §14.4.

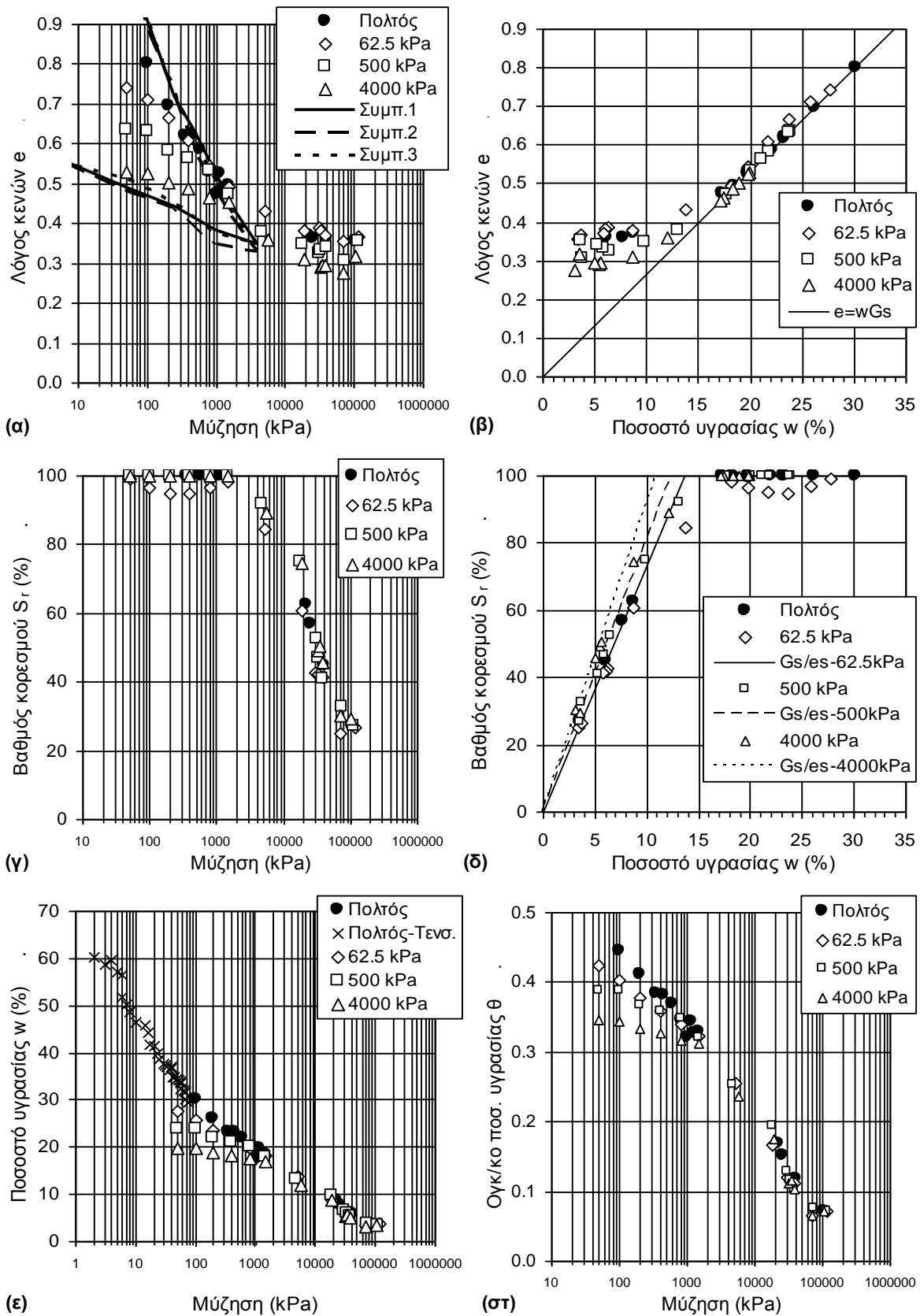
<sup>4</sup> Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο κλάδος επαναφόρτισης (γιατί περί αυτού πρόκειται και με αυτό θα έπρεπε να γίνεται σύγκριση) είναι λίγο πιο ήπιος από τον κλάδο της φόρτισης προς τις χαμηλές τάσεις.

Όπως φαίνεται και από το Σχ. 14.9α και από το Σχ. 14.9β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) η τιμή του παραμένοντος λόγου κενών αλλάζει με την μεταβολή της αρχικής τιμής του λόγου κενών. Η παρατήρηση αυτή δεν επεξηγείται περισσότερο σε αυτό το σημείο καθώς τα σχετικά δεδομένα για όλα τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην διδακτορική διατριβή αναλύονται και τυγχάνουν ειδικής επεξεργασίας στην §14.6.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 14.9β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.9γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) έγινε αποκορεσμός για τιμές της μύζησης μεταξύ 2 και 4 MPa<sup>5</sup>. Συναξιολογώντας την εικόνα από το Σχ. 14.9δ συνέβη πράγματι ο αποκορεσμός και είναι και πάλι σταδιακή η μετάβαση από την ευθεία  $S_r = 100\%$  στην ευθεία κλίσης  $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$ , η οποία μάλιστα είναι διαφορετική για κάθε χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, αφού για κάθε καμπύλη ήταν διαφορετικός ο παραμένων λόγος κενών (για τον πολτό 0.36, για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 62.5 kPa 0.36, για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 500 kPa 0.33, και τέλος για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 4000 kPa 0.29). Τέλος από τα Σχ. 14.9ε και 14.9στ προκύπτει ότι και το ποσοστό υγρασίας και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνονται με την μύζηση με σημαντικό ρυθμό, διαφορετικό για κάθε καμπύλη στο ίδιο αυτό υλικό, η οποία όμως τελικά καταλήγει στον ίδιο κοινό κλάδο μετά τον αποκορεσμό. Είναι δε χαρακτηριστική η ταύτιση της προέκτασης της καμπύλης του πολτού για χρήση της μεθόδου που περιγράφηκε παραπάνω στον μεγάλο θάλαμο μύζησης, με την καμπύλη που είχε προκύψει για πολτό Αργίλου Αμαρουσίου και ξήρανσή του με παρακολούθηση της μύζησης με тенσιόμετρο (Κεφ. 3 1<sup>ο</sup> Μέρους, §3.5.2.3).

Εάν λοιπόν επιχειρείτο η προσομοίωση των διαφόρων καμπυλών του Σχ. 14.9 θα παρουσιαζόταν η ανάγκη για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων προσομοίωσης για όλες τις καμπύλες εκτός από την καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης. Ενώ δηλαδή η διαφοροποίηση του αρχικού λόγου κενών οδηγεί σε διαφορετικές καμπύλες όπως λόγου κενών-μύζησης, ποσοστού υγρασίας-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης δεν φαίνεται να μεταβάλλει την καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης και συγκεκριμένα τη μύζηση αποκορεσμού και τη θέση και κλίση του κλάδου της καμπύλης μετά τον αποκορεσμό. Μεταβολή λοιπόν του λόγου κενών μόνο λόγω συμπίεσης, χωρίς την ύπαρξη άλλων, γεωλογικού χαρακτήρα, αιτίων της μεταβολής της δομής των υλικών μοιάζει να μη μεταβάλλει τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης παρόλο που τη μεταβάλλει σε όρους λόγου κενών-μύζησης (μηχανική συμπεριφορά σε όρους τάσεων- παραμορφώσεων) και σε όρους

<sup>5</sup> Εκτιμάται ότι για την καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης των δοκιμών που είχαν συμπιεστεί ως τα 62.5 kPa, οι τιμές που είναι μικρότερες του 100% στην αρχή πρέπει μάλλον να αποδοθούν σε σφάλμα μέτρησης.



**Σχήμα 14.9.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Αμαρουσίου. Οι γραμμές στα σχήματα (β) και (δ) αναπαριστούν τις θεωρητικές καμπύλες που αντιστοιχούν στο ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών του υλικού και τον λόγο κενών του στο όριο συρρίκνωσης (ιδέ κείμενο).

ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης (μηχανική συμπεριφορά σε ό,τι αφορά την διαπερατότητα).

Επισημαίνεται η αδυναμία να υλοποιηθούν μετρήσεις με χρήση της μεθόδου μετατόπισης άξονα υλοποιούμενης σε θάλαμο μύζησης με τη διάταξη που περιγράφηκε προηγουμένως για την άργιλο Αμαρουσίου σε μορφή πολτού για τιμές της μύζησης μικρότερες των 100 kPa καθώς τα δοκίμια παραμένουν τόσο μαλακά που δεν είναι δυνατόν να διατηρηθεί η μηχανική τους ακεραιότητα κατά την εφαρμογή της μεθόδου μέτρησης του ολικού τους όγκου με εμβάπτιση σε υγρή παραφίνη. Στην περίπτωση της αργίλου Αμαρουσίου το πρόβλημα παρακάμφθηκε μέσω της υλοποίησης διάταξης μέτρησης της μύζησης εντός του ξηραϊνόμενου πολτού με τενσιόμετρο και ταυτόχρονη παρακολούθηση του ολικού βάρους του δοκιμίου του πολτού και του ποτηριού ζέσεως εντός του οποίου βρισκόταν ο πολτός. Σε άλλα εδαφικά υλικά υλοποιήθηκε μία διάταξη τροποποίησης ενός κελιού Tempre για να μπορούν να γίνουν μετρήσεις και σε χαμηλότερες τιμές της μύζησης από 100 kPa, τουλάχιστον σε ό,τι αφορά το ποσοστό υγρασίας.

#### 14.3.8 Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου

Τα δείγματα της Αργίλου Ορεστιάδας Έβρου ήταν διαταραγμένα, προερχόμενα από ερευνητικό φρέαρ. Έτσι και εδώ δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του φυσικού υλικού αλλά λόγω της μεγάλης τιμής του ορίου υδαρότητας του υλικού επιλέχθηκε να μετρηθούν και εδώ οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού όπως και στην Άργιλο Αμαρουσίου, δηλ. στον πολτό του αναζυμωμένου υλικού και στο υλικό αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο σε τρεις διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης τάσης: 62.5, 500 και 4000 kPa, προς εξαγωγή των αντίστοιχων συμπερασμάτων με την Άργιλο Αμαρουσίου για ένα εδαφικό υλικό μεγαλύτερου ορίου υδαρότητας. Για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στον πολτό χρησιμοποιήθηκε η ίδια διαδικασία που περιγράφηκε ήδη για την Άργιλο Αμαρουσίου.

Στο Σχ. 14.10 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Ορεστιάδας Έβρου. Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.10α (μύζηση-λόγος κενών) ο λόγος κενών του εδαφικού αυτού υλικού κατά την απώλεια υγρασίας του φαίνεται να μειώνεται με την μύζηση τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερη τιμή είχε αρχικά. Προκειμένου για τον πολτό μειώνεται από περίπου 1.9 σε 0.46 (η αρχική υψηλή τιμή δεν φαίνεται στο Σχ. 14.10α), για το

υλικό συμπιεσμένο ως τα 62.5 kPa από το 0.97 στο 0.44, για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 500 kPa από το 0.74 στο 0.43, και τέλος για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 4000 kPa από το 0.63 στο 0.33 (οι καταληκτικές τιμές του λόγου κενών για τιμές της μύζησης από 50 έως 170 MPa). Για να μπορεί να γίνει καλύτερα η αξιολόγηση των καμπυλών λόγου κενών-μύζησης που παρουσιάζονται στο Σχ. 14.10α, στο ίδιο σχήμα δείχνεται ταυτόχρονα και η καμπύλη λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης από μία από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης για την προετοιμασία των δοκιμίων που συμπίεστηκαν ως τα 4000 kPa και στη συνέχεια μετρήθηκε σε αυτά η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Η καμπύλη λόγου κενών-μύζησης του πολτού απέχει από το σμήνος των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης αλλά αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί σε διαφορές στην υγρασία του πολτού (άλλος χρησιμοποιήθηκε για τα δοκίμια πολτού που μετρήθηκε η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού του πολτού και άλλος για την παρασκευή των τριών δοκιμίων που συμπίεστηκαν ως τα 4000 kPa) και στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τον ένα και τον άλλο πολτό. Και πάλι όμως από τα 200 kPa και μετά μέχρι τα 1500 kPa η καμπύλη αυτή ταυτίζεται πρακτικά με την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης. Οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμίων που συμπίεστηκαν μέχρι κάποια τιμή της τάσης υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως ξεκινούν για χαμηλές τιμές της μύζησης αισθητά μακριά από την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης παρουσιάζοντας έναν πρώτο κλάδο μικρότερης κλίσης, συνεχίζοντας σε έναν κλάδο μεγαλύτερης κλίσης και καταλήγοντας σε ένα πρακτικά οριζόντιο τμήμα όπου έχει σταθεροποιηθεί ο λόγος κενών στο εύρος τιμών της μύζησης 50 έως 170 MPa. Στην καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης παρατίθεται εκτός από τον κλάδο της φόρτισης και ο κλάδος της αποφόρτισης. Ειδικά οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμίων που είχαν συμπιεστεί μέχρι τα 500 και τα 4000 kPa, μοιάζουν να έχουν, η μεν πρώτη έναν κλάδο μέχρι τα 500 kPa μύζησης με κλίση παρόμοια με αυτή του κλάδου αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης<sup>4</sup> και μετά έναν κλάδο που ακολουθεί τον κλάδο φόρτισης της καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης, η δε δεύτερη μοιάζει να έχει μόνο έναν κλάδο που αντιστοιχεί στην «επαναφόρτιση» από τον κλάδο αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι μηδενική τιμή της κατακόρυφης τάσης<sup>4</sup>. Περισσότερα για αυτές τις συγκρίσεις παρατίθενται για όλα τα εδαφικά υλικά στα οποία μετρήθηκαν χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού στην §14.4.

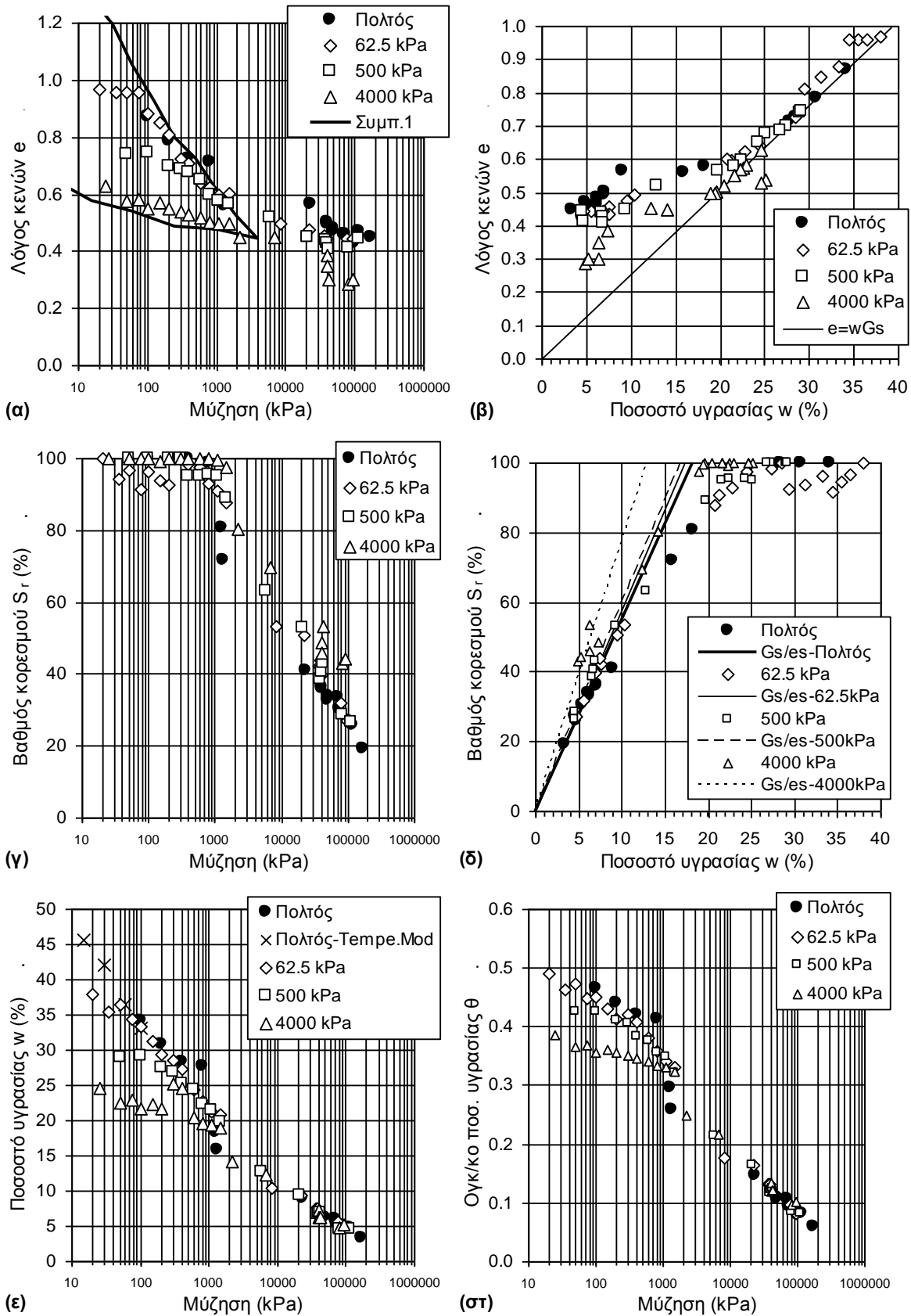
Όπως φαίνεται και από το Σχ. 14.10α και από το Σχ. 14.10β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) η τιμή του παραμένοντος λόγου κενών αλλάζει με τη μεταβολή της αρχικής τιμής του λόγου κενών. Η παρατήρηση αυτή δεν επεξηγείται περισσότερο σε αυτό το σημείο καθώς τα σχετικά



δεδομένα για όλα τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην διδακτορική διατριβή αναλύονται και τυγχάνουν ειδικής επεξεργασίας στην §14.6.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 14.10β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.10γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) έγινε αποκορεσμός για τιμές της μύζησης μεταξύ 2 και 4 MPa<sup>6</sup>. Συναξιολογώντας την εικόνα από το Σχ. 14.10δ συνέβη πράγματι ο αποκορεσμός και είναι σταδιακή και πάλι η μετάβαση από την ευθεία  $S_r = 100\%$  στην ευθεία κλίσης  $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$ , η οποία μάλιστα είναι διαφορετική για κάθε χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, αφού για κάθε καμπύλη ήταν διαφορετικός ο παραμένων λόγος κενών (για τον πολτό 0.46, για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 62.5 kPa 0.44, για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 500 kPa 0.43, και τέλος για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 4000 kPa 0.33). Τέλος από τα Σχ. 14.10ε και 14.10στ προκύπτει ότι και το ποσοστό υγρασίας και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνονται με την μύζηση με σημαντικό ρυθμό, διαφορετικό για κάθε καμπύλη στο ίδιο αυτό υλικό, η οποία όμως τελικά καταλήγει στον ίδιο κοινό κλάδο μετά τον αποκορεσμό. Είναι δε χαρακτηριστική η ταύτιση της προέκτασης της καμπύλης του πολτού για χρήση της μεθόδου που περιγράφηκε παραπάνω στον μεγάλο θάλαμο μύζησης, με την καμπύλη που προέκυψε από μετρήσεις σε τροποποιημένο κελί Tempe. Και για αυτό το υλικό λοιπόν εάν επιχειρείτο η προσομοίωση των διαφόρων καμπυλών του Σχ. 14.10 θα παρουσιαζόταν η ανάγκη για διαφορετικές τιμές παραμέτρων προσομοίωσης για όλες τις καμπύλες εκτός από την καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης. Ενώ δηλαδή η διαφοροποίηση του αρχικού λόγου κενών οδηγεί σε διαφορετικές καμπύλες όπως λόγου κενών-μύζησης, ποσοστού υγρασίας-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης δεν φαίνεται να μεταβάλλει την καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης και συγκεκριμένα την μύζηση αποκορεσμού και την θέση και κλίση του κλάδου της καμπύλης μετά τον αποκορεσμό. Και εδώ λοιπόν φαίνεται να υποστηρίζεται το συμπέρασμα για την άργιλο Αμαρουσίου, δηλ. ότι μεταβολή του λόγου κενών μόνο λόγω συμπίεσης, χωρίς την ύπαρξη άλλων, γεωλογικού χαρακτήρα, αιτίων της μεταβολής της δομής των υλικών μοιάζει να μην μεταβάλλει την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης παρόλο που την μεταβάλλει σε όρους λόγου κενών-μύζησης (μηχανική συμπεριφορά σε όρους τάσεων-παραμορφώσεων) και σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης (μηχανική συμπεριφορά σε ό,τι αφορά την διαπερατότητα).

<sup>6</sup> Εκτιμάται ότι για την καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης των δοκιμών που είχαν συμπιεστεί ως τα 62.5 kPa, οι τιμές που είναι μικρότερες του 100% στην αρχή πρέπει μάλλον να αποδοθούν σε σφάλμα μέτρησης.



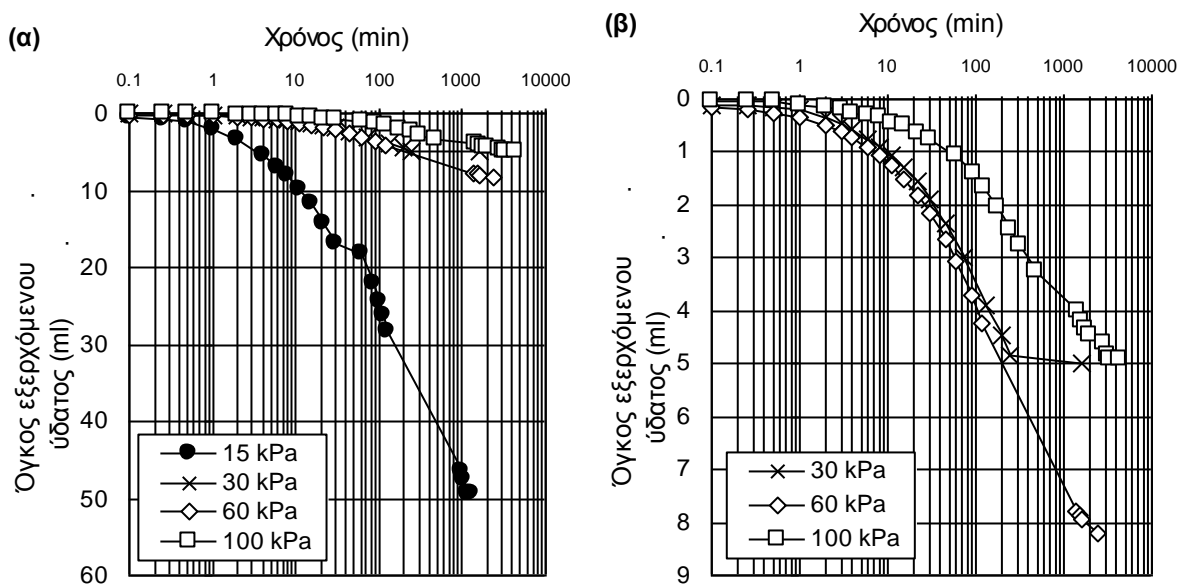
**Σχήμα 14.10.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Ορεστιάδας Έβρου. Οι γραμμές στα σχήματα (β) και (δ) αναπαριστούν τις θεωρητικές καμπύλες που αντιστοιχούν στο ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών του υλικού και τον λόγο κενών του στο όριο συρρίκνωσης (ιδέ κείμενο).

Στην §4.3.2 του 1<sup>ου</sup> Μέρους παρουσιάστηκε το τροποποιημένο κελί που χρησιμοποιήθηκε για να γίνουν οι μετρήσεις που παρατίθενται στο Σχ. 14.10ε (όπως και το κανονικό όπως διατίθεται από την Soilmoisture Inc.) –Φωτ. 4.1 και 4.2 για το τροποποιημένο και το κανονικό κελί αντίστοιχα, η Φωτ. 4.1 παρουσιάζεται και στο παρόν κεφάλαιο ως Φωτ. 14.11α. Η αρχή της τροποποίησης βασίζεται στην παρεμβολή μεταξύ της βάσης και του καπακιού του κελιού Tempre ενός διάφανου σωλήνα, ικανού να αντέχει πίεση μέχρι 100 kPa που είναι η πίεση διεύσδυσης αέρα των κεραμικών πορολίθων των κελιών Tempre, αντί για τον μεταλλικό δακτύλιο των κανονικών κελιών (βλ. Φωτ. 4.2 1<sup>ου</sup> Μέρους της διατριβής). Πράγματι λοιπόν τοποθετήθηκε ένας τέτοιος ακρυλικός σωλήνας εσωτερικής διαμέτρου 50 mm και εξωτερικής 60 mm (πάχους δηλ. 5 mm), με την κατάλληλη μηχανουργική επεξεργασία των άκρων του σωλήνα ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν η βάση και το καπάκι του διατιθέμενου κελιού Tempre. Επί της εξωτερικής επιφάνειας του σωλήνα δε προσαρμόστηκε διακριβωμένος κανόνας ακρίβειας μέτρησης 0.05mm και η έξοδος του κελιού Tempre στη βάση διαμορφώθηκε έτσι ώστε να μπορεί να εξέρχεται το νερό προς μπιρέτα στην οποία μπορούσε να μετρηθεί ο εξερχόμενος όγκος αλλά και να υπάρχει δυνατότητα εκκένωσης της μπιρέτας μέχρι χαμηλότερης στάθμης εάν διακρινόταν πιθανότητα υπερχειλίσης (κατά τα περιγραφόμενα στην §4.3.2 του 1<sup>ου</sup> Μέρους). Η διάταξη αυτή επιτρέπει την τοποθέτηση με χωνί πολτού αναζυμωμένου εδάφους εντός του σωλήνα. Έτσι υλοποιήθηκε μία διάταξη στην οποία μπορούσε να μετρηθεί και ο όγκος του εξερχόμενου νερού (μπιρέτα) αλλά και η μεταβολή του ύψους του δοκιμίου του πολτού (κανόνας στην εξωτερική επιφάνεια του ακρυλικού σωλήνα). Το σκεπτικό σε ό,τι αφορά τη δεύτερη δυνατότητα ήταν ότι εάν το δοκίμιο για χαμηλές τιμές της μύζησης παραμένει αρκετά μαλακό, τότε πιθανόν να παραμορφώνεται μόνο κατακόρυφα οπότε ο κανόνας θα επέτρεπε ουσιαστικά τη μέτρηση της μεταβολής όγκου στον πολτό (γι' αυτόν το λόγο άλλωστε και η εσωτερική επιφάνεια του ακρυλικού σωλήνα λιπαινόταν επιμελώς ώστε να μην υπάρχει τριβή που θα εμπόδιζε την ελεύθερη παραμόρφωση του πολτού κατά την ξήρανσή του). Αυτό αποδείχθηκε ότι εάν δεν είναι επαρκής η λίπανση είναι αδύνατον λόγω εμφάνισης ρωγμών, όπως αυτή στο δοκίμιο της Φωτ. 14.11γ, ενώ ακόμα και εκεί που η λίπανση ήταν επαρκής αρχικά μπορεί να συγκεντρωθεί νερό στην επιφάνεια του δοκιμίου λόγω καθίζησης των σωματιδίων εντός του πολτού (Φωτ. 14.11δ) ενώ στη συνέχεια σε όλα τα δοκίμια τελικά αποδεικνύεται ότι δεν μεταβάλλεται μόνο το ύψος των δοκιμίων αλλά αποκολλώνται και από τα τοιχώματα του σωλήνα (Φωτ. 14.11ε) οπότε η μέτρηση μόνου του ύψους του δοκιμίου μέσω του κανόνα δεν επιτρέπει τον υπολογισμό της μεταβολής όγκου.



**Φωτογραφία 14.11.** α) Διάταξη τροποποιημένου κελιού Tempre, β) χωρίς το καπάκι και τοποθετημένο το χωνί για την εισαγωγή πολτού, γ) λεπτομέρεια δοκιμίου στο οποίο εμφανίστηκε διαμπερές διαμήκης ρωγή λόγω ελλιπούς λίπανσης της εσωτερικής παρειάς, δ) λεπτομέρεια συρρίκνωσης πολτού στην επιφάνεια του οποίου υπάρχει νερό (διακρίνεται το σημείο από το οποίο άρχισε η συρρίκνωση), και ε) το ίδιο δοκίμιο μετά από αποκόλληση του δοκιμίου από την εσωτερική παρειά του σωλήνα.

Παρόλο που η διάταξη που υλοποιήθηκε τελικά δεν επέτρεψε και τον υπολογισμό των μεταβολών όγκου των πολτών κατά την ξήρανσή τους, επέτρεψε ωστόσο την παρακολούθηση της χρονικής μεταβολής του όγκου του νερού που εξέρχεται από το δοκίμιο σε κάθε επιβαλλόμενη μύζηση. Στο Σχ. 14.11 παρουσιάζονται οι καμπύλες όγκου εξερχόμενου νερού-χρόνου για τον πολτό της Αργίλου Ορεστιάδας Έβρου. Όπως συμβαίνει και στα δοκίμια αναζυμωμένων εδαφικών υλικών που υποβάλλονται σε δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης, για την μικρότερη τιμή της μύζησης εμφανίστηκε η μεγαλύτερη έξοδος όγκου νερού (Σχ. 14.11α) με τις αντίστοιχες μεταβολές για τις μεγαλύτερες τιμές της μύζησης να είναι μικρότερες αλλά παραπλήσιες μεταξύ τους (Σχ. 14.11β). Ο απαιτούμενος χρόνος για τη σταθεροποίηση της ποσότητας του νερού που εξήλθε κυμαίνεται μεταξύ 24 και 48 ωρών. Με βάση την βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αυτή είναι η πρώτη παρουσίαση διεθνώς στοιχείων για τη χρονική εξέλιξη της απώλειας ύδατος κατά την επιβολή μύζησης σε πολτούς αναζυμωμένων εδαφών.



**Σχήμα 14.11.** Καμπύλες όγκου εξερχόμενου ύδατος-χρόνου α) για όλες τις τιμές μύζησης που επιβλήθηκαν στον πολτό της Αργίλου Ορεστιάδας Έβρου στο τροποποιημένο κελί Tempe, και β) για τις τιμές 30 έως 100 kPa.

### 14.3.9 Αργίλος Αμφιλοχίας

Τα δείγματα της Αργίλου Αμφιλοχίας ήταν διαταραγμένα κατά το χρόνο απόκτησής τους αν και προερχόμενα από ερευνητική γεώτρηση. Έτσι και εδώ δεν ήταν δυνατός ο προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του φυσικού υλικού αλλά λόγω της ακόμα μεγαλύτερης τιμής του ορίου υδαρότητας του υλικού επιλέχθηκε να μετρηθούν και εδώ οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού όπως και στην Άργιλο Αμαρουσίου και την Άργιλο Ορεστιάδας Έβρου, δηλ. στον πολτό του αναζυμωμένου υλικού και στο υλικό αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο σε τρεις διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης τάσης: 62.5, 500 και 4000 kPa, προς εξαγωγή των αντίστοιχων συμπερασμάτων με την Άργιλο Αμαρουσίου και την Άργιλο Ορεστιάδας Έβρου για ένα εδαφικό υλικό ακόμα μεγαλύτερου ορίου υδαρότητας. Τονίζεται ότι πρόκειται για το πιο πλαστικό υλικό από τα μέχρι αυτό το σημείο της διατριβής εξετασθέντα εδαφικά υλικά και αυτό είχε ως αποτέλεσμα ότι προκειμένου για τον πολτό του αναζυμωμένου εδάφους ήταν πρακτικά αδύνατο για τιμές της μύζησης μικρότερες των 300 kPa να μεταχειριστεί κάποιος τα δοκίμια αφού ήταν εξαιρετικά μαλακά.

Στο Σχ. 14.12 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Αμφιλοχίας. Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.12α (μύζηση-λόγος κενών) ο λόγος κενών του εδαφικού αυτού υλικού κατά την απώλεια υγρασίας του φαίνεται να μειώνεται με την μύζηση τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερη τιμή είχε αρχικά. Προκειμένου για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 62.5 kPa από το 1.20 στο 0.66, για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 500 kPa από το 1.00 στο 0.53, και τέλος για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 4000 kPa από το 0.92 στο 0.47 (οι καταληκτικές τιμές του λόγου κενών για τιμές της μύζησης από 20 έως 120 MPa). Προκειμένου για τον πολτό αναζυμωμένης Αργίλου Αμφιλοχίας ο λόγος κενών μειώθηκε από μια αρχική τιμή κυμαινόμενη από 2.2 έως 2.6 (ανάλογα με διαφορές στην υγρασία και την μεταβολή του ορίου υδαρότητας του υλικού) στο 0.65-0.70. Για τον πολτό τα στοιχεία είναι λιγότερα για να διατυπωθούν αριθμητικά δεδομένα με υψηλότερη ακρίβεια.

Για να μπορεί να γίνει καλύτερα η αξιολόγηση των καμπυλών λόγου κενών-μύζησης που παρουσιάζονται στο Σχ. 14.12α, στο ίδιο σχήμα δείχνεται ταυτόχρονα και η καμπύλη λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης από μία από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης για την προετοιμασία των δοκιμίων που συμπίεστηκαν ως τα 4000 kPa και στη συνέχεια μετρήθηκε σε αυτά η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Η καμπύλη λόγου κενών-μύζησης του πολτού απέχει πολύ λίγο από το σμήνος των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης αλλά αυτό θα

μπορούσε να αποδοθεί σε διαφορές στην υγρασία του πολτού (άλλος χρησιμοποιήθηκε για τα δοκίμια πολτού που μετρήθηκε η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού του πολτού και άλλος για την παρασκευή των τριών δοκιμίων που συμπίεστηκαν ως τα 4000 kPa) και στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τον ένα και τον άλλο πολτό. Και πάλι όμως από τα 200 kPa και μετά μέχρι τα 1500 kPa η καμπύλη αυτή ταυτίζεται πρακτικά με την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης. Οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμίων που συμπίεστηκαν μέχρι κάποια τιμή της τάσης υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως ξεκινούν για χαμηλές τιμές της μύζησης αισθητά μακριά από την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης παρουσιάζοντας έναν πρώτο κλάδο μικρότερης κλίσης, συνεχίζοντας σε έναν κλάδο μεγαλύτερης κλίσης και καταλήγοντας σε ένα πρακτικά οριζόντιο τμήμα όπου έχει σταθεροποιηθεί ο λόγος κενών στο εύρος τιμών της μύζησης 20 έως 120 MPa. Στην καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης παρατίθεται εκτός από τον κλάδο της φόρτισης και ο κλάδος της αποφόρτισης. Ειδικά οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμίων που είχαν συμπεσεί μέχρι τα 500 και τα 4000 kPa, μοιάζουν να έχουν, η μεν πρώτη έναν κλάδο μέχρι τα 500 kPa μύζησης με κλίση παρόμοια με αυτή του κλάδου αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης και μετά έναν κλάδο που ακολουθεί τον κλάδο φόρτισης της καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης, η δε δεύτερη μοιάζει να έχει μόνο έναν κλάδο που αντιστοιχεί στην «επαναφόρτιση» από τον κλάδο αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι μηδενική τιμή της κατακόρυφης τάσης. Περισσότερα για αυτές τις συγκρίσεις παρατίθενται για όλα τα εδαφικά υλικά στα οποία μετρήθηκαν χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού στην §14.4.

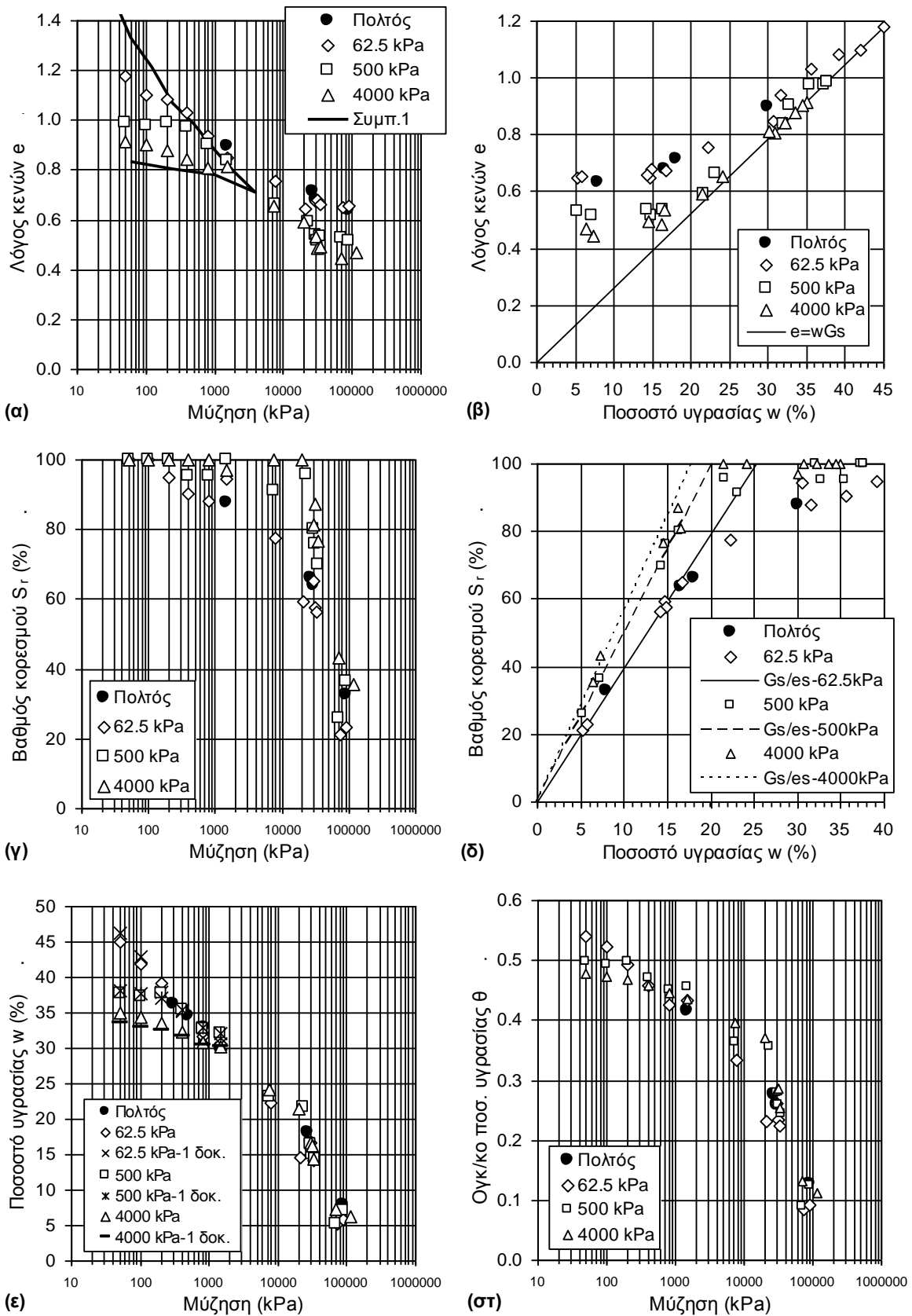
Όπως φαίνεται και από το Σχ. 14.12α και από το Σχ. 14.12β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) η τιμή του παραμένοντος λόγου κενών αλλάζει με την μεταβολή της αρχικής τιμής του λόγου κενών. Η παρατήρηση αυτή δεν επεξηγείται περισσότερο σε αυτό το σημείο καθώς τα σχετικά δεδομένα για όλα τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην διδακτορική διατριβή αναλύονται και τυγχάνουν ειδικής επεξεργασίας στην §14.6.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 14.12β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.12γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) έγινε αποκορεσμός για διάφορα εύρη τιμών της μύζησης. Αντίθετα όμως από ό,τι φάνηκε προηγουμένα για την Άργιλο Αμαρουσίου και την Άργιλο Ορεστιάδας Έβρου που οι μεν καμπύλες λόγου κενών-μύζησης ήταν διαφορετικές αλλά οι καμπύλες βαθμού κορεσμού-μύζησης ήταν πρακτικά κοινές, στην Άργιλο Αμφιλοχίας παρατηρείται για πρώτη φορά ότι πέρα από τη σαφή διάκριση μεταξύ των καμπυλών λόγου κενών-μύζησης για διάφορες αρχικές συνθήκες πριν την έναρξη της ξήρανσης, υπάρχει αντίστοιχη διάκριση και μεταξύ των

καμπυλών βαθμού κορεσμού-μύζησης. Σε αυτές τις καμπύλες βέβαια δεν παρατηρείται καταρχήν μία σαφής τάση ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες αλλά για τον πολτό ο αποκορεσμός επήλθε σαφώς για μικρότερες τιμές της μύζησης από 1500 kPa (υπενθυμίζεται ότι κατέστη αδύνατον να γίνουν μετρήσεις ολικού όγκου για μικρότερες τιμές της μύζησης από αυτήν), για το υλικό που είχε συμπιεστεί μέχρι τα 62.5 kPa ο αποκορεσμός επήλθε μεταξύ 100 και 200 kPa, για το υλικό που είχε συμπιεστεί μέχρι τα 500 kPa ο αποκορεσμός επήλθε μεταξύ 1.5 και 8 MPa και τέλος για το υλικό που είχε συμπιεστεί μέχρι τα 4000 kPa ο αποκορεσμός επήλθε μεταξύ 20 και 30 MPa. Συναξιολογώντας την εικόνα από το Σχ. 14.12δ συνέβη πράγματι ο αποκορεσμός και είναι σταδιακή και πάλι η μετάβαση από την ευθεία  $S_r = 100\%$  στην ευθεία κλίσης  $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$ , η οποία μάλιστα είναι διαφορετική για κάθε χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, αφού για κάθε καμπύλη ήταν διαφορετικός ο παραμένων λόγος κενών (για τον πολτό 0.65-0.70, για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 62.5 kPa 0.66, για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 500 kPa 0.53, και τέλος για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 4000 kPa 0.47). Τέλος από τα Σχ. 14.12ε και 14.12στ προκύπτει ότι και το ποσοστό υγρασίας και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνονται με την μύζηση με σημαντικό ρυθμό, διαφορετικό για κάθε καμπύλη στο ίδιο αυτό υλικό, η οποία όμως τελικά καταλήγει στον ίδιο κοινό κλάδο μετά τον αποκορεσμό. Είναι δε χαρακτηριστική η ταύτιση των καμπυλών ποσοστού υγρασίας-μύζησης αντίστοιχα για κάθε δοκίμιο συμπιεσμένο στην ίδια κατακόρυφη τάση αρχικά, όπως μετρήθηκαν σε ξεχωριστά δοκίμια με ταυτόχρονη μέτρηση και του ολικού όγκου μέσω εμβάπτισης σε λιωμένη παραφίνη και στο ίδιο δοκίμιο μέσω παρακολούθησης του βάρους του κατά την ξήρασή του και μέτρησης του ποσοστού υγρασίας του μόνο μετά την επιβολή της τελευταίας τιμής της μύζησης.

Για αυτό το υλικό λοιπόν εάν επιχειρείτο η προσομοίωση των διαφόρων καμπυλών του Σχ. 14.12 θα παρουσιαζόταν η ανάγκη για διαφορετικές τιμές παραμέτρων προσομοίωσης για όλες τις καμπύλες περιλαμβανομένης και της καμπύλης βαθμού κορεσμού-μύζησης. Δηλαδή σε αυτό το υλικό παρατηρήθηκε ότι η διαφοροποίηση του αρχικού λόγου κενών οδηγεί σε διαφορετικές καμπύλες λόγου κενών-μύζησης, ποσοστού υγρασίας-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης αλλά και βαθμού κορεσμού-μύζησης και συγκεκριμένα διαφορετική μύζηση αποκορεσμού και διαφορετική θέση και κλίση του κλάδου της καμπύλης βαθμού κορεσμού-μύζησης μετά τον αποκορεσμό. Επισημαίνεται ότι δεδομένου ότι αυτό το υλικό είναι το υλικό με την υψηλότερη πλαστικότητα διατηρούνται κάποιες επιφυλάξεις για αυτά τα αποτελέσματα, αφού για υλικά μικρότερης πλαστικότητας δεν παρατηρήθηκε αντίστοιχος διαχωρισμός των καμπυλών βαθμού κορεσμού-μύζησης. Αυτά τα αποτελέσματα απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση.





**Σχήμα 14.12.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Αμφιλοχίας. Οι γραμμές στα σχήματα (β) και (δ) αναπαριστούν τις θεωρητικές καμπύλες που αντιστοιχούν στο ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών του υλικού και τον λόγο κενών του στο όριο συρρίκνωσης (ιδέ κείμενο).

Το μεγάλο όριο υδαρότητας της Αργίλου Αμφιλοχίας και η μεγάλη της πλαστικότητα φάνηκε ήδη να επηρεάζει την παρατηρούμενη συμπεριφορά κατά τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού ως προς τη διάκριση και των καμπυλών βαθμού κορεσμού-μύζησης (εκτός και από τις υπόλοιπες καμπύλες) ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες προ έναρξης ξηράνσεως. Η διαφοροποίηση αυτή κρίθηκε αρκετά σημαντική για να επιχειρηθεί η διερεύνηση και άλλων παραμέτρων μεταβολής της δομής των υλικών εκτός από τη μεταβολή του λόγου κενών μέσω συμπίεσης όπως διερευνήθηκε έως αυτό το σημείο για τρία διαφορετικά υλικά. Στο υλικό αυτό λοιπόν επιχειρήθηκε η εισαγωγή με τεχνητό τρόπο δομής λόγω σιμέντωσης αλλά και ερπυσμού (αυτή η δεύτερη μάλιστα διερεύνηση υπήρξε τελικά προαπαιτούμενο για την ορθή και πλήρη διερεύνηση ως προς την τεχνητή εισαγωγή σιμέντωσης) υπό ελεγχόμενες συνθήκες πριν επιχειρηθεί η μέτρηση χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού και σε φυσικά εδαφικά υλικά με δομή. Αναζητήθηκε λοιπόν αρχικά μία χημική ουσία, η οποία αναμιγνυόμενη με την Άργιλο Αμφιλοχίας θα μπορούσε να δημιουργήσει δομή λόγω σιμέντωσης. Δύο προφανείς επιλογές –και μάλιστα συνηθισμένες σε πρακτικές βελτίωσης των ιδιοτήτων τόσο πλαστικών υλικών όσο η Άργιλος Αμφιλοχίας- ήταν το τσιμέντο και η υδράσβεστος<sup>7</sup>. Παρόλο που η δεύτερη γενικά κρίνεται καλύτερη για τη βελτίωση τόσο πλαστικών υλικών λόγω της μακροχρόνιας συνεχούς βελτίωσης των ιδιοτήτων του προς βελτίωση υλικού, αυτή ακριβώς η μακροχρόνια συνεχής βελτίωση των ιδιοτήτων του μίγματος μέχρι σταθεροποίησης των ιδιοτήτων του οδήγησε στην απόρριψή της υδρασβέστου για να μην εισαχθούν τόσο μεγάλοι χρόνοι αναμονής όσο οι απαιτούμενοι και φυσικά να δεσμευτούν συσκευές για τόσο μεγάλα χρονικά διαστήματα. Έτσι επιλέχθηκε το τσιμέντο και συγκεκριμένα κοινό τσιμέντο τύπου Portland το οποίο αναμίχθηκε με Άργιλο Αμφιλοχίας σε ποσοστό 6% (επί του ξηρού βάρους της αργίλου προ της ανάμιξης με νερό). Ενώ λοιπόν είχαν εκτελεστεί οι δοκιμές προπαρασκευής δοκιμίων μετά από συμπίεση στα 62.5, 500 και 4000 kPa καταστρώθηκε το εξής πρόγραμμα παρασκευής νέων δοκιμίων:

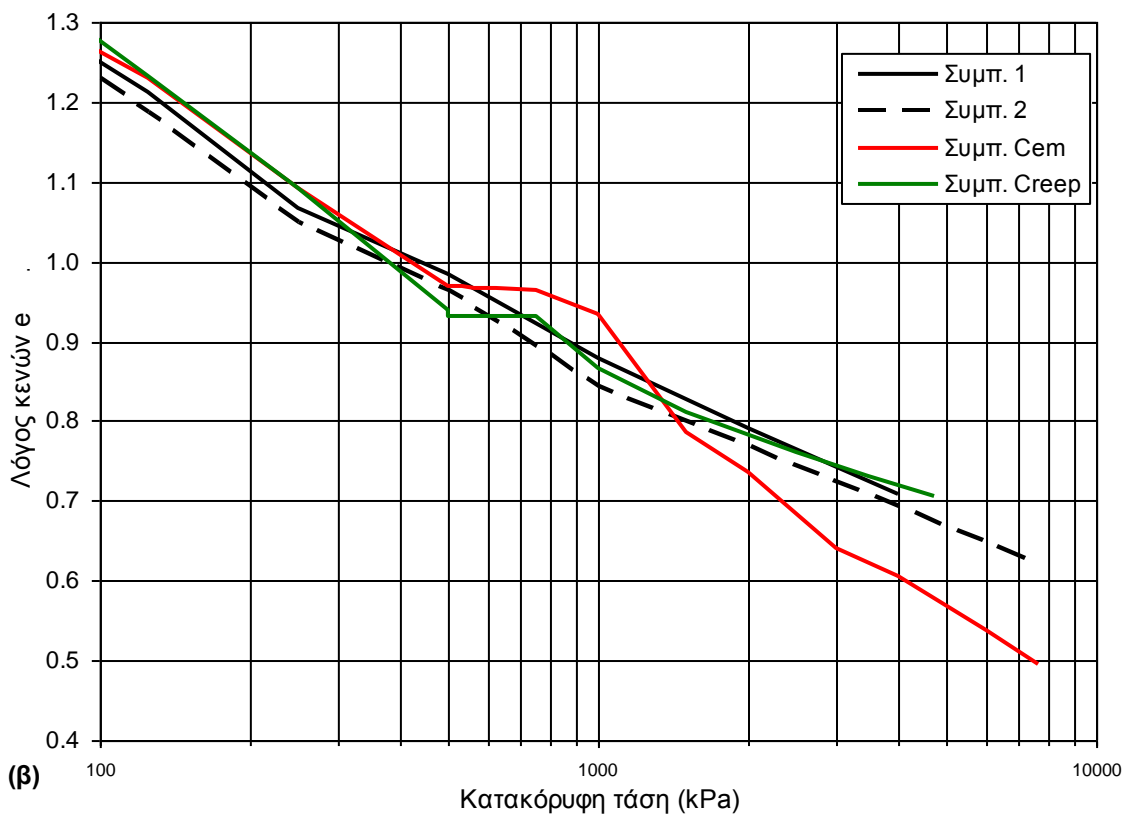
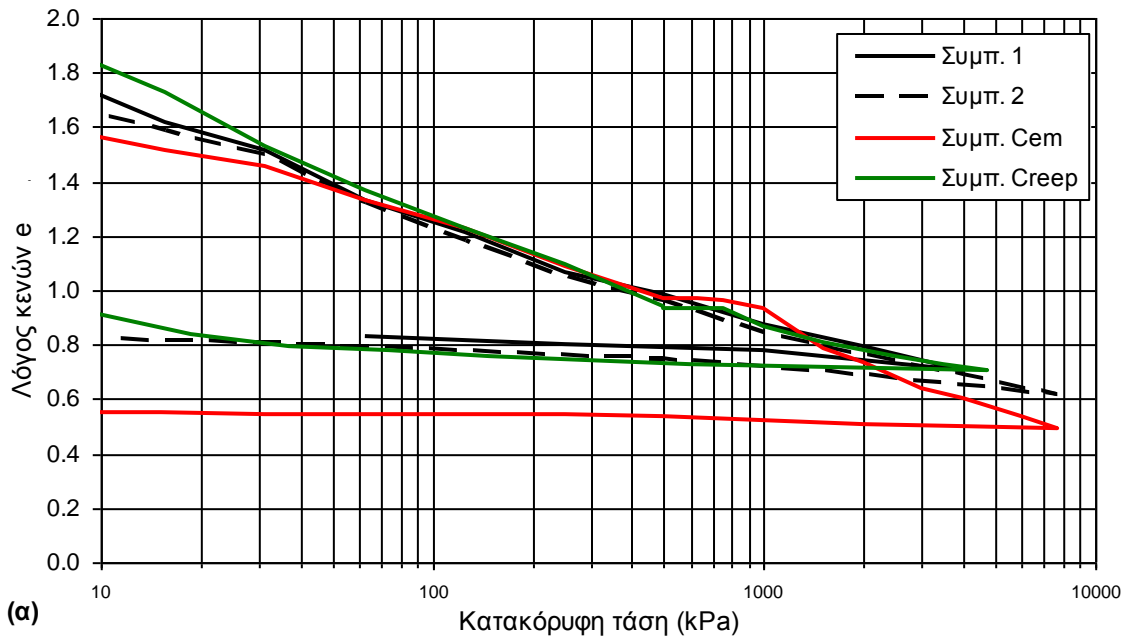
- ο παρασκευάστηκε ένα δοκίμιο από αναζυμωμένη άργιλο το οποίο συμπίεστηκε έως τα 500 kPa και αποφορτίστηκε (όπως τα δοκίμια στα οποία είχε μετρηθεί ήδη η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού) με σκοπό τη σύγκριση με τις προηγούμενες χαρακτηριστικές καμπύλες για το συγκεκριμένο δείγμα υλικού συμπιεσμένο έως αυτήν την τάση,

---

<sup>7</sup> Η επιλογή της ιπτάμενης τέφρας απορρίφθηκε εξ αρχής λόγω μεγάλης ανάγκης διερεύνησης των ιδιοτήτων αυτού καθεαυτού του υλικού αυτού πριν και από τη διερεύνηση της επιρροής του στη δομή της Αργίλου Αμφιλοχίας μετά την ανάμιξή τους.

- ένα δοκίμιο από αναζυμωμένη άργιλο το οποίο συμπίεστηκε έως τα 7600 kPa για να υπάρχει η πλήρης καμπύλη εγγενούς συμπίεσης μέχρι ακόμα μεγαλύτερη κατακόρυφη τάση,
- ένα δοκίμιο της αργίλου αναμεμειγμένης με τσιμέντο σε ποσοστό 6%, το οποίο συμπίεστηκε έως τα 500 kPa, αφέθηκε σε αυτήν την τάση για 14 ημέρες για να γίνει «ωρίμανση» και στη συνέχεια αποφορτίστηκε για να υποβληθεί σε ξήρανση και να μετρηθεί και σε αυτό η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού,
- ένα δοκίμιο της αργίλου αναμεμειγμένης με τσιμέντο σε ποσοστό 6%, το οποίο συμπίεστηκε έως τα 500 kPa, αφέθηκε σε αυτήν την τάση για 14 ημέρες για να γίνει «ωρίμανση» και στη συνέχεια φορτίστηκε προοδευτικά μέχρι τα 7600 kPa για να διαπιστωθεί το μέγεθος της επιρροής της προσθήκης του τσιμέντου στη δομή της αργίλου,
- δύο δοκίμια από αναζυμωμένη άργιλο –χωρίς τσιμέντο- τα οποία συμπίεστηκαν έως τα 500 kPa, αφέθηκαν σε αυτήν την τάση για 14 ημέρες, όπως και το δοκίμιο στο οποίο προστέθηκε τσιμέντο, και το ένα αποφορτίστηκε για να υποβληθεί σε ξήρανση και να μετρηθεί και σε αυτό η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, ενώ το άλλο φορτίστηκε προοδευτικά ξεκινώντας από μικρές μεταβολές της κατακόρυφης τάσης από τα 500 kPa και μετά μέχρι τα 4800 kPa για να διαπιστωθεί το μέγεθος της επιρροής του ερπυσμού επί 14 ημέρες στη δομή της αργίλου.

Η τάση των 500 kPa επιλέχθηκε γιατί αναγνωρίστηκε έγκαιρα ότι κατά την «ωρίμανση» της επιρροής του προσμίκτη, τα φαινόμενα είναι ταυτόχρονα δύο: και η «ωρίμανση» του μίγματος τσιμέντου-αργίλου υπό την κατακόρυφη αυτή τάση αλλά και ο ερπυσμός. Έτσι εκτός από τις δοκιμές στο μίγμα αργίλου-τσιμέντου θα έπρεπε να γίνουν δοκιμές και σε δοκίμια της αργίλου χωρίς ανάμιξη με τσιμέντο αλλά που έχουν παραμείνει υπό σταθερή κατακόρυφη τάση για αυτό το χρονικό διάστημα. Με αυτό το σκεπτικό λοιπόν, η τάση των 62.5 kPa (για την οποία είχε ήδη μετρηθεί η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού) κρίθηκε πολύ μικρή και ενδεχομένως σε αυτήν θα αποδεικνυόταν ότι δεν ήταν μεγάλη η επιρροή του ερπυσμού. Από την άλλη πλευρά, στην τάση των 4000 kPa θα ήταν μεν πολύ πιο μεγάλη η επιρροή του ερπυσμού αλλά δεν θα υπήρχε διαθέσιμο «περιθώριο» για την κατάρρευση της δημιουργούμενης δομής, είτε λόγω ερπυσμού, είτε λόγω σιμέντωσης, μέχρι τα 7600 kPa που ήταν η μέγιστη δυνατή εφαρμοζόμενη τάση στον συνδυασμό κλινών φόρτισης-κυψελών του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. που πραγματοποιήθηκαν οι εν λόγω δοκιμές. Έτσι τελικά επιλέχθηκε η κατακόρυφη τάση των 500 kPa και τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης παρουσιάζονται στο Σχ. 14.13. Στο Σχ. 14.13α παρουσιάζονται οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης σε πολύ της



**Σχήμα 14.13.** Καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης της Αργίλου Αμφιλοχίας αναζυμωμένης σε ποσοστό υγρασίας  $1.5 \times w_L$ , αναζυμωμένης στο ίδιο ποσοστό υγρασίας με άφεση υπό σταθερή τάση 500 kPa για 14 ημέρες, και αναζυμωμένης μετά από ανάμιξη σε ποσοστό 6% με τσιμέντο και άφεσή της υπό σταθερή τάση 500 kPa για 14 ημέρες, α) σε όλο το εύρος της κατακόρυφης τάσης και λόγου κενών και με τους κλάδους αποφόρτισης, και β) σε εύρος κατακόρυφης τάσης από 100 έως 10000 kPa και λόγου κενών από 0.4 έως 1.3 για να τονιστεί η επιρροή του ερπυσμού και της ανάμιξης με τσιμέντο.

Αργίλου Αμφιλοχίας με ποσοστό υγρασίας  $1.5 \times w_L$ , πολτό στο ίδιο ποσοστό υγρασίας με άφεση υπό σταθερή τάση 500 kPa για 14 ημέρες, και πολτό μετά από ανάμιξη σε ποσοστό 6% με τσιμέντο και άφεσή του υπό σταθερή τάση 500 kPa για 14 ημέρες, σε όλο το εύρος της κατακόρυφης τάσης και λόγου κενών και με τους κλάδους αποφόρτισης. Στο Σχ. 14.13β παρουσιάζονται οι ίδιες καμπύλες σε εύρος κατακόρυφης τάσης από 100 έως 10000 kPa και λόγου κενών από 0.4 έως 1.3 για να τονιστεί η επιρροή του ερπυσμού και της ανάμιξης με τσιμέντο (και για αυτό δεν δείχνονται και οι κλάδοι αποφόρτισης). Πράγματι λοιπόν το δοκίμιο της αργίλου που αναμίχθηκε με τσιμέντο επιδεικνύει σαφή ανάπτυξη δομής, με τάση διαρροής περί τα 900 kPa και πολύ ραγδαία καταστροφή της δομής αυτής (πρακτικά μέχρι τα 1500 kPa παρόλο που «υπολείμματα» ίσως παραμένουν στην «ιστορία» του υλικού μέχρι και τα 3000 kPa), ενώ το δοκίμιο της αργίλου που είχε μόνο ερπυσμό, επιδεικνύει μεν ανάπτυξη δομής και εκείνο αλλά σαφώς μικρότερης. Συγκεκριμένα η τάση διαρροής είναι περίπου 750 kPa και η «καταστροφή» της ολοκληρώθηκε μέχρι τα 1000 kPa. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ότι μετά την «καταστροφή» της δομής του υλικού που είχε υποστεί ερπυσμό, η καμπύλη του πρακτικά ταυτίζεται με τις καμπύλες των δύο δοκιμίων αναζυμωμένου υλικού, ενώ του υλικού που είχε σιμεντωθεί καταλήγει σε έναν κλάδο μεγαλύτερης κλίσης. Αυτό μοιάζει καταρχήν αντιφατικό δεδομένου ότι το μίγμα αργίλου Αμφιλοχίας-τσιμέντου έχει σαφώς μικρότερο όριο υδαρότητας και δείκτη πλαστικότητας από την άργιλο Αμφιλοχίας (45.5% και 10 αντίστοιχα, σε σύγκριση με 84.5% και 47.5). Η συγκεκριμένη παρατήρηση χρήζει περαιτέρω διερεύνησης στα πλαίσια της μελέτης της επιρροής προσμίκτων όπως το τσιμέντο στη μηχανική συμπεριφορά των αργίλων και ειδικά των τόσο πλαστικών όπως η άργιλος Αμφιλοχίας. Από την άλλη πλευρά, οι συγκεκριμένες δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης επιδεικνύουν σαφώς την ανάπτυξη δομής με τεχνητό τρόπο στο αναζυμωμένο υλικό και μεγαλύτερη επιρροή είχε σαφώς η προσθήκη του τσιμέντου σε ποσοστό 6%. Με αυτό ως κύριο δεδομένο μετρήθηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού των αντίστοιχων δοκιμίων παρασκευασμένων μάλιστα με τις ίδιες συνθήκες οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια. Για τον προσδιορισμό των καμπυλών αυτών χρησιμοποιήθηκε και πάλι ο συνδυασμός θαλάμου μύζησης και υδατικών διαλυμάτων αλάτων, αλλά με εφαρμογή των δημιουργούμενων τιμών της μύζησης σε μοναδικά για κάθε διαφορετική κατηγορία και συνθήκη δοκίμια με μέτρηση της μεταβολής του βάρους τους και των διαστάσεων τους στο τέλος της εφαρμογής κάθε τιμής της μύζησης.

Στο Σχ. 14.14 λοιπόν παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Αμφιλοχίας συμπιεσμένης ως τα 500 kPa και αποφορτισμένης μετά από δημιουργία των συνθηκών που περιγράφηκαν προηγουμένως (προσθήκη τσιμέντου και ερπυσμός). Το πρώτο

συμπέρασμα είναι ότι σε όλα τα επιμέρους διαγράμματα του Σχ. 14.14 η καμπύλη που προέκυψε από μετρήσεις σε διαφορετικά δοκίμια (είναι η καμπύλη που παρουσιάστηκε για φόρτιση ως τα 500 kPa στο Σχ. 14.12 –ένδειξη 500 kPa-Initial) και η καμπύλη που προέκυψε από μετρήσεις της μεταβολής όγκου και βάρους σε ένα μόνο δοκίμιο (ένδειξη 500 kPa-Check) ταυτίζονται πρακτικά. Κατά συνέπεια επιβεβαιώθηκε η αξιοπιστία της υιοθετηθείσας μεθόδου για μετρήσεις με παχύμετρο σε ένα μόνο δοκίμιο (αποφεύγοντας βέβαια τις γενικεύσεις καθώς στην συγκεκριμένη περίπτωση επρόκειτο για ένα πολύ πλαστικό και ως εκ τούτου έντονα συρρικνούμενο υλικό κατά την ξήρασή του).

Όπως προκύπτει λοιπόν από το Σχ. 14.14α (μύζηση-λόγος κενών) ο λόγος κενών του εδαφικού αυτού υλικού κατά την απώλεια υγρασίας του φαίνεται να μειώνεται με τη μύζηση περισσότερο στα δοκίμια του υλικού που έχει φορτιστεί μόνο μέχρι τα 500 kPa και αποφορτιστεί αλλά και του ίδιου υλικού έχοντας υποστεί ερπυσμό υπό την ίδια τάση, σε σχέση με το δοκίμιο που είχε σιμεντωθεί λόγω προσθήκης τσιμέντου. Προκειμένου για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 500 kPa, είτε με είτε χωρίς ερπυσμό, ο λόγος κενών μειώθηκε από το 1.00 στο 0.53, ενώ στο σιμεντωμένο δοκίμιο ο λόγος κενών μειώθηκε και πάλι αλλά μόνο από το 1.07 σε μία τιμή περί το 0.80. Ειδικά σε ό,τι αφορά τις καμπύλες λόγου κενών-μύζησης στο υλικό συμπιεσμένο ως τα 500 kPa χωρίς ερπυσμό και στο ίδιο υλικό και με ερπυσμό πρακτικά δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ τους. Από τα υπόλοιπα μάλιστα σχήματα, τα Σχ. 14.14β έως 14.14στ προκύπτει ότι το ίδιο συμπέρασμα ισχύει γενικά για τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού των δύο αυτών διαφορετικών συνθηκών στο ίδιο υλικό συνολικά για την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού τους ανεξάρτητα από τους όρους στους οποίους αυτή εκφράζεται και παρά το γεγονός του ότι αναπτύχθηκε με σαφήνεια δομή λόγω ερπυσμού όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης που παρουσιάστηκαν στο Σχ. 14.13. Για να μπορεί να γίνει καλύτερα η αξιολόγηση των καμπυλών λόγου κενών-μύζησης που παρουσιάζονται στο Σχ. 14.14α, στο ίδιο σχήμα δείχνονται ταυτόχρονα και οι καμπύλες λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης που παρουσιάστηκαν στο Σχ. 14.13.

Όπως φαίνεται και από το Σχ. 14.14α και από το Σχ. 14.14β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) η τιμή του παραμένοντος λόγου κενών αλλάζει λόγω σιμεντώσεως από το 0.53 στα δοκίμια χωρίς δομή λόγω σιμεντώσεως σε 0.80 σε εκείνο που είχε τέτοια δομή. Η παρατήρηση αυτή δεν επεξηγείται περισσότερο σε αυτό το σημείο καθώς τα σχετικά δεδομένα για όλα τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη διδακτορική διατριβή αναλύονται και τυγχάνουν ειδικής επεξεργασίας στην §14.6.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 14.12β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.12γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) έγινε αποκορεσμός για όλα τα δοκίμια, και το δοκίμιο που είχε σιμέντωση αποκορέστηκε σε πολύ χαμηλότερη τιμή της μύζησης μεταξύ 100 και 150 kPa. Η καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης ωστόσο έχει μορφή τέτοια που θα μπορούσε να παραπέμπει σε δύο αρχικά σημεία καμπής, ένα πρώτο πράγματι μεταξύ 100 και 150 kPa αλλά και ένα δεύτερο μεταξύ 1500 και 25000 kPa αφού στο προηγούμενο στάδιο έχει στραμμένα τα κοίλα προς τα πάνω. Η μικρή ακρίβεια με την οποία έχει προσδιοριστεί η καμπύλη, ειδικά μάλιστα στο στάδιο της μετάβασης από τη μέθοδο μετατόπισης άξονα στη μέθοδο υδατικών διαλυμάτων, δεν επιτρέπει την κατηγορηματική διατύπωση αυτής της παρατήρησης, από την άλλη πλευρά ωστόσο στα πλαίσια συνέχισης της έρευνας σχετικά με αυτού του τύπου μίγματα θα έπρεπε να διερευνηθεί το ενδεχόμενο σχηματισμού συσσωματωμάτων όπου τοπικά ενδεχομένως είναι αυξημένη η περιεκτικότητα σε τσιμέντο, οπότε το υλικό επιδεικνύει συμπεριφορά ανάλογη ενός μερικώς κορεσμένου εδάφους όπως αυτή που περιγράφηκε στην §4.2.5. Αυτή η διαφορά που εντοπίζεται στις καμπύλες βαθμού κορεσμού-μύζησης στο Σχ. 14.14γ εντοπίζεται με αντίστοιχο τρόπο και στις καμπύλες βαθμού κορεσμού-ποσοστού υγρασίας στο Σχ. 14.14δ όπου η ευθεία κλίσης  $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$  είναι σαφώς διαφορετική για το σιμεντωμένο υλικό και επίσης όπως και στο Σχ. 14.14γ κατά το στάδιο της μετάβασης από την ευθεία  $S_r=100\%$  στην ευθεία κλίσης  $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$  τα πειραματικά σημεία μοιάζουν να ακολουθούν μία καμπύλη που στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω. Μάλιστα στο Σχ. 14.14δ σχεδιάστηκε και μία ευθεία που αντιστοιχεί σε σταθερό λόγο κενών 1.05 η οποία εφάπτεται πάρα πολύ καλά στο πρώτο σμήνος των σημείων για τιμές μύζησης 150-800 kPa. Αυτή η υπόθεση θα μπορούσε να αποδοθεί στην δομή του υλικού λόγω σιμέντωσης με αποτέλεσμα για αρκετά μεγάλες τιμές της μύζησης (έως 800 kPa) συρρικνώνεται πολύ λίγο (από 1.07 αρχικό λόγο κενών) λόγω της αντίστασης στην συρρίκνωση που οφείλεται στην δομή του λόγω σιμέντωσης και στη συνέχεια αρχίζει να συρρικνώνεται περισσότερο με την αύξηση της μύζησης.

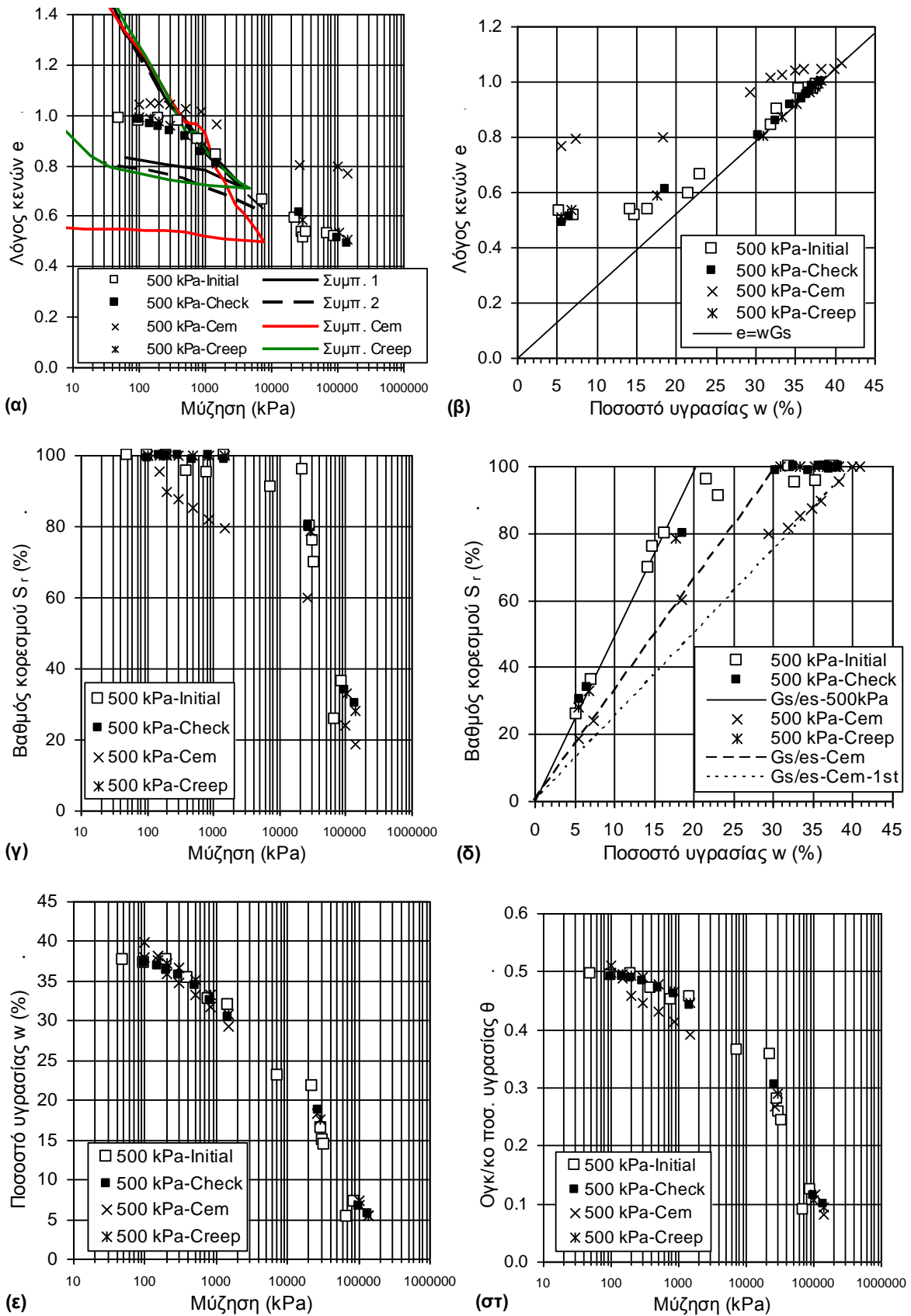
Τέλος από το Σχ. 14.14ε προκύπτει ότι υπάρχουν πολύ μικρές μεταβολές μεταξύ των καμπυλών ποσοστού υγρασίας-μύζησης, και από το Σχ. 14.14στ μόνο αυτές που υπεισέρχονται λόγω των διαφορών στις καμπύλες λόγου κενών-μύζησης μεταξύ δοκιμίων χωρίς δομή λόγω σιμέντωσης και του δοκιμίου με τέτοια δομή.

Κλείνοντας λοιπόν την αναφορά στην επιρροή της δομής που εισήχθη σε αυτό το πολύ πλαστικό αργιλικό υλικό που αποτελεί η άργιλος Αμφιλοχίας μέσω φόρτισης-αποφόρτισης (ως τα 500 kPa), ερπυσμού (μέσω της διατήρησης σταθερής της τάσης στα 500 kPa για 14 ημέρες) και

σιμέντωσης μέσω της ανάμιξης της αργίλου με τσιμέντο σε ποσοστό 6% (και διατήρησης σταθερής της τάσης στα 500 kPa για 14 ημέρες για «ωρίμανση» του μίγματος), σαφή διαφοροποίηση προκάλεσε μόνο η σιμέντωση κάνοντας το σιμεντωμένο υλικό να έχει μικρότερη μύζηση αποκορεσμού (παρά την υποψία ότι αυτή είναι ένα πρώτο σημείο καμψής και ενδέχεται να υπάρχει και δεύτερο) σε πολύ μεγαλύτερη μύζηση, και να αντιστέκεται πολύ περισσότερο στη μεταβολή όγκου λόγω συρρίκνωσης, σε ακριβή αντιστοιχία με την πολύ μικρότερη συμπίεστικότητα του πλήρως κορεσμένου σιμεντωμένου δοκιμίου κατά την υποβολή του σε μονοδιάστατη φόρτιση. Για το σιμεντωμένο υλικό λοιπόν εάν επιχειρείτο η προσομοίωση των διαφόρων καμπυλών του Σχ. 14.14 θα παρουσιαζόταν η ανάγκη για διαφορετικές τιμές παραμέτρων προσομοίωσης για όλες τις καμπύλες περιλαμβανομένης και –ίσως κυρίως- της καμπύλης βαθμού κορεσμού-μύζησης, με μόνη εξαίρεση την καμπύλη ποσοστού υγρασίας-μύζησης. Ειδικά μάλιστα για την καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης, είναι πολύ πιθανόν όχι μόνο να απαιτούνται διαφορετικές τιμές παραμέτρων αλλά και διαφορετικό είδος καμπύλης προσομοίωσης αφού οι καμπύλες του υλικού χωρίς ανάμιξη με τσιμέντο έχουν δύο σημεία καμψής, ενώ αυτή του υλικού με ανάμιξη με τσιμέντο έχει πιθανόν τέσσερα (βλ. §4.2.5).

Τα συμπεράσματα για την επιρροή της δομής όπως αυτή εισήχθη μέσω ερπυσμού και σιμέντωσης σε ένα αργιλικό υλικό πολύ υψηλής πλαστικότητας όπως η άργιλος Αμφιλοχίας πρέπει σε αυτό το στάδιο της έρευνας να θεωρηθούν μόνον ενδεικτικά, ειδικά μάλιστα μετά και τα συμπεράσματα από την επιρροή της δομής φυσικών εδαφικών υλικών όπως αυτή μελετήθηκε στην περίπτωση της Μάργας Κορίνθου, της Μάργας Χαλκουτσίου και του αργιλοποιημένου Ιλυολίθου Πάρνηθας, τα αποτελέσματα για τα οποία παρουσιάζονται στις επόμενες δύο παραγράφους. Σε κάθε περίπτωση η σχετική έρευνα θα πρέπει να συνεχιστεί και σε εδαφικά υλικά παρόμοιας πλαστικότητας αλλά και μικρότερης καθώς και με την ανάμιξη και με άλλα πρόσμικτα εκτός από το τσιμέντο όπως η υδράσβεστος ή και η ιπτάμενη τέφρα (εφόσον έχει προηγηθεί επαρκής έρευνα σε αυτή καθεαυτή την ιπτάμενη τέφρα πριν την ανάμιξή της με άργιλο), αλλά και με την εξέταση άλλων παραγόντων όπως ο χρόνος «ωρίμανσης» αλλά και οι συνθήκες υπό τις οποίες αυτή συμβαίνει (παρουσία φορτίου ή όχι υπό την οποία γίνεται, μέγεθος φορτίου, περίσσεια νερού ή όχι κλπ). Οι δοκιμές που παρουσιάστηκαν σε αυτήν την παράγραφο έγιναν με σκοπό κυρίως να συγκριθεί η επιρροή της τεχνητώς εισαχθείσας δομής με την επιρροή της δομής των φυσικών εδαφικών υλικών και συγκεκριμένα των μαργών που μελετήθηκε στη Μάργα Κορίνθου και στη Μάργα Χαλκουτσίου.





**Σχήμα 14.14.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργ. Αμφιλοχίας μετά από συμπίεση ως τα 500 kPa αλλά και συμπίεση ως την ίδια τάση και υποβολή των δοκιμίων σε ερπυσμό ή/και σιμέντωση.

### 14.3.10 Μάργα Κορίνθου

Έχοντας ήδη προσδιορίσει σημαντικό αριθμό χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού για διάφορα εδαφικά υλικά διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και πλαστικότητας, αλλά και για αρκετά εδαφικά υλικά για διαφορετικές συνθήκες προ έναρξης ξήρανσης (με αποκορύφωμα την περίπτωση της Αργίλου Αμφιλοχίας στην οποία διερευνήθηκε ακόμα και η επιρροή της δομής που εισάγεται τεχνητά μέσω ερπυσμού και σιμέντωσης), ήταν πλέον επιθυμητό σε αυτό το στάδιο της διερεύνησης να βρεθεί ένα εδαφικό υλικό διαθέσιμο σε τέτοιες ποσότητες και ποιότητα δειγματοληψίας που να μπορεί να προσδιοριστεί η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και του φυσικού υλικού. Το πρώτο εδαφικό υλικό που κατέστη διαθέσιμο πληρώνοντας αυτές τις προϋποθέσεις στη διάρκεια της εκτέλεσης του προγράμματος των εργαστηριακών δοκιμών ήταν η Μάργα Κορίνθου.

Από τη Μάργα Κορίνθου υπήρχε διαθέσιμη επαρκής ποσότητα αδιατάρακτου και διαταραγμένου υλικού, οπότε κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και του φυσικού και του αναζυμωμένου-επανασυμπιεσμένου στην επιτόπου τάση εδαφικού υλικού, καθιστώντας δυνατή τη σύγκριση μεταξύ των δύο καμπυλών. Κατά την δειγματοληψία λαμβάνονταν μετρήσεις της τιμής της μύζησης της Μάργας Κορίνθου επιτόπου με χρήση του τενσιομέτρου Quickdraw της SoilMoisture Inc. (Φωτ. 14.12). Από τις μετρήσεις αυτές προέκυψε ότι η τιμή της μύζησης επιτόπου στο σημείο της δειγματοληψίας ήταν περίπου 16 kPa σε ύψος περίπου 0.50 m από την επιφάνεια της θάλασσας και βάθος από την επιφάνεια του πρανούς μέχρι 0.50 m. Για βάθη από την επιφάνεια του πρανούς μεταξύ 0.50 και 1.00 m (μέγιστο βάθος από την επιφάνεια μέχρι το οποίο προχώρησε η δειγματοληψία προστιθεμένου του βάθους διεύθυνσης του τενσιομέτρου) και στο ίδιο ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας η τιμή της μύζησης ήταν περίπου 11 kPa. Οι τιμές αυτές είναι γενικά χαμηλές, πολύ χαμηλές μάλιστα για να υποτεθεί ότι το εδαφικό υλικό επιτόπου ήταν μη κορεσμένο (όπως άλλωστε επιβεβαιώθηκε από το πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών που ακολούθησε). Οι τιμές αυτές ωστόσο ήταν αρκετά μεγάλες για την θέση στην οποία βρισκόταν το υλικό επιτόπου. Στη Φωτ. 14.12 φαίνεται η θέση της δειγματοληψίας μετά την αφαίρεση των δειγμάτων με τοποθετημένο το τενσιόμετρο για τη λήψη της τελευταίας μέτρησης. Στην ίδια φωτογραφία φαίνεται ακριβώς δίπλα η στάθμη της θάλασσας. Τα δείγματα ελήφθησαν από μέσο ύψος από τη στάθμη της θάλασσας 0.1 έως 0.5 m και οι μετρήσεις της μύζησης στη θέση αυτή έγιναν σε ύψος από 0.40 έως 0.50 m. Υποθέτοντας αποκατεστημένη υδραυλική ισορροπία με τη στάθμη υπόγειου ορίζοντα στο 0 (εύλογη παραδοχή λόγω της γειννίας με τη θάλασσα) η μύζηση που θα έπρεπε

να έχει το υλικό είναι 3-4 kPa. Αντίθετα ο μέσος όρος των τιμών έδειξε τις τιμές που προαναφέρθηκαν. Η διαφορά ανάμεσα στις αναμενόμενες και στις μετρηθείσες τιμές είναι πράγματι πολύ μικρή αλλά η υψηλή ακρίβεια μέτρησης του οργάνου και ο σημαντικός αριθμός μετρήσεων καθιστά στατιστικά σημαντική τη διαφορά τους. Κατά συνέπεια το υλικό στη θέση δειγματοληψίας βρέθηκε να διατηρεί μεγαλύτερη τιμή μύζησης από την αναμενόμενη με υπόθεση αποκατάστασης υδραυλικής ισορροπίας το οποίο σημαίνει ότι κατά το χρόνο της δειγματοληψίας βρισκόταν σε διαδρομή ξήρανσης από την αρχική του κατάσταση υπό την επιρροή των ατμοσφαιρικών συνθηκών (η δειγματοληψία έγινε στις 9 Οκτωβρίου 2001 μεταξύ 10:30 και 12:00 μετά από σημαντική περίοδο ανομβρίας). Η επίδραση αυτή δε των ατμοσφαιρικών συνθηκών επιβεβαιώνεται και από τις μεγαλύτερες τιμές μύζησης προς την επιφάνεια του πρανούς σε σχέση με τις τιμές σε μεγαλύτερο βάθος.

Οι παρατηρήσεις αυτές ελήφθησαν υπόψη κατά τις εργαστηριακές δοκιμές που ακολούθησαν. Καταρχάς επέβαλαν την ακόμα προσεκτικότερη προφύλαξη των δοκιμίων αμέσως μετά τη δειγματοληψία αλλά και την πολύ προσεκτική φύλαξή τους στο εργαστήριο. Όλα τα δείγματα τυλίχθηκαν σε διπλή ελαστική μεμβράνη (cling film) και τοποθετήθηκαν σε σκοτεινό υγραντήρα με σχετική υγρασία 100%. Πριν τη διαμόρφωση κάθε δοκιμίου από τα τεμάχια που είχαν μεταφερθεί στο εργαστήριο μετρείτο με το τενσιόμετρο Quickdraw η μύζηση η οποία βρέθηκε κατά μέσο όρο 9-10 kPa επιβεβαιώνοντας την επιτυχή προφύλαξη των δοκιμίων, αφού όχι μόνο δεν αυξήθηκε η μύζησή τους (γεγονός που θα φανέρωνε ξήρανσή τους), αλλά μειώθηκε και λίγο ως αποτέλεσμα της συντήρησής τους στον υγρό θάλαμο. Τεμάχια του φυσικού υλικού αποσπώντο, τοποθετούνταν στο θάλαμο μύζησης και ξηραίνονταν υπό την επιβαλλόμενη μύζηση. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ωστόσο, στην τιμή της επιβαλλόμενης μύζησης προστίθετο η τιμή της μύζησης που είχε μετρηθεί πριν την τοποθέτηση των δειγμάτων στο θάλαμο μύζησης. Οι τιμές αυτές της μύζησης είναι εκείνες των καμπυλών στο Σχ. 14.15.

Εκτός από τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού του φυσικού υλικού προσδιορίστηκε και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού του αναζυμωμένου αλλά και του αναζυμωμένου και επανασυμπιεσμένου στην επιτόπου τάση υλικού. Αρχικά παρασκευάζονταν πολτοί του υλικού σε αρχικό ποσοστό υγρασίας ίσο με 1.5 φορές το όριο υδαρότητας, είτε για να τοποθετηθούν στη διάταξη που περιγράφηκε στην §14.3.8 (τροποποιημένο κελί Tempe για πολτούς), είτε στη συνέχεια από αυτούς τους πολτούς να παρασκευαστούν προσυμπιεσμένα δοκίμια μέχρι κατακόρυφη τάση 800 kPa. Η κατακόρυφη αυτή τάση δημιουργούσε στα δοκίμια λόγο κενών πρακτικά ίσο με αυτόν του φυσικού υλικού όπως φαίνεται και από το Σχ. 14.15α. Τα

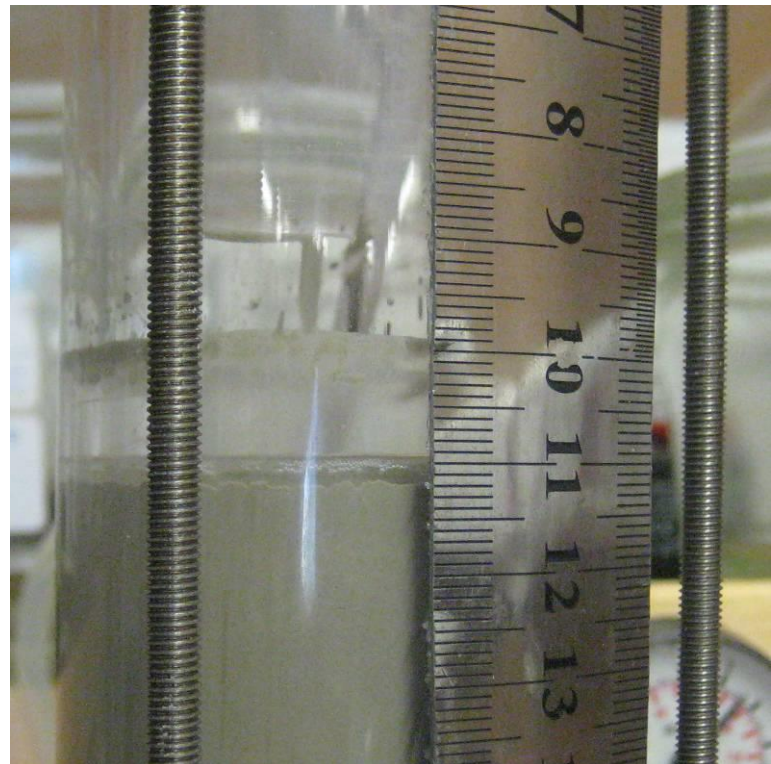
αποτελέσματα που παρουσιάζονται για την αναζυμωμένη μάργα Κορίνθου προέρχονται από τις μετρήσεις που έγιναν σε μοναδικό δοκίμιο, όπως αυτό αρχικά ξηράνθηκε στο τροποποιημένο κελί Tempe (§14.3.8), κόπηκε σε μικρότερα τεμάχια και στη συνέχεια μεταφέρθηκε στον θάλαμο μύζησης για εφαρμογή ακόμα μεγαλύτερων τιμών της μύζησης με τη μέθοδο μετατόπισης άξονα και μετά την παραμονή των νέων δοκιμίων του εκεί, κάποια από αυτά μεταφέρθηκαν στους θαλάμους υδατικών διαλυμάτων αλάτων για την εφαρμογή ακόμα μεγαλύτερων τιμών μύζησης. Στη Φωτ. 14.13α παρουσιάζεται πάλι η διάταξη του τροποποιημένου κελιού Tempe με το δοκίμιο της αναζυμωμένη μάργας Κορίνθου και στη Φωτ. 14.13β κοντινή άποψη της θέσης της στάθμης του δείγματος μετά την εφαρμογή μύζησης.

Στο Σχ. 14.15 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που προσδιορίστηκαν για τη φυσική, την αναζυμωμένη και την αναζυμωμένη/επανασυμπιεσμένη Μάργα Κορίνθου. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 14.15α (μύζηση-λόγος κενών) η διασπορά των αποτελεσμάτων για την φυσική Μάργα Κορίνθου είναι πολύ μεγαλύτερη από την διασπορά των αποτελεσμάτων για την αναζυμωμένη και την αναζυμωμένη/επανασυμπιεσμένη. Η περιοχή μέγιστης διασποράς για την φυσική μάργα εντοπίζεται μεταξύ 600 και 1100 kPa μύζησης. Αυτό οφείλεται στο ότι πρόκειται για δοκίμια φυσικού υλικού στο οποίο οι μικροδιαφορές από τεμάχιο σε τεμάχιο που αποκόπτεται για τοποθέτηση στο θάλαμο μύζησης δεν μπορούν να ελεγχθούν. Αντίθετα η αναζυμωμένη και η αναζυμωμένη/επανασυμπιεσμένη μάργα παρουσιάζει αρκετά μικρή διασπορά, η οποία, παρά την μικρή συμπίεστικότητα του υλικού, επιτρέπει να διαφανεί μία σαφής τάση μείωσης του λόγου κενών από το 0.66 (πλήρως κορεσμένο υλικό) στο 0.58 (1400 kPa) προκειμένου για το αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο υλικό και από το 1.40 στο 0.62 για το αναζυμωμένο υλικό. Για το φυσικό υλικό η μεταβολή στον λόγο κενών ήταν από το 0.66 στο 0.62 (όσο επιτρέπει η μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων να διαφανεί μια τέτοια εξέλιξη).

Όπως φαίνεται από τα Σχ. 14.15β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.15γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) έγινε αποκορεσμός του υλικού σε όλες του τις μορφές. Προκειμένου για το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό η πίεση διείσδυσης αέρα εντοπίζεται μεταξύ 100 και 200 kPa, για το φυσικό υλικό μεταξύ 200 και 400 kPa λαμβανομένης υπόψη της πολύ μεγαλύτερης διασποράς των αποτελεσμάτων για την φυσική μάργα, και τέλος για το αναζυμωμένο υλικό είναι σαφές ότι έχει γίνει για τιμές της μύζησης μικρότερες των 100 kPa. Παρά το γεγονός λοιπόν ότι ο αρχικός λόγος κενών είναι ο ίδιος για το υλικό στις δύο καταστάσεις (φυσικό και αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο), το φυσικό υλικό μπορεί να διατηρεί μεγαλύτερο βαθμό κορεσμού και ποσοστό υγρασίας (Σχ. 14.15ε) υπό την ίδια μύζηση, με το



**Φωτογραφία 14.12.** Μέτρηση της μύξης επιτόπου στη θέση αποκοπής αδιατάρακτων δειγμάτων Μάργας Κορίνθου με το тенσιόμετρο Quickdraw Suction Probe της SoilMoisture Inc. Μετρήσεις με το ίδιο όργανο πραγματοποιήθηκαν και στα δείγματα της Μάργας Κορίνθου πριν την τοποθέτησή τους στο θάλαμο μύξης για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.

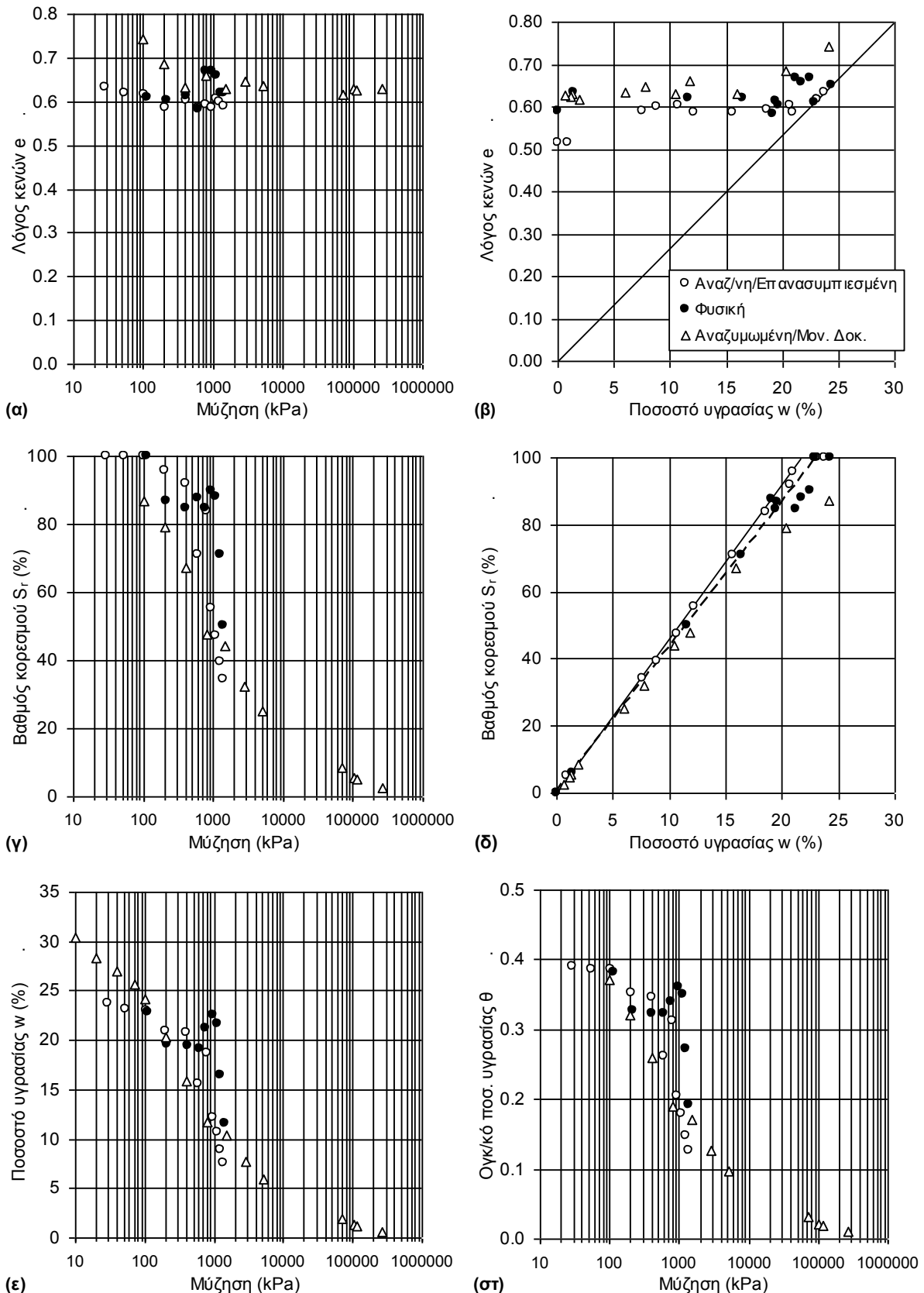


**Φωτογραφία 14.13.** α) Διάταξη τροποποιημένου κελιού Tempre με το δοκίμιο της αναζυμωμένης μάργας Κορίνθου, και β) λεπτομέρεια συρρίκνωσης του πολτού στην επιφάνεια του οποίου υπάρχει νερό (διακρίνεται το σημείο από το οποίο άρχισε η συρρίκνωση).

φυσικό υλικό να δείχνει ότι έχει μάλλον μεγαλύτερη πίεση διείσδυσης αέρα από το αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο στον ίδιο αρχικό λόγο κενών. Το φυσικό υλικό δηλαδή επιδεικνύει μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης ύδατος στους πόρους του και σχετικά (μεγαλύτερος βαθμός κορεσμού υπό την ίδια μύζηση) και απόλυτα (μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας υπό την ίδια μύζηση). Ανεξάρτητα δηλαδή από την ίδια τιμή του αρχικού λόγου κενών, η δομή του συγκεκριμένου φυσικού υλικού (σιμεντωμένο) που έχει αναπτυχθεί από φυσικά αίτια (σε αντίθεση με αυτήν που εξετάστηκε σε άλλα υλικά σε προηγούμενες παραγράφους), του επιτρέπει να διατηρεί μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης ύδατος στους πόρους του. Παρά τη διεξοδική αναζήτηση που πραγματοποιήθηκε στη βιβλιογραφία για πειραματικά δεδομένα στα οποία να απομονώνεται η επιρροή της δομής των φυσικών υλικών μέσω της επίτευξης ίδιου αρχικού λόγου κενών στα ίδια εδαφικά υλικά όταν δεν έχουν δομή, δεν βρέθηκαν άλλα τέτοια δεδομένα. Σε ό,τι αφορά τη σύγκριση των καμπυλών του φυσικού και του αναζυμωμένου/επανασυμπιεσμένου υλικού, οι δύο πρώτες κείνται σαφώς υψηλότερα και δεξιότερα της τελευταίας στα Σχ. 14.15γ, 14.15ε και 14.15στ με το πρώτο μόνο τμήμα της καμπύλης του αναζυμωμένου υλικού να βρίσκεται υψηλότερα των καμπυλών των άλλων υλικών στο Σχ. 14.15ε, όπως επιδείχθηκε και στα προηγούμενα εδαφικά υλικά στα οποία μετρήθηκε χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε πολτούς. Η ιδιομορφία στην περίπτωση της μάργας Κορίνθου είναι ότι η καμπύλη του αναζυμωμένου/επανασυμπιεσμένου υλικού διέρχεται δεξιά της καμπύλης του αναζυμωμένου (π.χ. στο Σχ. 14.15ε) αντί να την συναντήσει και στη συνέχεια να την ακολουθήσει όπως συνέβη σε όλα τα προηγούμενα υλικά (άργιλος Αμαρουσίου, άργιλος Ορεστιάδας Έβρου και άργιλος Αμφιλοχίας). Η παρατήρηση αυτή συζητείται περαιτέρω στην §14.3.15.

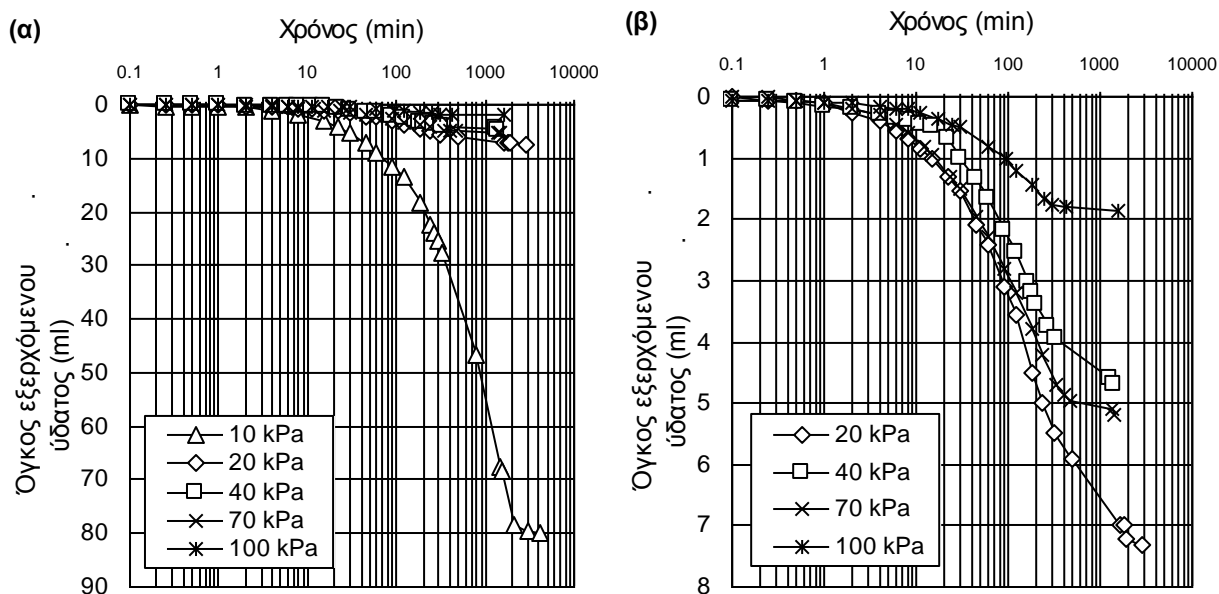
Από το Σχ. 14.15γ προκύπτει παραμένον λόγος κενών 0.62 για την φυσική μάργα, 0.58 για το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό (μεγαλύτερος του φυσικού υλικού) και 0.62 για το αναζυμωμένο υλικό. Αν με βάση τις τιμές αυτές σχεδιαστούν οι θεωρητικές ευθείες που έχουν σχεδιαστεί στο Σχ. 14.15δ προκύπτει μεγαλύτερο παραμένον ποσοστό υγρασίας για τη φυσική μάργα από αυτό για το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό.

Τέλος από τα Σχ. 14.15ε και 14.15στ προκύπτει ότι και το ποσοστό υγρασίας και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνονται με τη μύζηση με ρυθμό αντίστοιχο του ρυθμού μείωσης του βαθμού κορεσμού.



**Σχήμα 14.15.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Μάργας Κορίνθου. Οι γραμμές στα σχήματα (β) και (δ) αναπαριστούν τις θεωρητικές καμπύλες που αντιστοιχούν στο ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών του υλικού και τον λόγο κενών του στο όριο συρρίκνωσης (ιδέ κείμενο).

Όπως αναφέρθηκε ήδη στην §14.3.8, παρόλο που η διάταξη που υλοποιήθηκε για τον έλεγχο της μύζησης σε τιμές μικρότερες των 100 kPa στο αναζυμωμένο υλικό (τροποποιημένο κελί Tempre) τελικά δεν επέτρεψε και τον υπολογισμό των μεταβολών όγκου του πολτού κατά την ξήρανσή του, επέτρεψε ωστόσο την παρακολούθηση της χρονικής μεταβολής του όγκου του νερού που εξέρχεται από το δοκίμιο σε κάθε επιβαλλόμενη μύζηση. Στο Σχ. 14.16 παρουσιάζονται οι καμπύλες όγκου εξερχόμενου νερού-χρόνου για τον πολτό της Μάργας Κορίνθου. Όπως συμβαίνει και στα δοκίμια αναζυμωμένων εδαφικών υλικών που υποβάλλονται σε δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης, για τη μικρότερη τιμή της μύζησης εμφανίστηκε η μεγαλύτερη έξοδος όγκου νερού (Σχ. 14.16α) με τις αντίστοιχες μεταβολές για τις μεγαλύτερες τιμές της μύζησης να είναι μικρότερες αλλά παραπλήσιες μεταξύ τους (Σχ. 14.16β). Ο απαιτούμενος χρόνος για την σταθεροποίηση της ποσότητας του νερού που εξήλθε κυμαίνεται μεταξύ 24 και 48 ωρών. Όπως αναφέρθηκε και στην §14.3.8, με βάση την βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αυτή είναι η πρώτη παρουσίαση διεθνώς στοιχείων για τη χρονική εξέλιξη της απώλειας ύδατος κατά την επιβολή μύζησης σε πολτούς αναζυμωμένων εδαφών.



**Σχήμα 14.16.** Καμπύλες όγκου εξερχόμενου ύδατος-χρόνου α) για όλες τις τιμές μύζησης που επιβλήθηκαν στον πολτό της Μάργας Κορίνθου στο τροποποιημένο κελί Tempre, και β) για τις τιμές 20 έως 100 kPa.

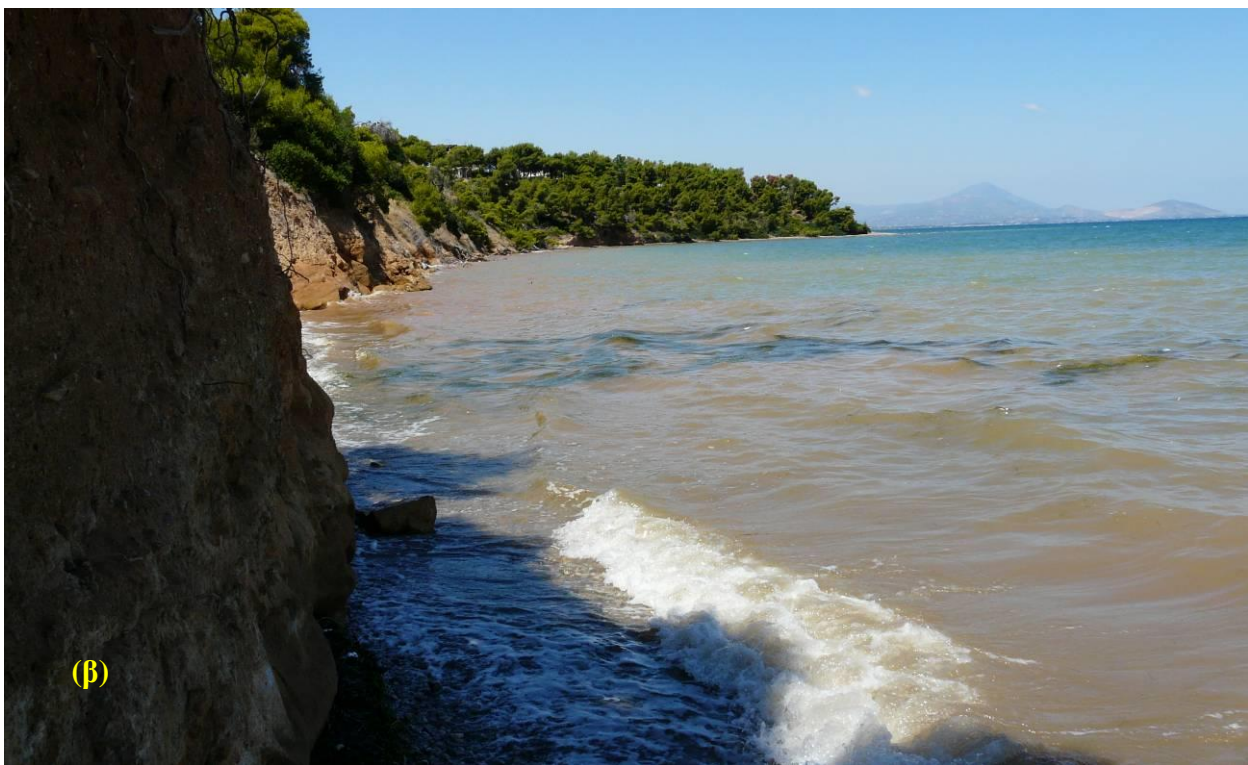


### 14.3.11 Μάργα Χαλκουτσίου

Μετά τις παρατηρήσεις στη Μάργα Κορίνθου σχετικά με την επιρροή της δομής του φυσικού υλικού στη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού επιδιώχθηκε η ανεύρεση και πραγματοποίηση δοκιμών του είδους και σε άλλα εδαφικά υλικά με δομή προερχόμενη από φυσικές διεργασίες όπως στην περίπτωση της Μάργας Κορίνθου. Τονίζεται, ότι θα ήταν εύκολο γενικά να ληφθούν δοκίμια ληφθέντα από γεωτρήσεις. Υπήρχαν όμως δύο παράγοντες που καθιστούσαν δύσκολη την ανεύρεση των κατάλληλων δειγμάτων. Ο πρώτος ήταν η ανάγκη το δείγμα του υλικού που θα βρεθεί να είναι αρχικά πλήρως κορεσμένο και ιδανικά χωρίς μύζηση, ή εάν έχει κάποια μύζηση αυτή να είναι πολύ μικρή και εύκολα μετρήσιμη με ακρίβεια (όπως π.χ. στην περίπτωση της Μάργας Κορίνθου). Ο δεύτερος παράγοντας ήταν το δείγμα να βρεθεί πρακτικά υπό μηδενική τάση. Εάν υπάρχει τάση σε ένα δείγμα (σημαντικού μεγέθους τουλάχιστον), όπως π.χ. στα δείγματα από γεωτρήσεις, ακόμα και πλήρως κορεσμένα να είναι θα αναπτυχθεί με βάση την αρχή των ενεργών τάσεων αρνητική πίεση πόρων ως αποτέλεσμα της αποφόρτισής τους. Αντίστοιχα, αν είναι πλήρως κορεσμένα και είχαν ήδη αρνητική πίεση πόρων ή ακόμα περισσότερο μη κορεσμένα και είχαν μύζηση πριν την αποφόρτισή τους, τότε και τα δυο αυτά μεγέθη θα μεταβληθούν κατά τρόπο που ουσιαστικά δεν θα μπορεί να καθοριστεί η θέση τους πάνω στα διαγράμματα των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού. Έτσι στην προσπάθεια να βρεθεί και άλλο δείγμα εκτός από το δείγμα της Μάργας Κορίνθου που χρησιμοποιήθηκε που να πληρεί τις ίδιες προϋποθέσεις βρέθηκε ένα δείγμα Μάργας Χαλκουτσίου το οποίο αποκόπηκε από χαμηλό πρανές κατά μήκος της ακτής δυτικά του Χαλκουτσίου σε υψόμετρο μόλις 0.3-0.5m και πάρα πολύ κοντά στη θάλασσα όπως φαίνεται και στην Φωτ. 14.14α.

Κατά τη δειγματοληψία δεν χρησιμοποιήθηκε το τενσιόμετρο τύπου Quickdraw για επιτόπου μετρήσεις όπως χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση της μάργας Κορίνθου αλλά σε δείγματα που τυλίχθηκαν πάρα πολύ καλά με μεμβράνη και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε πλαστικές σακούλες για μεταφορά στο εργαστήριο, έγιναν μετρήσεις και της μύζησης εδαφικού σκελετού και της ολικής μύζησης με εργαστηριακό τενσιόμετρο και υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου αντίστοιχα<sup>8</sup>. Η μύζηση εδαφικού σκελετού των δειγμάτων λοιπόν μετρήθηκε κατά μέσο όρο 25 kPa (υψηλότερη από εκείνη που μετρήθηκε στη Μάργα Κορίνθου παρά την αντίστοιχη θέση και απόσταση από τη θάλασσα) αλλά η ολική μύζηση μετρήθηκε κατά μέσο όρο περί τα 3 MPa. Η

<sup>8</sup> Το οποίο δεν υπήρχε ακόμα διαθέσιμο όταν έγινε η λήψη των δειγμάτων της μάργας Κορίνθου.



**Φωτογραφία 14.14.** α) Θέση απόληξης δειγμάτων μάργας Χαλκουτσίου, όπου διακρίνεται αυτή καθαυτή η θέση της δειγματοληψίας με το πεσμένο επιφανειακό υλικό μπροστά, η εγγύτητα από τη θάλασσα στα αριστερά και το υψόμετρο της θέσης, και β) άποψη της ακτής δυτικά του Χαλκουτσίου όπου εμφανίζεται η ομώνυμη μάργα βρεχόμενη και διαβρωσόμενη από τη θάλασσα τροφοδοτώντας με ίζημα όπως φαίνεται και από το χρώμα των υδάτων εγγύτερα στην ακτή.

τιμή αυτή της ολικής μύζησης είναι πάρα πολύ υψηλή υποδεικνύοντας πάρα πολύ μεγάλη τιμή της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης στα δείγματα αυτά. Η τιμή μάλιστα της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης είναι πολύ υψηλότερη κάθε άλλης τιμής που αναζητήθηκε και βρέθηκε στη διεθνή βιβλιογραφία. Αυτή η μεγάλη τιμή οφείλεται πιθανόν αφενός στην εγγύτητα της θέσης λήψης των δειγμάτων στη θάλασσα αλλά αφετέρου (και πιθανόν κυρίως) στη διεύθυνση κλίσης του χαμηλού πρανούς από το οποίο κόπηκαν τα δείγματα. Αυτή ήταν βόρεια έως βορειοανατολική σε μία θέση που κυριαρχούν οι βόρειοι άνεμοι οδηγώντας τα κύματα και τον αφρό από αυτά στο χαμηλό πρανές (Φωτ. 14.14β). Κατά συνέπεια αναμένεται ότι η περιεκτικότητα σε άλατα εντός των δειγμάτων δεν είναι απλώς εκείνη που αντιστοιχεί στην εγγύτητα με τη θάλασσα λόγω τριχοειδών δυνάμεων εξασκούμενων στο εγγύς ευρισκόμενο θαλασσινό νερό, αλλά πολύ μεγαλύτερη οφειλόμενη σε θαλασσινό νερό από τα κύματα και τον αφρό τους που πέφτει στην επιφάνεια των πρανών αυτών και στη συνέχεια εξατμίζεται αποθέτοντας επιπλέον άλατα στην επιφάνεια των εκτεθειμένων πρανών της Φωτ. 14.14β.

Από τη Μάργα Χαλκουτσίου υπήρχε διαθέσιμη επαρκής ποσότητα αδιατάρακτου και διαταραγμένου υλικού, οπότε κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και του φυσικού υλικού και του αναζυμωμένου/επανασυμπιεσμένου μετά από φόρτισή του σε διάφορες τιμές της κατακόρυφης τάσης και αποφόρτισής του στη συνέχεια (όπως έγινε και με τις αργίλους Αμαρουσίου, Ορεστιάδας Έβρου και Αμφιλοχίας) αλλά και του αναζυμωμένου υλικού σε μορφή πολτού με αρχικό ποσοστό υγρασίας  $1.5 \times w_L$ , καθιστώντας δυνατή τη σύγκριση μεταξύ όλων των καμπυλών.

Στο Σχ. 14.17 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Μάργας Χαλκουτσίου που μετρήθηκαν στον πολτό και στα δοκίμια που αναζυμώθηκαν και επανασυμπιέστηκαν στις τρεις τιμές της κατακόρυφης τάσης και αποφορτίστηκαν. Για λόγους ευκρίνειας και ευκολότερης ανάγνωσης του σχήματος, στο Σχ. 14.17 δεν παρουσιάζεται η καμπύλη που μετρήθηκε για το φυσικό υλικό, η οποία παρουσιάζεται στο Σχ. 14.18 συγκρινόμενη με την καμπύλη του δοκιμίου που αναζυμώθηκε και επανασυμπιέστηκε στα 500 kPa αποκτώντας πρακτικά τον ίδιο αρχικό λόγο κενών (προ έναρξης ξήρανσης) με τα δοκίμια του φυσικού υλικού.

Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.17α (μύζηση-λόγος κενών) ο λόγος κενών του εδαφικού αυτού υλικού κατά την απώλεια υγρασίας του φαίνεται να μειώνεται με την μύζηση τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερη τιμή είχε αρχικά. Προκειμένου για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 62.5 kPa από το

0.80 στο 0.55, για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 500 kPa από το 0.73 στο 0.51, και τέλος για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 4000 kPa από το 0.60 στο 0.44 (οι καταληκτικές τιμές του λόγου κενών για τιμές της μύζησης από 10 έως 140 MPa). Προκειμένου για τον πολτό αναζυμωμένης Μάργα Χαλκουτσίου ο λόγος κενών μειώθηκε από μια αρχική τιμή κυμαινόμενη από 1.8 έως 2.0 (ανάλογα με διαφορές στην υγρασία και τη μεταβολή του ορίου υδαρότητας του υλικού) στο 0.60.

Για να μπορεί να γίνει καλύτερα η αξιολόγηση των καμπυλών λόγου κενών-μύζησης που παρουσιάζονται στο Σχ. 14.17α, στο ίδιο σχήμα δείχνεται ταυτόχρονα και η καμπύλη λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης από την δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης ως τα 7600 kPa για την σύγκριση ιδιοτήτων φυσικού και αναζυμωμένου υλικού. Η καμπύλη λόγου κενών-μύζησης του πολτού απέχει από το σμήνος των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης, το οποίο αποδίδεται σε διαφορές στην υγρασία του πολτού και στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε από δοκιμή σε δοκιμή. Οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης για τον πολτό και τα δοκίμια που είχαν συμπιεστεί και αποφορτιστεί μοιάζουν να τείνουν σε κοινή εφαπτομένη πριν γίνει η προοδευτική σταθεροποίησή τους προς τον διαφορετικό παραμένοντα λόγο κενών τους (εφαπτομένη που είναι ελαφρώς πιο ήπια από την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού που μετρήθηκε). Σε κάθε περίπτωση οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμίων που συμπίεστηκαν μέχρι κάποια τιμή της τάσης υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως ξεκινούν για χαμηλές τιμές της μύζησης αισθητά μακριά από τη νοητή εφαπτομένη στην οποία τείνουν παρουσιάζοντας έναν πρώτο κλάδο μικρότερης κλίσης, συνεχίζοντας σε έναν κλάδο μεγαλύτερης κλίσης και καταλήγοντας σε ένα πρακτικά οριζόντιο τμήμα όπου έχει σταθεροποιηθεί ο λόγος κενών στο εύρος τιμών της μύζησης 10 έως 140 MPa, όπως ακριβώς είχε παρατηρηθεί και στα προηγούμενα εδαφικά υλικά που εκτελέστηκαν παρόμοιες δοκιμές. Στην καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης παρατίθεται εκτός από τον κλάδο της φόρτισης και ο κλάδος της αποφόρτισης. Ειδικά οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμίων που είχαν συμπιεστεί μέχρι τα 500 και τα 4000 kPa, μοιάζουν να έχουν, η μεν πρώτη έναν κλάδο μέχρι τα 500 kPa μύζησης με κλίση παρόμοια με αυτή του κλάδου αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης και μετά έναν κλάδο που ακολουθεί τον κλάδο φόρτισης της καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης, η δε δεύτερη μοιάζει να έχει μόνο έναν κλάδο που αντιστοιχεί στην «επαναφόρτιση» από τον κλάδο αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι μηδενική τιμή της κατακόρυφης τάσης. Περισσότερα για αυτές τις συγκρίσεις παρατίθενται για όλα τα εδαφικά υλικά στα οποία μετρήθηκαν χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού στην §14.4.

Όπως φαίνεται και από το Σχ. 14.17α και από το Σχ. 14.17β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) η τιμή του παραμένοντος λόγου κενών αλλάζει με την μεταβολή της αρχικής τιμής του λόγου κενών. Η παρατήρηση αυτή δεν επεξηγείται περισσότερο σε αυτό το σημείο καθώς τα σχετικά δεδομένα για όλα τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη διδακτορική διατριβή αναλύονται και τυγχάνουν ειδικής επεξεργασίας στην §14.6.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 14.17β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.17γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) έγινε αποκορεσμός για διάφορα εύρη τιμών της μύζησης. Αντίθετα όμως από ό,τι φάνηκε προηγούμενα για την Άργιλο Αμαρουσίου και την Άργιλο Ορεστιάδας Έβρου που οι μεν καμπύλες λόγου κενών-μύζησης ήταν διαφορετικές αλλά οι καμπύλες βαθμού κορεσμού-μύζησης ήταν πρακτικά κοινές, και στην Άργιλο Αμφιλοχίας παρατηρήθηκε για πρώτη φορά ότι πέρα από τη σαφή διάκριση μεταξύ των καμπυλών λόγου κενών-μύζησης για διάφορες αρχικές συνθήκες πριν την έναρξη της ξήρανσης, υπάρχει αντίστοιχη διάκριση και μεταξύ των καμπυλών βαθμού κορεσμού-μύζησης, στην περίπτωση της Μάργας Χαλκουτσίου έχουμε παρόμοια συμπεριφορά αλλά με λιγότερο έντονη διαφοροποίηση στις καμπύλες βαθμού κορεσμού-μύζησης από αυτήν στην περίπτωση της Αργίλου Αμφιλοχίας. Σε αυτές τις καμπύλες βέβαια δεν παρατηρείται καταρχήν μία σαφής τάση ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες αλλά για τον πολύ μοιάζει η καμπύλη του να βρίσκεται αριστερά από την καμπύλη των δοκιμίων που είχαν συμπιεστεί μέχρι τα 62.5 kPa (εξαιρουμένου ίσως του πρώτου τμήματος), αυτή αριστερά από εκείνη των δοκιμίων που είχαν συμπιεστεί μέχρι τα 500 kPa και αυτή τέλος αριστερά από εκείνη των δοκιμίων που είχαν συμπιεστεί μέχρι τα 4000 kPa. Συναξιολογώντας την εικόνα από το Σχ. 14.17δ συνέβη πράγματι αποκορεσμός και είναι σταδιακή και πάλι η μετάβαση από την ευθεία  $S_r = 100\%$  στην ευθεία κλίσης  $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$ , η οποία μάλιστα είναι διαφορετική για κάθε χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, αφού για κάθε καμπύλη ήταν διαφορετικός ο παραμένων λόγος κενών (για τον πολύ 0.60, για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 62.5 kPa 0.55, για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 500 kPa 0.51, και τέλος για το υλικό συμπιεσμένο ως τα 4000 kPa 0.44). Τέλος από τα Σχ. 14.17ε και 14.17στ προκύπτει ότι και το ποσοστό υγρασίας και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνονται με την μύζηση με σημαντικό ρυθμό, διαφορετικό για κάθε καμπύλη στο ίδιο αυτό υλικό, η οποία όμως τελικά καταλήγει στον ίδιο, πρακτικά, κοινό κλάδο μετά τον αποκορεσμό.

Όπως λοιπόν και στην περίπτωση της Αργίλου Αμφιλοχίας, και για αυτό το υλικό εάν επιχειρείτο η προσομοίωση των διαφόρων καμπυλών του Σχ. 14.17 θα παρουσιαζόταν η ανάγκη για διαφορετικές τιμές παραμέτρων προσομοίωσης για όλες τις καμπύλες περιλαμβανομένης και

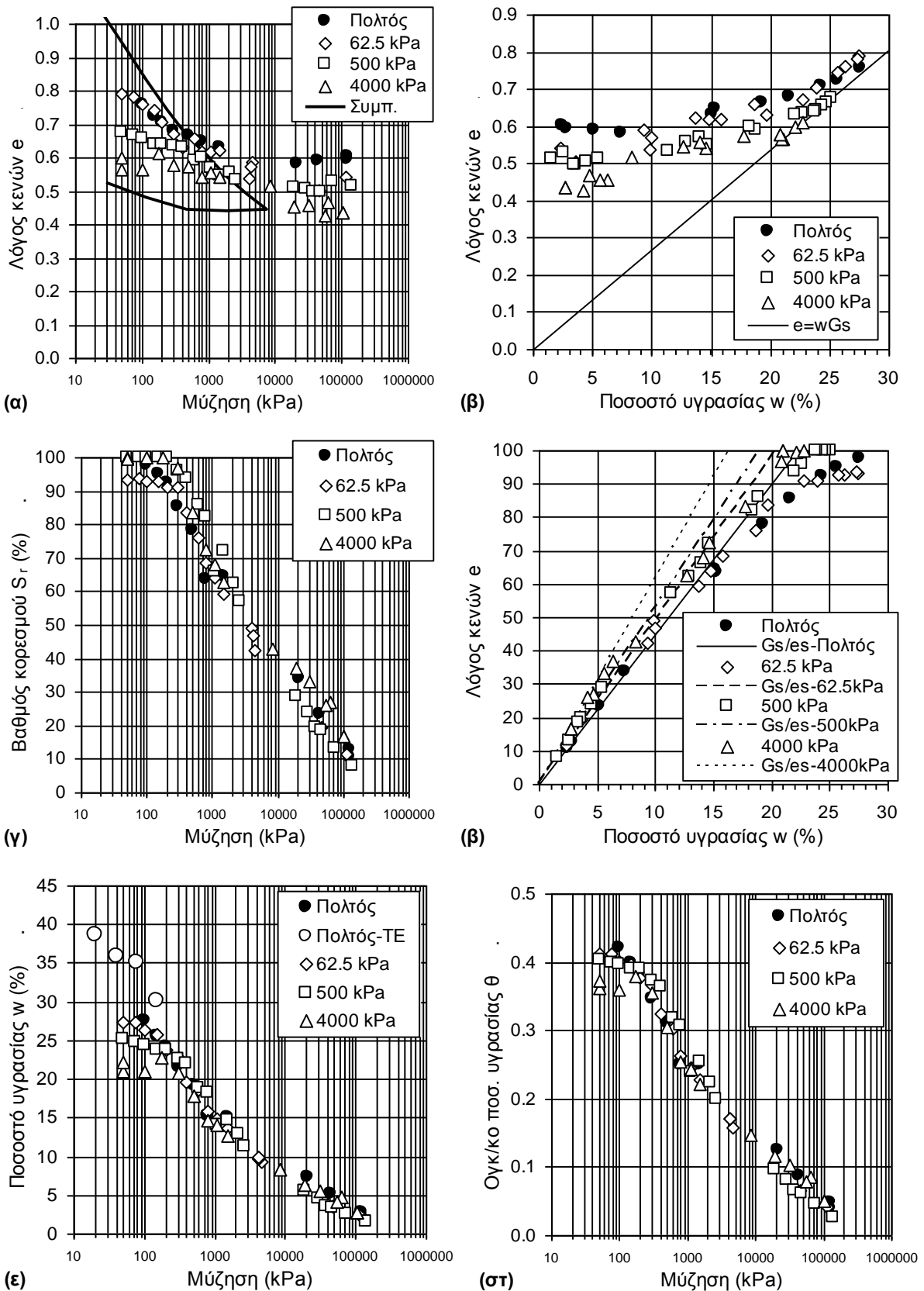
της καμπύλης βαθμού κορεσμού-μύζησης. Δηλαδή σε αυτό το υλικό παρατηρήθηκε ότι η διαφοροποίηση του αρχικού λόγου κενών οδηγεί σε διαφορετικές καμπύλες λόγου κενών-μύζησης, ποσοστού υγρασίας-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης αλλά και βαθμού κορεσμού-μύζησης και συγκεκριμένα διαφορετική μύζηση αποκορεσμού και διαφορετική θέση και κλίση του κλάδου της καμπύλης βαθμού κορεσμού-μύζησης μετά τον αποκορεσμό.

Εκτός όμως από την διερεύνηση της επιρροής του αρχικού λόγου κενών στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, η οποία είχε γίνει και στην Άργιλο Αμαρουσίου, την Άργιλο Ορεστιάδας Έβρου και την Άργιλο Αμφιλοχίας, στην Μάργα Χαλκουτσίου υπήρχε ταυτόχρονα η δυνατότητα να πραγματοποιηθεί και διερεύνηση αντίστοιχη με αυτήν στη Μάργα Κορίνθου, δηλαδή να μετρηθεί η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και στο φυσικό υλικό. Ο αρχικός λόγος κενών των δοκιμίων του φυσικού υλικού που χρησιμοποιήθηκαν για να μετρηθεί η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού ήταν κατά μέσο όρο περί το 0.74, και των δοκιμίων αναζυμωμένου/επανασυμπιεσμένου υλικού που χρησιμοποιήθηκαν για να μετρηθεί η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού ήταν 0.73. Και εδώ λοιπόν υπήρχαν δύο καμπύλες για να μπορούν να πραγματοποιηθούν οι συγκρίσεις που έγιναν ανάμεσα σε φυσικό και αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό και στην Μάργα Κορίνθου. Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.18α (μύζηση-λόγος κενών) η διασπορά των αποτελεσμάτων για τη φυσική Μάργα Κορίνθου είναι πολύ μεγαλύτερη από την διασπορά των αποτελεσμάτων για την αναζυμωμένη και την αναζυμωμένη/επανασυμπιεσμένη. Η περιοχή μέγιστης διασποράς για τη φυσική μάργα εντοπίζεται μεταξύ 400 και 1500 kPa μύζησης. Αυτό οφείλεται στο ότι πρόκειται για δοκίμια φυσικού υλικού στο οποίο οι μικροδιαφορές από τεμάχιο σε τεμάχιο που αποκόπτεται για τοποθέτηση στο θάλαμο μύζησης δεν μπορούν να ελεγχθούν. Αντίθετα η αναζυμωμένη/επανασυμπιεσμένη μάργα παρουσιάζει αρκετά μικρή διασπορά, η οποία επιτρέπει να διαφανεί μία σαφής τάση μείωσης του λόγου κενών από το 0.73 (πλήρως κορεσμένο υλικό) στο 0.51. Για το φυσικό υλικό η μεταβολή στον λόγο κενών ήταν από το 0.74 στο 0.54 (όσο επιτρέπει η μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων να διαφανεί μια τέτοια εξέλιξη).

Όπως φαίνεται από τα Σχ. 14.18β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.18γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) έγινε αποκορεσμός του υλικού και στις δυο του μορφές. Προκειμένου για το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό η πίεση διεϊσδυσης αέρα εντοπίζεται μεταξύ 200 και 300 kPa και για το φυσικό υλικό ακόμα και μικρότερη από 100 kPa. Η παρατήρηση αυτή στην περίπτωση της Μάργας Χαλκουτσίου είναι η αντίθετη από εκείνη στην περίπτωση της Μάργας

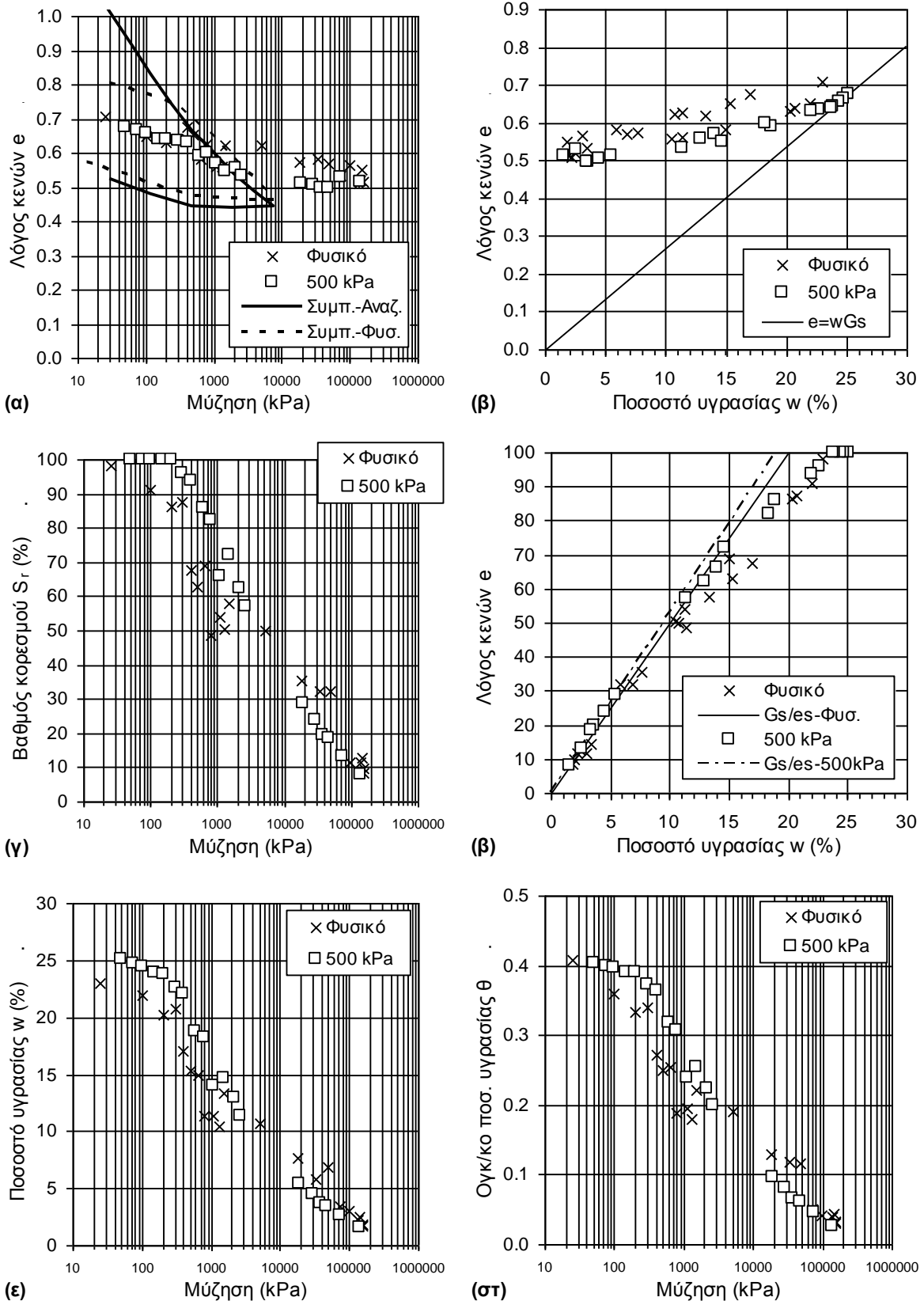
Κορίνθου αφού για τον ίδιο αρχικό λόγο κενών, το φυσικό υλικό διατηρεί μικρότερο βαθμό κορεσμού και ποσοστό υγρασίας (Σχ. 14.18ε) υπό την ίδια μύζηση, με το φυσικό υλικό να δείχνει ότι έχει μάλλον μικρότερη πίεση διείσδυσης αέρα από το αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο στον ίδιο αρχικό λόγο κενών. Το φυσικό υλικό δηλαδή επιδεικνύει σε αυτήν την περίπτωση μικρότερη ικανότητα συγκράτησης ύδατος στους πόρους του και σχετικά (μικρότερος βαθμός κορεσμού υπό την ίδια μύζηση) και απόλυτα (μικρότερο ποσοστό υγρασίας υπό την ίδια μύζηση). Από την άλλη πλευρά ωστόσο, αυτό μοιάζει να μην είναι ένα καθολικό φαινόμενο για το σύνολο του εύρους της μύζησης. Πράγματι λοιπόν, ενώ για τιμές της μύζησης μέχρι περίπου 5 MPa η παρατήρηση αυτή ισχύει σαφώς και ανεξάρτητα από τη μεγαλύτερη διασπορά αποτελεσμάτων του φυσικού υλικού, από τα 5 MPa και πάνω ανατρέπεται και ισχύει το ακριβώς αντίθετο όπως και στην περίπτωση της Μάργας Κορίνθου. Επίσης είναι σαφές από τα Σχ. 14.18α και 14.18β ότι σε κάθε περίπτωση η φυσική μάργα Χαλκουτσίου διατήρησε μεγαλύτερο παραμένοντα λόγο κενών σε σχέση με την αναζυμωμένη και επανασυμπιεσμένη στον ίδιο αρχικό λόγο κενών, όπως ακριβώς συνέβη και στη Μάργα Κορίνθου. Το άλλο κοινό με τη Μάργα Κορίνθου (πιο έντονα μάλιστα εμφανιζόμενο εδώ) είναι ότι ο λόγος κενών του φυσικού υλικού παραμένει συστηματικά μεγαλύτερος εκείνου του αναζυμωμένου και επανασυμπιεσμένου στον ίδιο αρχικό λόγο κενών κατά την αύξηση της μύζησης.

Όπως αναφέρθηκε ήδη στην §14.3.8, παρόλο που η διάταξη που υλοποιήθηκε για τον έλεγχο της μύζησης σε τιμές μικρότερες των 100 kPa στο αναζυμωμένο υλικό (τροποποιημένο κελί Tempe) τελικά δεν επέτρεψε και τον υπολογισμό των μεταβολών όγκου του πολτού κατά την ξήρανσή του, επέτρεψε ωστόσο την παρακολούθηση της χρονικής μεταβολής του όγκου του νερού που εξέρχεται από το δοκίμιο σε κάθε επιβαλλόμενη μύζηση. Στο Σχ. 14.19 παρουσιάζονται οι καμπύλες όγκου εξερχόμενου νερού-χρόνου για τον πολτό της Μάργας Χαλκουτσίου (καμπύλη στο Σχ. 14.17ε). Όπως συμβαίνει και στα δοκίμια αναζυμωμένων εδαφικών υλικών που υποβάλλονται σε δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης, για την μικρότερη τιμή της μύζησης εμφανίστηκε η μεγαλύτερη έξοδος όγκου νερού (Σχ. 14.19α) με τις αντίστοιχες μεταβολές για τις μεγαλύτερες τιμές της μύζησης να είναι μικρότερες αλλά παραπλήσιες μεταξύ τους (Σχ. 14.19β). Ο απαιτούμενος χρόνος για την σταθεροποίηση της ποσότητας του νερού που εξήλθε κυμαίνεται μεταξύ 4 και 20 ημερών και είναι σημαντικά μεγαλύτερος εκείνων που διαπιστώθηκαν για τα δύο προηγούμενα υλικά. Όπως αναφέρθηκε και στην §14.3.8, με βάση την βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αυτή είναι η πρώτη παρουσίαση διεθνώς στοιχείων για τη χρονική εξέλιξη της απώλειας ύδατος κατά την επιβολή μύζησης σε πολτούς αναζυμωμένων εδαφών.

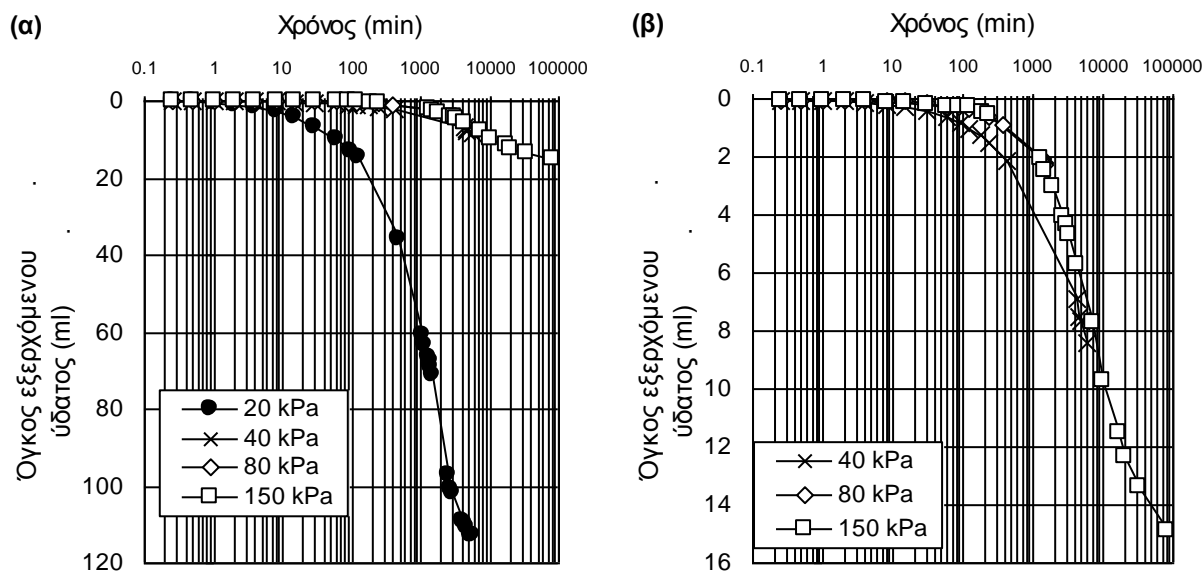


**Σχήμα 14.17.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Μάργας Χαλκουτσίου. Οι γραμμές στα σχήματα (β) και (δ) αναπαριστούν τις θεωρητικές καμπύλες που αντιστοιχούν στο ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών του υλικού και τον λόγο κενών του στο όριο συρρίκνωσης (ιδέ κείμενο).



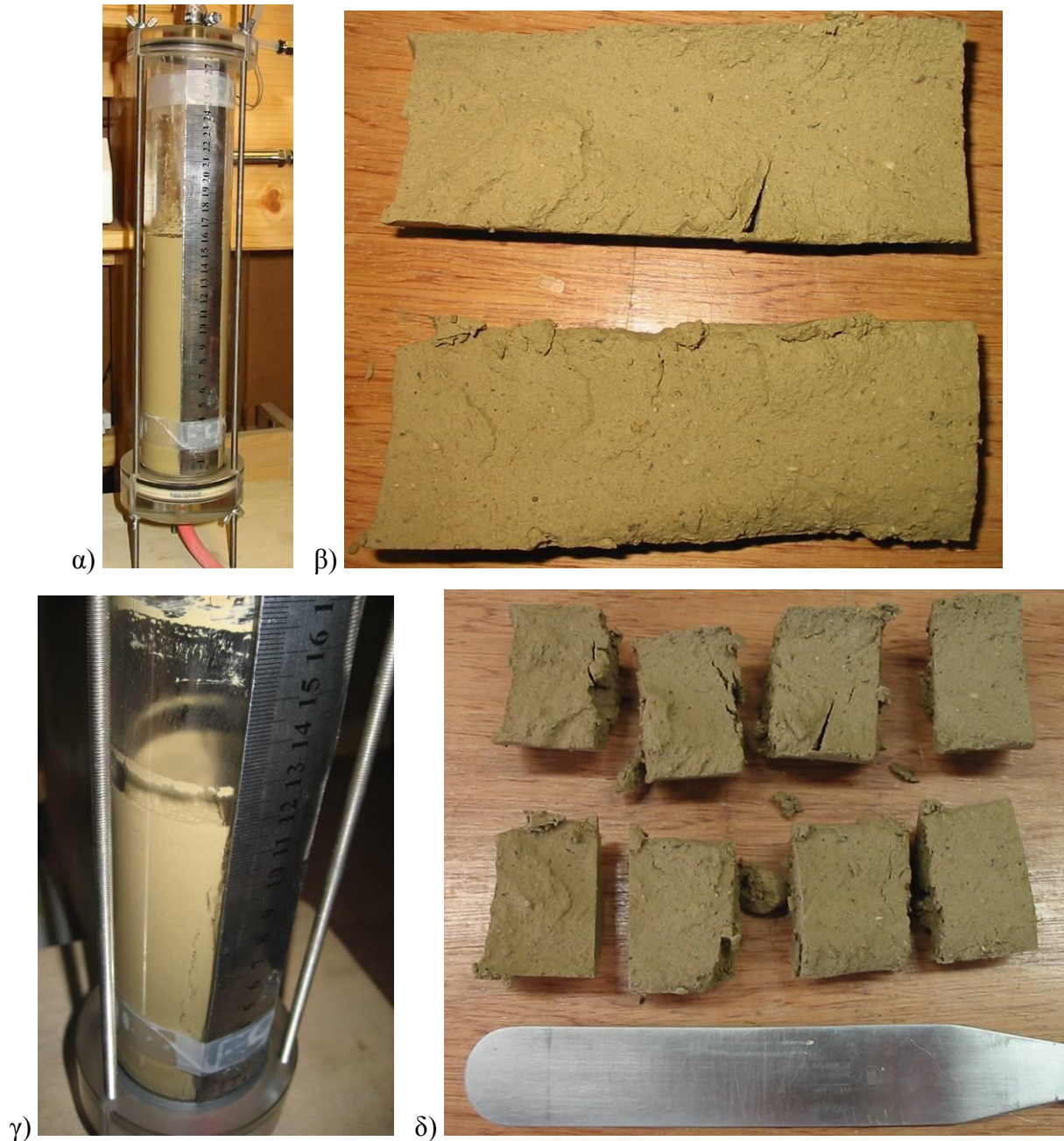


**Σχήμα 14.18.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Μάργας Χαλκουτσίου (φυσικό υλικό και αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο στα 500 kPa). Οι γραμμές στα σχήματα (β) και (δ) αναπαριστούν τις θεωρητικές καμπύλες για το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών και τον λόγο κενών στο όριο συρρίκνωσης.



**Σχήμα 14.19.** Καμπύλες όγκου εξερχόμενου ύδατος-χρόνου α) για όλες τις τιμές μύζησης που επιβλήθηκαν στον πολτό της Μάργας Χαλκουτσίου στο τροποποιημένο κελί Tempe, και β) για τις τιμές 40 έως 150 kPa.

Ειδικά σε αυτό το εδαφικό υλικό, κατά τη δοκιμή που εκτελέστηκε στο τροποποιημένο κελί Tempe (Φωτ. 14.15) στον πολτό του αναζυμωμένου εδάφους η μέγιστη τιμή της μύζησης που εφαρμόστηκε ήταν 150 kPa, δηλαδή μεγαλύτερη από την ονομαστική τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα του πορολίθου που είναι 100 kPa. Εκτιμάται ότι δεν διέφυγε σημαντική επιπλέον ποσότητα νερού από τον πορόλιθο ή το δοχείο νερού κάτω από αυτόν αλλά ο πορόλιθος μάλλον είναι που κατέστη πολύ πιο αδιαπέρατος δυσχεραίνοντας την έξοδο του νερού από το δοκίμιο (για αυτήν τη μύζηση απαιτήθηκαν 20 ημέρες έναντι μόλις 6 στις αμέσως προηγούμενες τιμές της μύζησης. Επίσης σε αυτό το δοκίμιο εμφανίστηκε μία διαμπερή ρωγμή (Φωτ. 14.15γ), η οποία επέτρεψε τον διαχωρισμό του δοκιμίου μετά την εξαγωγή του από τον ακρυλικό σωλήνα του κελιού (Φωτ. 14.15β) σε δύο τεμάχια κατά την έννοια του μήκους του δοκιμίου. Κάθε ένα από αυτά τα τεμάχια διαχωρίστηκε στη συνέχεια σε τέσσερα μικρότερα τεμάχια (Φωτ. 14.15δ) και στο κάθε ένα από αυτά μετρήθηκε το ποσοστό υγρασίας και ο ολικός όγκος μέσω της εμβάπτισής τους σε υγρή παραφίνη. Το ποσοστό υγρασίας μετρήθηκε από πάνω προς τα κάτω (προς τον πορόλιθο δηλαδή): 30.31%, 30.27%, 30.09% και 29.72%, ενώ ο λόγος κενών που υπολογίστηκε ήταν αντίστοιχα: 0.82, 0.83, 0.83 και 0.83. Αναλογικά λοιπόν ο λόγος κενών πρακτικά δεν μοιάζει να είχε κάποια σημαντική μεταβολή, ενώ και αυτή στο ποσοστό υγρασίας είναι πάρα πολύ μικρή, συστηματική όμως από την πάνω πλευρά του δοκιμίου προς την κάτω.



**Φωτογραφία 14.15.** α) Διάταξη τροποποιημένου κελιού Tempre με το δοκίμιο της αναζυμωμένης μάργας Χαλκουτσίου, β) τα δύο τεμάχια στα οποία είχε διαμελιστεί ο πολτός της Μάργας Χαλκουτσίου κατά την ξήρανσή του στο τροποποιημένο κελί Tempre με τη μορφή της επιφάνειας της ρωγμής στα δύο τεμάχια (δεξιά η επαφή με τον πορόλιθο), γ) λεπτομέρεια συρρίκνωσης του πολτού με εμφανή την διαμπερή ρωγμή που αναπτύχθηκε, και δ) τα ίδια τεμάχια με το (β) μετά την κοπή τους στα τέσσερα: τα δοκίμια στο πάνω μέρος χρησιμοποιήθηκαν για μέτρηση ποσοστού υγρασίας και εκείνα στο κάτω μέρος για μέτρηση του ολικού όγκου μέσω παραφίνωσης (εργαστηριακή σπάτουλα για λόγους κλίμακας).

### 14.3.12 Αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας

Μετά τα ευρήματα που αφορούσαν τη σύγκριση χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού εδαφικών υλικών με δομή στη φυσική τους κατάσταση όπως η Μάργα Κορίνθου και η Μάργα Χαλκουτσίου και των ίδιων υλικών παρασκευασμένων με τον ίδιο λόγο κενών μετά από αναζύμωση και επανασυμπίεση του υλικού υπό συνθήκες μονοδιάστατης φόρτισης, αναζητήθηκε ένα ακόμα φυσικό υλικό για να συμπληρωθεί η σχετική έρευνα. Βασική προϋπόθεση ήταν και πάλι το δείγμα του υλικού που θα βρεθεί να είναι αρχικά πλήρως κορεσμένο και ιδανικά χωρίς μύζηση, ή εάν έχει κάποια μύζηση αυτή να είναι πολύ μικρή και εύκολα μετρήσιμη με ακρίβεια, αλλά ταυτόχρονα το δείγμα να βρεθεί πρακτικά και υπό μηδενική τάση. Μετά από τις δύο μάργες λοιπόν αναζητήθηκε ένα ακόμα φυσικό υλικό που να πληρεί τα ίδια χαρακτηριστικά και με κύριο κριτήριο τελικά την εγγύτητα σε κάποια υδάτινη συγκέντρωση επιλέχθηκε ο αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας. Εντοπίστηκε κοντά σε μία από τις λίμνες που υπάρχουν στις επιφανειακές εμφανίσεις του ιλυολίθου στον ορεινό όγκο της Πάρνηθας (Φωτ. 14.16α) και η δειγματοληψία έγινε από χαμηλό πρανές εκσκαφής (~1.5m, Φωτ. 14.16β) ευρισκόμενο σε απόσταση περί τα 50m από τη μικρή λίμνη, σε υλικό αποσαθρωμένο έως αργιλοποιημένο αλλά με τη δομή του ιλυολίθου να διακρίνεται ακόμα όπως φαίνεται στην πολύ κοντινή άποψη της θέσης δειγματοληψίας στην Φωτ. 14.16γ.

Κατά τη δειγματοληψία δεν χρησιμοποιήθηκε το τενσιόμετρο τύπου Quickdraw για επιτόπου μετρήσεις όπως χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση της Μάργας Κορίνθου αλλά σε δείγματα που τυλίχθηκαν πάρα πολύ καλά με μεμβράνη και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε πλαστικές σακούλες για μεταφορά στο εργαστήριο, έγιναν μετρήσεις και της μύζησης εδαφικού σκελετού και της ολικής μύζησης με εργαστηριακό τενσιόμετρο και υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου αντίστοιχα<sup>9</sup>. Η μύζηση εδαφικού σκελετού των δειγμάτων λοιπόν μετρήθηκε κατά μέσο όρο 85 kPa αλλά η ολική μύζηση μετρήθηκε κατά μέσο όρο περί το 1 MPa. Η τιμή αυτή της ολικής μύζησης είναι υψηλή υποδεικνύοντας μεγάλη τιμή της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης στα δείγματα αυτά, χωρίς όμως να ξεπερνά παραδείγματα άλλων εδαφικών υλικών. Εξάλλου η εγγύτητα της μύζησης εδαφικού σκελετού στη μέγιστη μύζηση που μπορεί να μετρηθεί με τενσιόμετρο πορολίθου χαμηλής πίεσης διεύδυσης αέρα αφήνει περιθώριο να ήταν υψηλότερη η τιμή της και άρα μικρότερη η τιμή της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης. Η μεγαλύτερη τιμή της μύζησης εδαφικού σκελετού σε σχέση με εκείνη που μετρήθηκε στα μείγματα της Μάργας Κορίνθου και της

<sup>9</sup> Το οποίο δεν υπήρχε ακόμα διαθέσιμο όταν έγινε η λήψη των δειγμάτων της μάργας Κορίνθου.

Μάργας Χαλκουτσίου δικαιολογείται από τη μεγαλύτερη απόσταση από το πλησιέστερο υδάτινο σώμα και την απουσία ενός γενικού και ενιαίου (ambient) υπόγειου ορίζοντα στην περιοχή της Πάρνηθας.



**Φωτογραφία 14.16.** α) Η μικρή λίμνη κοντά στη θέση απόληξης δειγμάτων αργιλοποιημένου Ιλβολίθου Πάρνηθας, β) άποψη του χαμηλού πρανούς εκσκαφής από το οποίο έγινε η δειγματοληψία, και γ) κοντινή άποψη της θέσης δειγματοληψίας όπου διακρίνεται και η δομή του μητρικού υλικού που έχει διατηρηθεί στο αποσαθρωμένο/αργιλοποιημένο υλικό.

Από τον αργιλοποιημένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας υπήρχε διαθέσιμη μικρή ποσότητα αδιατάρακτου υλικού και επαρκής ποσότητα διαταραγμένου υλικού. Έγινε λοιπόν απόπειρα προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του φυσικού υλικού και πλήρης προσδιορισμός της καμπύλης του αναζυμωμένου/επανασυμπιεσμένου υλικού μετά από φόρτισή του σε μία τιμή της κατακόρυφης τάσης και αποφόρτισής του στη συνέχεια στον λόγο κενών του φυσικού υλικού, αλλά και του αναζυμωμένου υλικού σε μορφή πολτού με αρχικό ποσοστό υγρασίας  $1.5 \times w_L$ , καθιστώντας δυνατή τη σύγκριση μεταξύ όλων των καμπυλών.

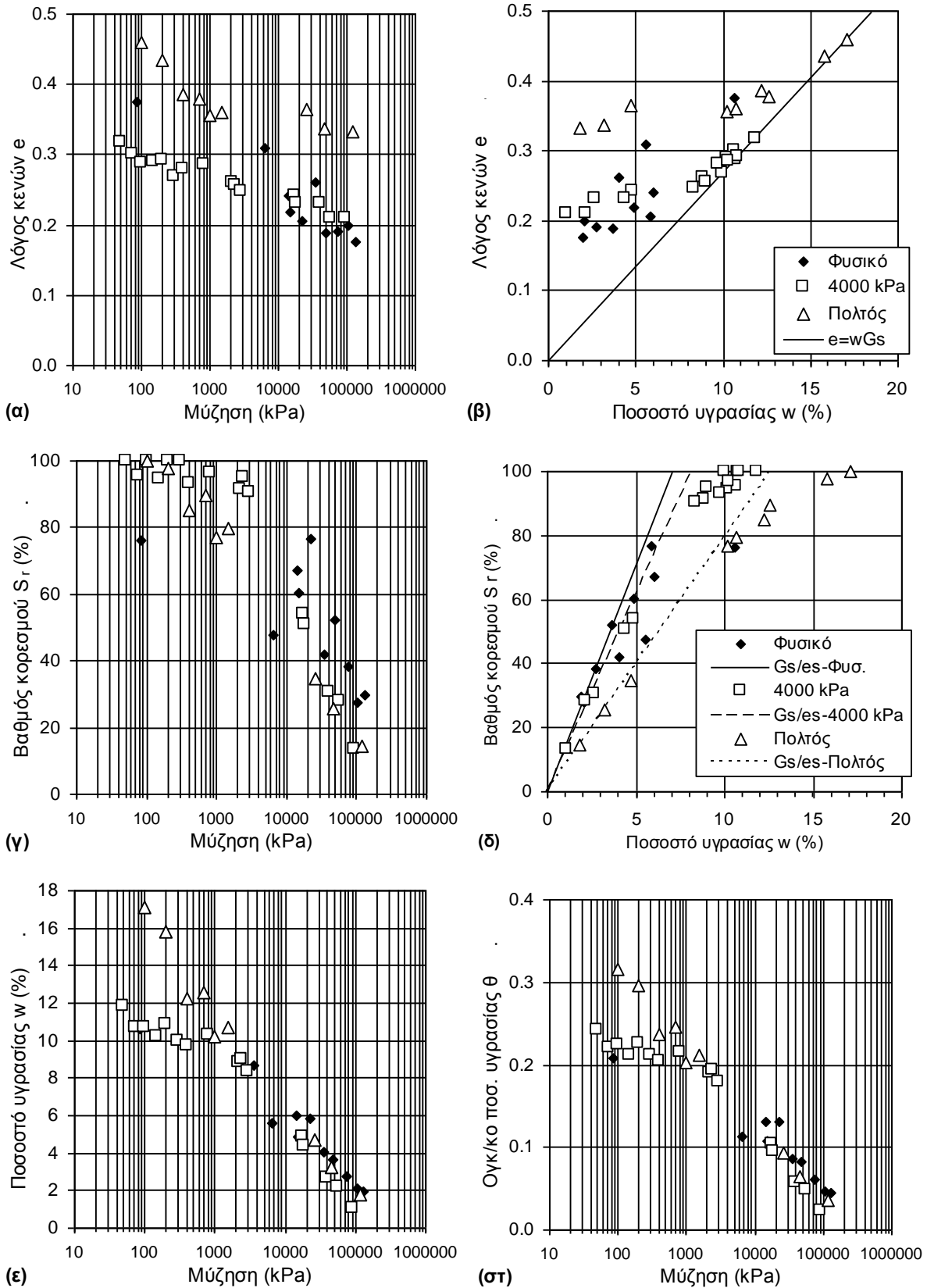
Στο Σχ. 14.20 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που προσδιορίστηκαν για τον φυσικό, τον αναζυμωμένο και τον αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο αργιλοποιημένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας. Όπως προκύπτει από το Σχήμα 14.20α (μύζηση-λόγος κενών) και φάνηκε και στα προηγούμενα υλικά που προσδιορίστηκε η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε δείγματα φυσικού υλικού η διασπορά των αποτελεσμάτων για τον φυσικό αργιλοποιημένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας είναι πολύ μεγαλύτερη από τη διασπορά των αποτελεσμάτων για τον αναζυμωμένο και τον αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο. Η περιοχή μέγιστης διασποράς για το φυσικό υλικό εντοπίζεται μεταξύ 3.5 και 130 MPa μύζησης. Αυτό οφείλεται στο ότι πρόκειται για δοκίμια φυσικού υλικού στο οποίο οι μικροδιαφορές από τεμάχιο σε τεμάχιο που αποκόπτεται για τοποθέτηση στο θάλαμο μύζησης δεν μπορούν να ελεγχθούν. Αντίθετα το αναζυμωμένο και το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό παρουσιάζει αρκετά μικρή διασπορά, η οποία, παρά τη μικρή συμπίεστικότητα του υλικού, επιτρέπει να διαφανεί μία σαφής τάση μείωσης του λόγου κενών από το 0.36 (πλήρως κορεσμένο υλικό) στο 0.22 προκειμένου για το αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο υλικό και από το 1.00 στο 0.34 για το αναζυμωμένο υλικό. Για το φυσικό υλικό η μεταβολή στον λόγο κενών ήταν από το 0.37 στο 0.19 (όσο επιτρέπει η μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων να διαφανεί μια τέτοια εξέλιξη).

Όπως φαίνεται από τα Σχ. 14.20β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.20γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) έγινε αποκορεσμός του υλικού σε όλες του τις μορφές. Προκειμένου για το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό η πίεση διείσδυσης αέρα εντοπίζεται μεταξύ 300 και 700 kPa, για το φυσικό υλικό να έχει ήδη συμβεί από την αρχή, και τέλος για το αναζυμωμένο υλικό είναι σαφές ότι έχει γίνει για τιμές της μύζησης μεταξύ 100 και 200 kPa. Παρά το γεγονός λοιπόν ότι ο αρχικός λόγος κενών είναι ο ίδιος για το υλικό στις δύο καταστάσεις (φυσικό και αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο), το φυσικό υλικό μπορεί να διατηρεί μεγαλύτερο βαθμό κορεσμού και ποσοστό υγρασίας (Σχ. 14.20ε) υπό την ίδια μύζηση. Η ιδιαιτερότητα στην περίπτωση αυτού του υλικού είναι όμως ότι μάλλον το υλικό δεν ήταν αρχικά πλήρως

κορεσμένο. Το πιθανότερο είναι ότι είχε αποκορευστεί και βρισκόταν σε έναν ενδιάμεσο κλάδο της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ευρισκόμενο μεταξύ κλάδου ξήρανσης πρώτης φοράς και κλάδου επανύγρανσης από ξήρανση μέχρι πολύ σημαντική τιμή της μύζησης. Κατά τα άλλα ωστόσο και για τις υψηλές τιμές της μύζησης, το φυσικό υλικό επιδεικνύει όπως και η φυσική Μάργα Κορίνθου (αλλά και η φυσική Μάργα Χαλκουτσίου για μεγάλες τιμές της μύζησης) μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης ύδατος στους πόρους του και σχετικά (μεγαλύτερος βαθμός κορεσμού υπό την ίδια μύζηση) και απόλυτα (μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας υπό την ίδια μύζηση). Ανεξάρτητα δηλαδή από την ίδια τιμή του αρχικού λόγου κενών, η δομή του συγκεκριμένου φυσικού υλικού (σιμεντωμένο) που έχει αναπτυχθεί από φυσικά αίτια (σε αντίθεση με αυτήν που εξετάστηκε σε άλλα υλικά σε προηγούμενες παραγράφους), του επιτρέπει να διατηρεί μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης ύδατος στους πόρους του. Σε ό,τι αφορά την σύγκριση των καμπυλών του φυσικού και του αναζυμωμένου/επανασυμπιεσμένου υλικού με αυτή του αναζυμωμένου, οι δύο πρώτες κείνται σαφώς χαμηλότερα και αριστερά της τελευταίας στα Σχ. 14.20γ, 14.20ε και 14.20στ.

Από το Σχ. 14.20γ προκύπτει παραμένων λόγος κενών 0.19 για το φυσικό υλικό, 0.22 για το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό και 0.34 για το αναζυμωμένο υλικό. Αν με βάση τις τιμές αυτές σχεδιαστούν οι θεωρητικές ευθείες που έχουν σχεδιαστεί στο Σχ. 14.20δ προκύπτει μεγαλύτερο παραμένον ποσοστό υγρασίας για φυσικό υλικό από αυτό για το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό.

Τέλος από τα Σχ. 14.20ε και 14.20στ προκύπτει ότι και το ποσοστό υγρασίας και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνονται με την μύζηση με ρυθμό αντίστοιχο του ρυθμού μείωσης του βαθμού κορεσμού.



**Σχήμα 14.20.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού του αργιλοποιημένου Ιλυολίθου Πάρνηθας (φυσικό υλικό, αναζυμωμένο υλικό και αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο στα 4000 kPa υλικό).



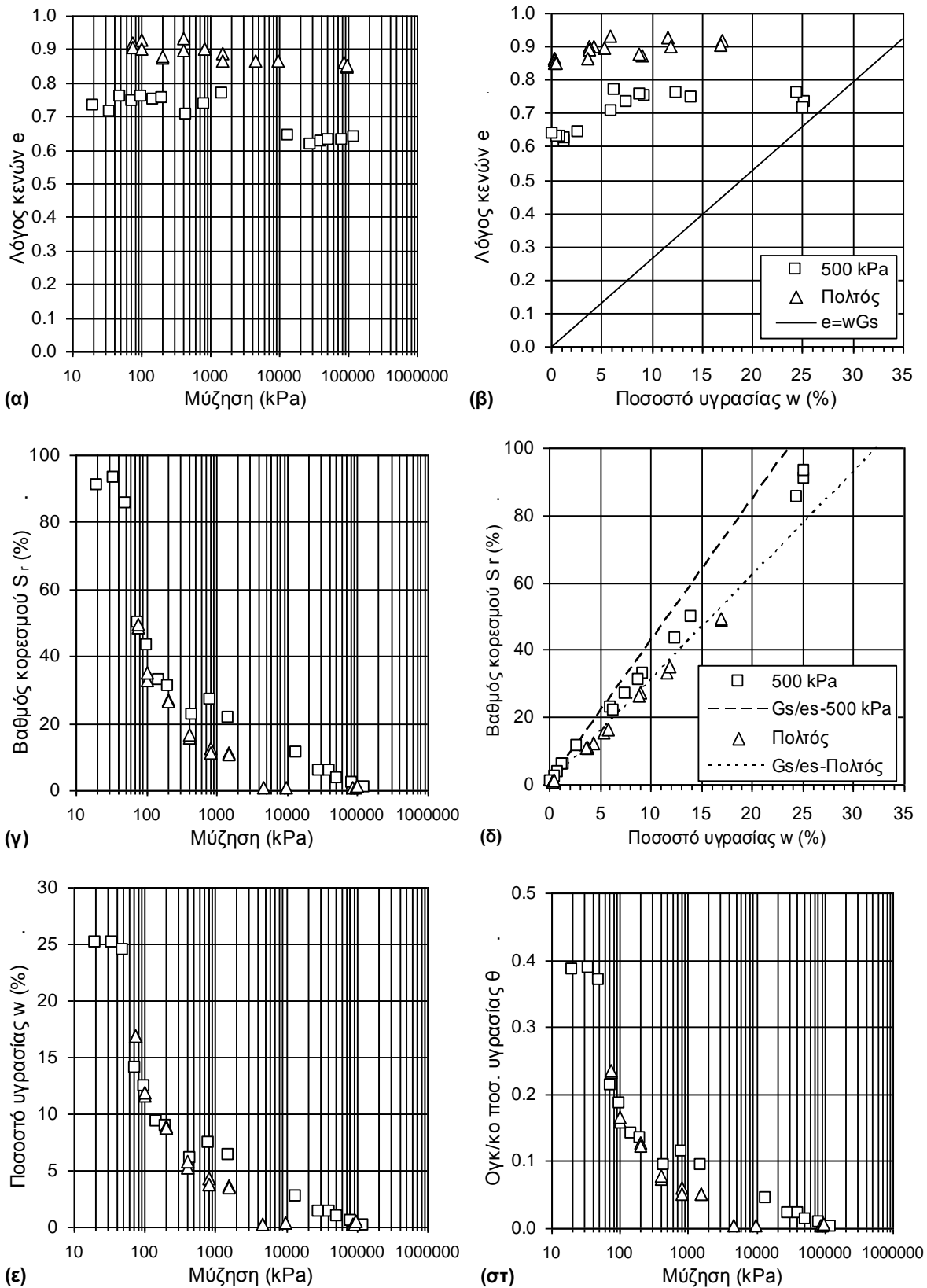
### 14.3.13 Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου

Η πειραματική διερεύνηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού μέχρι αυτό το σημείο εξέτασε την επιρροή της χαρακτηριστικών των λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών (δοκιμές σε υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης με δείκτη πλαστικότητας από 1 έως 47.5 –Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων και Άργιλος Αμφιλοχίας αντίστοιχα), της επιρροής της δομής των υλικών όπως αυτή προκύπτει από μεταβολές του αρχικού λόγου κενών λόγω φόρτισης (δοκιμές στις αργίλους Αμαρουσίου, Ορεστιάδας Έβρου και Αμφιλοχίας καθώς και στη Μάργα Χαλκουτσίου) αλλά και της επιρροής της δομής που δημιουργείται από άλλους παράγοντες όπως ο ερπυσμός και η σιμέντωση, είτε τεχνητά (δοκιμές στην Άργιλο Αμφιλοχίας), είτε φυσικά (δοκιμές σε αδιατάρακτα δείγματα Μάργας Κορίνθου, Μάργας Χαλκουτσίου και αργιλοποιημένου Ιλυολίθου Πάρνηθας). Προκειμένου να ολοκληρωθεί η σχετική διερεύνηση για λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά αναζητήθηκε και ένα, λεπτόκοκκο μεν, μη πλαστικό δε υλικό. Το υλικό που βρέθηκε να πληρεί αυτά τα χαρακτηριστικά ήταν ο αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου, ένα εδαφικό υλικό, προϊόν της αποσάθρωσης των φυλλιτών που απαντώνται στο βόρειο τμήμα της Σκύρου. Το υλικό αυτό έχει ποσοστό διερχομένων από το κόσκινο Νο 200 72.9% με το υπόλοιπο 27.1% να είναι άμμος (κυρίως λεπτή, δευτερευόντως μέση και με ίχνη μόνο χονδρής) και να είναι μη πλαστικό. Ενδεικτικά η σύγκριση γίνεται με την άργιλο Μελίτης Φλώρινας, η οποία έχει μικρότερο ποσοστό διερχομένων από το κόσκινο Νο 200 (62.9%) αλλά είναι ένα υλικό μέσης πλαστικότητας με όριο υδαρότητας 46% και δείκτη πλαστικότητας 30. Η αιτία της διαφοράς των δύο υλικών πρέπει να αναζητηθεί στην ορυκτολογική τους σύσταση (η οποία όμως δεν προσδιορίστηκε) και –ίσως κυρίως- στην κοκκομετρική τους διαβάθμιση, αφού το περιεχόμενο κλάσμα μεγέθους αργίλου στον αποσαθρωμένο φυλλίτη είναι μόλις 1.3% ενώ στην Άργιλο Μελίτης είναι 19.3%. Με αυτό το υλικό λοιπόν ολοκληρώθηκε η διερεύνηση των κλάδων ξήρανσης των λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών για διάφορες αρχικές συνθήκες προ ξήρανσης από ένα μη πλαστικό υλικό μέχρι εδαφικά υλικά πολύ υψηλής πλαστικότητας.

Το δείγμα του υλικού που βρέθηκε ήταν έντονα διαταραγμένο με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε δείγματα του υλικού στην φυσική του κατάσταση. Από την άλλη οι ποσότητες επαρκούσαν για να μετρηθεί η καμπύλη και του αναζυμωμένου υλικού αλλά και του υλικού μετά από αναζύμωση, επανασυμπιέσή του υπό μονοδιάστατες συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισή του μέχρι μηδενική τάση προ έναρξης ξήρανσης. Δεδομένου ότι το υλικό αν και λεπτόκοκκο είναι μη πλαστικό, ήταν αδύνατο να καθοριστεί το αρχικό ποσοστό υγρασίας του πολτού ως ποσοστό του ορίου

υδαρότητας του υλικού. Επιλέχθηκε λοιπόν η προοδευτική ανάμειξη του αποξηραμένου σε φούρνο υλικό με νερό μέχρι την επίτευξη ενός ποσοστού υγρασίας που οδηγούσε σε έναν πολτό ο οποίος οπτικά είχε την ίδια ρευστότητα με έναν πολτό ενός πλαστικού υλικού αναζυμωμένου σε ποσοστό υγρασίας ίσο με 1.5 φορές το όριο υδαρότητας ενός από τα πλαστικά υλικά που είχαν ήδη εξεταστεί. Αυτό το ποσοστό υγρασίας προέκυψε ότι ήταν περίπου 40%. Έτσι παρασκευάστηκε πολτός του υλικού με ποσοστό υγρασίας 40% και χρησιμοποιήθηκε για να μετρηθεί η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού απευθείας σε αυτόν αλλά και για την παρασκευή των επανασυμπιεσμένων δοκιμών υπό μονοδιάστατες συνθήκες φόρτισης μέχρι κατακόρυφη τάση 500 kPa.

Στο Σχ. 14.21 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που προσδιορίστηκαν για τον αναζυμωμένο και τον αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο αποσθρωμένο Φυλλίτη Σκύρου. Και το αναζυμωμένο και το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό παρουσιάζουν μικρή διασπορά, η οποία, παρά την μικρή συμπίεστότητα του υλικού, επιτρέπει να διαφανεί μία σαφής τάση μείωσης του λόγου κενών από το 0.75 (πλήρως κορεσμένο υλικό) στο 0.63 προκειμένου για το αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο υλικό και από το 1.06 στο 0.86 για το αναζυμωμένο υλικό. Όπως φαίνεται από τα Σχ. 14.21β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 14.21γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) έγινε αποκορεσμός του υλικού και στις δυο του μορφές και μάλιστα σε πολύ χαμηλή τιμή της μύζησης. Προκειμένου για το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό η πίεση διείσδυσης αέρα πρέπει να κείται μεταξύ 10 και 15 kPa και για το αναζυμωμένο υλικό μπορεί μόνο να υποθεθεί –διά προεκτάσεως της καμπύλης του στο Σχ. 14.21γ- ότι η πίεση διείσδυσης αέρα πρέπει να είναι μικρότερη ίσως και των 5 kPa. Σε ό,τι αφορά τη σύγκριση της καμπύλης του αναζυμωμένου/επανασυμπιεσμένου υλικού με αυτή του αναζυμωμένου, η πρώτη κείται σαφώς υψηλότερα και δεξιότερα της τελευταίας στα Σχ. 14.21γ, 14.21ε και 14.21στ. Από το Σχ. 14.21β προκύπτει παραμένων λόγος κενών 0.63 για το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό και 0.86 για το αναζυμωμένο υλικό. Τέλος από τα Σχ. 14.21ε και 14.21στ προκύπτει ότι και το ποσοστό υγρασίας και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνονται με την μύζηση με ρυθμό αντίστοιχο του ρυθμού μείωσης του βαθμού κορεσμού.



**Σχήμα 14.21.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού του αποσαθρωμένου Φυλλίτη Σκύρου (αναζυμωμένο υλικό και αναζυμωμένο/επανασυμπίεσμένο στα 500 kPa υλικό).

#### 14.3.14 Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού από μοναδικό δοκίμιο

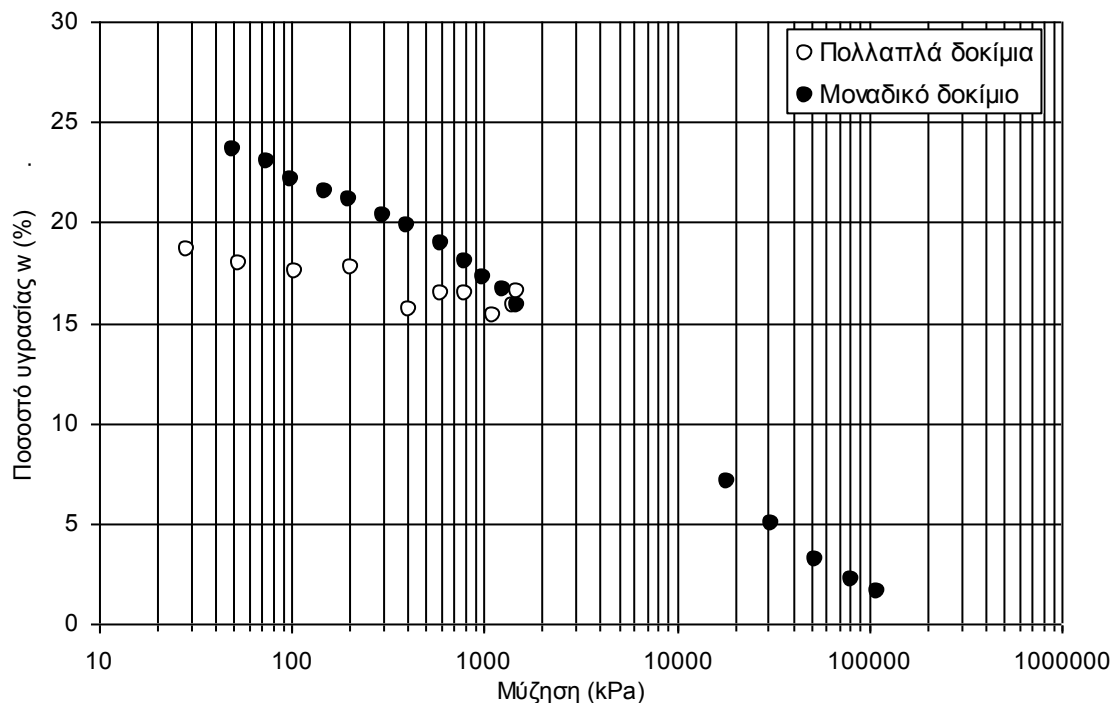
Όταν ξεκίνησε το πρόγραμμα των εργαστηριακών δοκιμών στα 13 εδαφικά υλικά για τα οποία παρουσιάστηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού έως αυτό το σημείο, η μόνη διαθέσιμη μέθοδος ελέγχου της μύζησης ήταν η μέθοδος μετατόπισης άξονα. Με αυτή μόνο έγιναν δοκιμές στην άργιλο Χανίων, στην άργιλο και στην μάργα Κηφισιάς και στην Μάργα Κορίνθου (στο φυσικό και το αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο υλικό). Όταν πια κατέστη διαθέσιμη και η μέθοδος ελέγχου υδατικών διαλυμάτων είχαν περιοριστεί πάρα πολύ οι διαθέσιμες ποσότητες των υλικών στα οποία είχαν γίνει μετρήσεις μόνο με εφαρμογή της μεθόδου μετατόπισης άξονα. Οι διαθέσιμες ποσότητες επαρκούσαν για την μόρφωση μόνο ενός δοκιμίου από κάθε υλικό, το οποίο τοποθετήθηκε αρχικά εντός του θαλάμου μύζησης για προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης από μοναδικό δοκίμιο. Μετά την επιβολή και της μέγιστης τιμής της μύζησης των 1500 kPa, τα δοκίμια των υλικών εξήχθησαν από τον θάλαμο μύζησης, τεμαχίστηκαν στα 5 (από ένα για κάθε έναν από τους διαθέσιμους θαλάμους διατήρησης υδατικών διαλυμάτων) και τοποθετήθηκαν εντός αυτών μέχρι σταθεροποίησης του ολικού τους βάρους, οπότε εξήχθησαν και σε ένα μέρος τους μετρήθηκε το ποσοστό υγρασίας τους και στο άλλο η ολική τους μύζηση στο υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου. Στα Σχ. 14.22 έως 14.24 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης που προέκυψαν και με τη μέθοδο πολλαπλών δοκιμών και με τη μέθοδο μοναδικού δοκιμίου.

Λόγω της διαφοροποίησης του δείγματος που είχε απομείνει για κάθε υλικό καλή σύμπτωση των καμπυλών από την μέθοδο πολλαπλών δοκιμών και την μέθοδο μοναδικού δοκιμίου προέκυψε μόνο για την Άργιλο Κηφισιάς και την Μάργα Κορίνθου (προφανώς συγκρίνοντας τους κλάδους που εκτείνονται στο ίδιο εύρος τιμών της μύζησης). Αντίθετα, για την Άργιλο Χανίων και την Μάργα Κηφισιάς προέκυψε μεγαλύτερο αρχικό ποσοστό υγρασίας του δοκιμίου που παρασκευάστηκε μετά από αναζύμωση, συμπίεση μέχρι την ίδια τάση όπως και στη μέθοδο πολλαπλών δοκιμών και πλήρη αποφόρτιση. Σε κάθε περίπτωση προέκυψαν τα εξής:

- Για την Άργιλο Χανίων προέκυψε η ίδια εκτίμηση για αποκορεσμό πιθανότατα σε τιμές της μύζησης μεταξύ 1200 και 1300 kPa. Το πρώτο μέρος του σμήνους των σημείων που προέκυψαν από την μέθοδο των υδατικών διαλυμάτων μοιάζει να είναι η νοητή συνέχεια της καμπύλης του προηγούμενου σμήνους των σημείων από την μέθοδο μετατόπισης άξονα και σε τιμή της μύζησης περί τα 50 MPa εμφανίζεται μάλλον το παραμένον ποσοστό υγρασίας

του 3%. Η τιμή αυτή είναι περί το 1% υψηλότερη από εκείνη που προέκυψε από την άφεση δοκιμίων για πλήρη ξήρανση στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου στη μέθοδο πολλαπλών δοκιμίων σε αυτό το υλικό.

- Για την Άργιλο Κηφισιάς προέκυψε η ίδια εκτίμηση για αποκορεσμό πιθανότατα σε τιμές της μύζησης μεγαλύτερες των 1500 kPa. Το πρώτο μέρος του σμήνους των σημείων που προέκυψαν από την μέθοδο των υδατικών διαλυμάτων μοιάζει να είναι η νοητή συνέχεια της καμπύλης του προηγούμενου σμήνους των σημείων από την μέθοδο μετατόπισης άξονα και σε τιμή της μύζησης περί τα 80 MPa εμφανίζεται μάλλον το παραμένον ποσοστό υγρασίας του 3%. Η τιμή αυτή είναι περί το 0.5% υψηλότερη από εκείνη που προέκυψε από την άφεση δοκιμίων για πλήρη ξήρανση στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου στην μέθοδο πολλαπλών δοκιμίων σε αυτό το υλικό.
- Για την Μάργα Κηφισιάς προέκυψαν πρακτικά τα ίδια συμπεράσματα που προέκυψαν και για την Άργιλο Κηφισιάς, δηλ. η ίδια εκτίμηση για αποκορεσμό πιθανότατα σε τιμές της μύζησης μεγαλύτερες των 1500 kPa, νοητή συνέχεια της καμπύλης του σμήνους των σημείων από την μέθοδο μετατόπισης άξονα από το πρώτο μέρος του σμήνους των σημείων που προέκυψαν από την μέθοδο των υδατικών διαλυμάτων, και εμφάνιση του παραμένοντος



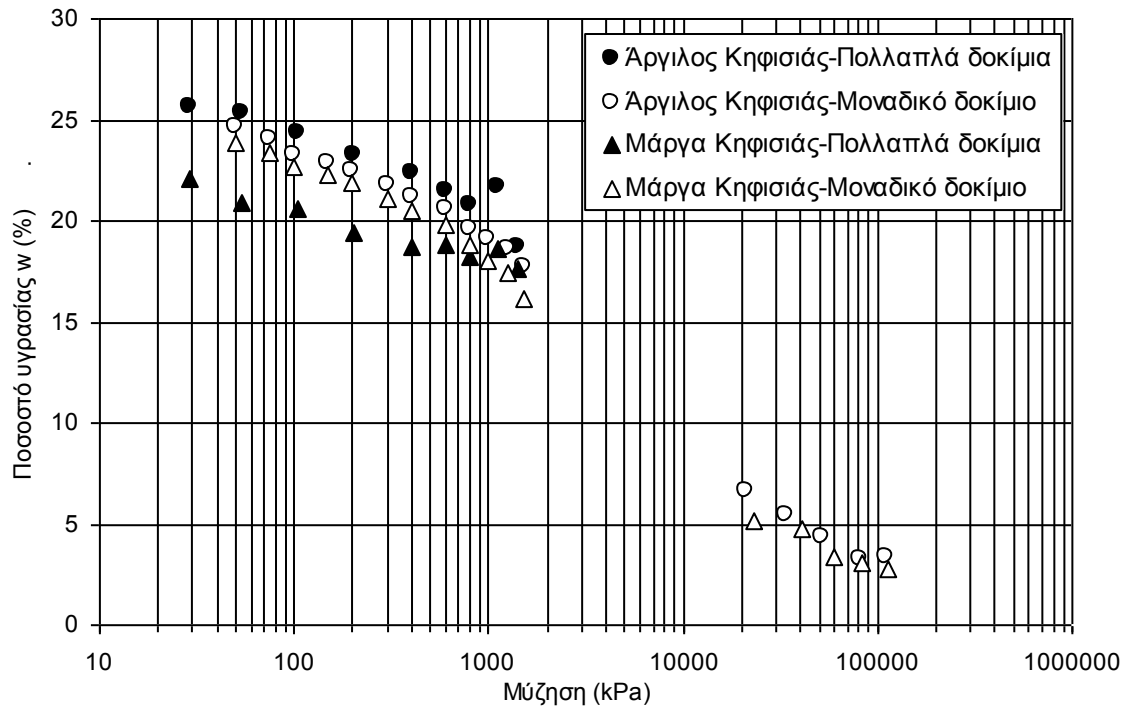
**Σχήμα 14.22.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της αναζυμωμένης/επανασυμπιεσμένης Αργίλου Χανίων σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης από την μέθοδο πολλαπλών δοκιμίων (Σχ. 14.5ε) και την μέθοδο μοναδικού δοκίμιου.

υγρασίας είναι και πάλι περί το 0.5% υψηλότερο από εκείνο που προέκυψε από την άφεση δοκιμίων για πλήρη ξήρανση στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου στην μέθοδο πολλαπλών δοκιμίων σε αυτό το υλικό.

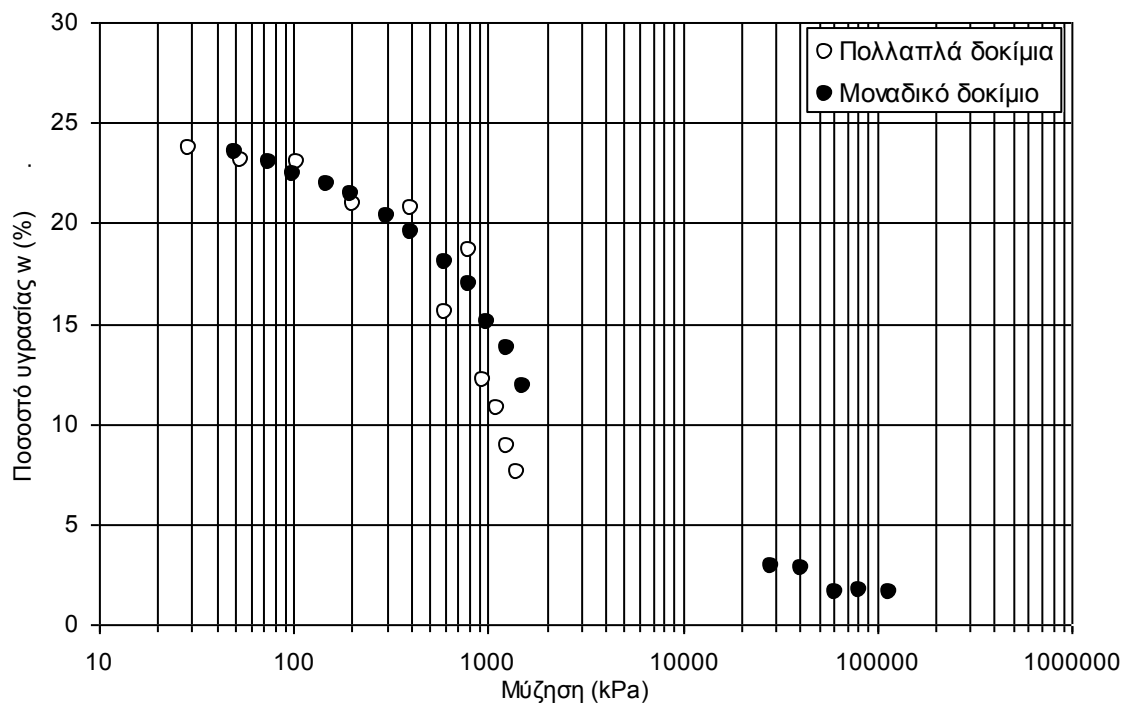
- Για τη Μάργα Κορίνθου, η ομαλότητα της καμπύλης δεν επιτρέπει ακριβή τοποθέτηση της μύζησης αποκορεσμού αφού το σημείο καμπής τοποθετείται μεταξύ 200 και 800 kPa. Επίσης σε αυτό το υλικό το σμήνος των σημείων που προέκυψαν από την μέθοδο των υδατικών διαλυμάτων δεν μοιάζει να είναι η νοητή συνέχεια της καμπύλης του προηγούμενου σμήνους των σημείων από την μέθοδο μετατόπισης άξονα, αφού οι προεκτάσεις καθενός από τα δύο σμήνη των πειραματικών σημείων προς το άλλο οδηγεί σε νοητή τομή στο σημείο: μύζηση περί τα 3 MPa και ποσοστό υγρασίας περί το 5%. Η τιμή αυτή είναι αρκετά υψηλότερη από εκείνη που προέκυψε από την άφεση δοκιμίων για πλήρη ξήρανση στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου στην μέθοδο πολλαπλών δοκιμίων σε αυτό το υλικό.

Παρά τη μάλλον πτωχή σύγκριση των καμπυλών από τις δύο μεθόδους (πολλαπλών δοκιμίων και μοναδικού δοκιμίου), η ομαλότητα και μικρότερη διασπορά των σημείων των καμπυλών επιτρέπει την ολοκλήρωση της εικόνας για τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού των συγκεκριμένων εδαφικών υλικών σε μεγαλύτερες τιμές της μύζησης όπως αυτές μπορούν να εφαρμοστούν με την μέθοδο υδατικών διαλυμάτων.

Σε ό,τι αφορά αυτή καθεαυτή τη σύγκριση μεταξύ καμπυλών όπως έχουν μετρηθεί σε ένα δοκίμιο και σε περισσότερα δοκίμια (μέθοδος «μοναδικού» και «πολλαπλών» δοκιμίων αντίστοιχα), επιδείχθηκε ήδη και για άλλα υλικά εκτός από αυτά που προαναφέρθηκαν στην παράγραφο αυτή ότι οι καμπύλες σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης ήταν πρακτικά οι ίδιες. Συγκεκριμένα επιδείχθηκε για την άργιλο Λιβαδερού Δράμας (Σχ. 14.6ε) και την άργιλο Αμφιλοχίας (14.12ε), ενώ πέραν της σύγκρισης και με την εφαρμογή της μεθόδου μετατόπισης άξονα σε κελί Tempe, πρακτικά η σύγκριση μεταξύ μοναδικού και πολλαπλών δοκιμίων πραγματοποιήθηκε και για τους πολτούς της αργίλου Ορεστιάδας Έβρου (Σχ. 14.10ε) αλλά και τους πολτούς της μάργας Χαλκουτσίου (Σχ. 14.17ε). Κατά συνέπεια, πράγματι στις περιπτώσεις που δεν επαρκεί το διαθέσιμο υλικό για εφαρμογή της μεθόδου πολλαπλών δοκιμίων (οπότε για κάθε ξεχωριστό δοκίμιο που αντιστοιχεί σε διαφορετική τιμή της μύζησης μπορούν να γίνουν και μετρήσεις του ολικού όγκου με εμβάπτιση σε υγρή παραφίνη) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος μοναδικού δοκιμίου για να προκύψει η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, τουλάχιστον σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης.



**Σχήμα 14.23.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της αναζυμωμένης/επανασυμπιεσμένης Αργίλου και Μάργας Κηφισιάς σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης από την μέθοδο πολλαπλών δοκιμών (Σχ. 14.7ε) και την μέθοδο μοναδικού δοκιμίου.



**Σχήμα 14.24.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της αναζυμωμένης/επανασυμπιεσμένης Μάργας Κορίνθου σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης από την μέθοδο πολλαπλών δοκιμών (Σχ. 14.15ε) και την μέθοδο μοναδικού δοκιμίου.

### 14.3.15 Μαθηματική προσομοίωση των προσδιορισθειών χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού που πραγματοποιήθηκαν<sup>10</sup>. Οι καμπύλες προσομοιώθηκαν σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης. Για την προσομοίωση των καμπυλών χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι του Brutsaert (1966), του van Genuchten (1980) και των Fredlund & Xing (1994) –Εξ. 4.9, 4.13 και 4.19 στο Κεφ. 4 του πρώτου μέρους οι οποίες παρατίθενται και εδώ χάριν ευκολίας πρόσβασης.

$$S_r = \frac{1}{1 + \left(\frac{s}{a}\right)^n} \quad (4.9)$$

$$S_r = \frac{1}{[1 + (as)^n]^m} \quad (4.13)$$

$$S_r = \frac{1}{\left(\ln\left(e + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right)\right)^m} \quad (4.19)$$

Για την κατάληξη στις παραμέτρους βέλτιστης προσέγγισης των πραγματικών καμπυλών καταστρώθηκε λογιστικό φύλλο επεξεργασίας στο οποίο χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων για την αξιολόγηση της προσέγγισης στα πραγματικά δεδομένα. Στο Σχ. 14.25 παρουσιάζονται οι καμπύλες των πραγματικών δεδομένων και οι βέλτιστες προσεγγίσεις για όλα τα υλικά εκτός από την Άργιλο Χανίων, την Άργιλο Κηφισιάς και την Μάργα Κηφισιάς, καθώς για αυτά τα υλικά υπήρχε διαθέσιμη μόνο η μέθοδος μετατόπισης άξονα (έως 1500 kPa μέγιστη τιμή μύζησης) και άρα όπως αναφέρθηκε ήδη σημεία της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού πρακτικά μόνο για τιμές της μύζησης μικρότερες της πίεσης διείσδυσης αέρα των υλικών (το οποίο δηλαδή σημαίνει ότι μπορεί να διέλθει απειρία μαθηματικά προσομοιούμενων καμπυλών από τα σημεία που υπήρχαν διαθέσιμα για κάθε υλικό από αυτά).

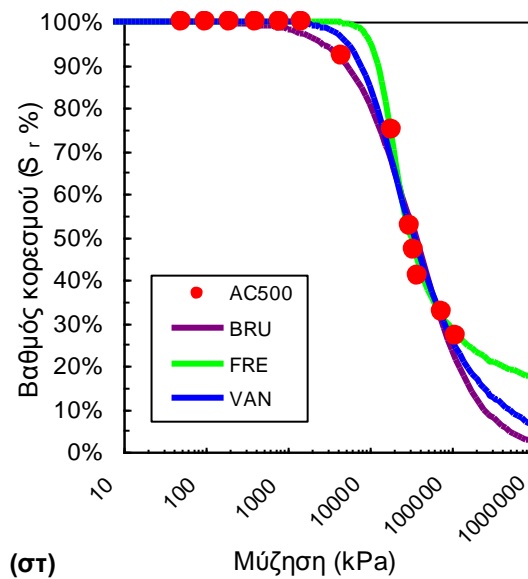
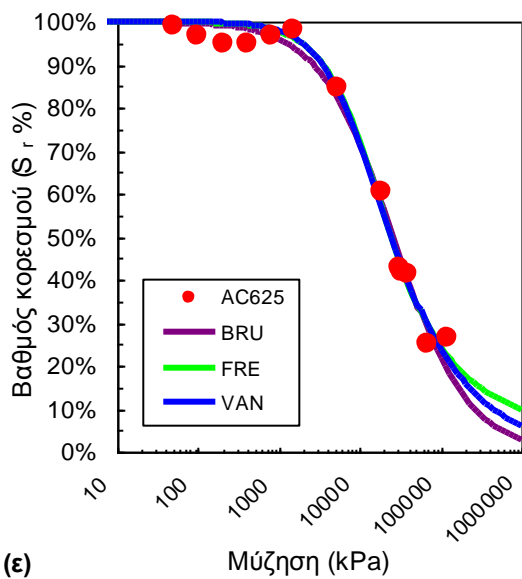
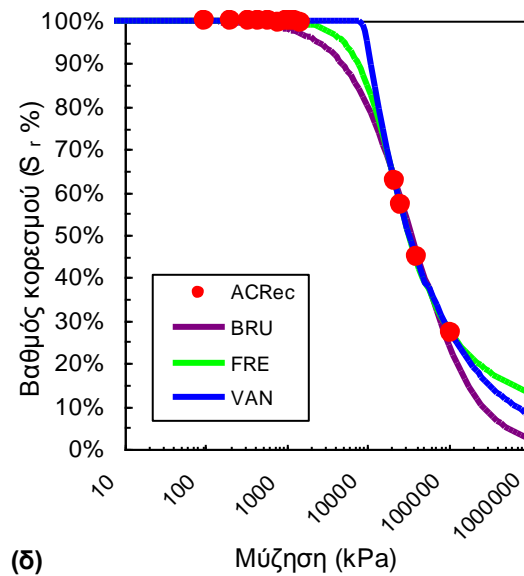
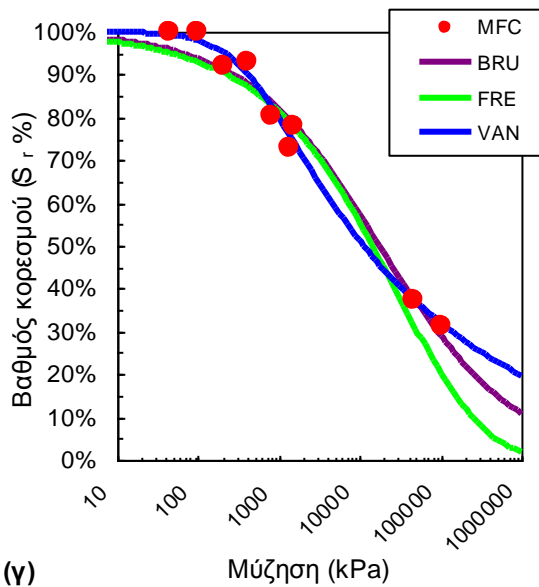
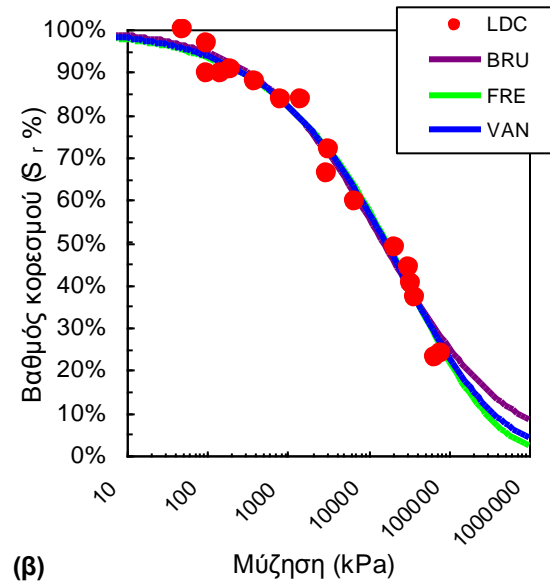
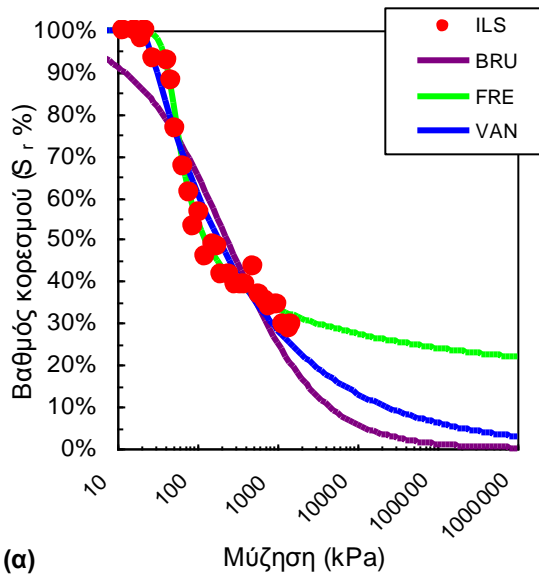
Γενικά πιο εύκολη στην διαδικασία προσομοίωσης αποδείχθηκε η μέθοδος του Brutsaert (1966), όπως άλλωστε αναμενόταν αφού χρησιμοποιεί μόνο δύο παραμέτρους. Μειονέκτημα της

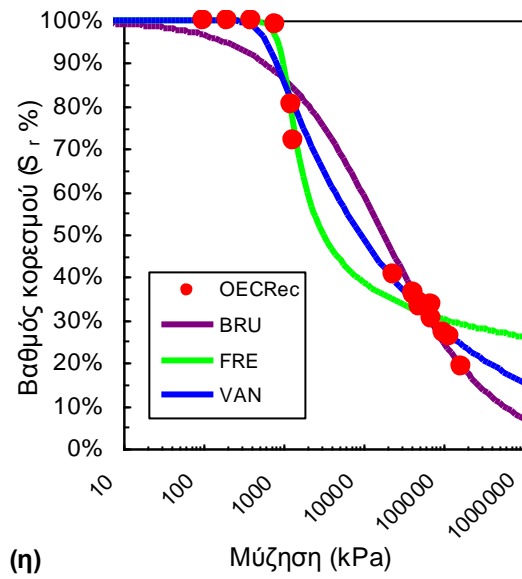
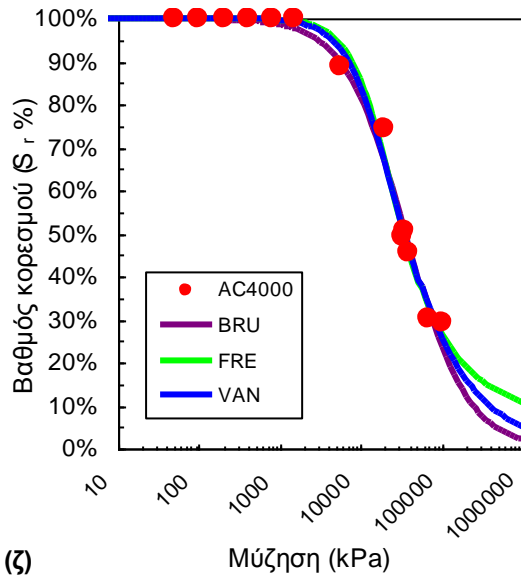
<sup>10</sup> Αυτή καθεαυτή η προσομοίωση που παρουσιάζεται σε αυτήν την παράγραφο έγινε από τον κ. Π. Σιταρένιο, Πολιτικό Μηχανικό, υποψήφιο διδάκτορα του Τομέα Γεωτεχνικής.



μεθόδου αποτελεί η αδυναμία της να προσεγγίσει καλά καμπύλες στις οποίες υπάρχει ραγδαία μείωση της παραμέτρου που συσχετίζεται με την μύζηση, όπως φάνηκε χαρακτηριστικά με την καμπύλη της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων (Σχ. 14.25α) και της αναζυμωμένης Αργίλου Ορεστιάδας Έβρου (Σχ. 14.25η). Γενικά ωστόσο επέδειξε πρακτικά ταύτιση με τις άλλες δύο μεθόδους. Η μέθοδος του van Genuchten (1980) επέδειξε την δεύτερη καλύτερη προσέγγιση και μέτρια ευκολία προσδιορισμού των τιμών των παραμέτρων που οδηγούν στην βέλτιστη προσέγγιση. Τέλος, η μέθοδος των Fredlund & Xing (1994) επέδειξε γενικά την βέλτιστη προσέγγιση για τις περισσότερες από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η μέγιστη παρατηρηθείσα δυσκολία προσδιορισμού των τιμών των παραμέτρων που οδηγούν στην βέλτιστη προσέγγιση καθώς και η απαίτηση για έναν διορθωτικό όρο ώστε σε αρκετές περιπτώσεις το αποτέλεσμα της προσέγγισης να οδηγείται εγγύτερα στο 0 για μύζηση 1000000 kPa (αυτό άλλωστε έχει επισημανθεί και από τους Fredlund & Xing, 1994, και είναι κάτι που απετέλεσε πρόβλημα και για τις άλλες δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν αν και σε πολύ λιγότερες περιπτώσεις γενικά).

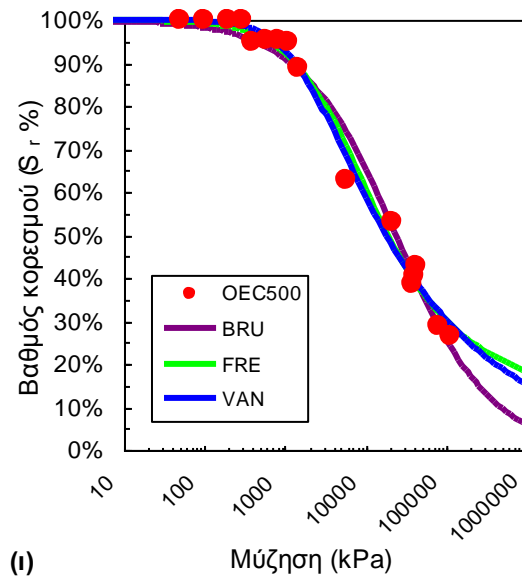
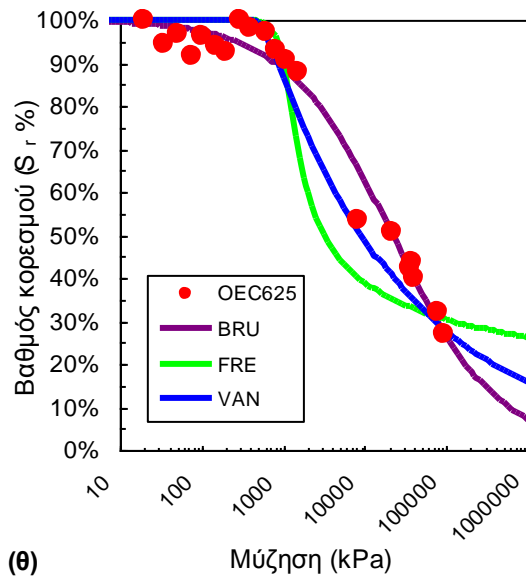
Στον Πίν. 14.3 συνοψίζονται οι παράμετροι βέλτιστης προσέγγισης για κάθε μία από τις τρεις μεθόδους προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού όλων των υλικών. Στον πίνακα θεωρήθηκε σκόπιμο να παρατεθεί και το αντίστροφο της παραμέτρου  $a$  για την μέθοδο του van Genuchten (1980), το οποίο αντιστοιχεί και αυτό περίπου στην πίεση διείδυσης αέρα, για καλύτερη αίσθηση των αποτελεσμάτων. Όπως προκύπτει λοιπόν από τον Πίν. 14.3 υπάρχουν τιμές, ειδικά της παραμέτρου  $a$ , οι οποίες είναι είτε υπερβολικές, είτε ακόμα και εξ ορισμού λαθασμένες. Στην πρώτη ομάδα υπάγονται τιμές της παραμέτρου  $a$  που υπολογίστηκαν για την μέθοδο του van Genuchten (1980) για την Άργιλο Λιβαδερού Δράμας, την Άργιλο Αμφιλοχίας (αναζυμωμένη και μετά από φόρτιση ως τα 62.5 kPa και αποφόρτιση) καθώς και τον φυσικό αργιλοποιημένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας. Όταν υπολογιστεί το αντίστροφο της παραμέτρου  $a$  της μεθόδου του van Genuchten (1980) προκύπτουν εξαψήφιας τιμές (σε kPa) το οποίο δεν είναι λογικό για τις συγκεκριμένες χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού. Στη δεύτερη ομάδα υπάγονται τιμές της παραμέτρου  $a$  για την μέθοδο του van Genuchten (1980) για την σιμεντωμένη Άργιλο Αμφιλοχίας αλλά και της παραμέτρου  $a$  για την μέθοδο των Fredlund & Xing (1994) για την Άργιλο Λιβαδερού Δράμας, την Άργιλο Μελίτης Φλώρινας, την Άργιλο Αμφιλοχίας (αναζυμωμένη, μετά από φόρτιση ως τα 62.5 kPa και αποφόρτιση, αλλά και σιμεντωμένη) καθώς και τον φυσικό αργιλοποιημένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας. Για το αντίστροφο λοιπόν της παραμέτρου  $a$  για την μέθοδο του van Genuchten (1980) και τις τιμές της παραμέτρου  $a$  για την μέθοδο των Fredlund





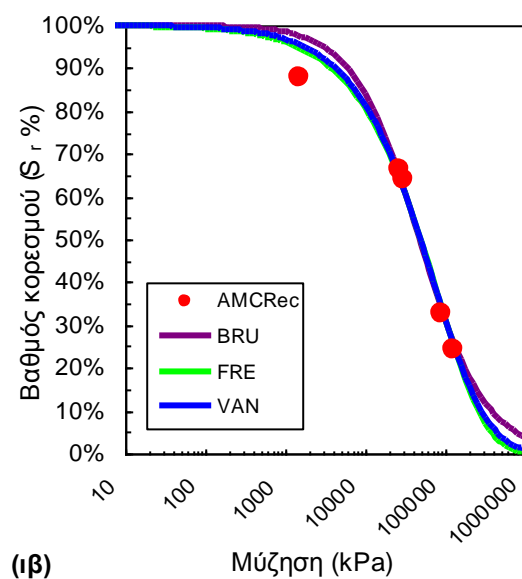
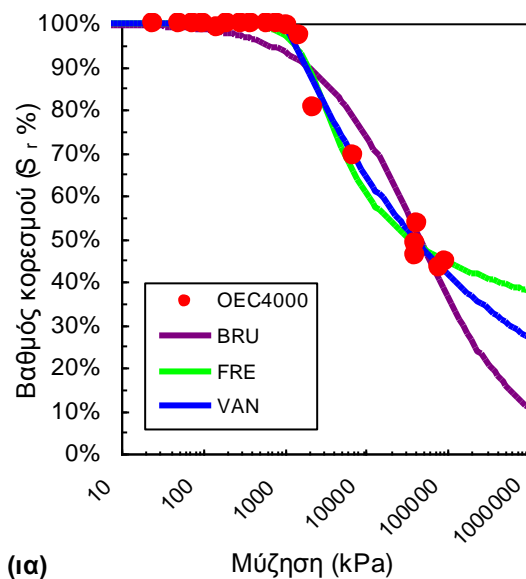
(ζ)

(η)



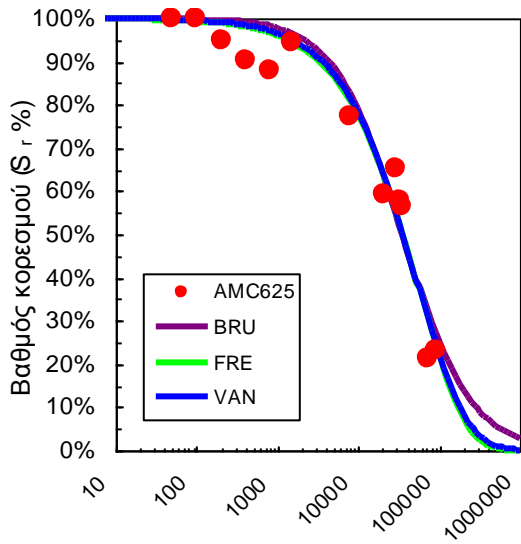
(θ)

(ι)

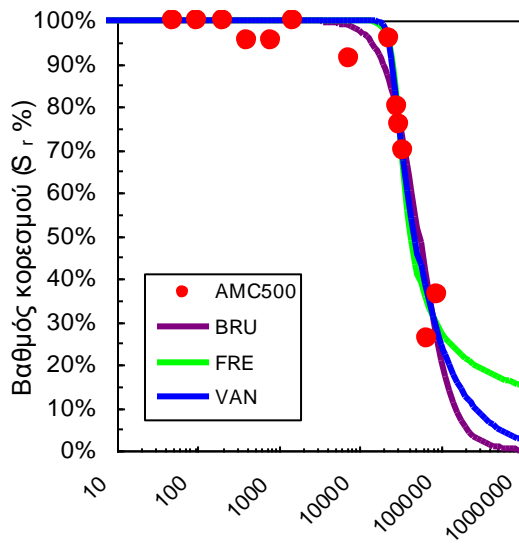


(ια)

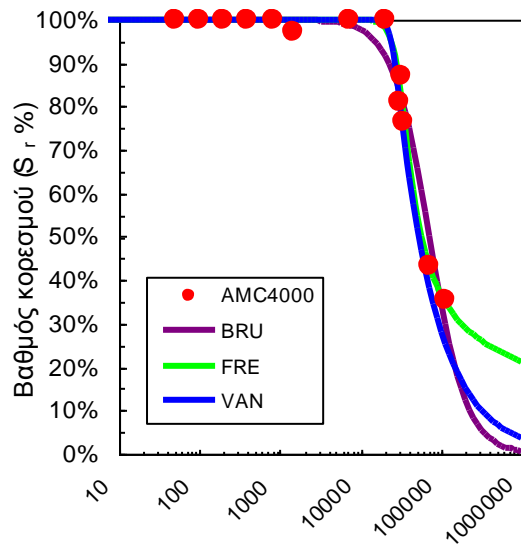
(ιβ)



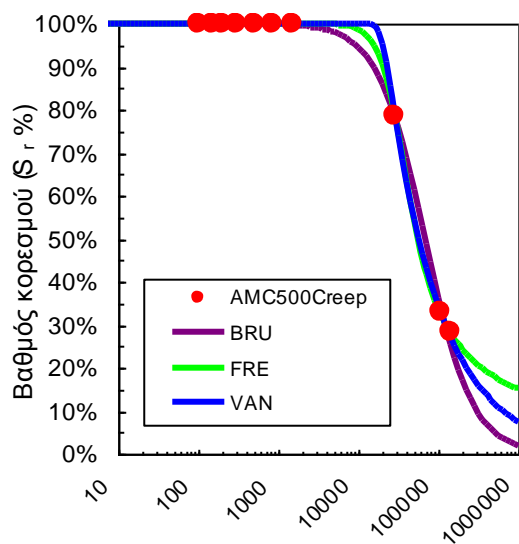
(iv) Μύζηση (kPa)



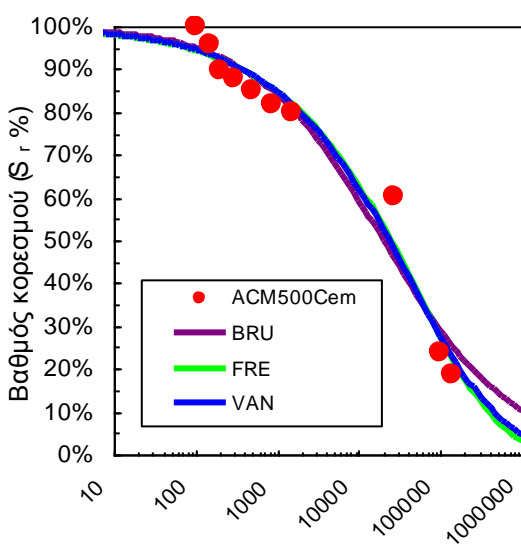
(ιδ) Μύζηση (kPa)



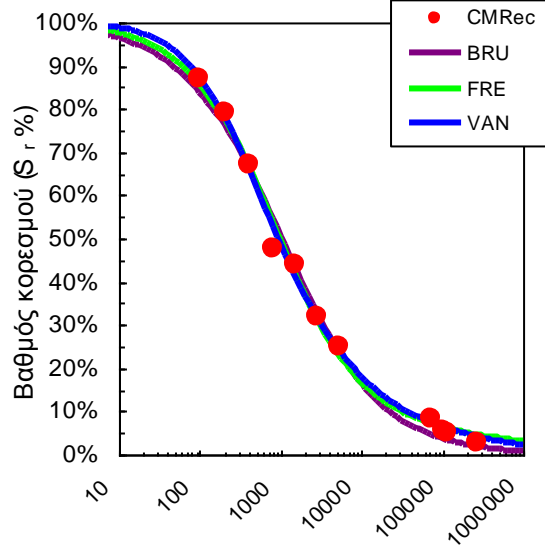
(ie) Μύζηση (kPa)



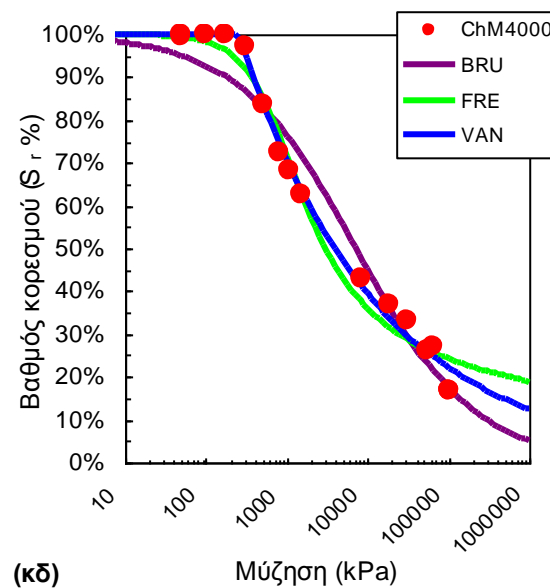
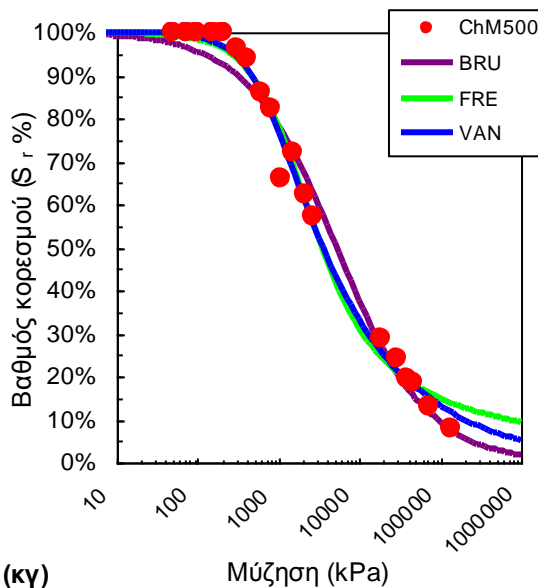
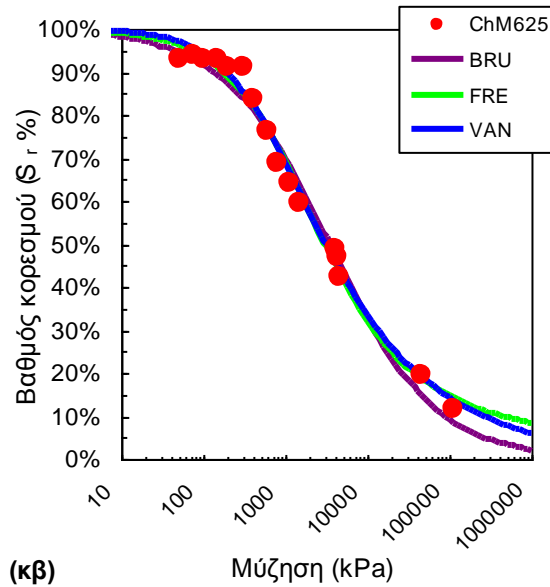
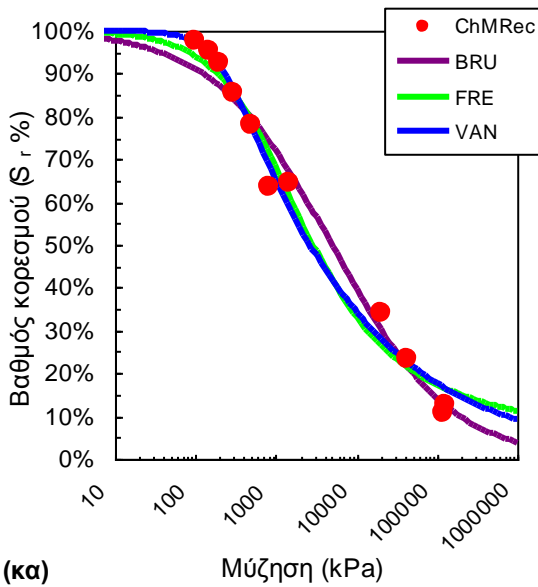
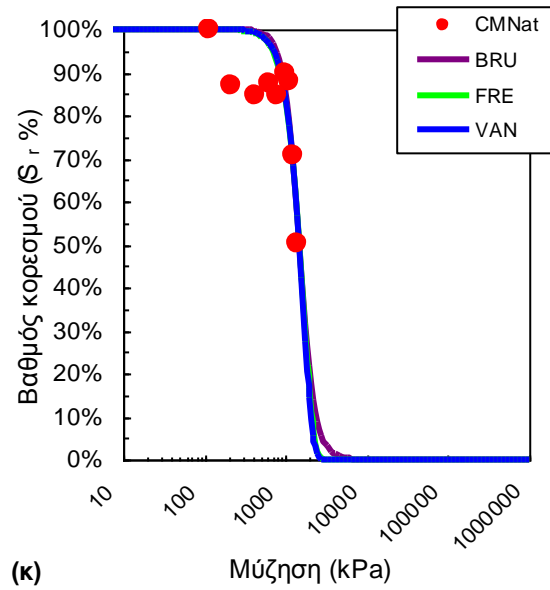
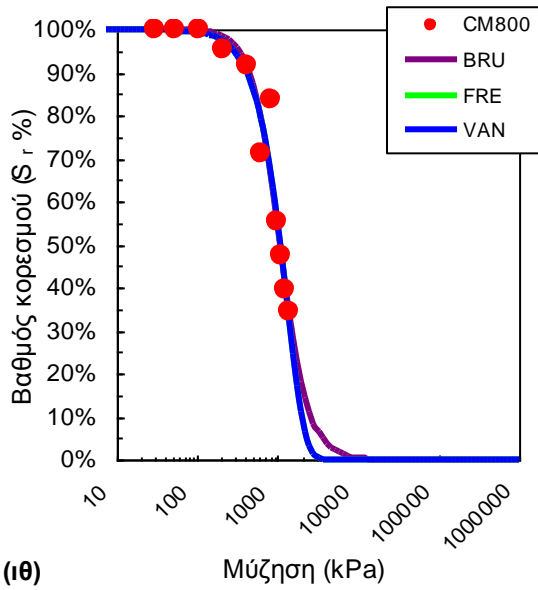
(ιστ) Μύζηση (kPa)

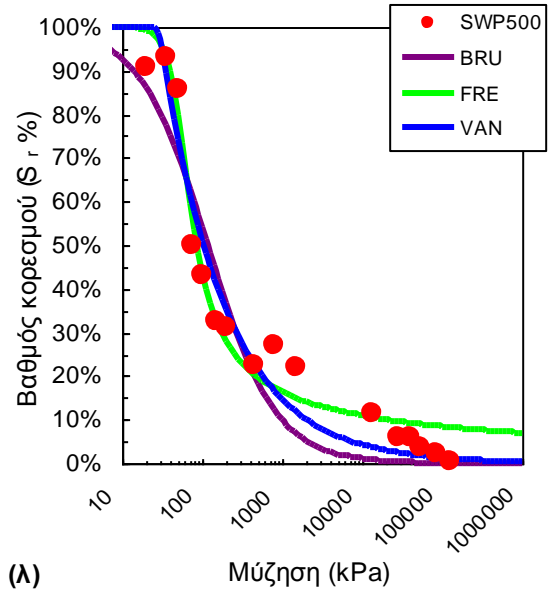
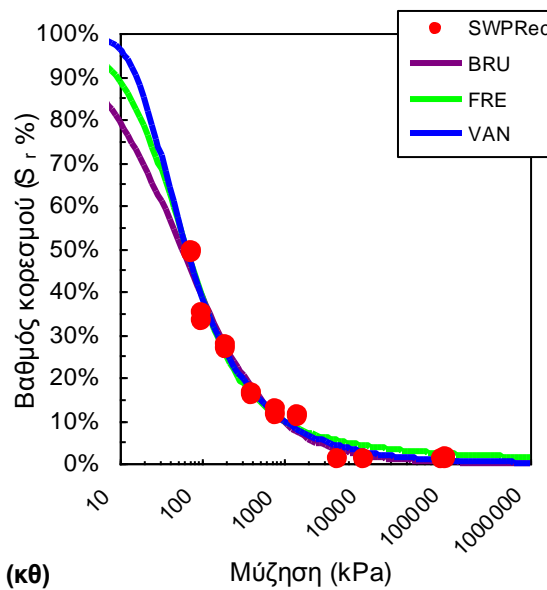
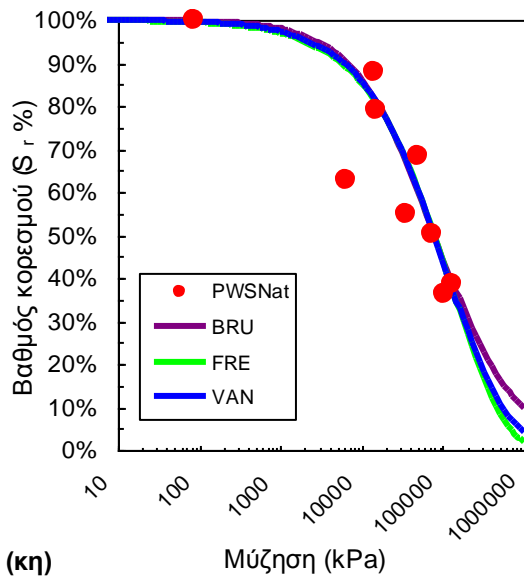
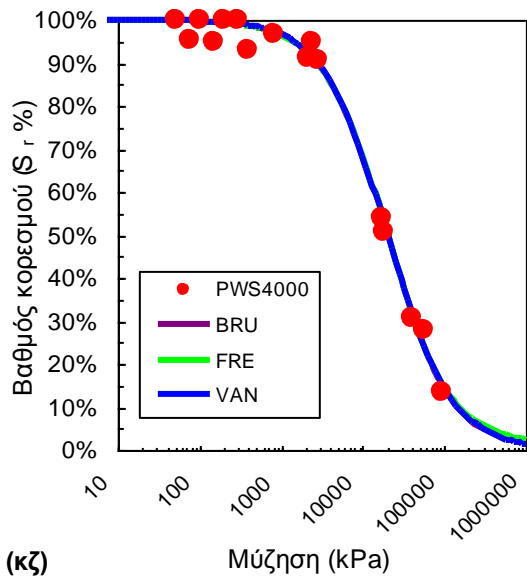
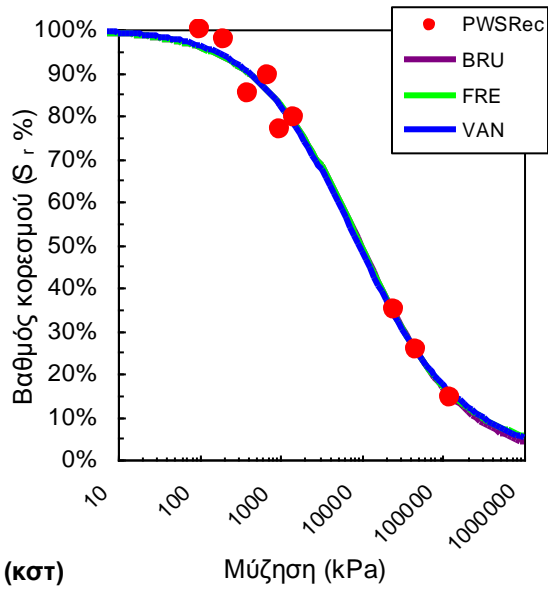
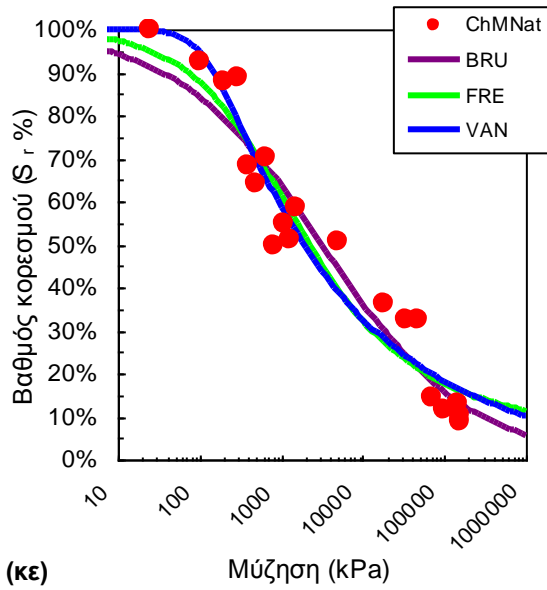


(ιζ) Μύζηση (kPa)



(ιη) Μύζηση (kPa)





**Σχήμα 14.25.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης για όλα τα εδαφικά υλικά της παρούσας εργαστηριακής διερεύνησης (που υπήρχαν αρκετά πειραματικά σημεία πέραν της πίεσης διείσδυσης αέρα) με τις βέλτιστες προσεγγίσεις τους με βάση τα μαθηματικά προσομοιώματα των Brutsaert (1966) –συμβολισμός «BRU»-, Fredlund & Xing (1994) –συμβολισμός «FRE»- και van Genuchten (1980) –συμβολισμός «VAN»: α) Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων, β) Άργιλος Λιβαδερού Δράμας, γ) Άργιλος Μελίτης Φλώρινας, δ) αναζυμωμένη Άργιλος Αμαρουσίου, ε) Άργιλος Αμαρουσίου μετά από φόρτιση στα 62.5 kPa και αποφόρτιση, στ) Άργιλος Αμαρουσίου μετά από φόρτιση στα 500 kPa και αποφόρτιση, ζ) Άργιλος Αμαρουσίου μετά από φόρτιση στα 4000 kPa και αποφόρτιση, η) αναζυμωμένη Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου, θ) Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου μετά από φόρτιση στα 62.5 kPa και αποφόρτιση, ι) Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου μετά από φόρτιση στα 500 kPa και αποφόρτιση, ια) Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου μετά από φόρτιση στα 4000 kPa και αποφόρτιση, ιβ) αναζυμωμένη Άργιλος Αμφιλοχίας, ιγ) Άργιλος Αμφιλοχίας μετά από φόρτιση στα 62.5 kPa και αποφόρτιση, ιδ) Άργιλος Αμφιλοχίας μετά από φόρτιση στα 500 kPa και αποφόρτιση, ιε) Άργιλος Αμφιλοχίας μετά από φόρτιση στα 4000 kPa και αποφόρτιση, ιστ) Άργιλος Αμφιλοχίας μετά από φόρτιση στα 500 kPa και αποφόρτιση (το δοκίμιο είχε αφεθεί 14 ημέρες υπό το μέγιστο φορτίο και είχε υποστεί ερπυσμό), ιζ) Άργιλος Αμφιλοχίας αναμεμιγμένη με τσιμέντο σε ποσοστό 6% μετά από φόρτιση στα 500 kPa και αποφόρτιση (το δοκίμιο είχε αφεθεί 14 ημέρες υπό το μέγιστο φορτίο για λόγους ωρίμανσης του μίγματος υλικού-τσιμέντου), ιη) αναζυμωμένη Μάργα Κορίνθου, ιθ) Μάργα Κορίνθου μετά από φόρτιση στα 800 kPa και αποφόρτιση, κ) φυσική Μάργα Κορίνθου, κα) αναζυμωμένη Μάργα Χαλκουτσίου, κβ) Μάργα Χαλκουτσίου μετά από φόρτιση στα 62.5 kPa και αποφόρτιση, κγ) Μάργα Χαλκουτσίου μετά από φόρτιση στα 500 kPa και αποφόρτιση, κδ) Μάργα Χαλκουτσίου μετά από φόρτιση στα 4000 kPa και αποφόρτιση, κε) φυσική Μάργα Χαλκουτσίου, κστ) αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας, κζ) αναζυμωμένος αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας μετά από φόρτιση στα 4000 kPa και αποφόρτιση, κη) φυσικός αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας, κθ) αναζυμωμένος αποσπασμένος Φυλλίτης Σκύρου, και λ) αποσπασμένος Φυλλίτης Σκύρου μετά από φόρτιση στα 500 kPa και αποφόρτιση.

& Xing (1994) σε αυτήν την ομάδα, προέκυψαν τιμές μεγαλύτερες και από 1000000 kPa το οποίο στερείται φυσικού νοήματος, δεδομένου ότι θερμοδυναμικά είναι αδύνατον να προκύψουν τέτοιες τιμές (βλ. σχετικά Κεφ. 4 στο 1<sup>ο</sup> Μέρος της διατριβής). Από αυτό λοιπόν συμπεραίνεται πρώτα και κύρια ότι το βασικό στατιστικό κριτήριο της μεγιστοποίησης του συντελεστή συσχέτισης δεν είναι ικανό να αποδώσει τις βέλτιστες τιμές παραμέτρων προσέγγισης χωρίς την κριτική παρέμβαση του εκτελούντα την προσομοίωση για περιορισμό των τιμών των παραμέτρων προσέγγισης σε αριθμητικό εύρος που έχει φυσικό νόημα. Ταυτόχρονα φαίνεται και η καλύτερη απόδοση στον συγκεκριμένο τομέα της μεθόδου του Brutsaert (1966) στην

οποία δεν παρουσιάστηκε κανένα αντίστοιχο πρόβλημα στην εκτίμηση της παραμέτρου  $a^{11}$ . Αντίστοιχα επίσης προβλήματα με την παράμετρο  $a$  υπήρξαν και για τις παραμέτρους  $n$  και  $m$  όπως φαίνεται από τα στοιχεία του Πιν. 14.3. Στην περίπτωση αυτών των παραμέτρων ωστόσο είναι πιο δύσκολο να γίνουν εύκολα αντιληπτές επειδή αποτελούν παραμέτρους συσχέτισης χωρίς άμεσα αντιληπτό φυσικό νόημα.

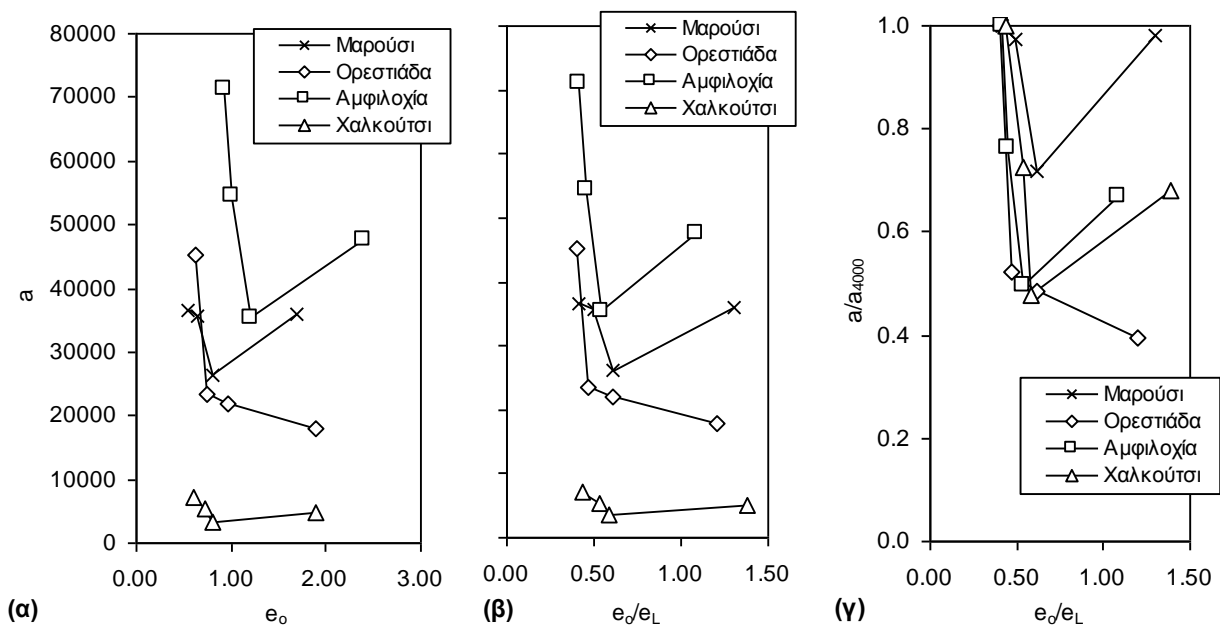
**Πίνακας 14.3.** Παράμετροι βέλτιστης προσέγγισης για κάθε μία από τις τρεις μεθόδους προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού όλων των υλικών.

Εδαφικό υλικό	Κωδικός	VAN GENUCHTEN				FREDLUND & XING			BRUTSAERT	
		$a$	$1/a$	$n$	$m$	$a$	$n$	$m$	$a$	$n$
Ιλός Λίμνης Ιωαννίνων	ILS	0.043400	23	9.084	0.037	43	6.072	0.371	235	0.747
Άργιλος Λιβαδερού Δράμας	LDC	<b>0.000004</b>	<b>228660</b>	0.488	2.863	<b>1936000</b>	0.459	17.422	14912	0.570
Άργιλος Μελίτης Φλώρινας	MFC	0.002500	400	1.390	0.149	<b>2030000</b>	0.458	18.778	17824	0.523
Άργιλος Αμαρουσίου	ACRec	0.000109	9208	19.775	0.027	14056	1.855	0.975	35930	1.102
	AC62.5	0.000107	9390	1.331	0.450	11455	1.246	1.344	26260	0.959
	AC500	0.000085	11732	2.074	0.301	14897	3.792	0.636	35625	1.126
	AC4000	0.000066	15159	1.672	0.425	16520	1.723	1.135	36559	1.162
Άργιλος Ορεσιτιάδας Έβρου	OERec	0.001800	556	4.460	0.056	980	5.684	0.366	17890	0.640
	OE62.5	0.001800	556	12.829	0.019	974	5.607	0.367	21940	0.670
	OE500	0.000595	1682	1.533	0.191	3938	1.036	0.972	23516	0.734
	OE4000	0.000964	1038	8.079	0.024	1858	2.298	0.365	45153	0.691
Άργιλος Αμφιλοχίας	AMCRec	<b>0.000002</b>	<b>409199</b>	0.803	4.151	<b>7973100</b>	0.735	79.528	47633	1.062
	AMC62.5	<b>0.000002</b>	<b>482789</b>	0.836	6.394	<b>11646000</b>	0.788	178.407	35290	1.055
	AMC500	0.000042	23613	12.042	0.080	28167	7.323	0.578	54454	2.181
	AMC4000	0.000042	23984	11.094	0.080	29247	5.714	0.516	71212	1.887
	AMC500Creep	0.000050	20108	9.655	0.069	27402	3.037	0.789	68415	1.475
	AMC500Cem	<b>0.000001</b>	<b>1065224</b>	0.472	4.528	<b>18924000</b>	0.452	38.647	20093	0.554
Μάργα Κορίνθου	CMRec	0.004100	244	1.098	0.417	598	0.811	1.923	1029	0.712
	CM800	0.000077	13059	1.962	88.866	88075	1.955	9882.200	1090	2.497
	CMNat	0.000185	5406	3.565	68.505	27969	3.372	35763.000	1498	4.481
Μάργα Χαλκουτσίου	ChMRec	0.004200	238	1.837	0.156	759	0.933	1.151	4913	0.600
	ChM62.5	0.001700	588	1.017	0.372	1074	0.841	1.419	3442	0.680
	ChM500	0.001500	667	1.652	0.245	1209	1.277	1.102	5260	0.772
	ChM4000	0.004000	250	16.783	0.015	568	1.534	0.685	7235	0.593
	ChMNat	0.008000	125	2.223	0.115	522	0.716	1.291	3161	0.485
Άργιλος Ιλυόλιθος Πάρνηθας	PWSRec	0.000190	5269	0.744	0.759	8680	0.675	2.423	9670	0.685
	PWS4000	0.000052	19351	1.119	0.971	20740	1.073	2.599	20129	1.110
	PWSNat	<b>0.000002</b>	<b>563952</b>	0.760	3.419	<b>10465000</b>	0.708	59.990	79195	0.881
Αποσ/νος Φυλλίτης Σκύρου	SWPRec	0.049200	20	2.459	0.241	40	1.167	1.727	56	0.782
	SWP500	0.034600	29	19.810	0.027	48	4.141	0.716	118	1.029

<sup>11</sup> Αυτό μοιάζει καταρχήν παράξενο αφού η μέθοδος του Brutsaert (1966) είναι δύο παραμέτρων ενώ οι άλλες τριών. Αυτή όμως η μία λιγότερη παράμετρος της επιτρέπει να είναι και λιγότερο ευαίσθητη σε κάποια μεμονωμένα σημεία μιας καμπύλης (που μπορεί να είναι και λάθος) και να δίνει την εικόνα για το σύνολο.



Στο Σχ. 14.26 επιχειρήθηκε να επιδειχθεί η επιρροή της μεταβολής του αρχικού λόγου κενών ενός αρχικά πλήρως κορεσμένου εδάφους διά της αύξησης της κατακόρυφης τάσης μέχρι την οποία έχει συμπιεστεί υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως και στη συνέχεια αποφορτιστεί πριν αρχίσει η ξήρανση –δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στις Αργίλους Αμαρουσίου, Ορεστιάδας Έβρου, Αμφιλοχίας και στη Μάργα Χαλκούτσι. Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.26α, όσο πιο μεγάλος είναι ο αρχικός λόγος κενών –ή ο λόγος του προς τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας κάθε υλικού, Σχ. 14.26β- τόσο πιο μικρή γίνεται η τιμή της παραμέτρου  $a$  της μεθόδου του Brutsaert (1966)<sup>12</sup> εκτός από την περίπτωση που το υλικό βρίσκεται σε μορφή πολτού (δοκιμές σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά). Παρατηρείται δε στο Σχ. 14.26γ μία εντυπωσιακή σύμπτωση των σημείων όταν και η παράμετρος  $a$  κανονικοποιηθεί διά της διαίρεσής της με την τιμή της παραμέτρου  $a$  για τα δοκίμια που είχαν συμπιεστεί έως τα 4000 kPa. Το γενικό συμπέρασμα λοιπόν είναι ότι η μείωση του λόγου κενών ενός λεπτόκοκκου πλα-



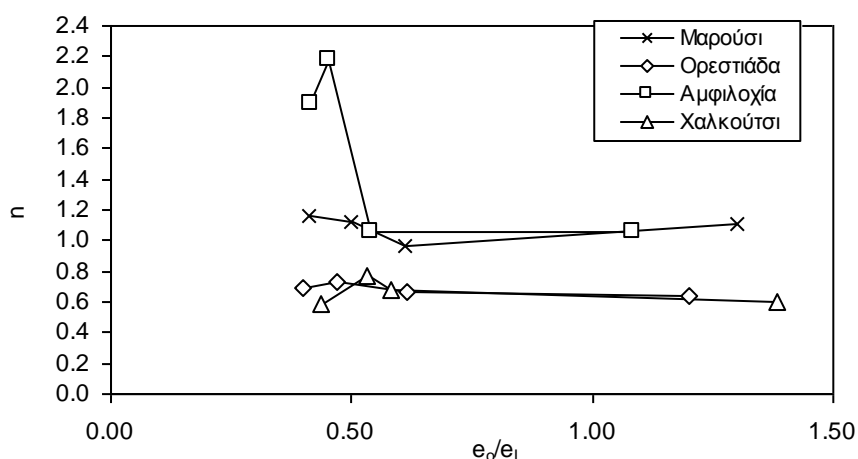
**Σχήμα 14.26.** α) Εξέλιξη της παραμέτρου προσέγγισης  $a$  της μεθόδου του Brutsaert (1966) συναρτήσει του αρχικού λόγου κενών των δοκιμίων πριν την έναρξη της ξήρανσης, β) εξέλιξη της ίδιας παραμέτρου με τον λόγο του αρχικού λόγου κενών των δοκιμίων πριν την έναρξη της ξήρανσης προς τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας κάθε υλικού, και γ) εξέλιξη της παραμέτρου  $a$  προς την τιμή της ίδιας παραμέτρου για τα δοκίμια μετά από φόρτιση έως τα 4000 kPa με τον λόγο του αρχικού λόγου κενών των δοκιμίων πριν την έναρξη της ξήρανσης προς τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας κάθε υλικού.

<sup>12</sup> Αποφεύχθηκε η χρήση των παραμέτρων προσέγγισης από τις άλλες δύο μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν λόγω των προβλημάτων που προαναφέρθηκαν με κάποιες ακόμα και εκτός φυσικών ορίων τιμές των παραμέτρων προσέγγισης.

στικού εδαφικού υλικού οδηγεί σε αύξηση της τιμής της πίεσης διείσδυσης αέρα του στις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που η ξήρανση ξεκινάει με το εδαφικό υλικό πλήρως κορεσμένο και ευρισκόμενο υπό μηδενική μύζηση (με την εξαίρεση της περίπτωσης των αναζυμωμένων εδαφικών υλικών, για την οποία πρέπει να διερευνηθεί εάν συντρέχει κάποιος ιδιαίτερος λόγος ή η καταγραφείσα απόκλιση οφείλεται σε κάποιο πειραματική ιδιαιτερότητα που δεν έχει ξεκαθαριστεί ακόμα). Σε ό,τι αφορά δε την παράμετρο  $a$  της μεθόδου του Brutsaert (1966) μπορεί να διατυπωθεί η εμπειρική συσχέτιση με τη μορφή της Εξ. 14.2 (έχουν εξαιρεθεί οι τιμές της παραμέτρου για αναζυμωμένα εδαφικά υλικά) με εύρος ισχύος για τον λόγο  $e_0/e_L$  μεταξύ 0.35 και 0.65 και συντελεστή συσχέτισης 0.56.

$$a \text{ (Brutsaert, 1966)} = a_{4000} \cdot (1.83 - 2.15 \cdot e_0/e_L) \quad (14.2)$$

Σε ό,τι αφορά την παράμετρο προσέγγισης  $n$  της μεθόδου του Brutsaert (1966) δεν διαπιστώθηκε κάποια γενική συσχέτιση, όποιες κανονικοποιήσεις και εάν επιχειρήθηκαν. Μάλιστα, όπως φαίνεται στο Σχ. 14.27 η παράμετρος αυτή για τρία από τα τέσσερα εδαφικά υλικά στα οποία μετρήθηκαν χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού προκύπτει πρακτικά ανεξάρτητη του αρχικού λόγου κενών πριν την έναρξη της ξήρανσης. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση της Αργίλου Αμφιλοχίας, στην οποία ωστόσο δεν διαφαίνεται κάποια λογικά εξελισσόμενη μεταβολή και δεν μπορεί να αποκλειστεί το ενδεχόμενο επιρροής μεμονωμένων σημείων της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στις προσομοιώσεις. Από τις δύο παρατηρήσεις ωστόσο για την παράμετρο  $a$  και την παράμετρο  $n$ , προκύπτει ότι σε ό,τι αφορά

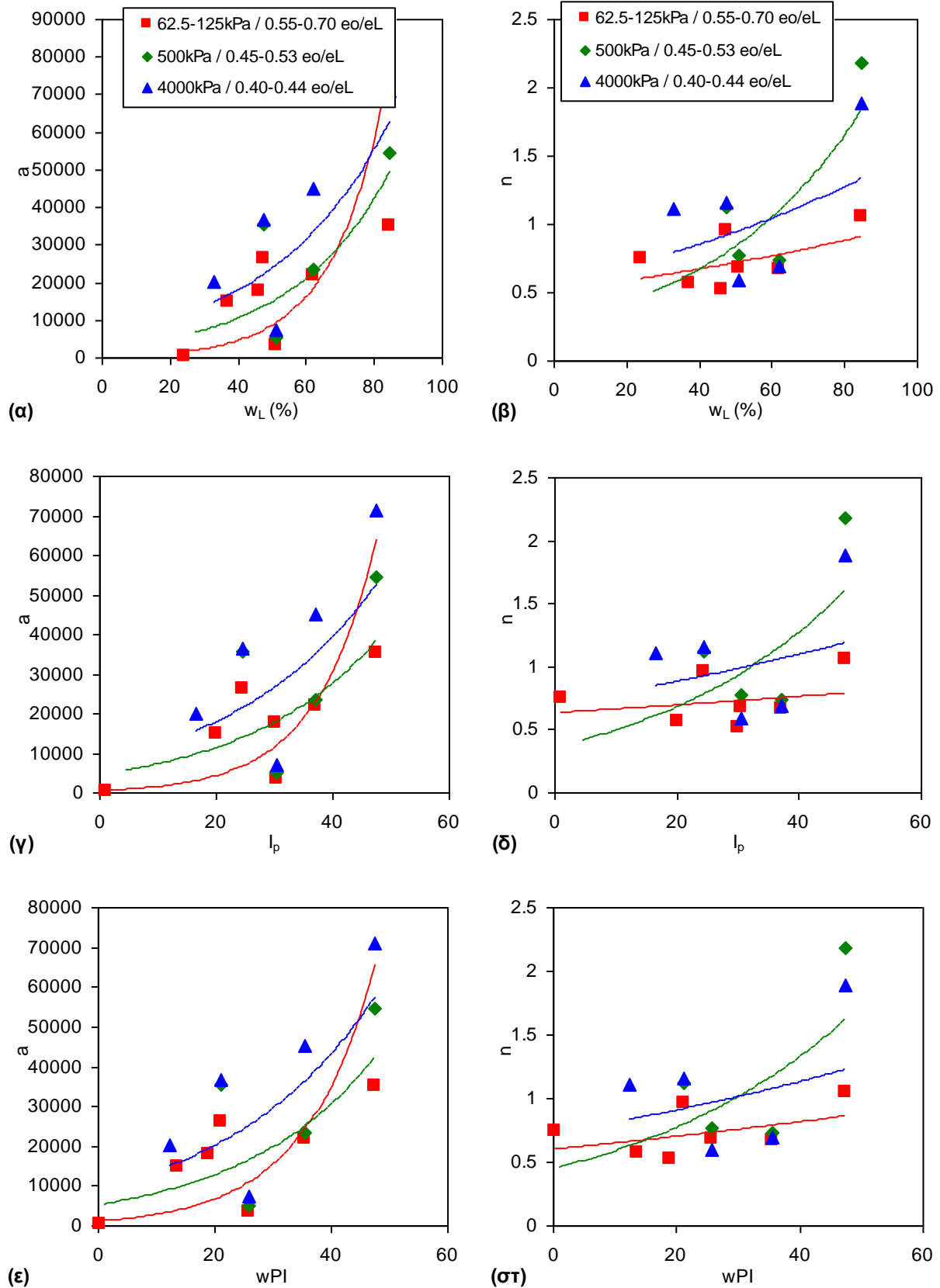


**Σχήμα 14.27.** Εξέλιξη της παραμέτρου προσέγγισης  $n$  της μεθόδου του Brutsaert (1966) με τον λόγο του αρχικού λόγου κενών των δοκιμών πριν την έναρξη της ξήρανσης προς τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας κάθε υλικού.

την μέθοδο του Brutsaert (1966), για αρχικά πλήρως κορεσμένα εδαφικά υλικά, ο αρχικός λόγος κενών των οποίων οφείλεται μόνο σε φόρτιση και αποφόρτισή τους αρκεί να μετρηθεί η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού δείγματος με έναν μόνο αρχικό λόγο κενών και στη συνέχεια διά της εμπειρικής συσχέτισης που εκφράζει η Εξ. 14.2 και της διαπιστωθείσας ανεξαρτησίας της παραμέτρου  $n$  από τον αρχικό λόγο κενών να προβλεφθούν και οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που αντιστοιχούν σε άλλους λόγους κενών (εντός του εύρους ισχύος της Εξ. 14.2).

Στο Σχ. 14.28 επιχειρήθηκε η ομαδοποίηση των τιμών των παραμέτρων συσχέτισης  $a$  και  $n$  της μεθόδου του Brutsaert (1966) ανά κατακόρυφη τάση που είχε γίνει η συμπίεσή τους πριν την αποφόρτιση και την ξήρανση και η συσχέτιση των παραμέτρων αυτών με επιλεγμένα από τα φυσικά χαρακτηριστικά (το όριο υδαρότητας, τον δείκτη πλαστικότητας και το γινόμενο του ποσοστού διερχομένων από το κόσκινο No 200 με τον δείκτη πλαστικότητας<sup>13</sup>). Οι ομαδοποιήσεις με βάση την τάση φόρτισης των δοκιμίων πριν την ξήρανση έγιναν για τιμές 62.5 έως 125 kPa (που αντιστοιχεί σε εύρος λόγου  $e_0/e_L$  0.55 έως 0.70), 500 kPa (που αντιστοιχεί σε εύρος λόγου  $e_0/e_L$  0.45 έως 0.53), και 4000 kPa (που αντιστοιχεί σε εύρος λόγου  $e_0/e_L$  0.40 έως 0.44). Όπως προκύπτει από τα Σχ. 14.28α και 14.28β και η παράμετρος  $a$  και η παράμετρος  $n$  αντίστοιχα αυξάνονται με την αύξηση του ορίου υδαρότητας, με την πρώτη να αυξάνεται πιο ραγδαία από την δεύτερη. Από τις βέλτιστες προσεγγίσεις που παρουσιάζονται επίσης στα προαναφερθέντα σχήματα η παράμετρος  $a$  στο Σχ. 14.28α είναι τόσο πιο μεγάλη όσο μεγαλύτερη είναι η τάση συμπίεσης πριν την ξήρανση (ή αντίστοιχα όσο πιο μικρός ο λόγος  $e_0/e_L$ ), και μάλιστα για το εύρος τιμών ορίου υδαρότητας 25 έως 65% (που άλλωστε είναι και το πιο συνηθισμένο) η αύξηση αυτή είναι συστηματική και οι απεικονιζόμενες καμπύλες βέλτιστης προσέγγισης πρακτικά παράλληλες. Για μεγάλες τιμές του ορίου υδαρότητας η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης για την μικρότερη τάση αρχίζει να ανυψώνεται ραγδαία οδηγώντας σε μεγαλύτερες τιμές της παραμέτρου  $a$  από εκείνες για τις καμπύλες για τις άλλες τάσεις. Η ίδια εικόνα παρατηρείται και κατά την εξέλιξη της παραμέτρου  $n$  με το όριο υδαρότητας αλλά η θέση των καμπυλών για κάθε διαφορετική τάση συμπίεσης δεν είναι το ίδιο συστηματική όπως για την εξέλιξη της παραμέτρου  $a$ . Τα ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και από τα Σχ. 14.28γ έως 14.28στ για τις συσχετίσεις με τον δείκτη πλαστικότητας και το γινόμενο του ποσοστού

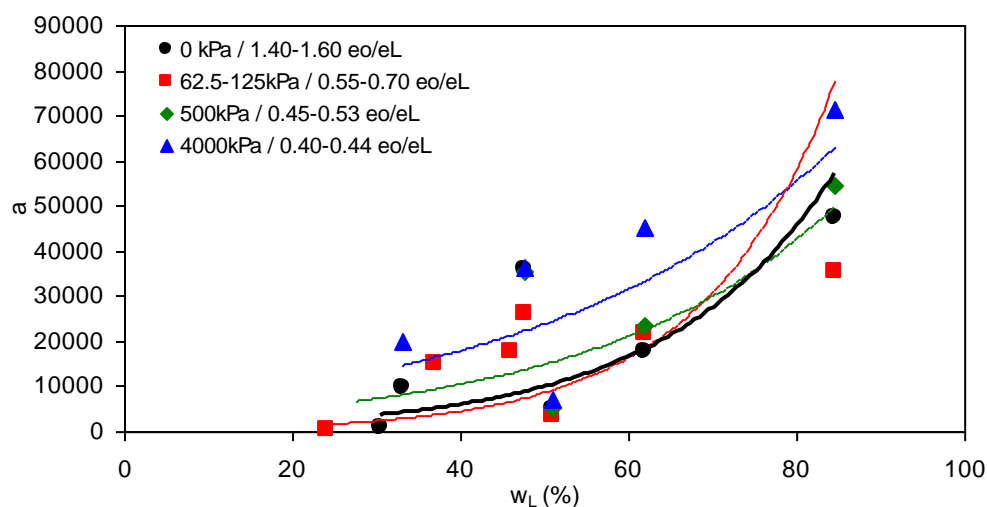
<sup>13</sup> Δεν αποτελεί διαδεδομένη παράμετρο γενικά αλλά εκφράζει την ταυτόχρονη επιρροή και του λεπτόκοκκου μέρους ενός υλικού και της πλαστικότητας του υλικού, αναγνωρίζοντας ότι ένα εδαφικό υλικό μπορεί να έχει περισσότερο λεπτόκοκκο αλλά μικρότερης πλαστικότητας, ενώ ένα άλλο εδαφικό υλικό να έχει λιγότερο λεπτόκοκκο αλλά μεγαλύτερης πλαστικότητας, αλλά τελικά και τα δύο υλικά θα συμπεριφερθούν για ορισμένες παραμέτρους της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών με ανάλογο τρόπο. Εισήχθη από τους Zapata, et al. (2000).



**Σχήμα 14.28.** Συσχετίσεις των παραμέτρων προσέγγισης  $a$  και  $n$  της μεθόδου του Brutsaert (1966) α) α με  $w_L$ , β) η με  $w_L$ , γ) α με  $I_p$ , δ) η με  $I_p$ , ε) α με  $wPI$ , και στ) η με  $wPI$ .

διερχομένων από το κόσκινο Νο 200 με τον δείκτη πλαστικότητας, με το εύρος πρακτικής παραλληλίας των συσχετίσεων  $a-I_p$  να εντοπίζεται μεταξύ  $I_p$  1 και 30 και των συσχετίσεων  $a-w_{PI}$  να εντοπίζεται μεταξύ  $w_{PI}$  1 και 25. Όπως και στην περίπτωση της συσχέτισης  $n-w_L$  οι καμπύλες συσχέτισης για την παράμετρο  $n$  δεν τοποθετούνται το ίδιο συστηματικά με την εξέλιξη της τάσης συμπίεσης. Αποφεύχθηκε η αναφορά των εξισώσεων που περιγράφουν τις αναφερθείσες εμπειρικές συσχετίσεις καθώς θεωρούνται απολύτως προκαταρκτικές και άνευ χρησιμότητας σε επίπεδο πρόβλεψης για το πλήθος των διαθέσιμων δεδομένων. Απλώς αναφέρεται ότι με βάση τον συντελεστή συσχέτισης οι ισχυρότερες συσχετίσεις βρέθηκαν μεταξύ της παραμέτρου  $a$  και του ορίου υδαρότητας ενώ επίσης για όλες τις παραμέτρους φυσικών χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν στις συσχετίσεις, οι συσχετίσεις της παραμέτρου  $n$  ήταν πολύ πιο αδύναμες από τις συσχετίσεις της παραμέτρου  $a$ .

Τέλος, όπως φαίνεται και από το Σχ. 14.29 όπου συσχετίζεται η παράμετρος  $a$  με το όριο υδαρότητας για διάφορα εύρη τιμών τάσης συμπίεσης (το Σχ. 14.28α) αλλά και με την προσθήκη των παραμέτρων προσέγγισης από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού σε αναζυμωμένα υλικά. Η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης για αυτό το σμήνος τιμών παραμέτρων βρίσκεται πολύ κοντά σε αυτήν για το σμήνος των παραμέτρων προσέγγισης για τιμές της τάσης συμπίεσης μεταξύ 62.5 και 125 kPa. Λόγω αυτής της εγγύτητας αποφεύχθηκε η παράθεσή τους σε όλα τα επιμέρους διαγράμματα του Σχ. 14.28. Σε κάθε περίπτωση επιβεβαιώνεται πρακτικά μια τάση σταθεροποίησης της παραμέτρου  $a$  καθώς μειώνεται η τάση συμπίεσης μέχρι μηδενισμού, όπως συμβαίνει με τους πολλούς αναζυμωμένων εδαφικών υλικών.

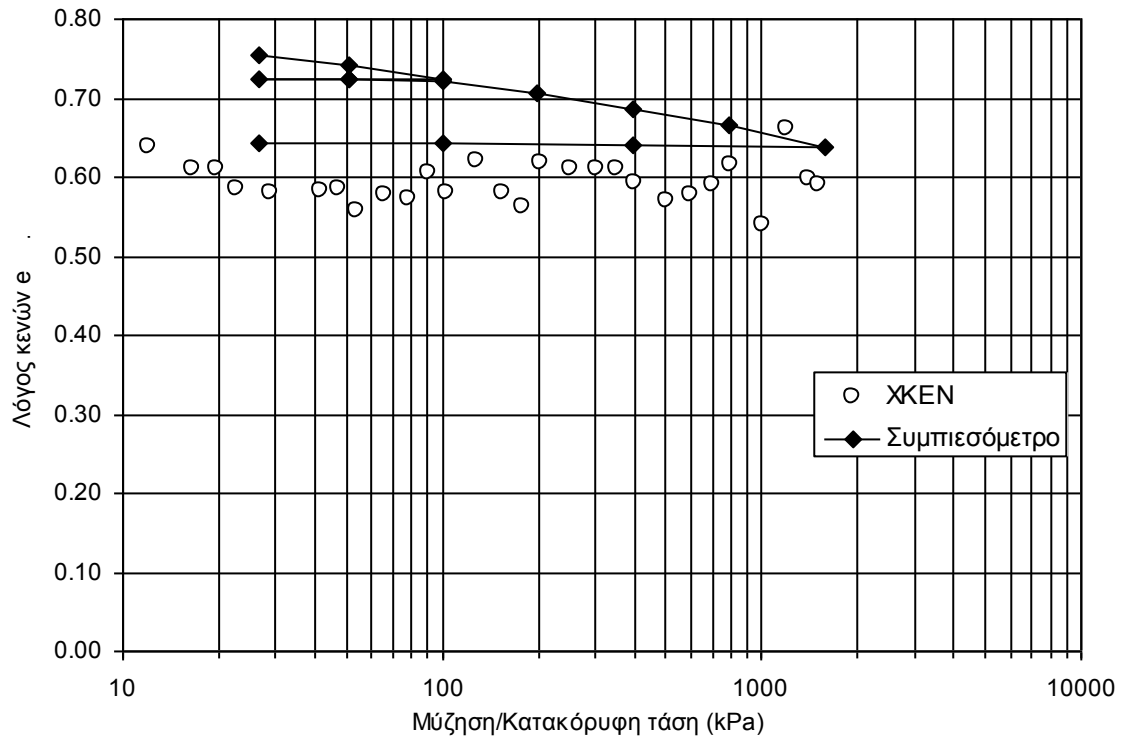


**Σχήμα 14.29.** Συσχέτιση της παραμέτρου προσέγγισης  $a$  της μεθόδου του Brutsaert (1966) με  $w_L$  περιλαμβανομένων και των παραμέτρων για τις δοκιμές στα αναζυμωμένα υλικά.

#### 14.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο της παρουσίασης των αποτελεσμάτων των δοκιμών προσδιορισμού του κλάδου ξήρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού έχει ενδιαφέρον η σύγκριση της μεταβολής του λόγου κενών με την μύζηση με την αντίστοιχη μεταβολή του λόγου κενών με την κατακόρυφη τάση υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως για το ίδιο εύρος τιμών μύζησης/τάσης. Η σύγκριση έχει νόημα για να διαπιστωθεί εάν οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης ταυτίζονται με τις καμπύλες λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης μέχρι την πίεση διείδυσης αέρα των εδαφικών υλικών στην αντίστοιχη κατάσταση από την οποία ξεκίνησε η ξήρανση έτσι ώστε σε επίπεδο καταστατικής προσομοίωσης πλέον να μπορεί να θεωρηθεί βάσιμα ίδια η κλίση του κλάδου ξήρανσης μέχρι την πίεση διείδυσης αέρα με την αντίστοιχη κλίση της καμπύλης συμπίεσης (ως αποτέλεσμα άλλωστε της γενικής παραδοχής ισχύος της αρχής των ενεργών τάσεων μέχρι την πίεση διείδυσης αέρα). Στην παράγραφο αυτή λοιπόν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης παρουσιαζόμενες ταυτόχρονα με τις καμπύλες λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης για όλα τα εδαφικά υλικά. Για κάποια από αυτά, όπως επεξηγείται στη συνέχεια, καταστρώθηκαν ειδικές δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης για να μπορεί να γίνει ευκολότερα η σύγκριση των δύο ειδών καμπυλών.

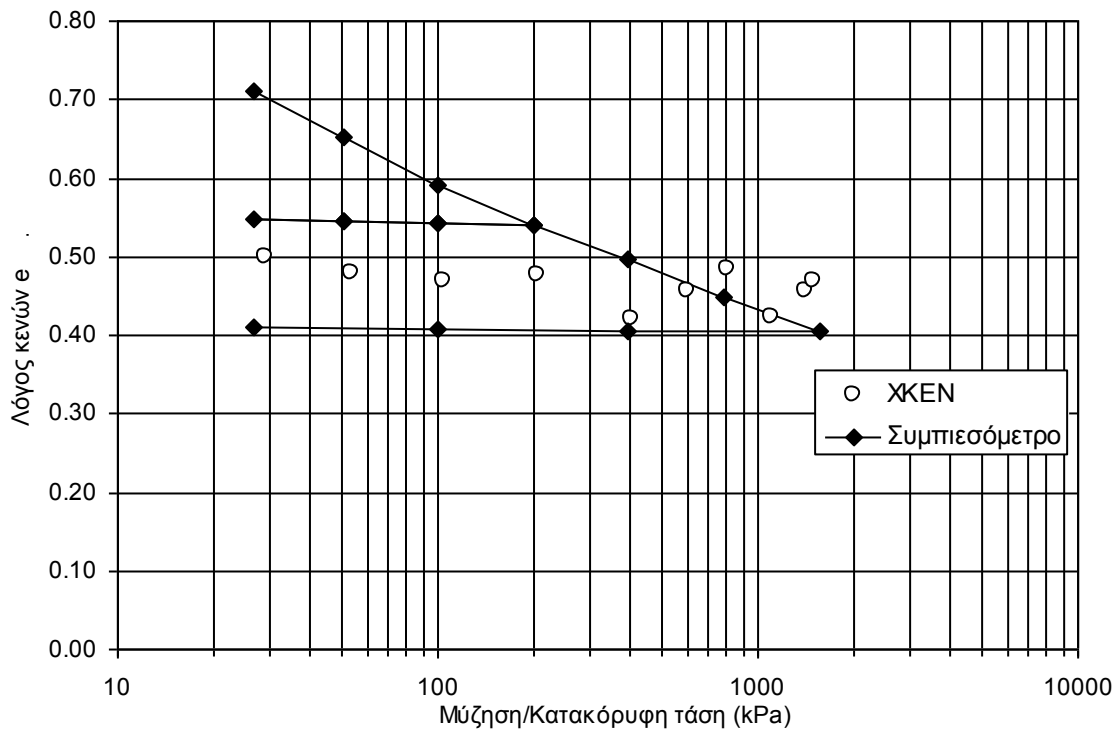
Για την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων πραγματοποιήθηκε ειδική δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης κατά την οποία δοκίμιο αναζυμωμένου εδαφικού υλικού συμπίεστηκε μέχρι τα 100 kPa, όπως και τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, αποφορτίστηκε στα 25 kPa και στη συνέχεια επαναφορτίστηκε μέχρι τα 1600 kPa απ'όπου έγινε η τελική αποφόρτίσή του. Στο Σχ. 14.30 παρουσιάζεται αυτή η καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης μαζί με την καμπύλη λόγου κενών-μύζησης του ίδιου υλικού που παρουσιάστηκε στο Σχ. 14.4α. Όπως φαίνεται στο Σχ. 14.30 δεν υπάρχει καμμία ταύτιση μεταξύ της εξέλιξης του λόγου κενών με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης στη δοκιμή συμπίεσομέτρου και της εξέλιξης του λόγου κενών με τη μύζηση κατά την ξήρανση της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων. Όπως προαναφέρθηκε στην §14.3.2, είναι πολύ πιθανόν στο υλικό αυτό να έχει υποεκτιμηθεί ο λόγος κενών από τη δοκιμή προσδιορισμού του ολικού όγκου με εμβάπτιση σε παραφίνη λόγω της διείδυσης της παραφίνης μέσα στο υλικό (Φωτ. 14.9).



**Σχήμα 14.30.** Μεταβολή του λόγου κενών της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων κατά την ξήρανση και τη μονοδιάστατη συμπίεσή της μετά από φόρτιση και αποφόρτισή της στα 100 kPa.

Αντίστοιχα, δοκίμιο αναζυμωμένης Αργίλου Χανίων συμπίεστηκε μέχρι τα 200 kPa, όπως και τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, αποφορτίστηκε στα 25 kPa και στη συνέχεια επαναφορτίστηκε μέχρι τα 1600 kPa απ'όπου έγινε η τελική αποφόρτισή του. Στο Σχ. 14.31 παρουσιάζεται αυτή η καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης μαζί με την καμπύλη λόγου κενών-μύζησης του ίδιου υλικού που παρουσιάστηκε στο Σχ. 14.5α. Όπως φαίνεται στο Σχ. 14.31 δεν υπάρχει καμμία ταύτιση μεταξύ της εξέλιξης του λόγου κενών με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης στη δοκιμή συμπίεσομέτρου και της εξέλιξης του λόγου κενών με την μύζηση κατά την ξήρανση της Αργίλου Χανίων. Αντίστοιχη υποεκτίμηση του λόγου κενών λοιπόν με αυτή που προαναφέρθηκε για την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων μοιάζει να έχει συμβεί και για την Αργίλο Χανίων όπως προκύπτει από το Σχ. 14.31.

Στα Σχ. 14.32α και 14.32β παρουσιάζονται οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης της αργίλου και της μάργας Κηφισιάς αντίστοιχα μαζί με τις καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των ίδιων υλικών που παρουσιάστηκαν μαζί και οι δύο στο Σχ. 14.7α. Στην περίπτωση της Αργίλου και της Μάργας Κηφισιάς λοιπόν φαίνεται ότι για τιμές της μύζησης μέχρι τα 600 kPa (που είναι

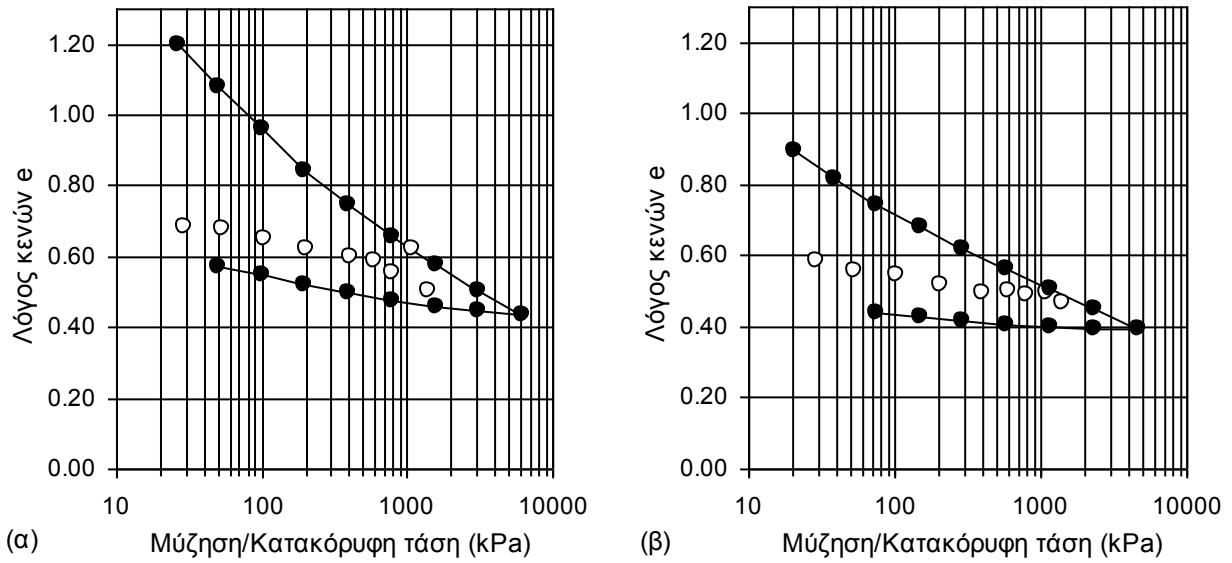


**Σχήμα 14.31.** Μεταβολή του λόγου κενών της Αργίλου Χανίων κατά την ξήρανση και τη μονοδιάστατη συμπίεσή της μετά από φόρτιση και αποφόρτισή της στα 200 kPa.

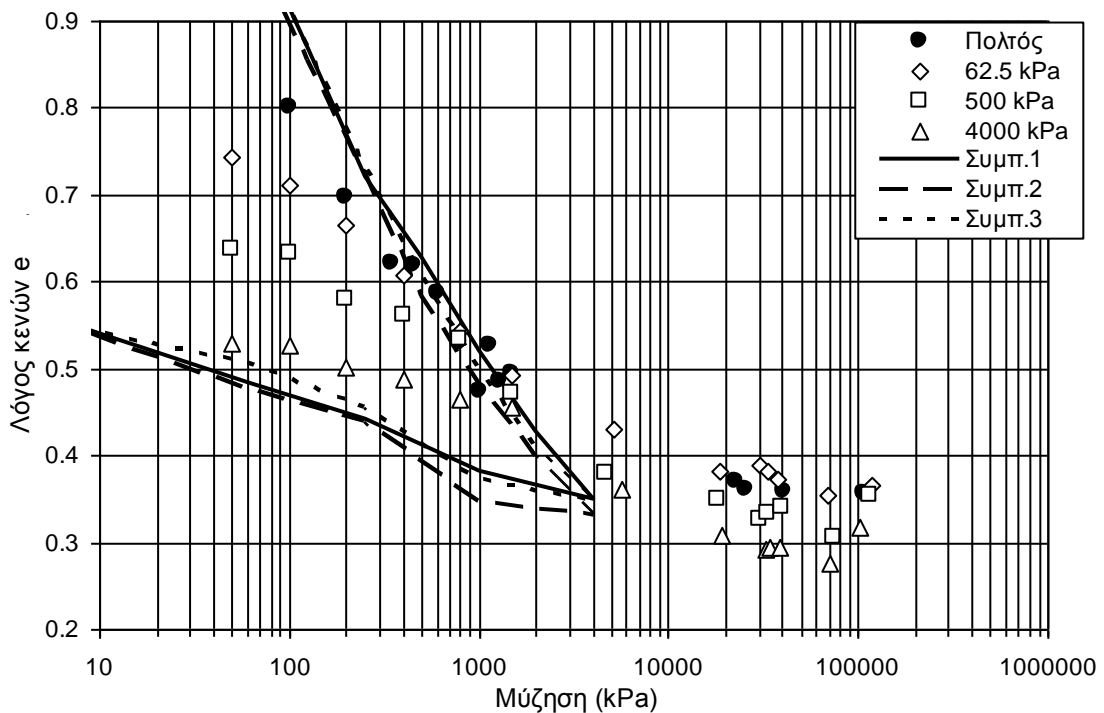
η τιμή της κατακόρυφης τάσης μέχρι την οποία είχαν συμπιεστεί τα δοκίμια και αποφορτιστεί πριν υποβληθούν σε ξήρανση), η κλίση της καμπύλης εξέλιξης του λόγου κενών με τη μύζηση κατά την ξήρανση του υλικού είναι πρακτικά η ίδια με την κλίση του κλάδου αποφόρτισης και για τα δύο υλικά. Για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες από αυτήν, στην μεν Άργιλο Κηφισιάς ο κλάδος ξήρανσης φαίνεται να έχει την ίδια κλίση με τον κλάδο φόρτισης στην δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης (εξαιρουμένου προφανώς του σημείου που ξεχωρίζει από την καμπύλη αυτή), στην δε Μάργα Κηφισιάς δεν παρατηρείται παρόμοια παραλληλία των δύο κλάδων. Για τα δύο αυτά υλικά δεν καταστρώθηκαν ειδικές δοκιμές όπως για την Ιλύ Λίμνης Ιωαννίνων και την Άργιλο Χανίων αλλά χρησιμοποιήθηκαν οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης που παρουσιάστηκαν ήδη στο Κεφ. 13 (§13.4.3 & 13.4.4 και Σχ. 13.28α & 13.30α).

Στο Σχ. 14.33 παρουσιάζεται σε μεγέθυνση το Σχ. 14.9α για την Άργιλο Αμαρουσίου. Οι καμπύλες εγγενούς συμπίεσης είναι οι καμπύλες λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης για την προετοιμασία των τριών δοκιμών που συμπίεστηκαν ως τα 4000 kPa και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στο θάλαμο μύζησης για εφαρμογή τιμών της μύζησης μεταξύ 50 και 1500 kPa. Η καμπύλη λόγου κενών-μύζησης του πολτού απέχει από το





**Σχήμα 14.32.** Μεταβολή του λόγου κενών α) της Αργίλου και β) της Μάργας Κηφισιάς κατά την ξήρανση (ξεχωριστά σημεία) και την μονοδιάστατη συμπίεσή τους (καμπύλες με ενωμένα σημεία).



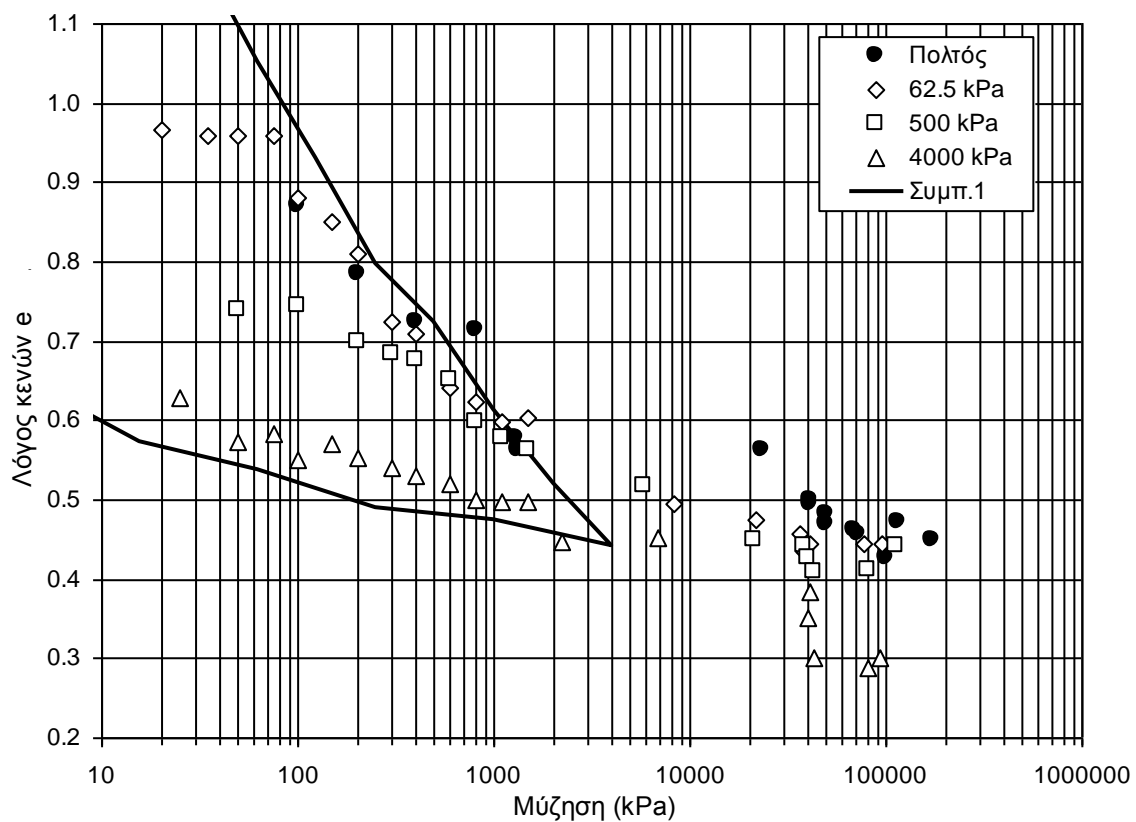
**Σχήμα 14.33.** Μεταβολή του λόγου κενών της Αργίλου Αμαρουσίου κατά την ξήρανση (καμπύλες για τον πολτό του υλικού και δοκίμια του υλικού αναζυμωμένα, επανασυμπίεσμένα μέχρι 62.5, 500 και 4000 kPa και αποφορτισμένα σε μηδενική τάση) και την μονοδιάστατη συμπίεση του αναζυμωμένου υλικού.

σμήνος των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης αλλά αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί σε διαφορές στην υγρασία του πολτού και στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τον ένα και τον άλλο πολτό. Και πάλι όμως από τα 200 kPa και μετά μέχρι τα 1500 kPa ταυτίζεται η καμπύλη αυτή με τις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης. Οι καμπύλες λόγω κενών-μύζησης των δοκιμίων που συμπίεστηκαν μέχρι κάποια τιμή της τάσης υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως ξεκινούν για χαμηλές τιμές της μύζησης αισθητά μακριά από τις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης παρουσιάζοντας έναν πρώτο κλάδο μικρότερης κλίσης, συνεχίζοντας σε έναν κλάδο μεγαλύτερης κλίσης και καταλήγοντας σε ένα πρακτικά οριζόντιο τμήμα όπου έχει σταθεροποιηθεί ο λόγος κενών στο εύρος τιμών της μύζησης 20 έως 120 MPa. Στις καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης παρατίθεται εκτός από τον κλάδο της φόρτισης και ο κλάδος της αποφόρτισης. Ειδικά οι καμπύλες λόγω κενών-μύζησης των δοκιμίων που είχαν συμπιεστεί μέχρι τα 500 και τα 4000 kPa, μοιάζουν να έχουν, η μεν πρώτη έναν κλάδο μέχρι τα 500 kPa μύζησης με κλίση παρόμοια με αυτή του κλάδου αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης<sup>14</sup> και μετά έναν κλάδο που ακολουθεί τους κλάδους φόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης, η δε δεύτερη μοιάζει να έχει μόνο έναν κλάδο που αντιστοιχεί στην «επαναφόρτιση» από τον κλάδο αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι μηδενική τιμή της κατακόρυφης τάσης.

Στο Σχ. 14.34 παρουσιάζεται σε μεγέθυνση το Σχ. 14.10α για την άργιλο Ορεστιάδας Έβρου. Η καμπύλη εγγενούς συμπίεσης είναι η καμπύλη λόγω κενών-κατακόρυφης τάσης από μία από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης για την προετοιμασία των δοκιμίων που συμπίεστηκαν ως τα 4000 kPa και στη συνέχεια μετρήθηκε σε αυτά η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Η καμπύλη λόγω κενών-μύζησης του πολτού απέχει από το σμήνος των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης αλλά αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί σε διαφορές στην υγρασία του πολτού και στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τον ένα και τον άλλο πολτό. Και πάλι όμως από τα 200 kPa και μετά μέχρι τα 1500 kPa η καμπύλη αυτή ταυτίζεται πρακτικά με την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης. Οι καμπύλες λόγω κενών-μύζησης των δοκιμίων που συμπίεστηκαν μέχρι κάποια τιμή της τάσης υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως ξεκινούν για χαμηλές τιμές της μύζησης αισθητά μακριά από την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης παρουσιάζοντας έναν πρώτο κλάδο μικρότερης κλίσης, συνεχίζοντας σε έναν κλάδο μεγαλύτερης κλίσης και καταλήγοντας σε ένα πρακτικά οριζόντιο τμήμα όπου έχει σταθεροποιηθεί ο λόγος κενών στο εύρος τιμών της μύζησης 50 έως 170 MPa. Στην καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης παρατίθεται εκτός από τον

<sup>14</sup> Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο κλάδος επαναφόρτισης (γιατί περί αυτού πρόκειται και με αυτό θα έπρεπε να γίνεται σύγκριση) είναι λίγο πιο ήπιος από τον κλάδο της φόρτισης προς τις χαμηλές τάσεις.

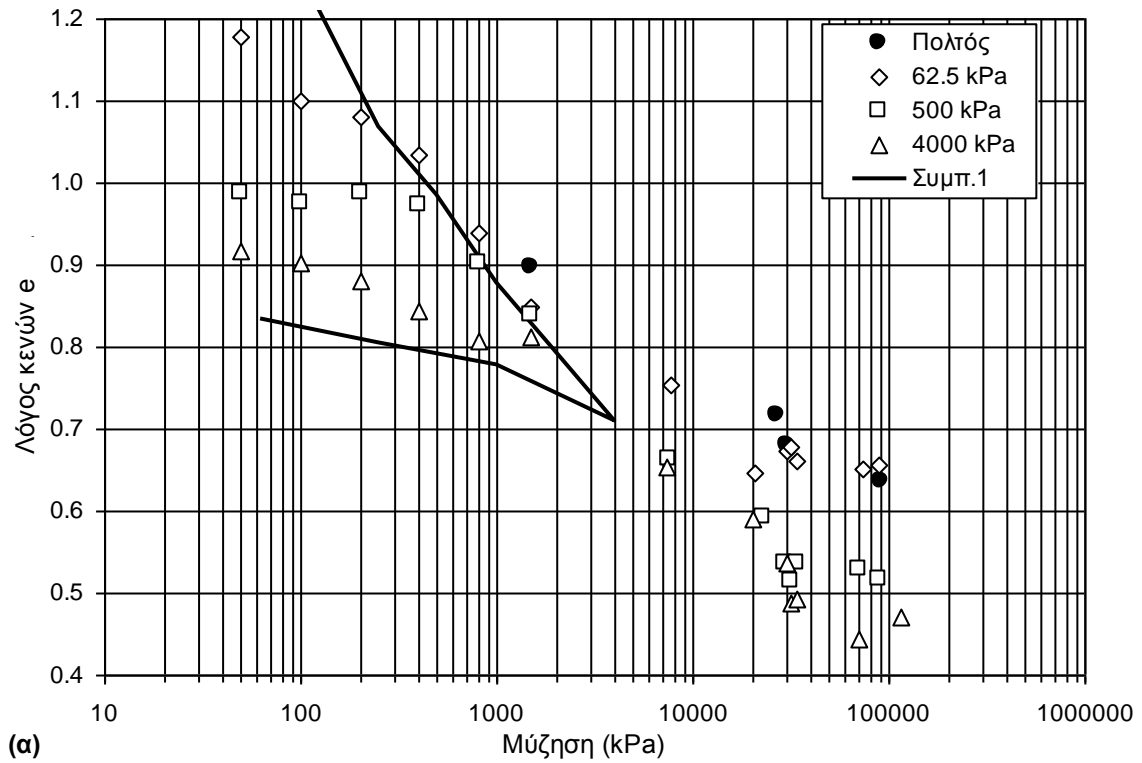
κλάδο της φόρτισης και ο κλάδος της αποφόρτισης. Ειδικά οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμίων που είχαν συμπιεστεί μέχρι τα 500 και τα 4000 kPa, μοιάζουν να έχουν, η μεν πρώτη έναν κλάδο μέχρι τα 500 kPa μύζησης με κλίση παρόμοια με αυτή του κλάδου αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης και μετά έναν κλάδο που ακολουθεί τον κλάδο φόρτισης της καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης, η δε δεύτερη μοιάζει να έχει μόνο έναν κλάδο που αντιστοιχεί στην «επαναφόρτιση» από τον κλάδο αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι μηδενική τιμή της κατακόρυφης τάσης.



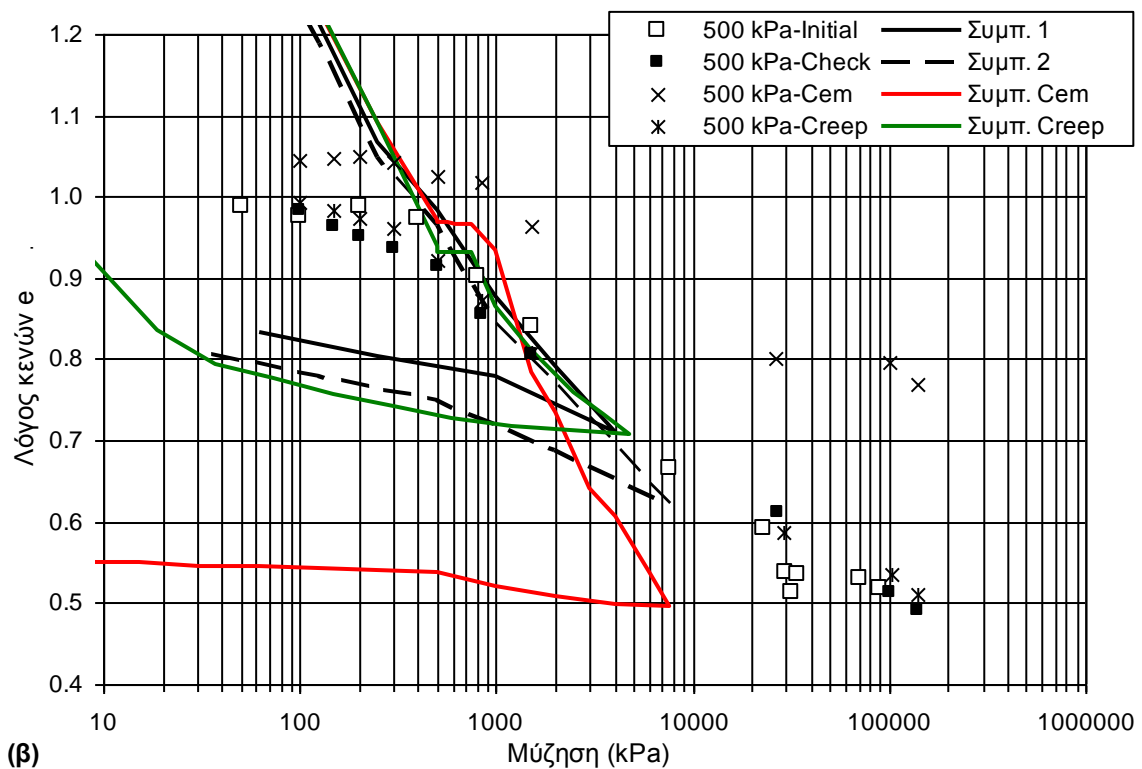
**Σχήμα 14.34.** Μεταβολή του λόγου κενών της Αργίλου Ορεστιάδας Έβρου κατά την ξήρανση (καμπύλες για τον πολτό του υλικού και δοκίμια του υλικού αναζυμωμένα, επανασυμπιεσμένα μέχρι 62.5, 500 και 4000 kPa και αποφορτισμένα σε μηδενική τάση) και την μονοδιάστατη συμπίεση του αναζυμωμένου υλικού.

Στα Σχ. 14.35α & 14.35β παρουσιάζονται σε μεγέθυνση αντίστοιχα τα Σχ. 14.12α και 14.14α για την άργιλο Αμφιλοχίας. Στο υλικό αυτό εκτός από τις δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που έγιναν σε δοκίμια του φορτισμένα σε διάφορες τιμές της τάσης

και αποφορτισμένα σε μηδενική τάση πριν την έναρξη της ξήρανσης, έγιναν και αντίστοιχες δοκιμές σε δοκίμια του ίδιου υλικού τα οποία είχαν υποβληθεί σε σιμέντωση αλλά και σε ερπυσμό υπό την κατακόρυφη τάση των 500 kPa κατά το στάδιο της μονοδιάστατης συμπίεσης. Στην περίπτωση των δοκιμών που έγιναν σε δοκίμια φορτισμένα σε διάφορες τιμές της τάσης και αποφορτισμένα σε μηδενική τάση (Σχ. 14.35α) η καμπύλη λόγου κενών-μύζησης του πολτού απέχει πολύ λίγο από το σμήνος των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης αλλά αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί σε διαφορές στην υγρασία του πολτού και στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τον ένα και τον άλλο πολτό. Και πάλι όμως από τα 200 kPa και μετά μέχρι τα 1500 kPa η καμπύλη αυτή ταυτίζεται πρακτικά με την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης. Οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμών που συμπίεστηκαν μέχρι κάποια τιμή της τάσης υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως ξεκινούν για χαμηλές τιμές της μύζησης αισθητά μακριά από την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης παρουσιάζοντας έναν πρώτο κλάδο μικρότερης κλίσης, συνεχίζοντας σε έναν κλάδο μεγαλύτερης κλίσης και καταλήγοντας σε ένα πρακτικά οριζόντιο τμήμα όπου έχει σταθεροποιηθεί ο λόγος κενών στο εύρος τιμών της μύζησης 20 έως 120 MPa. Στην καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης παρατίθεται εκτός από τον κλάδο της φόρτισης και ο κλάδος της αποφόρτισης. Ειδικά οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμών που είχαν συμπεσθεί μέχρι τα 500 και τα 4000 kPa, μοιάζουν να έχουν, η μεν πρώτη έναν κλάδο μέχρι τα 500 kPa μύζησης με κλίση παρόμοια με αυτή του κλάδου αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης και μετά έναν κλάδο που ακολουθεί τον κλάδο φόρτισης της καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης, η δε δεύτερη μοιάζει να έχει μόνο έναν κλάδο που αντιστοιχεί στην «επαναφόρτιση» από τον κλάδο αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι μηδενική τιμή της κατακόρυφης τάσης. Ειδικά για την καμπύλη του υλικού που είχε συμπεσθεί μέχρι τα 500 kPa, η διαφορά μεταξύ ήπιας και πιο απότομης κλίσης μοιάζει να συμβαίνει με μεγάλη ακρίβεια στην ίδια τιμή της μύζησης. Στην περίπτωση των δοκιμών που έγιναν σε δοκίμια τα οποία είχαν υποβληθεί σε σιμέντωση αλλά και σε ερπυσμό υπό την κατακόρυφη τάση των 500 kPa (Σχ. 14.35β) η καμπύλη λόγου κενών-μύζησης στο δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για ακριβή σύγκριση (ένδειξη: 500 kPa-Check) με την πρώτη δοκιμή που είχε γίνει σε ξεχωριστά δοκίμια (ένδειξη: 500 kPa-Initial) απέχει αισθητά από αυτήν. Το σημαντικό είναι ότι η καμπύλη που μετρήθηκε στο δοκίμιο που είχε υποστεί ερπυσμό μεταξύ 150 και 500 kPa μύζησης διατηρείται υψηλότερα ελαφρώς από την καμπύλη με ένδειξη 500 kPa-Check. Η διαφορά είναι πολύ μικρή αλλά δεν μπορεί να μην επισημανθεί. Επίσης σαφώς η καμπύλη λόγου κενών-μύζησης του υλικού που είχε υποβληθεί σε σιμέντωση διατηρείται υψηλότερα από τις δύο άλλες καμπύλες λόγου κενών-μύζησης αλλά και αυτή καθεαυτή την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης του σιμεντωμένου υλικού, πράγμα όμως αναμενόμενο,



(α)

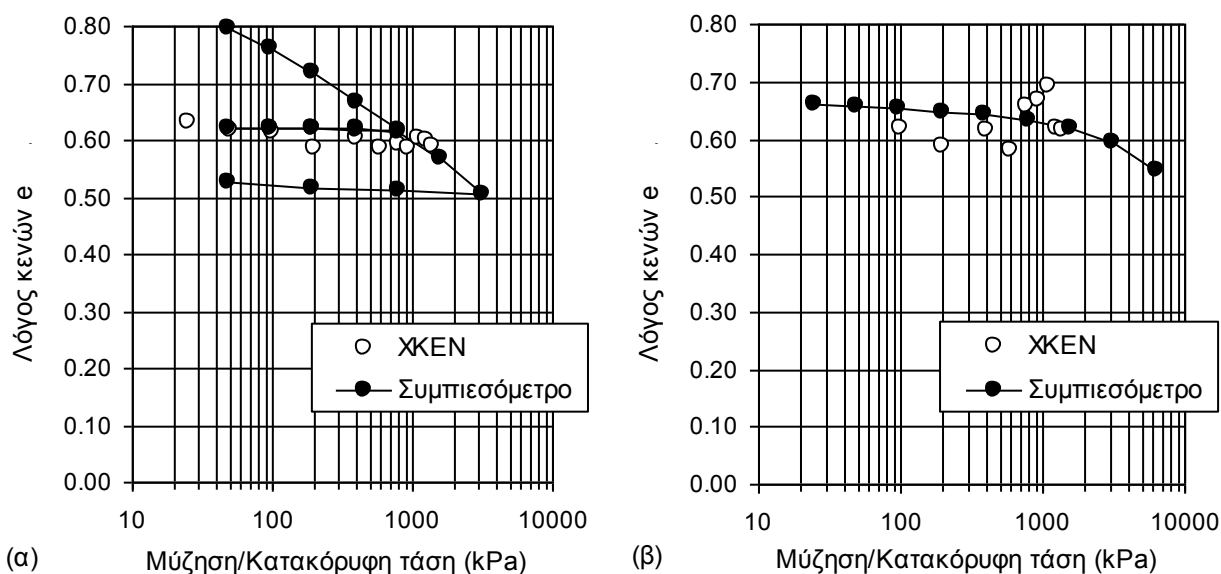


(β)

**Σχήμα 14.35.** Μεταβολή του λόγου κενών της Αργίλου Αμφιλοχίας κατά την ξήρανση: α) καμπύλες για τον πολτό του υλικού και δοκίμια του υλικού αναζυμωμένα, επανασυμπιεσμένα μέχρι 62.5, 500 και 4000 kPa και αποφορτισμένα σε μηδενική τάση και την μονοδιάστατη συμπίεση του αναζυμωμένου υλικού, και β) καμπύλες για το υλικό αναζυμωμένο, επανασυμπιεσμένο μέχρι 500 kPa και αποφορτισμένο σε μηδενική τάση με ή χωρίς ερπυσμό αλλά και με σιμέντωση με τσιμέντο σε ποσοστό 6%.

δεδομένου ότι η καμπύλη αυτή προσδιορίστηκε μετά από περαιτέρω συμπίεση του υλικού αφού είχε παραμείνει για σιμέντωση στην τάση των 500 kPa χωρίς να έχει αποφορτιστεί προηγουμένως. Μία αποφόρτιση ενδεχομένως θα οδηγούσε την αντίστοιχη καμπύλη επαναφόρτισης λίγο ψηλότερα (όπου βρίσκεται και η καμπύλη λόγου κενών-μύζησης του σιμεντωμένου υλικού που υποβλήθηκε σε ξήρανση) οπότε τελικά η διαφορά αυτή που παρατηρείται είναι μικρότερη.

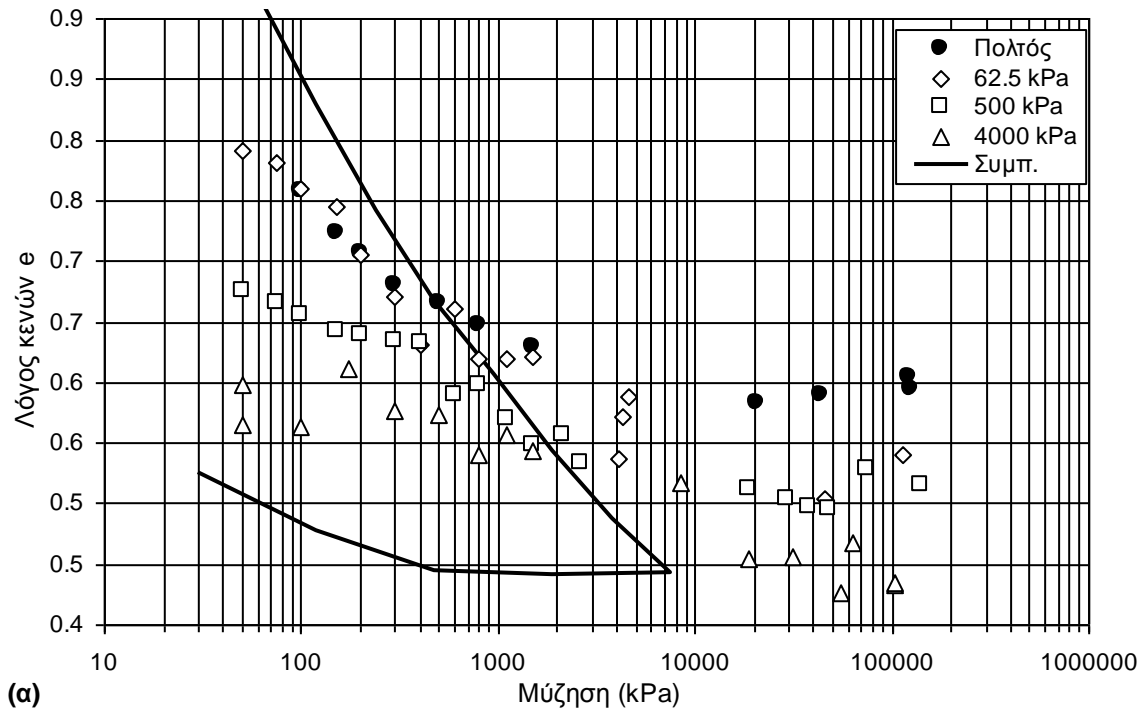
Στο Σχ. 14.36 παρουσιάζονται οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης και λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης για την αναζυμωμένη/επανασυμπιεσμένη Μάργα Κορίνθου (Σχ. 14.36α) και την φυσική (Σχ. 14.36β). Στο Σχ. 14.36α παρουσιάζεται η καμπύλη λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης που μετρήθηκε σε δοκίμιο αναζυμωμένης Μάργας Κορίνθου που συμπίεστηκε μέχρι τα 800 kPa, όπως και τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, αποφορτίστηκε στα 50 kPa και στη συνέχεια επαναφορτίστηκε μέχρι τα 3200 kPa απ'όπου έγινε η τελική αποφόρτίσή του. Στο Σχ. 14.36β χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη συμπίεσης της λιγότερο πλαστικής Μάργας Κορίνθου (στην οποία βρίσκονταν εγγύτερα τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στο φυσικό υλικό). Το μεν αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο υλικό μοιάζει να έχει κλάδο ξήρανσης που ακολουθεί πρακτικά την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίε-



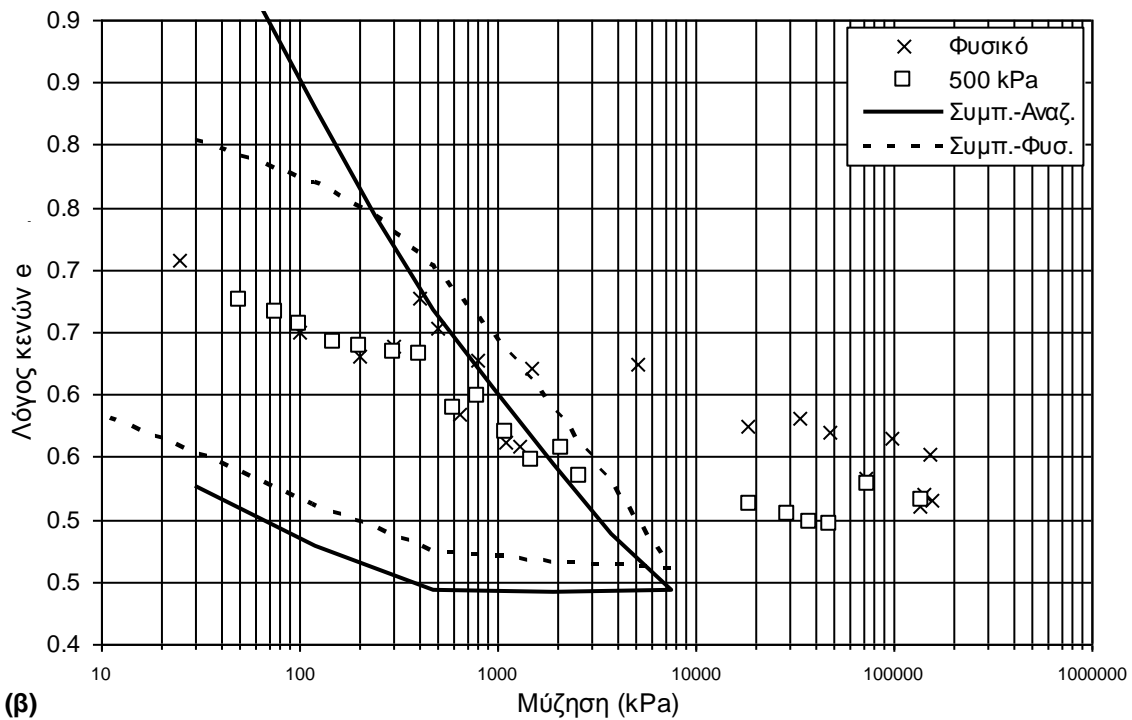
**Σχήμα 14.36.** Μεταβολή του λόγου κενών α) της αναζυμωμένης/επανασυμπιεσμένης και β) της φυσικής Μάργας Κορίνθου κατά την ξήρανση και τη μονοδιάστατη συμπίεσή τους.

σης μονοδιάστατης συμπίεσης μετά την πρώτη αποφόρτιση (τηρουμένων πάντα των προβλημάτων ακριβείας που εισάγει η μέθοδος προσδιορισμού του ολικού όγκου με εμβάπτιση των δοκιμίων σε υγρή παραφίνη), το δε αδιατάρακτο έχει τόσο μεγάλη διασπορά (λόγω της μεγάλης επιρροής της ανομοιογένειας που εισάγει η μέθοδος πολλαπλών δοκιμίων) που δεν ξεχωρίζει σύμπτωση ή μη του σμήνους των σημείων που αντιστοιχούν στην ξήρανση με την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης (εξαιρουμένης ίσως της διέλευσης της καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης σχεδόν κεντροβαρικά από το σμήνος των σημείων που αντιστοιχούν στον κλάδο ξήρανσης).

Στα Σχ. 14.37α & 14.37β παρουσιάζονται σε μεγέθυνση αντίστοιχα τα Σχ. 14.17α και 14.18α για την Μάργα Χαλκουτσίου. Στο υλικό αυτό εκτός από τις δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που έγιναν σε δοκιμιά του φορτισμένα σε διάφορες τιμές της τάσης και αποφορτισμένα σε μηδενική τάση πριν την έναρξη της ξήρανσης (Σχ. 14.37α), έγιναν και αντίστοιχες δοκιμές σε δοκίμια του ίδιου υλικού στη φυσική του κατάσταση (Σχ. 14.37β). Στο Σχ. 14.37α η καμπύλη λόγου κενών-μύζησης του πολτού απέχει από το σμήνος των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης, το οποίο αποδίδεται σε διαφορές στην υγρασία του πολτού και στο υλικό που χρησιμοποιήθηκε από δοκιμή σε δοκιμή. Οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης για τον πολτό και τα δοκίμια που είχαν συμπίεστεί και αποφορτιστεί μοιάζουν να τείνουν σε κοινή εφαπτομένη πριν γίνει η προοδευτική σταθεροποίησή τους προς τον διαφορετικό παραμένοντα λόγο κενών τους (εφαπτομένη που είναι ελαφρώς πιο ήπια από την καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης του αναζυμωμένου υλικού που μετρήθηκε). Σε κάθε περίπτωση οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμίων που συμπίεστηκαν μέχρι κάποια τιμή της τάσης υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως ξεκινούν για χαμηλές τιμές της μύζησης αισθητά μακριά από την νοητή εφαπτομένη στην οποία τείνουν παρουσιάζοντας έναν πρώτο κλάδο μικρότερης κλίσης, συνεχίζοντας σε έναν κλάδο μεγαλύτερης κλίσης και καταλήγοντας σε ένα πρακτικά οριζόντιο τμήμα όπου έχει σταθεροποιηθεί ο λόγος κενών στο εύρος τιμών της μύζησης 10 έως 140 MPa, όπως ακριβώς είχε παρατηρηθεί και στα προηγούμενα εδαφικά υλικά που εκτελέστηκαν παρόμοιες δοκιμές. Στην καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης παρατίθεται εκτός από τον κλάδο της φόρτισης και ο κλάδος της αποφόρτισης. Ειδικά οι καμπύλες λόγου κενών-μύζησης των δοκιμίων που είχαν συμπίεστεί μέχρι τα 500 και τα 4000 kPa, μοιάζουν να έχουν, η μεν πρώτη έναν κλάδο μέχρι τα 500 kPa μύζησης με κλίση παρόμοια με αυτή του κλάδου αποφόρτισης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης και μετά έναν κλάδο που ακολουθεί τον κλάδο φόρτισης της καμπύλης μονοδιάστατης συμπίεσης, η δε δεύτερη μοιάζει να έχει μόνο έναν κλάδο που αντιστοιχεί στην «επαναφόρτιση» από τον κλάδο αποφόρτισης των καμπυλών



(α)



(β)

**Σχήμα 14.37.** Μεταβολή του λόγου κενών της Μάργας Χαλκουτσίου κατά την ξήρανση: α) καμπύλες για τον πολτό του υλικού και δοκίμια του υλικού αναζυμωμένα, επανασυμπίεσμένα μέχρι 62.5, 500 και 4000 kPa και αποφορτισμένα σε μηδενική τάση και την μονοδιάστατη συμπίεση του αναζυμωμένου υλικού, και β) καμπύλες για το υλικό αναζυμωμένο, επανασυμπίεσμένο μέχρι 500 kPa και στη φυσική του μορφή (μαζί με την αντίστοιχη καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης του φυσικού υλικού αλλά και του αναζυμωμένου για σύγκριση).



μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι μηδενική τιμή της κατακόρυφης τάσης. Σε ό,τι αφορά το αδιατάρακτο υλικό (Σχ. 14.37β), και πάλι όπως στην περίπτωση της Μάργας Κορίνθου είναι πολύ μεγαλύτερη η διασπορά των αποτελεσμάτων σε σχέση με το αντίστοιχο αναζυμωμένο και επανασυμπιεσμένο υλικό με τον ίδιο αρχικό λόγο κενών. Παρά δε τον διαφορετικό αρχικό λόγο κενών μεταξύ αδιατάρακτου δοκιμίου μονοδιάστατης συμπίεσης και δοκιμίων προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, ο αρχικός κλάδος αυτής είναι παράλληλος του κλάδου αποφόρτισης στην καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης.

Συνοψίζοντας το σύνολο των προηγούμενων παρατηρήσεων για όλα τα εδαφικά υλικά στα οποία υπήρχαν καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης προσδιορισθείσες επί δοκιμίων ευρισκόμενων στην ίδια κατάσταση με εκείνα στα οποία μετρήθηκαν χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού φαίνεται ότι πράγματι στις περιπτώσεις που το υλικό δεν έχει ακόμα αποκορευτεί (κατά συνέπεια στους πόρους του υπάρχει αρνητική πίεση πόρων και όχι μύζηση) οι κλίσεις των καμπυλών λόγου κενών-μύζησης/αρνητικής πίεσης πόρων, είναι οι ίδιες με εκείνες των καμπυλών λόγου κενών κατακόρυφης τάσης για το ίδιο μέγεθος τάσης και πάντα σε σχέση με την ίδια θέση ως προς την τάση διαρροής. Δηλαδή σε ένα εδαφικό υλικό συμπιεσμένο μέχρι μία κατακόρυφη τάση και στη συνέχεια αποφορτισμένο σε μηδενική τάση η κλίση της καμπύλης λόγου κενών-μύζησης συγκρίνεται κατ' αρχήν με τον δείκτη επαναφόρτισης, ενώ σε ένα αναζυμωμένο εδαφικό υλικό που ξηραίνεται από αρχική κατάσταση πολλού συγκρίνεται με τον δείκτη συμπίεσης. Και στην πρώτη περίπτωση μπορεί να γίνεται σύγκριση με τον δείκτη συμπίεσης αλλά για το τμήμα της καμπύλης λόγου κενών-μύζησης για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες της μέγιστης κατακόρυφης τάσης προ ξήρανσης.

Οι προηγούμενες παρατηρήσεις δεν αποδεικνύουν καταληκτικά αν πράγματι ο δείκτης συμπίεσης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα κατά την ξήρανση ταυτίζεται με τον δείκτη επαναφόρτισης κατά τη δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης, παρέχουν όμως αρκετές ενδείξεις ώστε μια τέτοια δυνατότητα να ενσωματωθεί στο νέο θεωρητικό πλαίσιο που παρουσιάζεται στο Κεφ. 19 του τρίτου μέρους.

## **14.5 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ Ή ΣΤΟΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΦΟΥΡΝΟ**

### **14.5.1 Εισαγωγή**

Οι δοκιμές προσδιορισμού καμπυλών ξήρανσης στον ατμοσφαιρικό αέρα ή στον εργαστηριακό φούρνο έγιναν με σκοπό την απόπειρα συσχέτισης των καμπυλών αυτών με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Δεδομένου ότι η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού εκφράζει την απώλεια υγρασίας κατά μήκος του κλάδου ξήρανσής της, η λογική της συσχέτισης αυτού του τρόπου απώλειας υγρασίας με τον απλούστερο και πιο σύντομο δυνατό που είναι η εισαγωγή ενός δοκιμίου στον φούρνο θερμοκρασίας 110° C ή τον ακόμα απλούστερο αλλά πιο χρονοβόρο τρόπο της άφεσης ενός δοκιμίου για ξήρανση στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου μοιάζει κατ'αρχήν αρκετά ελκυστική. Όπως έχει τονιστεί, οι δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι εξαιρετικά λεπτεπίλεπτες και συνήθως χρονοβόρες έως πολύ χρονοβόρες ανάλογα με την μέθοδο ή συνδυασμό μεθόδων ελέγχου της μύζησης που υιοθετούνται. Η ύπαρξη λοιπόν μιας εναλλακτικής μεθόδου άμεσου ή έμμεσου έστω προσδιορισμού της, ειδικά μάλιστα όταν η εναλλακτική αυτή μέθοδος δεν προϋποθέτει τίποτα πιο εξεζητημένο από έναν φούρνο ξήρανσης και έναν ζυγό ή μόνο έναν ζυγό απετέλεσε αρκετά ελκυστική προοπτική ώστε να επιδιωχθεί η εκτέλεση των δοκιμών ξήρανσης στα ίδια εδαφικά υλικά και με τις ίδιες αρχικές συνθήκες των δοκιμών για σύγκρισή τους με τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που προσδιορίστηκαν.

### **14.5.2 Καμπύλες ξήρανσης στον φούρνο θερμοκρασίας 110° C**

Αρχικά παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης στον φούρνο θερμοκρασίας 110° C που προσδιορίστηκαν.

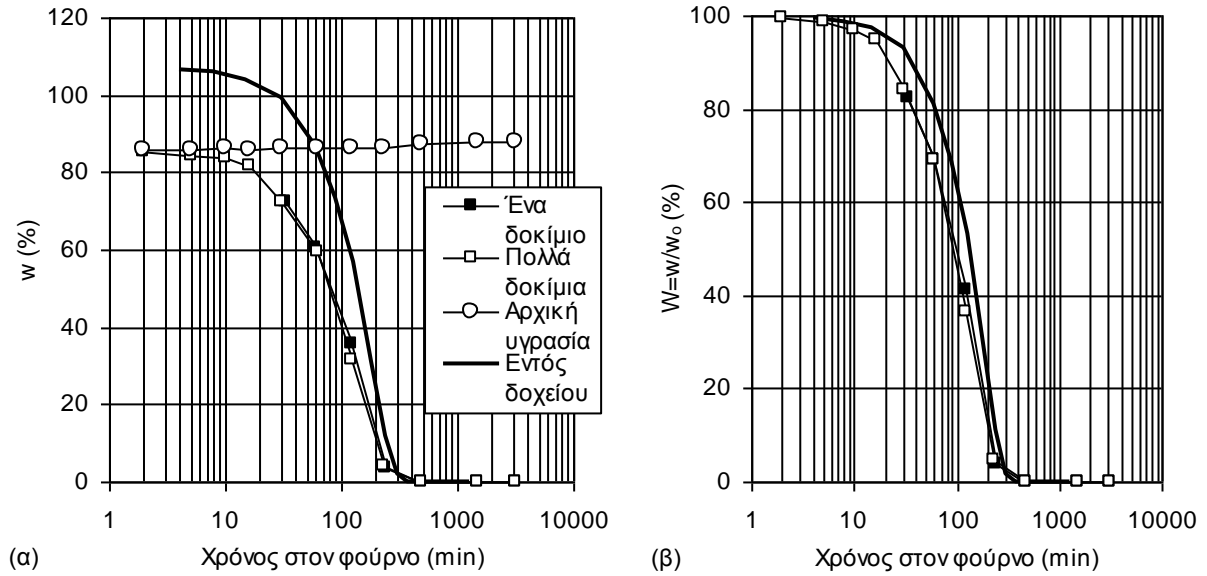
Για την εμπέδωση της διαδικασίας εκτέλεσης της μεθόδου, πριν την εκτέλεση των δοκιμών στα εδαφικά υλικά που προσδιορίστηκε και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού εκτελέστηκε μία ειδική συγκριτική δοκιμή σε αναζυμωμένο καολίνη Speswhite. Αρχικά παρασκευάστηκε πολτός τους αναζυμωμένου υλικού με ποσοστό υγρασίας 135±2% του ορίου υδαρότητας του υλικού (δηλ. 85.5 έως 87.5% του ορίου υδαρότητας) και εισήχθη σε μικρές γυάλινες κάψες για εισαγωγή στον φούρνο. Άλλα δοκίμια από αυτά χρησιμοποιήθηκαν για να βγουν μόνο μία φορά από τον φούρνο, στον χρόνο που αναλογούσε στην μέτρησή τους, και ένα από αυτά έβγαине σε

κάθε χρόνο ζύγισης. Σκοπός της διαφοροποίησης αυτής ήταν να διαπιστωθεί η διαφορά μεταξύ των καμπυλών από ένα δοκίμιο που ζυγίζεται σε όλους τους χρόνους (και άρα εξέρχεται από τον φούρνο σε όλους τους χρόνους) και από πολλά δοκίμια κάθε ένα από τα οποία εξέρχεται μόνο μία φορά από τον φούρνο στο χρόνο που αναλογεί στην δική του ζύγιση. Προφανώς η πρώτη μέθοδος είναι απλούστερη και απαιτεί πολύ λιγότερο υλικό, παρόλο που η δεύτερη είναι πιθανόν πιο αντιπροσωπευτική του τι συμβαίνει σε ένα δοκίμιο που δεν θα βγει ποτέ από τον φούρνο, παρά μόνο την άλλη ημέρα για την τελική του ζύγιση. Οι χρόνοι στους οποίους έγιναν ζυγίσεις των δοκιμίων ήταν κάθε φορά περίπου διπλάσιοι του προηγούμενου ξεκινώντας από τα 2' και φτάνοντας μέχρι τις 8 ώρες πριν γίνει η τελική ζύγιση την επόμενη ημέρα (ειδικά στα πλαίσια αυτών των δοκιμών η παραμονή στον φούρνο επεκτάθηκε μέχρι και τις 48 ώρες προκειμένου να ελεγχθεί και η επάρκεια του χρόνου των 24 ωρών που υιοθετείται για ξήρανση στον φούρνο). Μετά την παρέλευση των 48 ωρών όλα τα δοκίμια ζυγίστηκαν (ολικό βάρος 24 ωρών και 48 ωρών αποδείχθηκε το ίδιο για όλα τα δοκίμια) και από το τελικό ξηρό τους βάρος υπολογίστηκε το αρχικό ποσοστό υγρασίας όλων των δοκιμίων και το ενδιάμεσο στον χρόνο ή χρόνους που έγιναν ενδιάμεσες ζυγίσεις. Για να αποφευχθούν προβλήματα με την ταχεία ζύγιση ενός δοκιμίου υψηλής θερμοκρασίας, πριν την εξαγωγή κάθε δοκιμίου από τον φούρνο για ζύγιση, στην επιφάνεια του ζυγού τοποθετείτο ένα κομμάτι μονωτικού υλικού (π.χ. φελιζόλ), ο ζυγός μηδενιζόταν, και στην συνέχεια ανοιγόταν ο φούρνος και τοποθετείτο άμεσα το δοκίμιο στον ζυγό. Έτσι δεν υπήρχε επιρροή της υψηλής θερμοκρασίας του δοκιμίου και της γυάλινης κάψας ούτε στην στιγμιαία απόκριση του ζυγού (ορθότητα της μέτρησης) ούτε στην μακροχρόνια λειτουργία του (ζυγοί εκτεθειμένοι σε μεγάλες διαφορές θερμοκρασίες στην επιφάνεια ζύγισής τους μπορεί να χάσουν μόνιμα την ακρίβεια μέτρησής τους). Εκτός από τα μικρού μεγέθους δοκίμια παρασκευάστηκε και μεγαλύτερο από πολύ ποσοστού υγρασίας 167% του ορίου υδαρότητα, τοποθετήθηκε εντός κάψας από πορσελάνη, εισήχθη μαζί με την κάψα στον φούρνο και ξεράθηκε με παρακολούθηση της εξέλιξης του βάρους του στους ίδιους χρόνους που έγιναν οι ενδιάμεσες ζυγίσεις και των μικρών δοκιμίων.

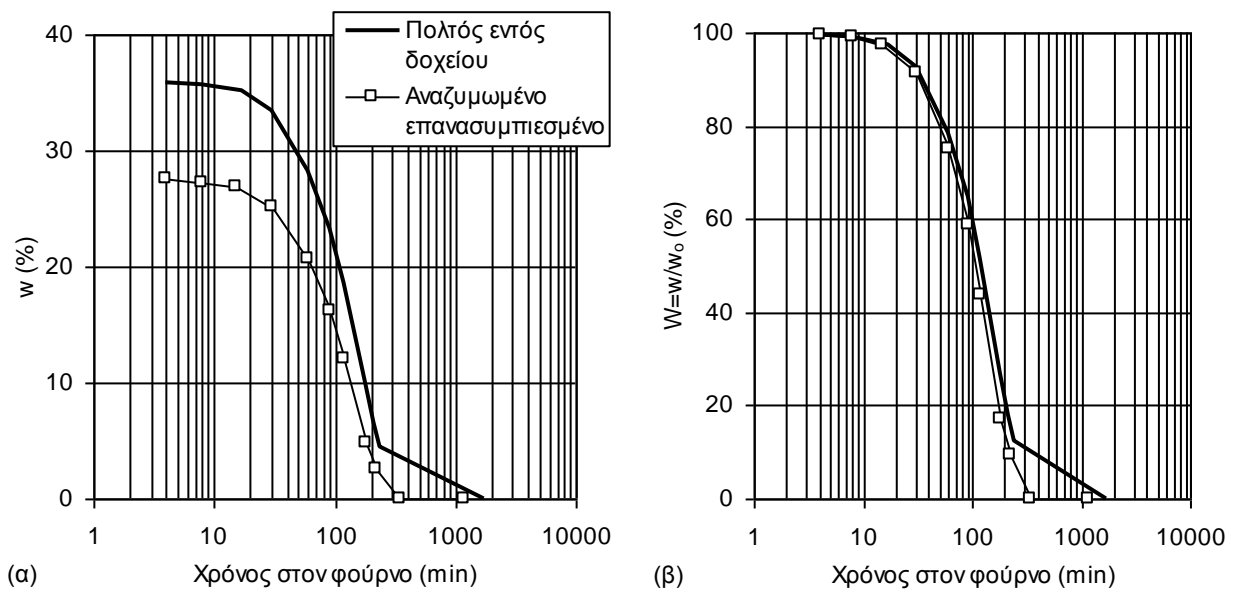
Στο Σχ. 14.38 παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης στον φούρνο των δοκιμίων καολίνη. Στο Σχ. 14.38α παρουσιάζονται οι καμπύλες της εξέλιξης του ποσοστού υγρασίας με τον χρόνο παραμονής στον φούρνο και στο Σχ. 14.38β οι καμπύλες της εξέλιξης του κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας με τον χρόνο παραμονής στον φούρνο. Το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι πρακτικά δεν υπάρχει διαφορά ανάμεσα στην καμπύλη που προέκυψε από μετρήσεις σε περισσότερα δοκίμια που ζυγίζονταν μόνο μία φορά και στην καμπύλη που προέκυψε από μετρήσεις σε ένα μόνο δοκίμιο. Πράγματι η καμπύλη που προέκυψε από μέτρηση πολλών

δοκιμίων μόνο μία φορά το καθένα βρίσκεται ελαφρώς ψηλότερα από την καμπύλη από το ένα δοκίμιο (όπως ήταν αναμενόμενο) αλλά η διαφορά είναι τόσο μικρή που τεκμηριώνεται η δυνατότητα χρήσης στα πλαίσια αυτής της μεθόδου μόνο ενός δοκιμίου που ζυγίζεται σε όλους τους ενδιάμεσους χρόνους (τηρουμένων των προϋποθέσεων που εξασφαλίστηκαν στα πλαίσια αυτού του προγράμματος δοκιμών, δηλ. ελάχιστος χρόνος παραμονής δοκιμίου εκτός φούρνου κατά την ζύγιση και παρεμβολή μονωτικού υλικού μεταξύ επιφάνειας ζύγισης και δοκιμίου και για εξασφάλιση ορθής μέτρησης και για προστασία του ζυγού). Το δεύτερο συμπέρασμα είναι ότι αφενός η μεγαλύτερη μάζα του μεγαλύτερου δοκιμίου (περίπου 50g ξηρή έναντι 20g των μικρότερων δοκιμίων) και αφετέρου το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειάς του σε επαφή με τον υποδοχέα του (περίπου 60% έναντι περίπου 30% των μικρότερων δοκιμίων) οδηγούν σε μεγαλύτερη αντίσταση στην απώλεια ύδατος όπως παρατηρείται στο Σχ. 14.38β που η καμπύλη του μεγαλύτερου δοκιμίου βρίσκεται υψηλότερα από τις καμπύλες των μικρότερων δοκιμίων. Η απώλεια υγρασίας από τον πολτό που παρασκευάστηκαν τα πολλά δοκίμια δεν είχε επιρροή στην πειραματική διαδικασία αφού, όπως παρατηρείται στο Σχ. 14.38α, ήταν πολύ μικρή (έχει σχεδιαστεί η καμπύλη των αρχικών ποσοστών υγρασίας των δοκιμίων με πρώτο από όλα εκείνο της ζύγισης στις 48 ώρες, δεύτερο εκείνο της ζύγισης στις 24 ώρες, τρίτο εκείνο της ζύγισης στις 8 ώρες κ.ο.κ.).

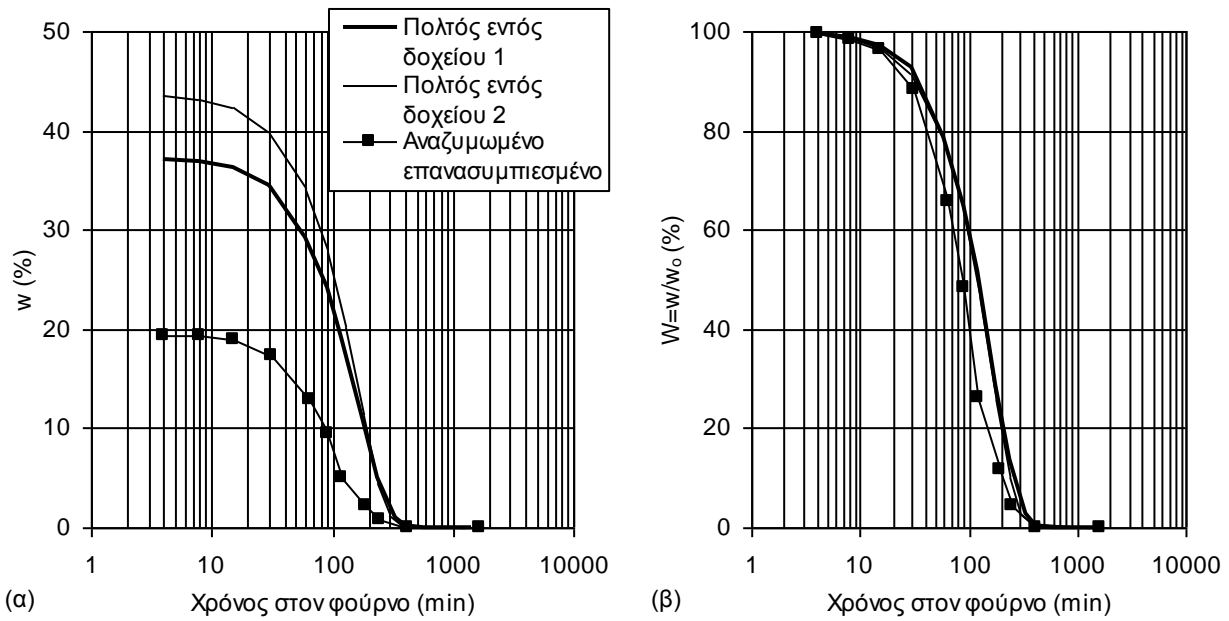
Παρόμοια συμπεράσματα προέκυψαν και από τις δοκιμές στα άλλα υλικά, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στα Σχ. 14.39 έως 14.43 (Σχ. 14.39: Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων, Σχ. 14.40: Άργιλος Χανίων, Σχ. 14.41: Άργιλος και Μάργα Κηφισιάς, Σχ. 14.42: Μάργα Κορίνθου, και Σχ. 14.43: τα αναζυμωμένα και επανασυμπιεσμένα δοκίμια όλων των υλικών μαζί). Σε όλες τις περιπτώσεις, οι καμπύλες των αναζυμωμένων υλικών που τοποθετήθηκαν ως πολτοί εντός κάψας μέσα στον φούρνο για ξήρανση, βρίσκονται υψηλότερα από τις αντίστοιχες καμπύλες των αναζυμωμένων και επανασυμπιεσμένων δοκιμίων. Μόνο οι καμπύλες των αδιατάρακτων δοκιμίων της Μάργας Κορίνθου στο Σχ. 14.42β βρίσκονται υψηλότερα και από τις καμπύλες του ίδιου υλικού αναζυμωμένου, υποδηλώνοντας μεγαλύτερη αντίσταση του φυσικού αυτού υλικού με δομή στην απώλεια ύδατος. Αυτό αποτελεί πράγματι αντιστοιχία των καμπυλών αυτών με τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που μετρήθηκαν, αλλά είναι η μόνη. Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.43 όπου παρουσιάζονται οι καμπύλες από τα αναζυμωμένα και επανασυμπιεσμένα δοκίμια όλων των υλικών (δοκίμια ίδιων συνθηκών λοιπόν), ειδικά οι κανονικοποιημένες καμπύλες ταυτίζονται πρακτικά μεταξύ τους χωρίς να προκύπτει κάποια παρατηρήσιμη μεταβολή μεταξύ τους η οποία θα υποδήλωνε εξάρτηση από τα φυσικά χαρακτηριστικά των υλικών, όπως συμβαίνει και με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-



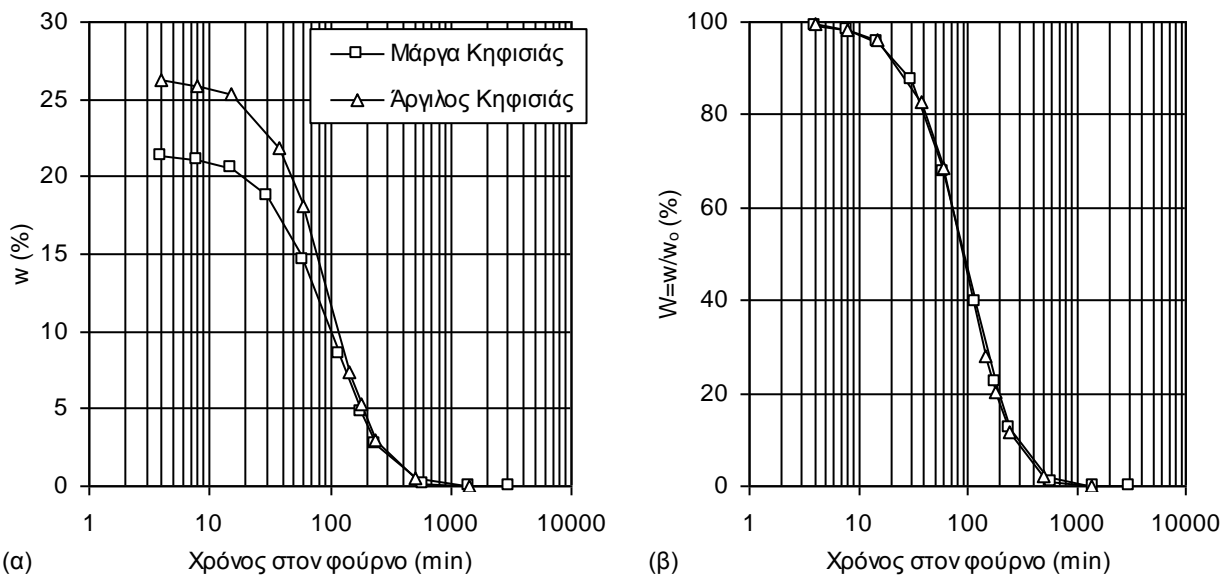
**Σχήμα 14.38.** Μεταβολή α) του ποσοστού υγρασίας, και β) του κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας αναζυμωμένου καολίνη Speswhite μορφωμένου σε μικρά δοκίμια ή τοποθετημένου εντός δοχείου κατά την ξήρανσή του στον φούρνο των 110° C.



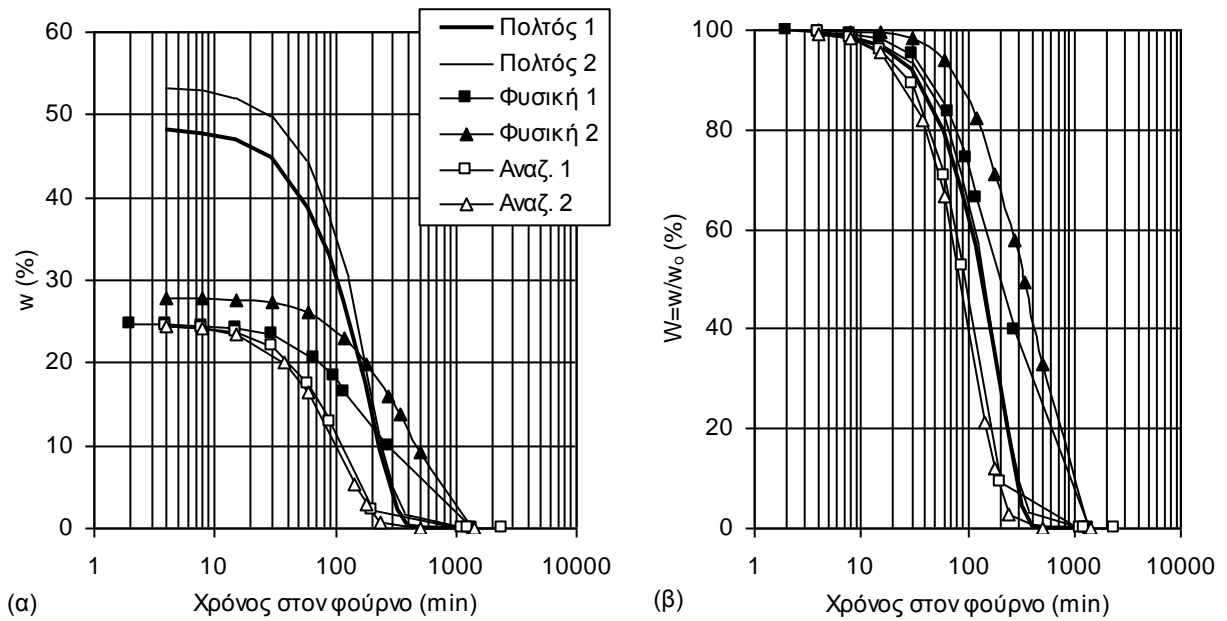
**Σχήμα 14.39.** Μεταβολή α) του ποσοστού υγρασίας, και β) του κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας αναζυμωμένης Ιλίους Λίμνης Ιωαννίνων εντός δοχείου και αναζυμωμένου και επανασυμπίεσμένου δοκιμίου του ίδιου υλικού κατά την ξήρανσή τους στον φούρνο των 110° C.



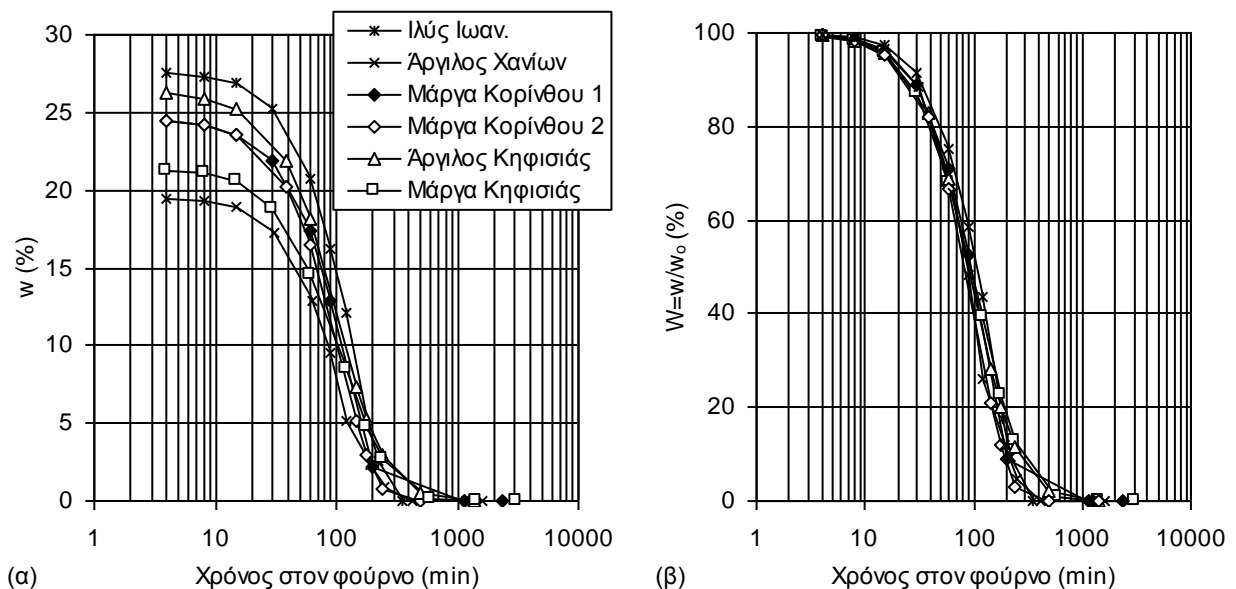
**Σχήμα 14.40.** Μεταβολή α) του ποσοστού υγρασίας, και β) του κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας δύο δοκιμών αναζυμωμένης Αργίλου Χανίων εντός δοχείου και αναζυμωμένου και επανασυμπιεσμένου δοκιμίου του ίδιου υλικού κατά την ξήρανσή τους στον φούρνο των 110° C.



**Σχήμα 14.41.** Μεταβολή α) του ποσοστού υγρασίας, και β) του κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας δοκιμών αναζυμωμένης και επανασυμπιεσμένης Αργίλου και Μάργας Κηφισιάς κατά την ξήρανσή τους στον φούρνο των 110° C.



**Σχήμα 14.42.** Μεταβολή α) του ποσοστού υγρασίας, και β) του κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας δύο δοκιμίων αναζυμωμένης Μάργας Κορίνθου εντός δοχείου, δύο αναζυμωμένων και επανασυμπιεσμένων δοκιμίων και δύο αδιατάρακτων δοκιμίων του ίδιου υλικού κατά την ξήρανσή τους στον φούρνο των 110° C.



**Σχήμα 14.43.** Μεταβολή α) του ποσοστού υγρασίας, και β) του κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας όλων των δοκιμίων αναζυμωμένων και επανασυμπιεσμένων υλικών κατά την ξήρανσή τους στον φούρνο των 110° C.

νερού. Κατά συνέπεια η μέθοδος παρακολούθησης του ποσοστού υγρασίας των υλικών κατά την ξήρανσή τους στον εργαστηριακό φούρνο δεν προσφέρεται για τη συσχέτιση με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού.

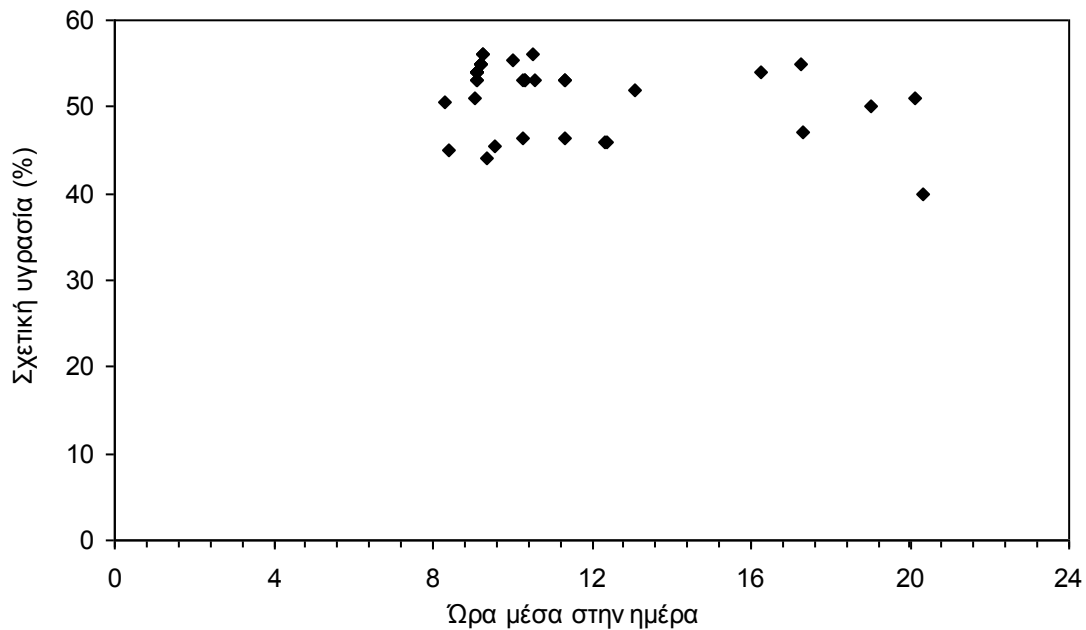
### 14.5.3 Καμπύλες ξήρανσης στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου

Μετά τις καμπύλες ξήρανσης στον φούρνο θερμοκρασίας 110° C, προσδιορίστηκαν και οι καμπύλες ξήρανσης των υλικών στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου. Κατά τις προβλέψεις του νόμου του Kelvin (Εξ. 2.11 έως 2.13 στο Κεφ. 2 του πρώτου μέρους) η ξήρανση ενός δοκιμίου στον ατμοσφαιρικό αέρα αποτελεί ουσιαστικά βήμα μεταβολής της μύζησης του προς την τιμή της ολικής μύζησης που αντιστοιχεί στην σχετική υγρασία του δεδομένου ατμοσφαιρικού αέρα (για ένα υγρό πλήρως κορεσμένο δείγμα που αφήνεται σε συνθήκες ατμοσφαιρικές συνθήκες, αυτό το βήμα είναι αύξηση της μύζησης μέχρι την τιμή που αντιστοιχεί στην σχετική υγρασία). Στο Σχ. 14.44 παρουσιάζεται διάγραμμα της εξέλιξης της σχετικής υγρασίας του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής με την ώρα μέσα στην ημέρα για το χρονικό διάστημα από 13/5/2004 έως 9/6/2004. Ο μέσος όρος των απεικονιζόμενων τιμών ήταν 51.5% με τυπική απόκλιση 4.0%. Από τον νόμο του Kelvin και για μέση θερμοκρασία 25° C, η σχετική αυτή υγρασία αντιστοιχεί σε τιμή της ολικής μύζησης κατά μέσο όρο 92 MPa, κυμαινόμενη από 81 MPa έως 104 MPa. Η τιμή αυτή της ολικής μύζησης είναι πολύ υψηλή, ικανή να προκαλέσει ξήρανση μέχρι το παραμένον ποσοστό υγρασίας του υλικού. Οι τιμές στο Εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. είναι παραπλήσιες.

Το ύψος της τιμής αυτής της μέσης σχετικής υγρασίας δύο εργαστηρίων υπογραμμίζει και την σημασία της επιλογής του υδατικού διαλύματος ένυδρου χλωριούχου μαγνησίου ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) στα πλαίσια της εφαρμογής της μεθόδου ελέγχου της μύζησης με υδατικά διαλύματα, το οποίο είναι ικανό να δημιουργήσει σχετική υγρασία μικρότερη και από αυτή της ατμοσφαιρικής, ξηραίνοντας έτσι ακόμα περισσότερο τα υλικά και από την ξήρανση που είναι δυνατόν να τους επιβάλλει η άφεσή τους στον ατμοσφαιρικό αέρα.

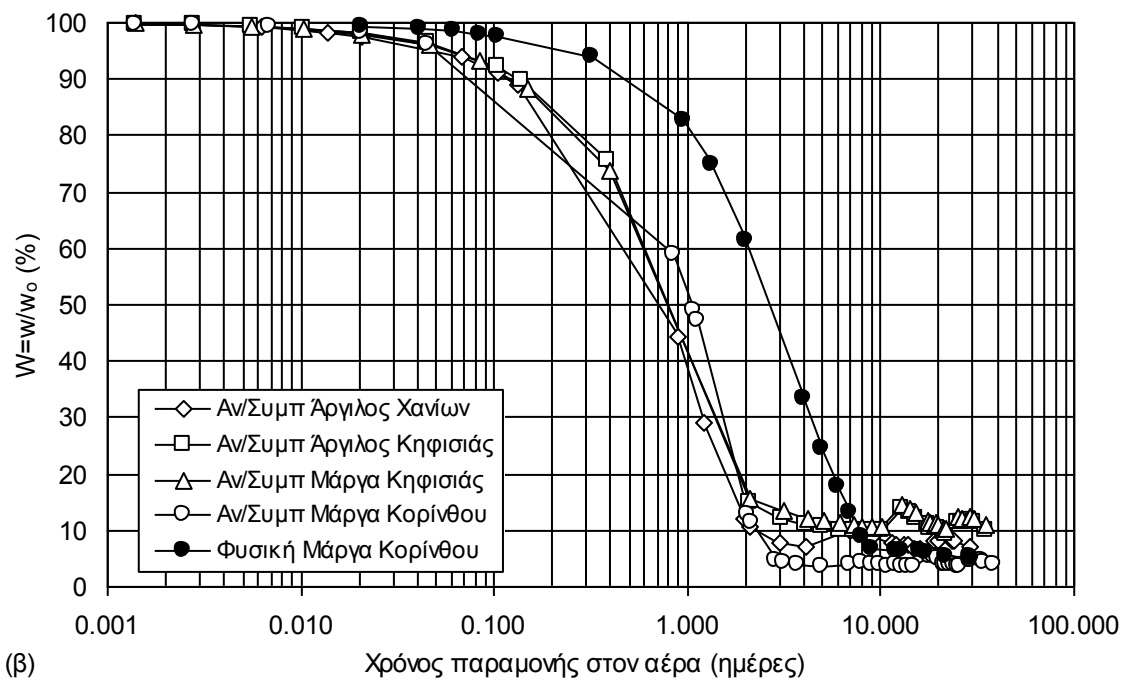
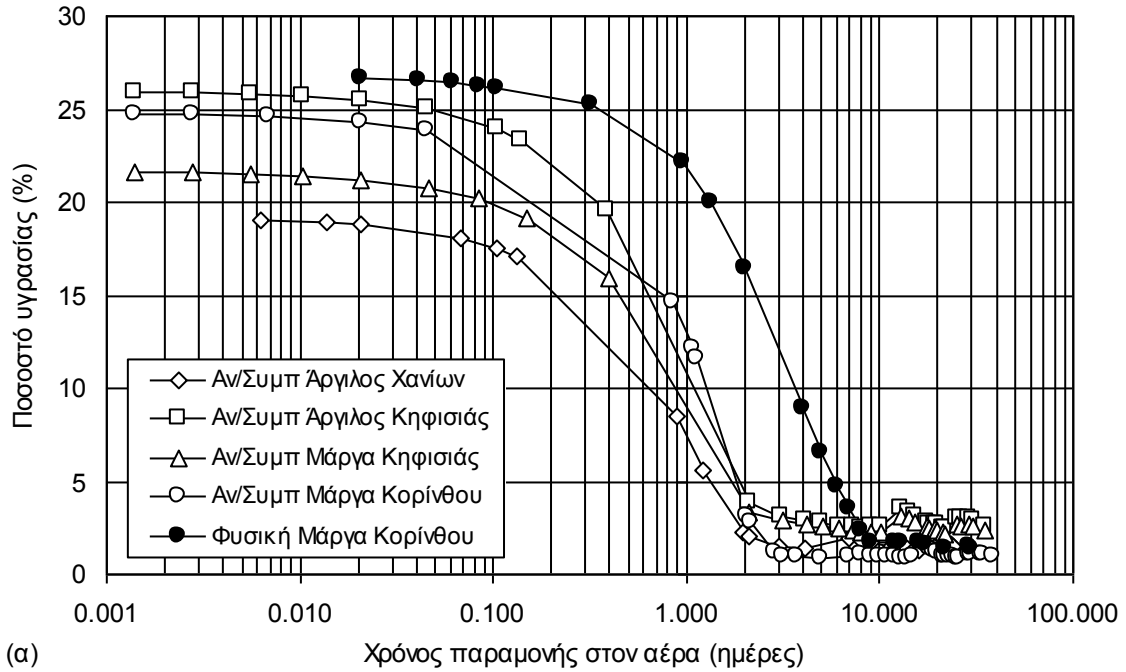
Στο Σχ. 14.45α παρουσιάζεται η εξέλιξη του ποσοστού υγρασίας αναζυμωμένων και επανασυμπιεσμένων δοκιμίων Αργίλου Χανίων, Αργίλου και Μάργας Κηφισιάς και Μάργας Κορίνθου, καθώς και ενός δοκιμίου φυσικής Μάργας Κορίνθου με τον χρόνο παραμονής των δοκιμίων στον ατμοσφαιρικό αέρα, ενώ στο Σχ. 14.45β παρουσιάζεται η εξέλιξη του κανονικο-





**Σχήμα 14.44.** Εξέλιξη της σχετικής υγρασίας του Εργαστηρίου Θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής με την ώρα μέσα στην ημέρα για το χρονικό διάστημα από 13/5/2004 έως 9/6/2004.

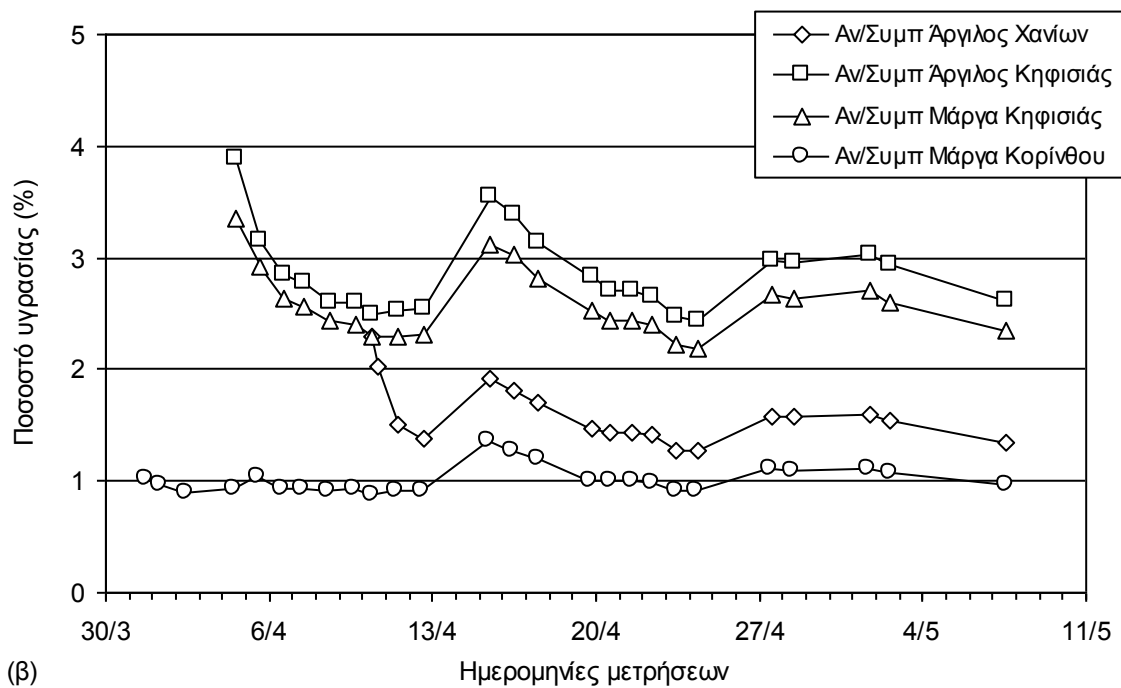
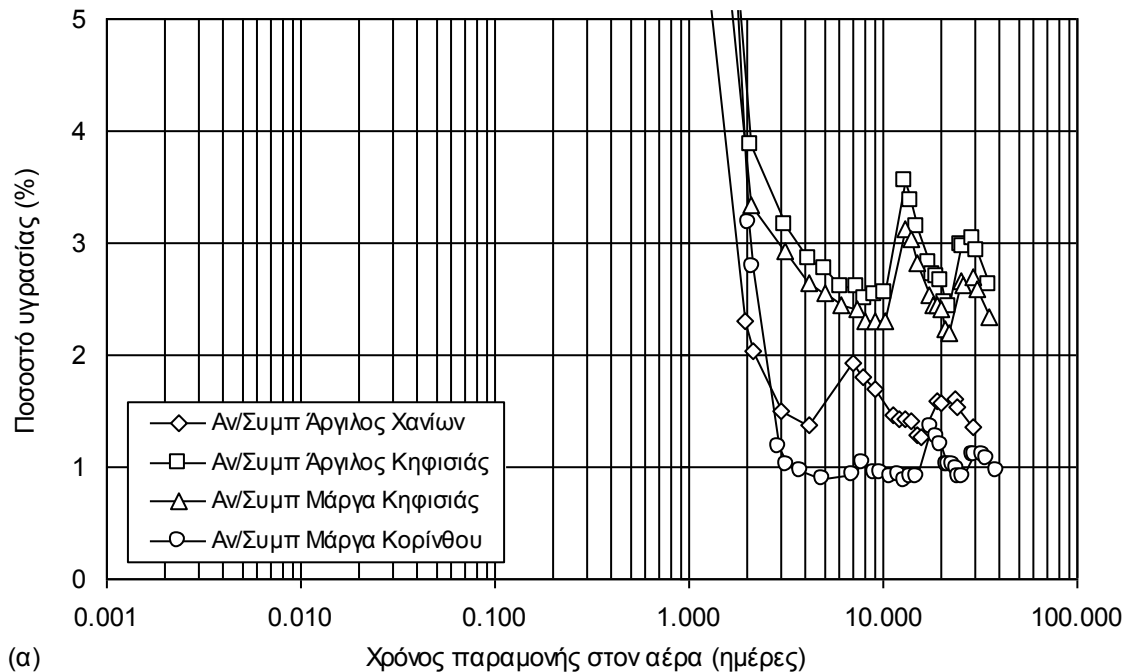
ποημένου ποσοστού υγρασίας των ίδιων δοκιμίων με τον χρόνο παραμονής τους στον ατμοσφαιρικό αέρα (και στα δύο σχήματα ο άξονας του χρόνου είναι σε λογαριθμική κλίμακα). Όπως και στην περίπτωση των καμπυλών ξήρανσης στον φούρνο θερμοκρασίας 110° C, δεν παρατηρείται κάποια σημαντική μεταβολή μεταξύ των καμπυλών ξήρανσης στον ατμοσφαιρικό αέρα των δοκιμίων που είναι παρασκευασμένα υπό αντίστοιχες συνθήκες, αλλά μόνο για την φυσική Μάργα Κορίνθου, η οποία και σε αυτήν την διαδικασία ξήρανσης επέδειξε μεγαλύτερη αντίσταση στην απώλεια υγρασίας σε σχέση με το δοκίμιο του ίδιου υλικού αναζυμωμένου και επανασυμπιεσμένου στον ίδιο αρχικό λόγο κενών με το φυσικό υλικό. Η ενδιαφέρουσα διαφοροποίηση αυτών των καμπυλών ξήρανσης έγκειται στο ότι σταθεροποιούνται σε μία μη μηδενική τιμή του ποσοστού υγρασίας, η οποία είναι το παραμένον ποσοστό υγρασίας. Στο τελικό δε στάδιο της ξήρανσής τους, το ποσοστό υγρασίας τους δεν είναι σταθερό αλλά μεταβάλλεται ελαφρώς, προφανώς παρακολουθώντας τις μικρές μεταβολές της σχετικής υγρασίας στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου. Στο Σχ. 14.46α παρουσιάζεται μεγέθυνση του Σχ. 14.45α για το τμήμα του άξονα του ποσοστού υγρασίας από 0 έως 5%, όπου φαίνονται οι διάφορες αιχμές προς τα πάνω ή προς τα κάτω που κάνει η καμπύλη κάθε υλικού στο στάδιο της σταθεροποίησής της πέριξ του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας. Προς επίδειξη του ότι οι



**Σχήμα 14.45.** Εξέλιξη α) του ποσοστού υγρασίας, και β) του κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας με τον χρόνο παραμονής των δοκιμίων από όλα τα εδαφικά υλικά σε λογαριθμική κλίμακα.

αιχμές αυτές παρακολουθούν τις μεταβολές της σχετικής υγρασίας στον ατμοσφαιρικό αέρα παρατίθεται και το Σχ. 14.46β στο οποίο ο οριζόντιος άξονας είναι η ημερομηνία της μέτρησης αντί για τον χρόνο απ'αρχής. Στο σχήμα αυτό φαίνεται λοιπόν ότι οι αιχμές στις καμπύλες

ταυτίζονται και σχετίζονται με την ημερομηνία της μέτρησης, αντιστοιχώντας προφανώς στην κοινή τιμή της σχετικής υγρασίας εντός του εργαστηρίου την συγκεκριμένη ημέρα.



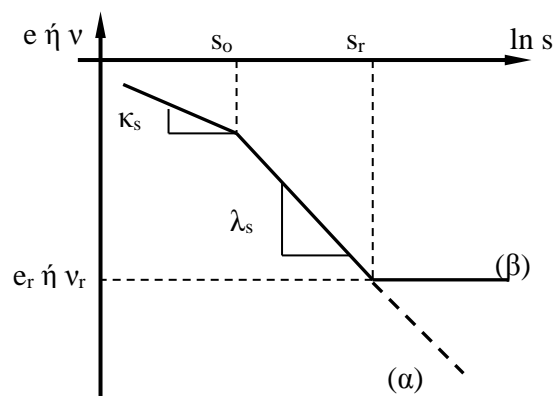
**Σχήμα 14.46.** Εξέλιξη του ποσοστού υγρασίας των δοκιμίων από όλα τα εδαφικά υλικά α) με τον χρόνο παραμονής των δοκιμίων από όλα τα εδαφικά υλικά σε λογαριθμική κλίμακα, και β) με την ημερομηνία λήψης των μετρήσεων.

## 14.6 ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΚΕΝΩΝ ΣΤΟ ΟΡΙΟ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΑΡΧΙΚΟ ΛΟΓΟ ΚΕΝΩΝ

### 14.6.1 Εισαγωγή

Η πρόβλεψη των μεταβολών όγκου που συμβαίνουν με τις μεταβολές της μύζησης είναι κεντρικής σημασίας για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών. Καταστατικά προσομοιώματα που έχουν προταθεί για μη κορεσμένα εδάφη προβλέπουν τις μεταβολές όγκου μέσω των δεικτών συμπίεσης για ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις λόγω μύζησης,  $\kappa_s$  και  $\lambda_s$  αντίστοιχα (Alonso, et al., 1990). Όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 14.47 (καμπύλη α), για μεταβολές της μύζησης υπό μηδενική ολική τάση, ο ειδικός όγκος  $v$  ( $v=1+e$ ), και κατά συνέπεια ο λόγος κενών  $e$ , μεταβάλλεται γραμμικά με τη μύζηση (σε λογαριθμική κλίμακα), σύμφωνα με την τιμή του δείκτη  $\kappa_s$  για τιμές της μύζησης μέχρι την μύζηση  $s_0$  (ουσιαστικά μία τυχαία επιλεγμένη τιμή της μύζησης η οποία αντιστοιχεί στην εμφάνιση πλαστικής διαρροής κατά την ξήρανση και εκφράζει φυσικά τη μέγιστη μύζηση που έχει εφαρμοστεί στο υλικό κατά τους Alonso, et al., 1990), και σύμφωνα με την τιμή του δείκτη  $\lambda_s$  για τιμές μεγαλύτερες της  $s_0$ . Αυτού του είδους η διατύπωση βρίσκεται σε συμφωνία με τη διατύπωση για την πρόβλεψη των μεταβολών όγκου που οφείλονται σε μεταβολές της ολικής τάσης λόγω μέσω των δεικτών  $\kappa$  και  $\lambda(s)$ . Τέτοιου τύπου καταστατικά προσομοιώματα προβλέπουν ρεαλιστικές τιμές των μεταβολών όγκου για τιμές της μύζησης μικρότερες εκείνης που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας, μέχρι το οποίο συμβαίνουν πράγματι ογκομετρικές μεταβολές λόγω ξήρανσης και μετά σταματούν. Για τιμές της μύζησης κοντά στο παραμένον ποσοστό υγρασίας, ή και ακόμα υψηλότερες, τέτοιου τύπου διατυπώσεις υπερεκτιμούν τις αναμενόμενες μεταβολές όγκου επειδή υποεκτιμούν τις τιμές του ειδικού όγκου/λόγου κενών. Πολυάριθμα δημοσιευμένα αποτελέσματα (π.χ. Fredlund & Rahardjo, 1993), τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο καθώς και η συνήθης εμπειρία από δοκιμές προσδιορισμού του ορίου συρρίκνωσης (περιλαμβανομένων και των δοκιμών ξήρανσης στον ατμοσφαιρικό αέρα που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής) επιδεικνύουν ότι η μείωση του ολικού όγκου ενός δοκιμίου και άρα του λόγου κενών του κατά την ξήρανση υπό μηδενική ολική τάση σταματούν σε μία οριακή τιμή του λόγου κενών  $e_r$ , η οποία αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας και αναφέρεται στην παρούσα διδακτορική διατριβή ως παραμένον λόγος κενών. Η τιμή  $e_r$  (ή η αντίστοιχη τιμή του παραμένοντος ειδικού όγκου  $v_r$ ,  $v_r=1+e_r$ ) θα έπρεπε να είναι η χαμηλότερη τιμή του λόγου κενών που προβλέπεται από καταστατικά προσομοιώματα που περιγράφουν τη μηχανική συμπεριφορά μη κορεσμένων εδαφών.

Πράγματι, σχετικά πρόσφατα έχουν προταθεί καταστατικά προσομοιώματα τα οποία εισάγουν παραμέτρους που περιορίζουν την μείωση του λόγου κενών με την αύξηση της μύζησης υπό σταθερή ολική τάση (π.χ. Toll, 1995, Kohgo, 2004). Ο Toll (1995) παρουσίασε ένα θεωρητικό (conceptual) προσομοίωμα για την ξήρανση και επανύγρανση των εδαφών, το οποίο προβλέπει τον περιορισμό της μείωσης του λόγου κενών με την αύξηση της μύζησης κοντά σε τιμές που αντιστοιχούν στο παραμένον ποσοστό υγρασίας (καμπύλη β στο Σχ. 14.47). Για να είναι κάτι τέτοιο δυνατόν, απαιτείται μόνο μία πρόσθετη παράμετρος. Αυτή είναι είτε η τιμή της μύζησης  $s_r$  στην οποία επιτυγχάνεται ο λόγος κενών  $e_r$  (το δεύτερο σημείο καμπής στην καμπύλη β στο Σχ. 14.47) είτε απλώς η τιμή του παραμένοντος λόγου κενών  $e_r$ . Με βάση αυτά λοιπόν, η τιμή του παραμένοντος λόγου κενών  $e_r$  παρουσιάζεται κρίσιμη για την ορθή καταστατική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς παραμορφώσιμων μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Στο Κεφ. 18 του τρίτου μέρους παρουσιάζονται τα διατυπωμένα μέχρι σήμερα καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη και στο Κεφ. 19 το νέο θεωρητικό πλαίσιο, το οποίο ενσωματώνει χαρακτηριστικά περιορισμού της μείωσης του λόγου κενών όσο η μύζηση προσεγγίζει την τιμή που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας.



**Σχήμα 14.47.** Μεταβολή του ειδικού όγκου/λόγου κενών με την αύξηση της μύζησης α) χωρίς πρόβλεψη περιορισμού της μείωσης του ειδικού όγκου/λόγου κενών όσο η μύζηση προσεγγίζει την τιμή της που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας, και β) με παύση της μείωσης αυτής.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται στο σύνολό της η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δοκιμές που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και καταλήγει σε μία οικογένεια εμπειρικών συσχετίσεων του παραμένοντος λόγου κενών  $e_r$  από

τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών και την αρχική τους κατάσταση κατά την έναρξη της ξήρανσης όπως εκφράζεται από τον αρχικό λόγο κενών. Τα αποτελέσματα και η επεξεργασία που παρουσιάζονται εδώ έχουν παρουσιαστεί σε διάφορα στάδια της εξέλιξης της επεξεργασίας των δεδομένων από τους Bardanis & Kanvadas (2006), Μπαρδάνης & Καββαδάς (2006) και Bardanis & Kanvadas (2008), ενώ στην §14.6.4 παρουσιάζεται η τελική επεξεργασία του συνόλου των δεδομένων όπως προέκυψαν από τις δοκιμές που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

### 14.6.2 Αρχικά πειραματικά δεδομένα

Στους Πίν. 14.4 και 14.5 συνοψίζονται τα αρχικά πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. Παρουσιάζονται ξεχωριστά ανάλογα με το στάδιο επεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκαν, ώστε να διευκολυνθεί η ροή της παρουσίασης της επεξεργασίας των αποτελεσμάτων που παρουσιάζεται στην §14.6.3 και στην §14.6.4. Στον Πίν. 14.5 περιλαμβάνονται και τρία πειραματικά σημεία από τους Παπαμεντζελόπουλο & Τσούκα (2004)<sup>15</sup>, ενώ στον Πιν. 14.5 περιλαμβάνονται και άλλα αποτελέσματα από την παρούσα διατριβή και αποτελέσματα που συλλέχθηκαν από τη βιβλιογραφία στο αντίστοιχο στάδιο παρουσίασης της επεξεργασίας.

**Πίνακας 14.4.** Αρχικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από τους Bardanis & Kanvadas (2006).

Εδαφικό υλικό	w <sub>L</sub> (%)	I <sub>p</sub> -	G <sub>s</sub> -	Κατάσταση*	e <sub>o</sub> -	e <sub>r</sub> -
Άργιλος Χανίων	24	9	2.68	Πολτός	1.05	0.35
				Πολτός	1.04	0.34
				100*	0.59	0.33
				200	0.52	0.31
				400*	0.51	0.34
				1600*	0.43	0.31
Καολίνης Speswhite	64	32	2.61	Πολτός	2.81	0.72
Μάργα Κορίνθου	34	11.5	2.67	Πολτός	1.27	0.60
				800	0.66	0.51
Μάργα Κηφισιάς	31.5	15.5	2.66	600	0.57	0.34

\* Η τιμή της τάσης που αναφέρεται στη στήλη αυτή είναι η μέγιστη που ασκήθηκε στο δοκίμιο υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως και στη συνέχεια αφαιρέθηκε πριν ξεκινήσει η ξήρανση.

\* Τα τρία αυτά πειραματικά σημεία προέρχονται από τους Παπαμεντζελόπουλο & Τσούκα (2004).

**Πίνακας 14.5.** Πρόσθετα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από τους Bardanis & Kanvadas (2008).

<sup>15</sup> Διπλωματική εργασία στον Τομέα Γεωτεχνικής η οποία εκπονήθηκε με την συνδρομή του γράφοντος.

Εδαφικό υλικό	w <sub>L</sub> (%)	I <sub>p</sub> -	G <sub>s</sub> -	Κατάσταση*	e <sub>o</sub> -	e <sub>r</sub> -
<i>Μετρήσεις στα πλαίσια της διατριβής</i>						
Ιλός Λίμνης Ιωαννίνων	24	1	2.55	100	0.69	0.58
Αργίλος Κηφισιάς	40.5	20.5	2.67	600	0.70	0.34
Μάργα Κορίνθου	34	11.5	2.67	Φυσική	0.64	0.62
<i>Fleureau et al. (1993)</i>						
Sterrebeek Loam	27	4	2.65*	Πολτός 200	0.78 0.61	0.61 0.52
Orly Loam	31	9.5	2.65*	Πολτός	1.23	0.39
Jossigny Loam	37	17.5	2.65 <sup>x</sup>	Πολτός	1.26	0.46
White Clay	61	30	2.67 <sup>x</sup>	Πολτός	2.00	0.88
Montmorillonite	170	110	2.64 <sup>x</sup>	Πολτός	7.40	0.95
<i>Dineen (1997)</i>						
Speswhite Kaolin	64	32	2.61	200	1.15	0.76
London Clay	74	45	2.64	200	1.12	0.42
<i>Melgarejo et al. (2002)</i>						
Colluvium	95	48	2.65*	200 Φυσικό	1.27 1.10	0.80 0.80
<i>Fleureau et al. (2002)</i>						
La Verne Clay	35	16	2.71	Πολτός	1.42	0.75
<i>Cunningham et al. (2003)</i>						
Silty Clay	28	18	2.64	200	0.54	0.44
<i>Fleureau et al. (2004)</i>						
Silty Sand	19	9	2.69	Πολτός	0.77	0.35
<i>Fredlund (2004)</i>						
Regina Clay	75	50	2.65	6.2 400	3.00 1.40	0.45 0.45
<i>Agus &amp; Schanz (2006)</i>						
Bentonite/Sand	130	97	2.65	Πολτός	4.50	0.70
<i>Abou-Bekr et al. (2006)</i>						
Sikkak Soil	50	27	2.64	Πολτός	1.98	0.51
<i>Peron et al. (2006)</i>						
Bioley Silt	32	15	2.71	Πολτός	1.33	0.57
<i>Pineda &amp; Colmenares (2006)</i>						
Clayey Silt	28.3	10.7	2.64	Πολτός	0.53	0.44

\* Η τιμή της τάσης που αναφέρεται στη στήλη αυτή είναι η μέγιστη που ασκήθηκε στο δοκίμιο υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως και στη συνέχεια αφαιρέθηκε πριν ξεκινήσει η ξήρανση.

\* Οι τιμές αυτές υποτέθηκαν.

<sup>x</sup> Οι τιμές αυτές εκτιμήθηκαν από την κλίση της γραμμής πλήρους κορεσμού στα διαγράμματα λόγου κενών-ποσοστού υγρασίας που παραθέτουν οι συγγραφείς.

### 14.6.3 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων

Η πρώτη απόπειρα επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων έγινε με τα δεδομένα του Πιν. 14.4. Από την αρχή υπήρχε η εκτίμηση ότι ο παραμένων λόγος κενών  $e_r$  είναι συνάρτηση και των φυσικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών, αλλά και της αρχικής τους κατάστασης όπως εκφράζεται από τον αρχικό λόγο κενών κατά την έναρξη της ξήρανσης  $e_o$ . προκειμένου να επιδειχθεί αυτό αρχικά συσχετίστηκε το  $e_r$  με το  $e_o$  όπως φαίνεται στο Σχ. 14.48. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι όσο αυξάνεται ο αρχικός λόγος κενών, τόσο αυξάνεται και ο παραμένων λόγος κενών  $e_r$ . Κανονικοποιώντας το  $e_r$  μέσω της διαίρεσής του με τον αρχικό λόγο κενών  $e_o$  όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 14.49 προκύπτει η αντίστροφη τάση, δηλ. ότι όσο ο αρχικός λόγος κενών ενός εδαφικού υλικού αυξάνεται, τόσο ο λόγος  $e_r/e_o$  μειώνεται, με τις καμπύλες για το ίδιο υλικό να έχουν την τάση να διέλθουν από το σημείο [ $e_o=0$ ,  $e_r/e_o=1$ ]. Αυτή η τάση θα έπρεπε να αναμένεται, δεδομένου ότι ένα υλικό με μεγαλύτερο αρχικό λόγο κενών κατά την έναρξη της ξήρανσης, δηλ. ένα υλικό με πιο ανοικτή δομή, θα έχει την τάση να συρρικνωθεί περισσότερο κατά την ξήρανσή του και να σταματήσει να συρρικνώνεται σε μία μικρότερη τιμή του παραμένοντος λόγου κενών (ως προς την αρχική τιμή) σε σύγκριση με ένα υλικό με μικρότερο αρχικό λόγο κενών. Στη θεωρητική ακραία κατάσταση ενός εδαφικού υλικού πολύ μικρού λόγου κενών ( $e_o \rightarrow 0$ ) θα αναμενόταν να μην υπάρχει ουσιαστική μεταβολή του λόγου κενών κατά την ξήρανση και άρα ο λόγος  $e_r/e_o$  να τείνει στη μονάδα.

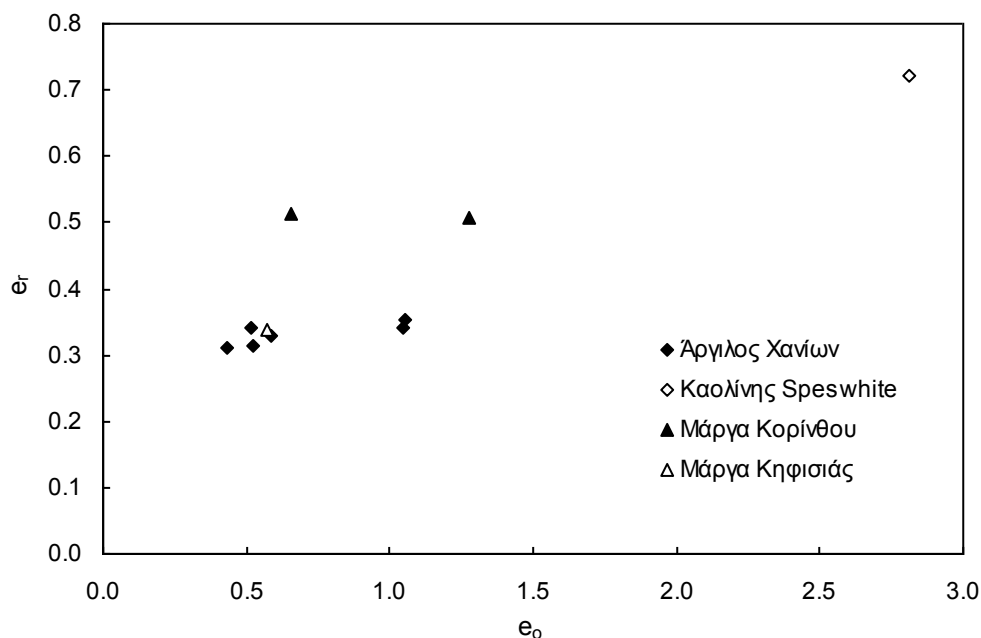
Δεδομένης της συσχέτισης που προέκυψε μεταξύ κανονικοποιημένου λόγου κενών  $e_r$  και αρχικού λόγου κενών  $e_o$ , αναζητήθηκε μία κανονικοποίηση των παραμέτρων και ως προς τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών. Ο αρχικός λόγος κενών ενός εδαφικού υλικού πριν την έναρξη της ξήρανσης περιγράφει με επιτυχία την κατάσταση του υλικού και άρα τη δομή του (ειδικά στην περίπτωση των πειραματικών δεδομένων του Πιν. 14.4 που τα υλικά είναι είτε πολλοί, είτε πολλοί συμπιεσμένοι υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως και αποφορτισμένοι και πάλι σε μηδενική τάση). Όταν όμως συγκρίνονται αποτελέσματα από εδαφικά υλικά με διαφορετικά φυσικά χαρακτηριστικά, τότε υπάρχει η ανάγκη κανονικοποίησης και ως προς μία παράμετρο που εκφράζει αυτές τις ιδιότητες. Ως τέτοια παράμετρος επιλέχθηκε ο λόγος κενών στο όριο υδαρότητας,  $e_L (=w_L \cdot G_s)$ , και ο λόγος  $e_r/e_o$  συσχετίστηκε με τον λόγο  $e_o/e_L$  (Σχ. 14.50). Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.50 όλα τα σημεία συγκεντρώνονται γύρω από μία μοναδική γραμμή, συνεπή με την προαναφερθείσα αναμενόμενη τάση, δηλ. τείνει *αβίαστα* να διέλθει από το σημείο [ $e_o/e_L=0$ ,  $e_r/e_o=1$ ]. Η γραμμή αυτή εκφράζεται από την Εξ. 14.3 με συντελεστή συσχέτισης 0.90. Η παράμετρος  $m$  αποτελεί εμπειρική παράμετρο, η οποία για τα



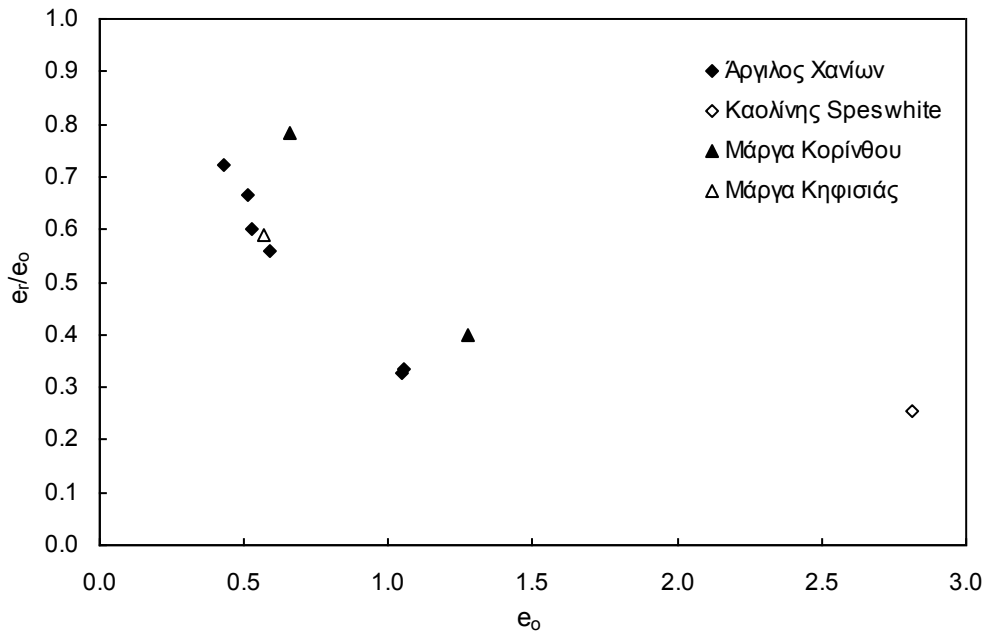
πειραματικά δεδομένα του Πιν. 14.4 προέκυψε να έχει τιμή 0.43. Μετασχηματίζοντας την Εξ. 14.3 με πολλαπλασιασμό και των δύο μερών με τον αρχικό λόγο κενών  $e_o$  και αντικατάσταση του λόγου κενών  $e_L$  από το γινόμενο  $w_L \cdot G_s$  προκύπτει η Εξ. 14.4, η οποία προβλέπει τον παραμένοντα λόγο κενών  $e_r$  από την αρχική κατάσταση των εδαφικών υλικών όπως αυτή εκφράζεται από τον αρχικό λόγο κενών  $e_o$  και τη φύση των εδαφικών υλικών όπως εκφράζεται από το όριο υδαρότητας  $w_L$  και το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών  $G_s$ , καθώς και από μία εμπειρική παράμετρο  $m$  η οποία για τα πειραματικά δεδομένα του Πιν. 14.4 προέκυψε 0.43. Η σημασία της Εξ. 14.4 για την κατανόηση της εξέλιξης του παραμένοντος λόγου κενών συναρτήσει της αρχικής κατάστασης των υλικών εξηγείται καλύτερα με την ενσωμάτωσή της στο Σχ. 14.48.

$$\frac{e_r}{e_o} = 1 - m \cdot \frac{e_o}{e_L} \quad (14.3)$$

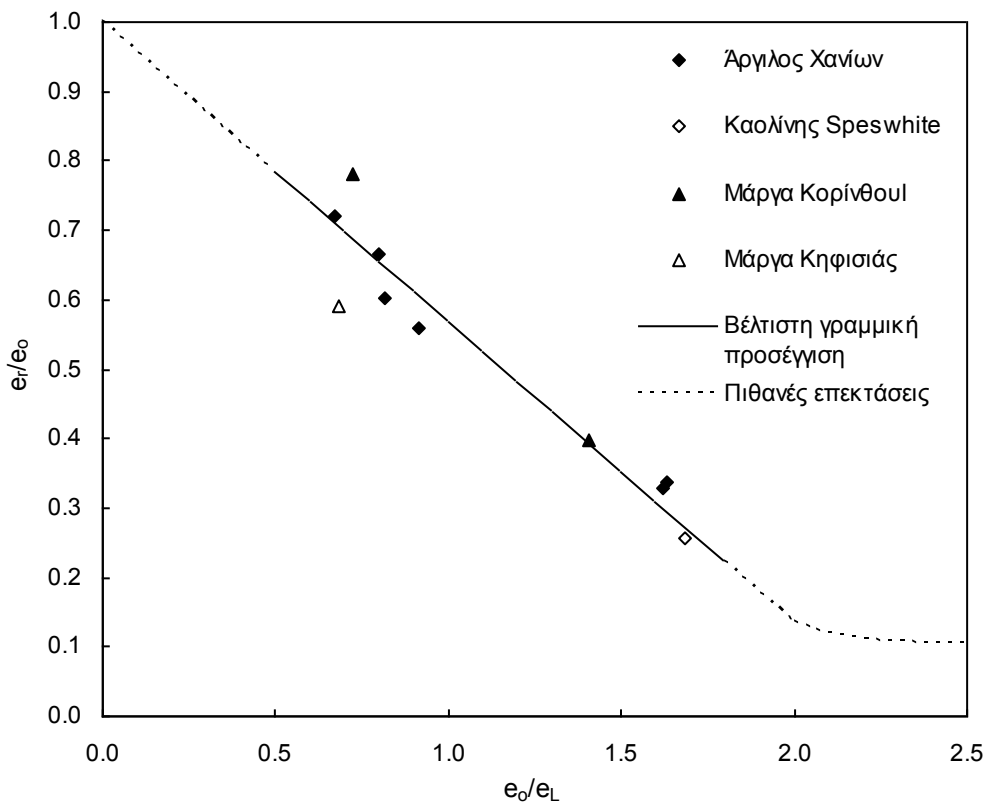
$$e_r = e_o \left( 1 - \frac{m}{w_L \cdot G_s} \cdot e_o \right) \quad (14.4)$$



**Σχήμα 14.48.** Συσχέτιση του παραμένοντος λόγου κενών  $e_r$  με τον αρχικό λόγο κενών  $e_o$  των εδαφικών υλικών πριν από την έναρξη της ξήρανσης των υλικών.



**Σχήμα 14.49.** Συσχέτιση του λόγου του παραμένουτος λόγου κενών  $e_r$  προς τον αρχικό λόγο κενών  $e_0$  των εδαφικών υλικών πριν από την έναρξη της ξήρανσης των υλικών με τον αρχικό λόγο κενών  $e_0$ .



**Σχήμα 14.50.** Συσχέτιση του λόγου του παραμένουτος λόγου κενών  $e_r$  προς τον αρχικό λόγο κενών  $e_0$  των εδαφικών υλικών πριν από την έναρξη της ξήρανσης των υλικών με τον λόγο του αρχικού λόγου κενών  $e_0$  προς τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας  $e_L$ .

Στο Σχ. 14.51 το  $e_r$  συσχετίζεται με τον αρχικό λόγο κενών  $e_o$  όπως στο Σχ. 14.48 αλλά έχουν σχεδιαστεί και οι καμπύλες  $e_r - e_o$  που προκύπτουν για σταθερές τιμές του ορίου υδαρότητας, όπως προβλέπονται από την Εξ. 14.4 για τιμές του  $w_L$  μεταξύ 20 και 100% ανά διαστήματα 10% (το  $G_s$  θεωρήθηκε σταθερό, ίσο με 2.65· προφανώς εάν πρόκειται να σχεδιαστούν τέτοιες καμπύλες για ένα συγκεκριμένο εδαφικό υλικό, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η τιμή του  $G_s$  του συγκεκριμένου υλικού). Οι καμπύλες αυτές είναι κυρτές, διερχόμενες από το σημείο [ $e_o=0, e_r=0$ ] προβλέποντας αρχικά αύξηση του  $e_r$  με την αύξηση του  $e_o$  μέχρι την επίτευξη μίας μέγιστης τιμής του  $e_r$ , οπότε πλέον το  $e_r$  αρχίζει να μειώνεται με την περαιτέρω αύξηση του  $e_o$  μέχρι του μηδενισμού του για μεγάλες τιμές του  $e_o$ . Παραγωγίζοντας την Εξ. 14.4 ως προς το  $e_o$  προκύπτει η Εξ. 14.5, η οποία εάν τεθεί ίση με το 0, τότε προκύπτει η Εξ. 14.6 από την οποία προκύπτει η τιμή του  $e_o$  ενός συγκεκριμένου εδαφικού υλικού (συνδυασμού  $w_L$  και  $G_s$ ) για την οποία γίνεται μέγιστο το  $e_r$ . Όσο απομακρύνεται, είτε μειούμενο, είτε αυξανόμενο, το  $e_o$  ενός εδαφικού υλικού από την τιμή που προβλέπεται από την Εξ. 14.6, τόσο μικρότερη τιμή του  $e_r$  θα προκύπτει από την μέγιστη. Τέλος, αντικαθιστώντας την Εξ. 14.6 στην Εξ. 14.4 προκύπτει η Εξ. 14.7 η οποία περιγράφει την γραμμή που ενώνει τα μέγιστα των καμπυλών σταθερού ορίου υδαρότητας στο Σχ. 14.51.

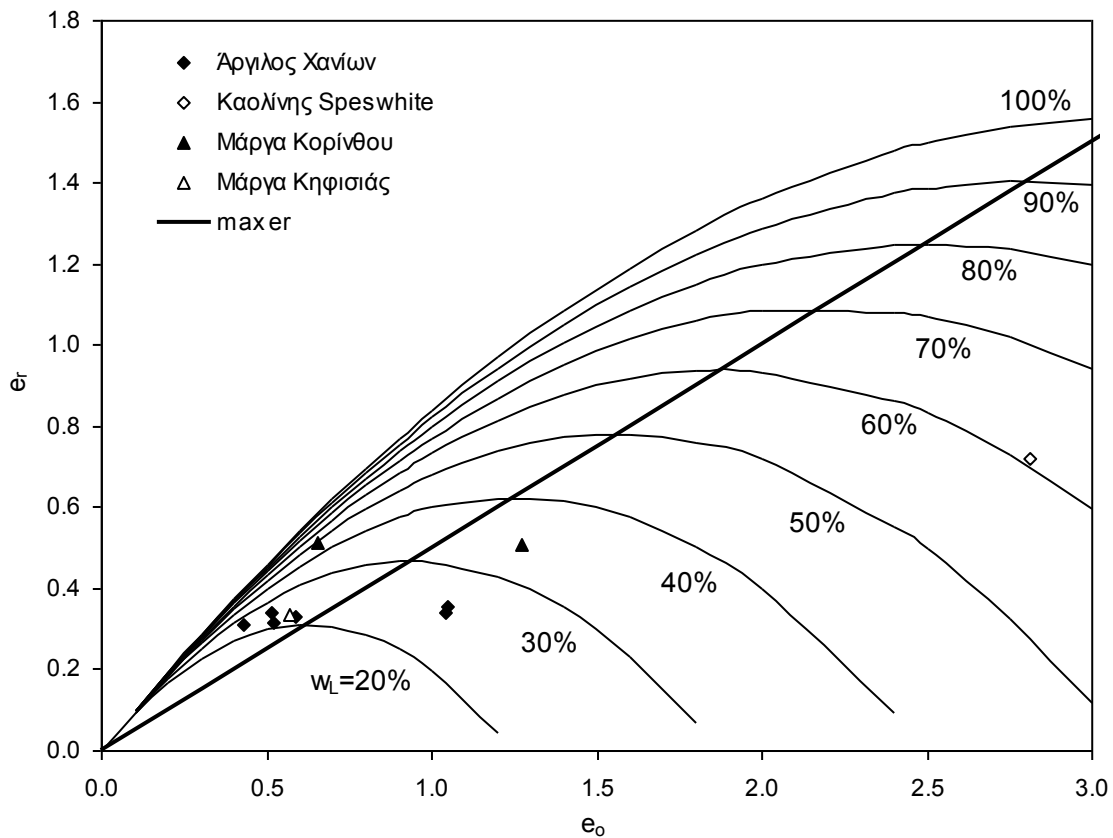
$$e_r' = 1 - 2 \cdot \frac{m}{w_L \cdot G_s} \cdot e_o \quad (14.5)$$

$$e_o(e_r \rightarrow \max) = \frac{w_L \cdot G_s}{2 \cdot m} = \frac{e_L}{2 \cdot m} \quad (14.6)$$

$$e_{r, \max} = \frac{e_L}{4 \cdot m} \quad (14.7)$$

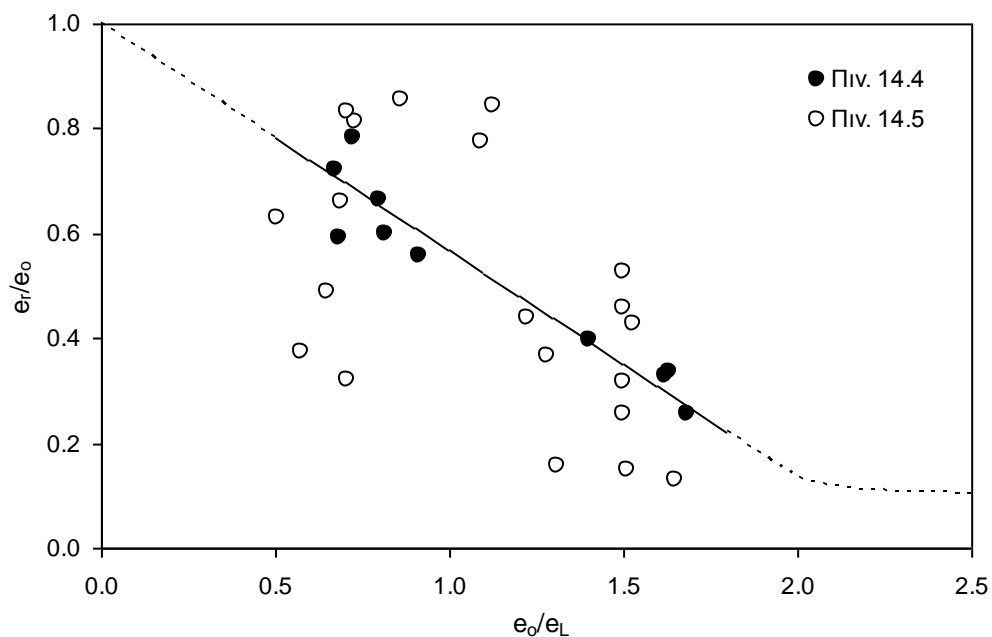
Αναζητώντας τα όρια εφαρμογής της Εξ. 14.4 υπολογίστηκαν οι τιμές του  $e_o$  στις οποίες ο παραμένων λόγος κενών  $e_r$  γίνεται 0. Αυτές προκύπτουν εύκολα  $e_o=0$  και  $e_o=e_L/m$ . Η περίπτωση  $e_o=0$ , αν και χωρίς φυσικό νόημα, αποτελεί το μαθηματικό όριο της λογικής υπόθεσης ότι όσο μειώνεται ο αρχικός λόγος κενών τόσο μειώνεται και ο παραμένων λόγος κενών. Η περίπτωση  $e_o=e_L/m$ , δηλ.  $e_o \approx 2.3e_L$  και δεδομένου ότι εξετάζονται οι ιδιότητες αρχικά πλήρως κορεσμένων εδαφών,  $w_o \approx 2.3w_L$ , δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Το μέγιστο αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών που εξετάστηκαν μέχρι αυτό το στάδιο της επεξεργασίας ήταν μόλις 1.7 φορές το όριο υδαρότητας των υλικών. Έτσι παρόλο που διαπιστώθηκε μία τάση εξέλιξης, μοιάζει

μάλλον αδύνατον ότι ο λόγος  $e_r/e_o$  θα γίνει πράγματι 0, ειδικά μάλιστα σε τόσο χαμηλές τιμές του λόγου  $w_o/w_L$  όπως το 2.3. Κατά συνέπεια το όριο εφαρμογής της Εξ. 14.4 πρέπει να περιοριστεί μέχρι τιμές του λόγου  $w_o/w_L$  μεταξύ 1.7 και 2, τουλάχιστον μέχρι να ληφθούν υπόψη και πειραματικά δεδομένα για πιο υγρούς πολτούς (όπως αυτά κατέστησαν διαθέσιμα στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, βλ. §14.6.4). Ως τότε, μία καμπύλη όπως αυτή που δείχνεται ποιοτικά στο Σχ. 14.50 θα πρέπει να αναμένεται ότι ακολουθεί το γραμμικό τμήμα της συσχέτισης μεταξύ  $e_r/e_o$  και  $e_o/e_L$  που εκφράζει η Εξ. 14.4. Αντίστοιχα, θα πρέπει να διατηρούνται επιφυλάξεις για τιμές του λόγου  $w_o/w_L$  μικρότερες του 0.5 έως 0.6, παρόλο που στην περίπτωση αυτή υπάρχει η θεωρητική τεκμηρίωση της προέκτασης της Εξ. 14.4 προς μικρότερες τιμές και της διέλευσής της από το σημείο [ $e_o/e_L=0$ ,  $e_r/e_o=1$ ].



**Σχήμα 14.51.** Συσχέτιση του παραμένοντος λόγου κενών  $e_r$  με τον αρχικό λόγο κενών  $e_o$  των εδαφικών υλικών πριν από την έναρξη της ξήρανσης των υλικών και καμπύλες  $e_r - e_o$  για σταθερές τιμές ορίου υδαρότητας, καθώς και η ευθεία σύνδεσης των μεγίστων αυτών των καμπυλών.

Προκειμένου να ελεγχθούν οι προβλέψεις της Εξ. 14.4 χρησιμοποιήθηκαν και άλλα δεδομένα που συλλέχθηκαν στην πορεία της εργαστηριακής διερεύνησης αλλά και τα πειραματικά δεδομένα άλλων ερευνητών (στοιχεία του Πίν. 14.4). Στο Σχ. 14.52 παρουσιάζεται ξανά το Σχ. 14.50 με τα δεδομένα και του Πίν. 14.4 και του Πίν. 14.5 (πλην των σημείων που αντιστοιχούν σε φυσικά εδαφικά υλικά -2 σημεία). Όπως παρατηρείται, η διασπορά όλων των σημείων είναι πλέον πολύ μεγαλύτερη, παρόλο που μοιάζει ισομερώς κατανεμημένη εκατέρωθεν της γραμμικής συσχέτισης που εκφράζει η Εξ. 14.3. Η στατιστική επεξεργασία όλων των δεδομένων δείχνει ότι η συσχέτιση που συνδέει τον λόγο  $e_r/e_o$  με τον λόγο  $e_o/e_L$  δεν μεταβάλλεται σημαντικά αλλά ο συντελεστής συσχέτισης μειώνεται από το 90% στο 44%. Η εικόνα του συνόλου των δεδομένων στο επίπεδο  $e_r/e_o$ - $e_o/e_L$  υποδεικνύει ότι έπρεπε να αναζητηθεί μία εναλλακτική συσχέτιση. Ακολουθώντας το σκεπτικό που επέβαλε την υιοθέτηση παραμέτρων συσχέτισης που εκφράζουν την αρχική κατάσταση των εδαφικών υλικών πριν από την ξήρανσή τους και την φύση τους, αναζητήθηκε μία παράμετρος εναλλακτική του λόγου κενών στο όριο υδαρότητας  $e_L$ .

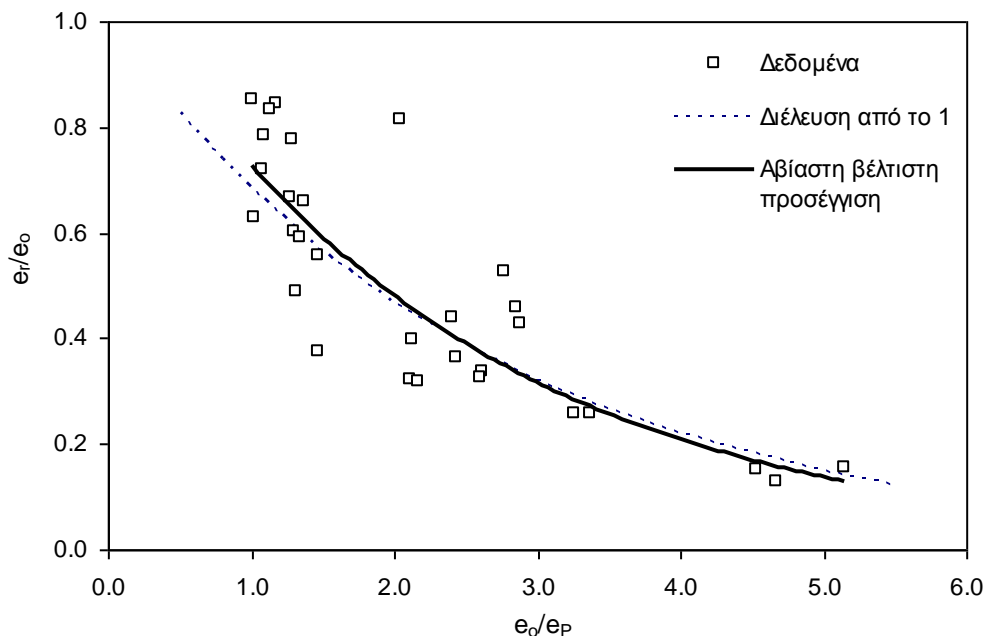


**Σχήμα 14.52.** Εξέλιξη του λόγου του παραμένοντος λόγου κενών  $e_r$  προς τον αρχικό λόγο κενών  $e_o$  των εδαφικών υλικών πριν από την έναρξη της ξήρανσης των υλικών με τον λόγο του αρχικού λόγου κενών  $e_o$  προς τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας  $e_L$  για το σύνολο των δεδομένων των Πίν. 14.4 και 14.5 με τη γραφική παράσταση της Εξ. 14.4 (συνεχής γραμμή –οι διακεκομμένες είναι οι λογικά εκτιμώμενες προεκτάσεις της μέχρι αυτό το στάδιο επεξεργασίας).

Στο Σχ. 14.53 όλα τα πειραματικά δεδομένα έχουν σχεδιαστεί αλλά ο λόγος κενών στο όριο υδαρότητας έχει αντικατασταθεί από τον λόγο κενών στο όριο πλαστικότητας,  $e_p$  ( $e_p = G_s \cdot w_p$ ). Όπως παρατηρείται, η διασπορά των δεδομένων έχει μειωθεί αισθητά σε σχέση με το Σχ. 14.52 και μία εκθετική συσχέτιση μεταξύ  $e_r/e_o$  και  $e_o/e_p$  φαίνεται να προσφέρει τη βέλτιστη προσέγγιση, η οποία περιγράφεται από την Εξ. 14.8, η οποία έχει συντελεστή συσχέτισης 81%. Η καμπύλη που περιγράφεται από την Εξ. 14.8 δεν διέρχεται από το σημείο [ $e_r/e_o=1$ ,  $e_o/e_p=0$ ] όπως θα αναμενόταν θεωρητικά με βάση το σκεπτικό που προαναφέρθηκε. Αν η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης υποχρεωθεί να διέλθει από το σημείο [ $e_r/e_o=1$ ,  $e_o/e_p=0$ ], τότε περιγράφεται από την Εξ. 14.9 η οποία έχει συντελεστή συσχέτισης 80% και αποκλίνει ελάχιστα από την Εξ. 14.8, όπως φαίνεται από τη σύγκρισή τους στο Σχ. 14.53 (διακεκομμένη και συνεχής γραμμή αντίστοιχα).

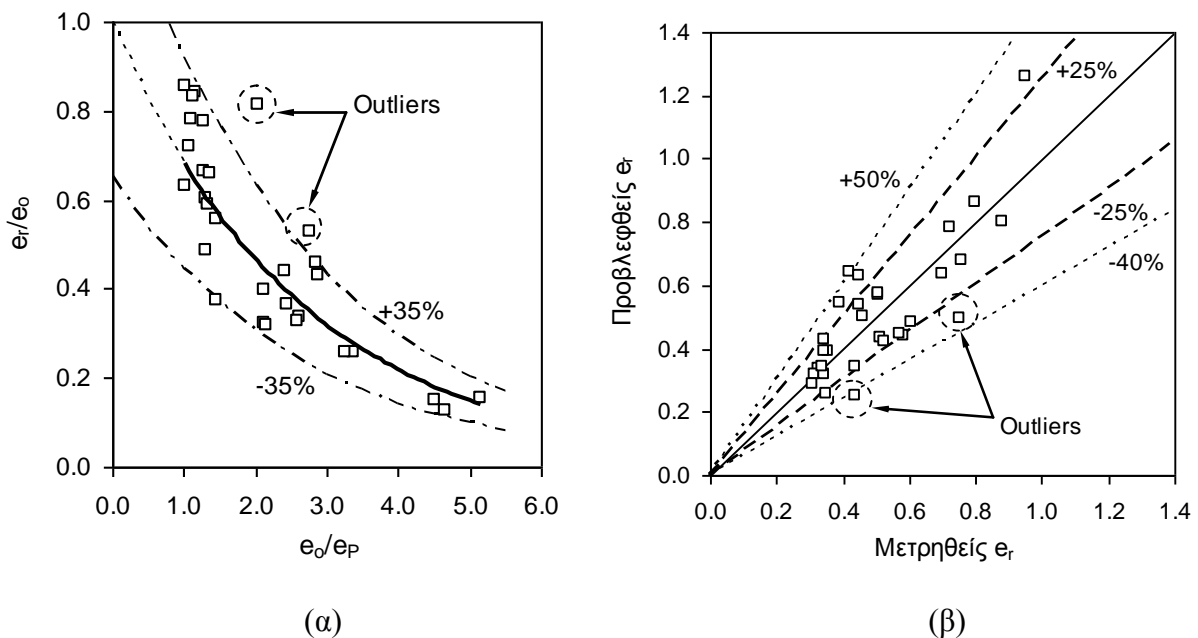
$$\frac{e_r}{e_o} = 1.108 \cdot \exp\left(-0.42 \cdot \frac{e_o}{e_p}\right) \quad (14.8)$$

$$\frac{e_r}{e_o} = \exp\left(-0.38 \cdot \frac{e_o}{e_p}\right) \quad (14.9)$$



**Σχήμα 14.53.** Εξέλιξη του λόγου του παραμένοντος λόγου κενών  $e_r$  προς τον αρχικό λόγο κενών  $e_o$  των εδαφικών υλικών πριν από την έναρξη της ξήρανσης των υλικών με τον λόγο του αρχικού λόγου κενών  $e_o$  προς τον λόγο κενών στο όριο πλαστικότητας  $e_p$  για το σύνολο των δεδομένων με τις γραφικές παραστάσεις των Εξ. 14.8 και 14.9.

Όπως παρατηρείται στο Σχ. 14.54α, όλα τα πειραματικά δεδομένα (με εξαίρεση μόνο δύο) βρίσκονται στην ζώνη  $\pm 35\%$  από την γραμμή που εκφράζει η Εξ. 14.9. Οι τιμές του παραμένοντος λόγου κενών που προβλέπονται από την Εξ. 14.9 έχουν σχεδιαστεί στο Σχ. 14.54β ως προς τις τιμές των μετρηθεισών τιμών του. Όπως παρατηρείται στο Σχ. 14.54β, η Εξ. 14.9 δεν υποεκτιμά την τιμή του παραμένοντος λόγου κενών περισσότερο από 25% (εξαιρουμένων των δύο σημείων που αποκλίνουν στο Σχ. 14.54α), παρόλο που μπορεί να την υπερτιμήσει έως και 50%. Παρόλα αυτά, μόνο 4 πειραματικά δεδομένα βρίσκονται πάνω από την γραμμή του +25% (και χαμηλότερα από την γραμμή του +50%). Κατά συνέπεια για 24 από τα 30 πειραματικά σημεία, οι προβλεπόμενες τιμές του  $e_r$  από την Εξ. 14.9 βρίσκονται στο εύρος  $\pm 25\%$  των μετρηθεισών τιμών, και για το σύνολο των δεδομένων οι προβλεπόμενες τιμές του  $e_r$  από την Εξ. 14.9 βρίσκονται στο εύρος +50%/-40% των μετρηθεισών τιμών. Η διασπορά αυτή είναι πολύ μεγάλη, ειδικά μάλιστα για να χρησιμοποιηθεί η Εξ. 14.9 σε πρακτικές εφαρμογές. Από την άλλη πλευρά, η διασπορά αυτή είναι αρκετά χαμηλή για να υποστηρίξει πράγματι τη θεωρητική συσχέτιση που περιγράφηκε ως τώρα ανάμεσα στο παραμένοντα λόγο κενών και την αρχική κατάσταση των υλικών πριν από την ξήρανσή τους και τα φυσικά τους χαρακτηριστικά.



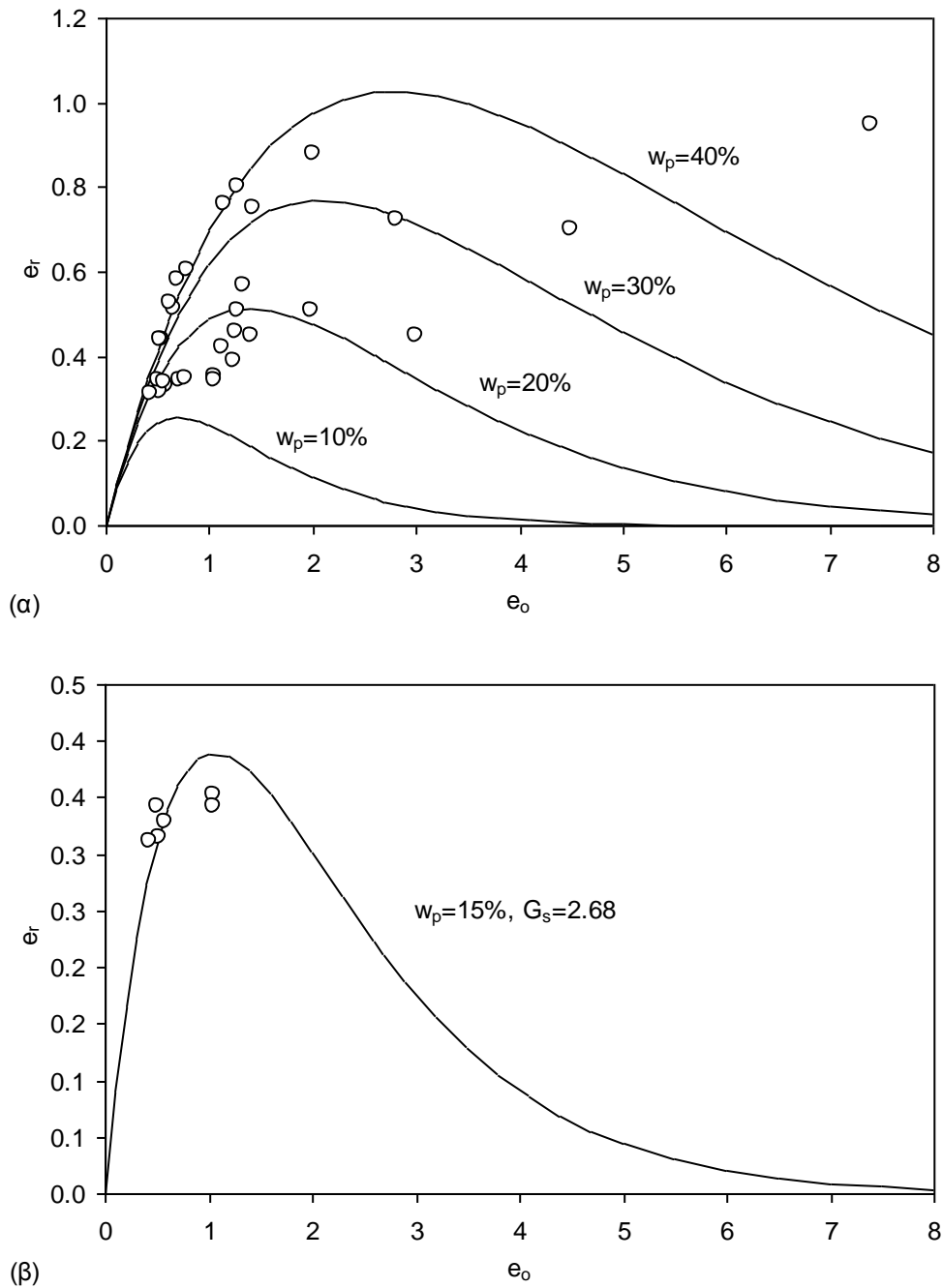
**Σχήμα 14.54.** α) Εξέλιξη του  $e_r / e_o$  με τον λόγο  $e_o / e_p$  για το σύνολο των δεδομένων με τις γραφικές παραστάσεις της Εξ. 14.9 και των ορίων της ζώνης  $\pm 35\%$ , και β) προβλεφθείσες προς μετρηθείσες τιμές του  $e_r$  με τα όρια που συζητώνται στο κείμενο.

Στο Σχ. 14.55α έχουν σχεδιαστεί τα πειραματικά δεδομένα σε όρους  $e_r$  προς  $e_o$  καθώς και οι καμπύλες εξέλιξης του  $e_r$  με το  $e_o$  που προκύπτουν για σταθερές τιμές του ορίου πλαστικότητας από 10% έως 40% σε βήματα του 10%. Σε αντίθεση με τις προβλέψεις της Εξ. 14.4 και το αντίστοιχο Σχ. 14.51 η εξέλιξη του παραμένοντος λόγου κενών με τον αρχικό λόγο κενών έχει πολύ πιο ομαλή εξέλιξη με την αύξηση του αρχικού λόγου κενών, παρόλο που και εδώ παρατηρείται η ίδια τάση, δηλ. αρχική αύξηση του  $e_r$  με την αύξηση του  $e_o$  και στη συνέχεια βαθμιαία μείωση που τείνει ασυμπτωτικά στο 0. Αυτό αποτελεί άλλο ένα πλεονέκτημα της Εξ. 14.9 έναντι της Εξ. 14.4 (πέραν της προφανούς καλύτερης προσέγγισης των πειραματικών δεδομένων). Στο Σχ. 14.55β έχουν σχεδιαστεί τα πειραματικά δεδομένα μόνο για την Άργιλο Χανίων (για την οποία υπήρχαν περισσότερες τιμές του αρχικού λόγου κενών) καθώς και η θεωρητική καμπύλη εξέλιξης για τα φυσικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υλικού. Επιδεικνύεται καλή σύμπτωση μεταξύ πειραματικών δεδομένων και θεωρητικής καμπύλης.

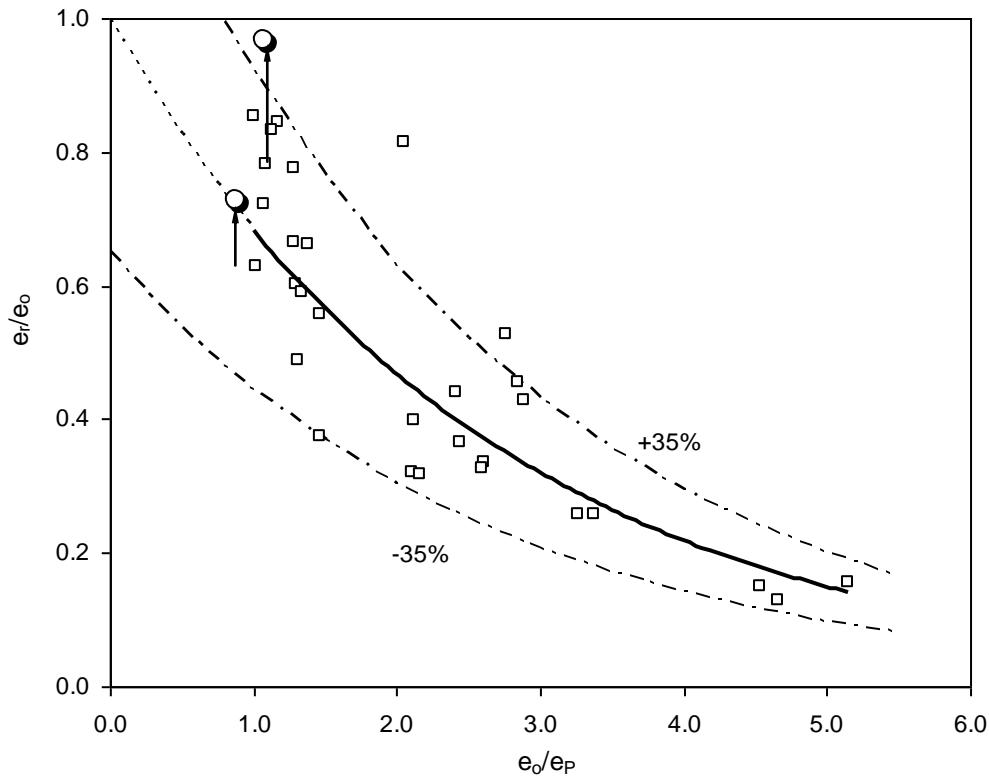
Τα πειραματικά δεδομένα στα οποία έγινε επεξεργασία και παρουσιάστηκε έως τώρα ήταν αναζυμωμένα και αφέθηκαν να ξεραθούν είτε από αρχική κατάσταση πολλού είτε μετά από επανασυμπίεση μέχρι κάποια τάση και αποφόρτιση. Όπως φαίνεται στον Πιν. 14.5, διαθέσιμα στοιχεία για αρχικά αδιατάρακτα φυσικά υλικά υπήρχαν μόνο για την Μάργα Κορίνθου (μέτρηση στα πλαίσια της παρούσας διατριβής) και το υλικό των Melgarejo, et al. (2002). Στο Σχ. 14.56 έχουν σχεδιαστεί όλα τα πειραματικά δεδομένα, συμπεριλαμβανομένων και των δεδομένων που αντιστοιχούν στα δοκίμια φυσικού υλικού, μαζί με τη γραφική παράσταση της Εξ. 14.9 και τις οριογραμμές που οριοθετούν την ζώνη  $\pm 35\%$ . Τα σημεία που αντιστοιχούν στα φυσικά υλικά έχουν επισημανθεί με βέλη που τα συνδέουν με τα σημεία που αντιστοιχούν στα ίδια υλικά μετά από αναζύμωση, επανασυμπίεση και αποφόρτιση. Παρά τον μικρό αριθμό των σημείων, προκύπτει και για τα δύο ισχυρής δομής φυσικά υλικά ότι ο λόγος  $e_r/e_o$  για αυτά προκύπτει υψηλότερος από εκείνον των ίδιων υλικών αναζυμωμένων και επανασυμπιεσμένων για περίπου τον ίδιο λόγο  $e_o/e_p$ . Μία εξίσωση που θα εξέφραζε τον παραμένοντα λόγο κενών των υλικών αυτών λοιπόν θα είχε την μορφή της Εξ. 14.10 με δύο εμπειρικές παραμέτρους  $M_s$  και  $m_e$ , με την πρώτη να εκφράζει την επιρροή της δομής των υλικών και την δεύτερη την συσχέτιση που καθορίζεται από το διαθέσιμο δείγμα δεδομένων (για τα δεδομένα των Πιν. 14.4 και 14.5 προέκυψε -0.38) και μαθηματικά ελέγχει την καμπυλότητα της εκθετικής καμπύλης.

$$\frac{e_r}{e_o} = M_s \cdot \exp\left(m_e \cdot \frac{e_o}{e_p}\right) \quad (14.10)$$





**Σχήμα 14.55.** α) Εξέλιξη του παραμένοντος λόγου κενών  $e_r$  με τον αρχικό λόγο κενών  $e_o$  για σταθερές τιμές του ορίου πλαστικότητας (υποτέθηκε  $G_s=2.65$ ) και το σύνολο των πειραματικών δεδομένων, και β) μόνο για το όριο πλαστικότητας 15% και ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών 2.68 και τα πειραματικά δεδομένα της Αργίλου Χανίων που έχει αυτά τα φυσικά χαρακτηριστικά.



**Σχήμα 14.56.** Εξέλιξη του λόγου του παραμένουτος λόγου κενών  $e_t$  προς τον αρχικό λόγο κενών  $e_0$  των εδαφικών υλικών πριν από την έναρξη της ξήρανσης των υλικών με τον λόγο του αρχικού λόγου κενών  $e_0$  προς τον λόγο κενών στο όριο πλαστικότητας  $e_p$  για το σύνολο των δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που αντιστοιχούν σε φυσικά υλικά, με την γραφική παράσταση της Εξ. 14.9.

Η παράμετρος  $M_s$  δεν μπορεί να μετρηθεί για τα ελάχιστα δεδομένα που είναι προς το παρόν διαθέσιμα και γι' αυτό θα πρέπει να θεωρηθεί ως εντελώς θεωρητική προς το παρόν. Η ύπαρξή της όμως είναι μάλλον εμφανής από τα πειραματικά δεδομένα. Προφανώς πρέπει να λαμβάνει τέτοιες τιμές έτσι ώστε ο λόγος  $e_t/e_0$  να μην ξεπερνά ποτέ την μονάδα. Από την Εξ. 14.10 λοιπόν προκύπτει εύκολα ότι παρόλο που η παράμετρος  $M_s$  είναι μεγαλύτερη της μονάδας, ταυτόχρονα έχει και ένα άνω όριο το οποίο ισούται με  $\{\exp[m_e \cdot e_0/e_p]\}^{-1}$ . Πρέπει να τονιστεί ότι η παράμετρος  $M_s$  αντικατοπτρίζει τη δομή των φυσικών υλικών και όχι εκείνη που δημιουργείται σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά με την επανασυμπίεση και αποφόρτισή τους. Η επιρροή αυτού του τύπου δομής των υλικών έχει ήδη εισαχθεί στην εμπειρική συσχέτιση που εκφράζει η Εξ. 14.9 μέσω της χρήσης του λόγου  $e_0/e_p$  ως παραμέτρου συσχέτισης αντί για τον αρχικό λόγο κενών  $e_0$  μόνο.

#### 14.6.4 Επεξεργασία με το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων

Η επεξεργασία που παρουσιάστηκε στην §14.6.3 βασίστηκε σε μέρος μόνο των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων που κατέστησαν διαθέσιμα στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Επιλέχθηκε ωστόσο να παρουσιαστεί γιατί επιδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο προσεγγίστηκε η απόπειρα διατύπωσης μιας εμπειρικής συσχέτισης για τον παραμένοντα λόγο κενών των εδαφικών υλικών. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η τελική επεξεργασία του συνόλου των πειραματικών δεδομένων, τα οποία παρουσιάζονται στους Πιν. 14.6α και 14.6β (οι οποίοι περιέχουν αντίστοιχα το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από εργαστηριακές δοκιμές στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και τα επιπλέον πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από εργαστηριακές δοκιμές από το αρχείο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.).

Επιλέχθηκε να εστιαστεί η επεξεργασία στα πειραματικά δεδομένα που αφορούν σε πολτούς αναζυμωμένων υλικών και δείγματα αναζυμωμένα αρχικά, συμπιεσμένα και αποφορτισμένα (αφού τα δεδομένα για φυσικά υλικά είναι πάρα πολύ λίγα) και τα πειραματικά δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από τη βιβλιογραφία να μην ομαδοποιούνται με το δείγμα των δεδομένων από τους Πιν. 14.6α και 14.6β αλλά να χρησιμοποιούνται για έλεγχο της συνολικής εικόνας που προκύπτει από αυτά. Αρχικά λοιπόν συντάχθηκε το Σχ. 14.57α στο οποίο παρουσιάζεται για κάθε υλικό ξεχωριστά η εξέλιξη του παραμένοντος λόγου κενών με τον αρχικό λόγο κενών προ ξηράνσεως. Η γενική μορφή που προέκυψε παραπέμπει σε μια συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών αντίστοιχη της απεικονιζόμενης στο Σχ. 14.55, παραπέμποντας κατ' αρχήν σε μια εκθετικού τύπου συσχέτιση μεταξύ κανονικοποιημένου παραμένοντος λόγου κενών και κανονικοποιημένου αρχικού λόγου κενών. Στη συνέχεια συντάχθηκαν τα Σχ. 14.57β και 14.57γ στα οποία παρουσιάζονται τα κανονικοποιημένα δεδομένα ως προς τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας και τον λόγο κενών στο όριο πλαστικότητας αντίστοιχα, αλλά με το κάθε υλικό να υποδεικνύεται ξεχωριστά προκειμένου να εντοπιστούν εδαφικά υλικά τα οποία αποκλίνουν σημαντικά από το σμήνος τιμών. Εμφανώς αποκλίνει και στα δύο σχήματα το μοναδικό σημείο για την Ιλυώδη Άμμο Λίμνης Ιωαννίνων (μαύρο τρίγωνο με μαύρο γέμισμα) που είναι και η μοναδική ιλυώδης άμμος από όλα τα υλικά. Αφαιρώντας αυτό το σημείο προσδιορίστηκαν οι εξισώσεις για τις καμπύλες βέλτιστης προσέγγισης όλων των δεδομένων με τις γραφικές παραστάσεις τους να απεικονίζονται στα Σχ. 14.57δ και 14.57ε. Οι εξισώσεις αυτές ήταν υπερβολικές (έχει το μειονέκτημα ότι εξ' ορισμού δεν μπορεί να διέλθει από το σημείο [ $e_r/e_o=1$ ,  $e_o/e_L=0$  ή  $e_o/e_P=0$ ]) και εκθετικές, αβίαστες και με επιβολή διέλευσης από το σημείο [ $e_r/e_o=1$ ,  $e_o/e_L=0$  ή  $e_o/e_P=0$ ]. Οι εξισώσεις αυτές συγκεντρώνονται στον Πίν. 14.7.

**Πίνακας 14.6α.** Το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν από εργαστηριακές δοκιμές στα πλαίσια της παρούσας διατριβής σχετικά με τον παραμένοντα λόγο κενών.

Εδαφικό υλικό	Κατάσταση	Τάση (kPa)	w <sub>o</sub> (%)	e <sub>o</sub> -	w <sub>r</sub> (%)	e <sub>r</sub> -	S <sub>r,r</sub> (%)	
Ιλυώδης Άμμος Ιωαννίνων	Συμπιεσμένο	100.0	27.00	0.689	1.44	0.581	6.21	
		0.0	42.57	1.050	1.66	0.353	12.59	
	Πολτός	0.0	38.94	1.044	2.02	0.342	15.86	
Άργιλος Χανίων	Συμπιεσμένο	100.0	21.93	0.588	1.45	0.328	11.60	
		200.0	19.55	0.524	1.35	0.315	11.51	
		400.0	19.16	0.514	1.59	0.342	11.07	
		1600.0	16.08	0.431	1.36	0.311	11.48	
Μάργα Κορίνθου	Πολτός	0.0	47.71	1.274	1.92	0.508	10.06	
	Συμπιεσμένο	800.0	24.62	0.657	0.95	0.514	4.95	
Μάργα Κηφισιάς	Συμπιεσμένο	600.0	21.48	0.571	2.35	0.337	18.53	
Άργιλος Λιβαδερού Δράμας	Συμπιεσμένο	Πολτός	0.0	57.12	1.542	2.43	0.447	14.65
		62.5	28.82	0.778	3.67	0.414	23.93	
		500.0	22.65	0.611	3.93	0.377	28.14	
Άργιλος Κηφισιάς	Συμπιεσμένο	4000.0	17.04	0.460	3.62	0.352	27.78	
		600.0	26.37	0.704	2.62	0.343	20.39	
		0.0	150.29	3.877	6.11	0.466	33.83	
Άργιλος Μελίτης Φλώρινας	Πολτός	0.0	115.55	2.981	6.05	0.428	36.50	
		0.0	86.92	2.243	6.63	0.443	38.60	
		0.0	77.19	2.053	3.57	0.388	24.49	
		0.0	107.18	2.851	4.04	0.378	28.43	
Άργιλος Αμαρουσίου	Συμπιεσμένο	Βάρη	49.82	1.285	4.71	0.398	30.51	
		12.5	41.21	1.063	4.62	0.420	28.41	
		37.5	36.68	0.946	4.36	0.417	26.99	
		125.0	30.93	0.798	4.48	0.370	31.20	
		0.0	63.99	1.702	3.76	0.367	27.25	
		0.0	70.90	1.886	3.40	0.353	25.63	
Μάργα Χαλκουτσίου	Πολτός	0.0	77.19	2.053	3.57	0.388	24.49	
		0.0	107.18	2.851	4.04	0.378	28.43	
		0.0	119.22	3.171	4.18	0.385	28.91	
		0.0	133.53	3.552	2.20	0.345	16.97	
		62.5	28.82	0.766	3.67	0.360	23.93	
		500.0	22.65	0.602	3.93	0.330	28.14	
Μάργα Χαλκουτσίου	Συμπιεσμένο	4000.0	17.04	0.453	3.62	0.290	27.78	
		0.0	76.50	2.058	2.62	0.600	11.00	
		62.5	29.74	0.800	2.35	0.540	11.69	
Άργιλος Ορεστιάδας Έβρου	Συμπιεσμένο	500.0	25.28	0.680	1.53	0.515	7.97	
		4000.0	21.93	0.590	2.69	0.434	16.65	
		0.0	93.00	2.502	3.38	0.450	19.17	
Άργιλος Αμφιλοχίας	Πολτός	62.5	37.17	1.000	4.71	0.445	27.01	
		500.0	27.88	0.750	4.60	0.442	26.50	
		4000.0	23.42	0.630	5.24	0.301	44.45	
Άργιλος Αμφιλοχίας	Συμπιεσμένο	0.0	126.75	3.410	5.52	0.598	24.22	
		62.5	46.47	1.250	5.80	0.656	23.15	
		500.0	37.17	1.000	7.18	0.518	36.36	
Αργ/νος Ιλυόλιθος Πάρνηθας	Πολτός	4000.0	34.39	0.925	6.35	0.556	29.94	
		0.0	49.50	1.332	1.80	0.333	14.57	
		4000.0	13.01	0.350	1.04	0.210	13.30	

**Πίνακας 14.6β.** Επιπλέον πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από εργαστηριακές δοκιμές από το αρχείο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. σχετικά με τον παραμένοντα λόγο κενών.

Εδαφικό υλικό	Κατάσταση	Τάση (kPa)	w <sub>o</sub> (%)	e <sub>o</sub> -	w <sub>r</sub> (%)	e <sub>r</sub> -	S <sub>r,r</sub> (%)
Αργίλος Ευπαλινείου Ορύγματος <sup>*</sup>	Πολτός	0.0	82.77	2.160	5.82	0.386	39.36
		0.0	146.50	3.824	5.97	0.303	51.40
		0.0	241.25	6.297	5.63	0.301	48.80
		0.0	241.25	6.297	5.63	0.250	58.79
Αργίλος Καλαμπάκας <sup>**</sup>	Πολτός	0.0	191.10	4.911	2.05	0.413	12.75
		0.0	163.80	4.210	3.03	0.437	17.81
		0.0	136.50	3.508	2.24	0.292	19.69
		0.0	109.20	2.806	2.09	0.332	16.18
		0.0	81.90	2.105	2.58	0.382	17.34
Αργίλος Βελεστίνου <sup>***</sup>	Πολτός	0.0	221.00	5.901	1.13	0.239	12.62
		0.0	265.20	7.081	1.18	0.211	14.91

<sup>\*</sup> Υλικό πλήρωσης ασυνεχειών βράχου εντοπισθεισών εντός του Ευπαλινείου Ορύγματος με w<sub>L</sub> = 54%, w<sub>p</sub> = 17% και G<sub>s</sub> = 2.61.  
<sup>\*\*</sup> Υλικό δείγματος γεώτρησης εκτελεσθείσας στα πλαίσια των γεωτεχνικών ερευνών για τον Αυτοκινητόδρομο Ε65 με w<sub>L</sub> = 35.5%, w<sub>p</sub> = 15% και G<sub>s</sub> = 2.57.  
<sup>\*\*\*</sup> Υλικό δείγματος γεώτρησης εκτελεσθείσας στα πλαίσια των γεωτεχνικών ερευνών για τον Νέο Κόμβο Βελεστίνου με w<sub>L</sub> = 48%, w<sub>p</sub> = 18.5% και G<sub>s</sub> = 2.67.

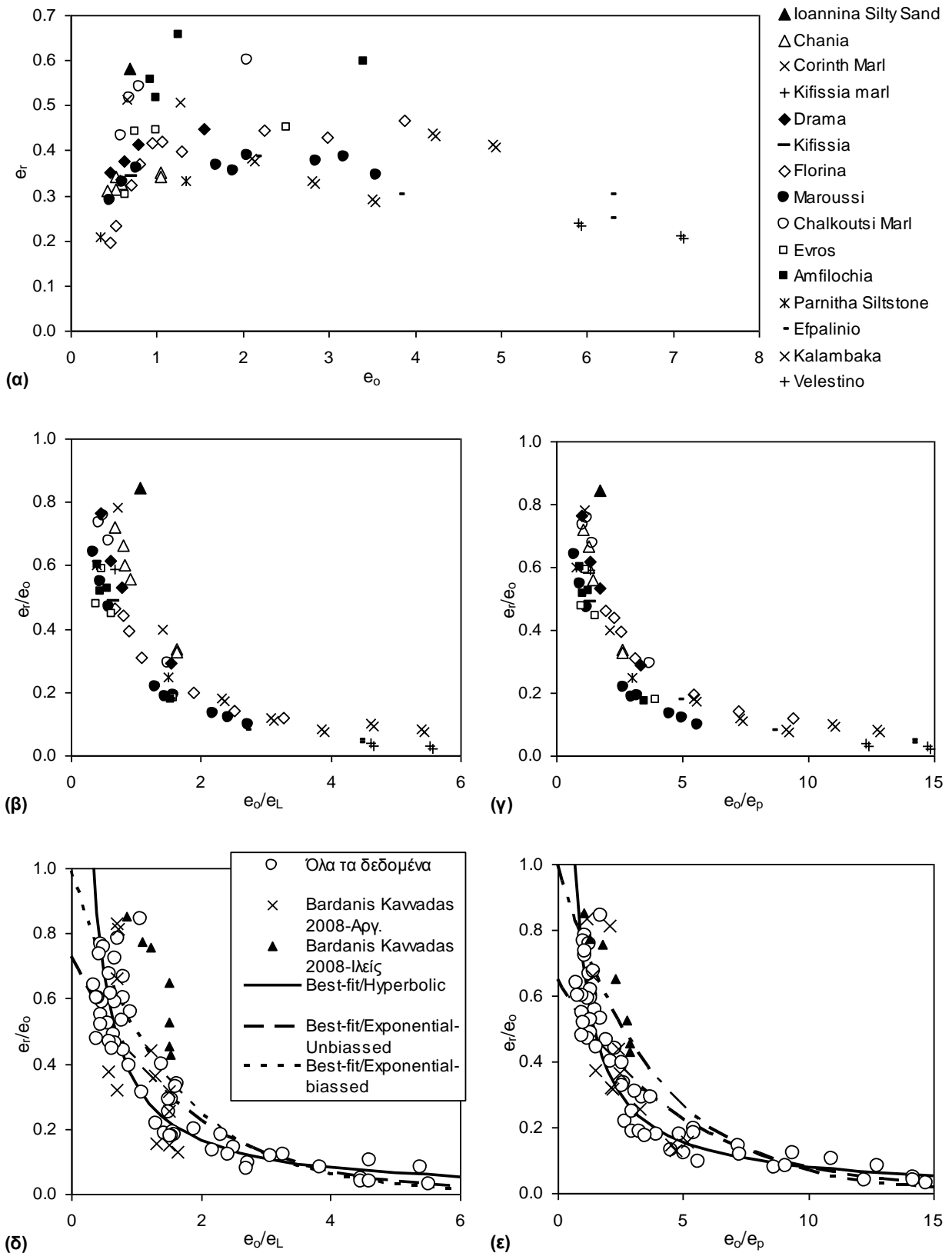
**Πίνακας 14.7.** Εξισώσεις που περιγράφουν τις βέλτιστες προσεγγίσεις του σμήνους όλων των δεδομένων στα Σχ. 14.57δ και 14.57ε.

Είδος εξίσωσης	Συσχέτιση μεταξύ e <sub>r</sub> /e <sub>o</sub> και e <sub>o</sub> /e <sub>L</sub>		Συσχέτιση μεταξύ e <sub>r</sub> /e <sub>o</sub> και e <sub>o</sub> /e <sub>p</sub>	
	Εξίσωση	R <sup>2</sup>	Εξίσωση	R <sup>2</sup>
Υπερβολική	$e_r = e_o [ 0.33 ( e_o / e_L )^{-1.023} ]$ Εξ. 14.11	0.87	$e_r = e_o [ 0.71 ( e_o / e_p )^{-0.951} ]$ Εξ. 14.12	0.91
Εκθετική αβίαστη	$\frac{e_r}{e_o} = 0.715 \cdot \exp\left(-0.58 \cdot \frac{e_o}{e_L}\right)$ Εξ. 14.13	0.87	$\frac{e_r}{e_o} = 0.636 \cdot \exp\left(-0.21 \cdot \frac{e_o}{e_p}\right)$ Εξ. 14.14	0.87
Εκθετική με επιβολή διέλευσης από το σημείο [e <sub>r</sub> /e <sub>o</sub> =1, e <sub>o</sub> /e <sub>L</sub> =0 ή e <sub>o</sub> /e <sub>p</sub> =0]	$\frac{e_r}{e_o} = \exp\left(-0.70 \cdot \frac{e_o}{e_L}\right)$ Εξ. 14.15	0.81	$\frac{e_r}{e_o} = \exp\left(-0.27 \cdot \frac{e_o}{e_p}\right)$ Εξ. 14.16	0.74

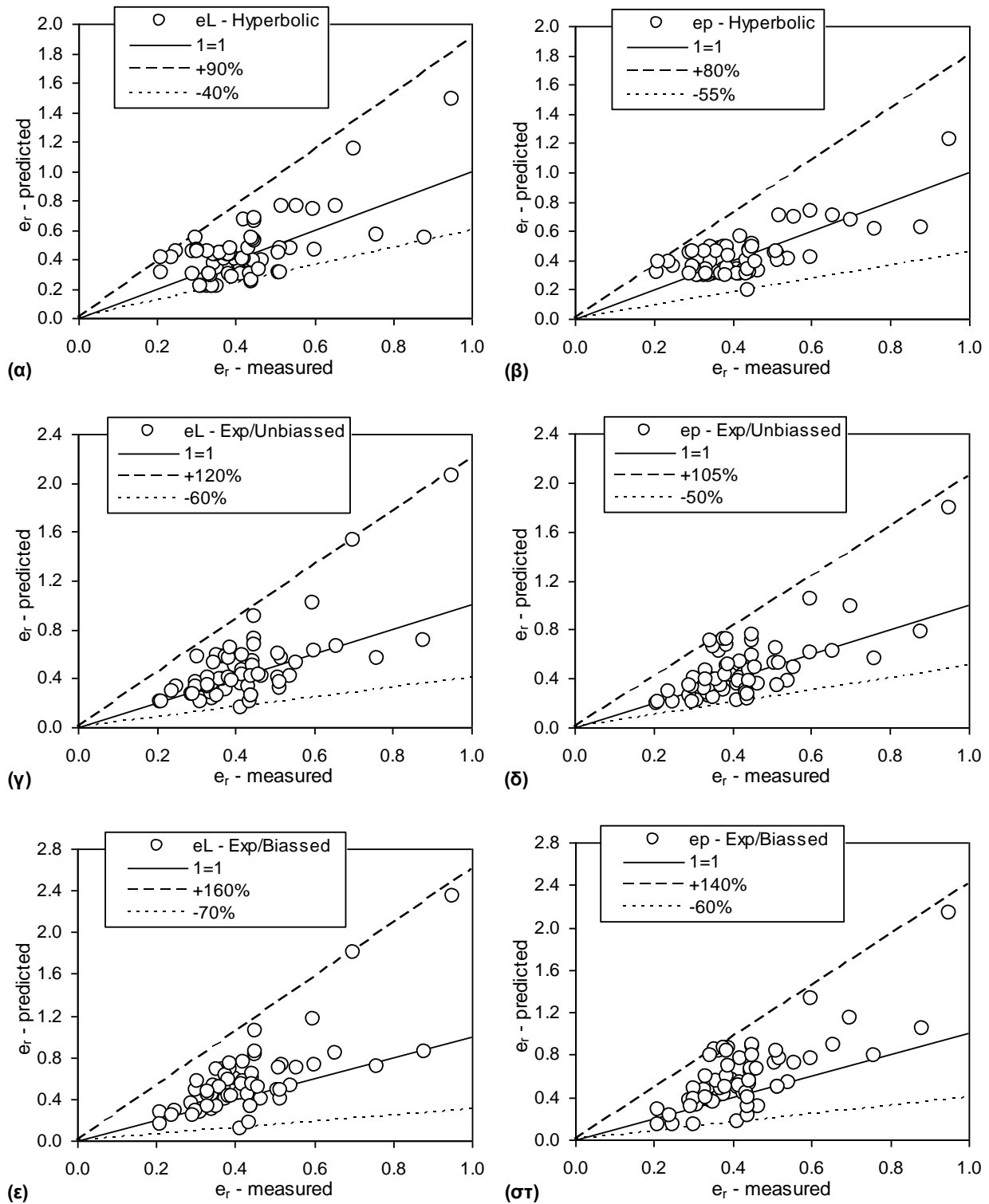
Το πρώτο συμπέρασμα είναι ότι οι Εξ. 14.11 έως 14.16 είναι διαφορετικές από τις αντίστοιχες εξισώσεις που διατυπώθηκαν στην §14.6.3 για τα αρχικά στάδια επεξεργασίας αυτού του είδους δεδομένων. Για όλες τις εξισώσεις του Πιν. 14.7 προκύπτει αρκετά υψηλός συντελεστής

συσχέτισης, όχι τόσο διαφορετικός που τελικά να τεκμηριώνει ριζική διαφορά μεταξύ εξισώσεων με κανονικοποίηση του αρχικού λόγου κενών μέσω του λόγου κενών στο όριο υδαρότητας και εξισώσεων με κανονικοποίηση μέσω του λόγου κενών στο όριο πλαστικότητας. Επιχειρήθηκαν και συχετίσεις με τον δείκτη υδαρότητας αλλά απέδωσαν μικρότερους συντελεστές συσχέτισης. Σε ό,τι αφορά τη σύγκριση με τα δεδομένα από τη βιβλιογραφία, όταν αυτά διακρίθηκαν σε δεδομένα από αργίλους και δεδομένα από ιλείς και ιλυώδεις άμμους, τότε διαπιστώθηκε ότι τα δεδομένα για αργίλους πρακτικά εντάσσονται ακριβώς μέσα στο σμήνος των σημείων από τα δεδομένα των Πιν. 14.6α και 14.6β με την εξέλιξή τους να περιγράφεται από τις Εξ. 14.11 έως 14.16. Αντίθετα τα δεδομένα για ιλείς και ιλυώδεις άμμους βρίσκονται εκτός του σμήνους όπως συνέβη και με το ένα σημείο για την Ιλυώδη Άμμο Λίμνης Ιωαννίνων.

Τέλος, στο Σχ. 14.58 επιχειρήθηκε για κάθε μια από τις Εξ. 14.11 έως 14.16 να συσχετιστεί η τιμή του παραμένοντος λόγου κενών που προβλέπεται από την αντίστοιχη εξίσωση με τη μετρημένη τιμή και στο Σχ. 14.59 σχεδιάστηκε η εξέλιξη της ποσοστιαίας διαφοράς της τιμής του παραμένοντος λόγου κενών που προβλέπεται από την αντίστοιχη εξίσωση από τη μετρημένη τιμή με τον κανονικοποιημένο αρχικό λόγο κενών για κάθε μία από τις Εξ. 14.11 έως 14.16. Όπως προκύπτει από το Σχ. 14.58, παρά τους αρκετά υψηλούς συντελεστές συσχέτισης οι αποκλίσεις μεταξύ προβλεπόμενης και μετρημένης τιμής παραμένοντος λόγου κενών είναι πολύ υψηλές. Όλες οι εξισώσεις συστηματικά υπερτιμούν περισσότερο παρά υποτιμούν τον παραμένοντα λόγο κενών, με το μικρότερο εύρος προβλεπόμενων τιμών να διαπιστώνεται για τις Εξ. 14.11 και 14.12 (υπερβολικού τύπου) το οποίο όμως είναι και πάλι μεγάλο (από -40% έως +90% για την Εξ. 14.11 και από -55% έως +80% για την Εξ. 14.12). Όπως αναμενόταν το μεγαλύτερο εύρος προβλεπόμενων τιμών διαπιστώθηκε για τις Εξ. 14.15 και 14.16 οι οποίες προέκυψαν μετά από επιβολή διέλευσης της καμπύλης βέλτιστης προσέγγισης από το σημείο [ $e_r/e_o=1$ ,  $e_o/e_L=0$  ή  $e_o/e_P=0$ ] και άρα δεν είναι αβίαστες (unbiased). Δεν διαπιστώθηκε –όπως και με τους συντελεστές συσχέτισης– σημαντική διαφορά μεταξύ συσχετίσεων με τον κανονικοποιημένο αρχικό λόγο κενών με τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητα ή στο όριο πλαστικότητας. Παρά το μικρότερο εύρος όμως των προβλεπόμενων τιμών για τις Εξ. 14.11 και 14.12, όπως προκύπτει από τα Σχ. 14.59α και 14.59β, το εύρος αυτό είναι πρακτικά σταθερό για όλες τις τιμές του  $e_o/e_L$  και του  $e_o/e_P$  του συνόλου των δεδομένων και μάλιστα και με την ίδια περίπτωση κατανομή μεταξύ υπερτιμημένων και υποεκτιμημένων τιμών (παρόλο που αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί και καλό, αφού αφορά κάθε περιοχή αρχικού λόγου κενών). Αντίθετα για τις Εξ. 14.13 έως 14.16 αυτό το εύρος δεν είναι σταθερό και κυρίως δεν έχει και σταθερή



**Σχήμα 14.57.** Εξέλιξη α) του  $e_r$  με το  $e_o$ , β) του  $e_r/e_o$  με το  $e_o/e_L$ , και γ) του  $e_r/e_o$  με το  $e_o/e_p$  για όλα τα εδαφικά υλικά ξεχωριστά, και δ) του  $e_r/e_o$  με το  $e_o/e_L$ , και ε) του  $e_r/e_o$  με το  $e_o/e_p$  με τα δεδομένα πλέον ομαδοποιημένα, τα δεδομένα από τη βιβλιογραφία χωρισμένα σε αυτά που αφορούν σε ιλιές και αυτά που αφορούν σε αργίλους καθώς και τις επικρατέστερες καμπύλες βέλτιστης προσέγγισης.

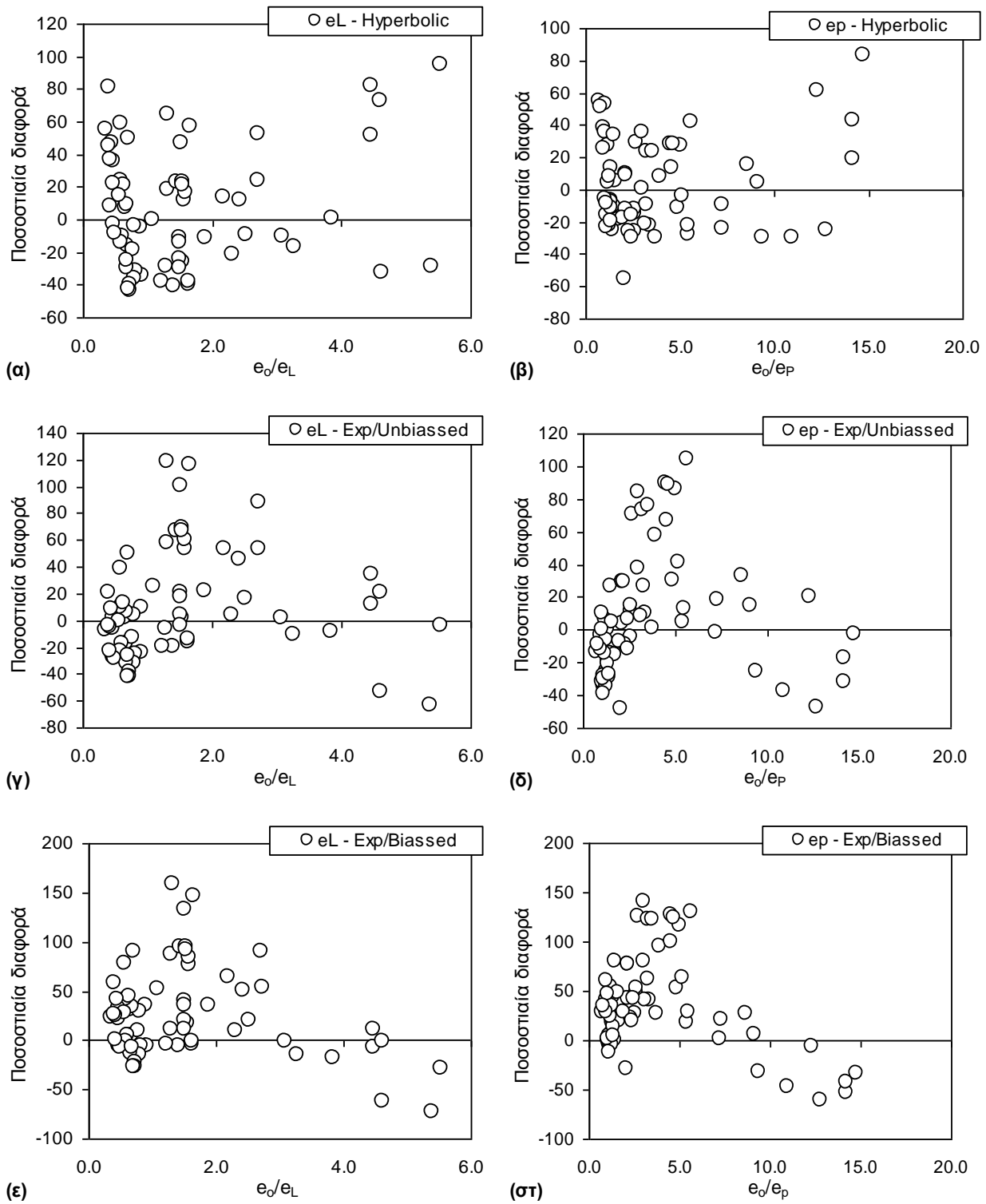


**Σχήμα 14.58.** Συγκρίσεις μεταξύ προβλεπόμενου παραμένουτος λόγου κενών  $e_r$  και μετρηθέντος με βάση α) την Εξ. 14.11, β) την Εξ. 14.12, γ) την Εξ. 14.13, δ) την Εξ. 14.14, ε) την Εξ. 14.15, και στ) την Εξ. 14.16. Παρατίθεται η γραμμή « $1=1$ » και οι γραμμές που περικλείουν το σύνολο των δεδομένων προς κάθε κατεύθυνση με το αναφερόμενο ποσοστό μεταβολής από τη μετρηθείσα τιμή.



κατανομή μεταξύ υπερτιμημένων και υποεκτιμημένων τιμών του παραμένοντος λόγου κενών. Έτσι η Εξ. 14.13 (Σχ. 14.59γ) τείνει περισσότερο να υπερτιμά το  $e_t$  για τιμές του  $e_o/e_L$  μέχρι το 3 και για μεγαλύτερες από αυτές να γίνεται αισθητά πιο ακριβής με το εύρος προβλεπόμενων τιμών να μειώνεται εντυπωσιακά και να έχει και ίση κατανομή μεταξύ υπερτιμημένων και υποεκτιμημένων τιμών. Η Εξ. 14.14 παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά με την Εξ. 14.13 με τη μετάβαση να συμβαίνει για τιμή  $e_o/e_F$  περί το 7. Τέλος για τις Εξ. 14.15 και 14.16 συμβαίνουν τα αντίστοιχα ακριβώς με τις Εξ. 14.13 και 14.14 με τη μετάβαση να συμβαίνει για τιμή  $e_o/e_L$  μέχρι το 2.5 (Σχ. 14.59ε) και τιμή του  $e_o/e_F$  περί το 7 (Σχ. 14.59στ), ενώ ειδικά για τις μικρές τιμές κανονικοποιημένου αρχικού λόγου κενών, ο παραμένον λόγος κενών συστηματικά υπεριτιμάται, προφανώς ως αποτέλεσμα της επιβολής διέλευσης των βέλτιστων προσεγγίσεων που περιγράφονται από τις Εξ. 14.15 και 14.16 από το σημείο [ $e_t/e_o=1$ ,  $e_o/e_L=0$  ή  $e_o/e_F=0$ ]. Σε κάθε περίπτωση, οι παρατηρήσεις αυτές συνοψίζονται στα εξής:

- οι Εξ. 14.15 και 14.16, παρά την ενδιαφέρουσα «θεωρητική» τους τεκμηρίωση είναι μάλλον οι πλέον ακατάλληλες για χρήση,
- οι Εξ. 14.11 και 14.12 είναι οι πλέον κατάλληλες με «ομοιόμορφη» μάλιστα ικανότητα πρόβλεψης ανεξαρτήτως εύρους τιμών κανονικοποιημένου αρχικού λόγου κενών (και χωρίς τελικά να εντοπίζεται σημαντική διαφορά μεταξύ χρήσης του λόγου κενών στο όριο υδαρότητας ή στο όριο πλαστικότητας), και
- οι Εξ. 14.13 και 14.14 είναι χειρότερες των Εξ. 14.11 και 14.12 με την ιδιαιτερότητα όμως ότι αν περιοριστεί η χρήση του μόνο για πολτούς (πολύ υψηλού ποσοστού υγρασίας μάλιστα), η απόδοσή τους βελτιώνεται σημαντικά και γίνεται πολύ καλύτερη και από εκείνη των Εξ. 14.11 και 14.12.



**Σχήμα 14.59.** Εξέλιξη ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ προβλεπόμενου παραμένοντος λόγου κενών  $e_i$  και μετρηθέντος με τον κανονικοποιημένο αρχικό λόγο κενών για κάθε μια από τις Εξ. 14.11 έως 14.16, με βάση α) την Εξ. 14.11, β) την Εξ. 14.12, γ) την Εξ. 14.13, δ) την Εξ. 14.14, ε) την Εξ. 14.15, και στ) την Εξ. 14.16.

### 14.6.5 Συμπεράσματα

Από την επεξεργασία του συνόλου των πειραματικών δεδομένων που παρουσιάστηκε προκύπτει ότι υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις που να υποδεικνύουν τη συσχέτιση ανάμεσα στον παραμένοντα λόγο κενών και την αρχική κατάσταση των εδαφικών υλικών όπως αυτή εκφράζεται από τον αρχικό λόγο κενών τους κατά την έναρξη της ξήρανσης και τη φύση τους όπως αυτή εκφράζεται με το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών και είτε το όριο υδαρότητας, είτε το όριο πλαστικότητας και μάλιστα και για το σύνολο των δεδομένων. Λιγосτές αλλά υπαρκτές ενδείξεις επίσης υποδεικνύουν ότι ο λόγος  $e_r/e_o$  για *ισχυρής δομής* φυσικά υλικά προκύπτει υψηλότερος από εκείνον των ίδιων υλικών αναζυμωμένων και επανασυμπιεσμένων για περίπου τον ίδιο λόγο  $e_o/e_p$ .

Η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων κατέληξε στις Εξ. 14.11 και 14.12 για το σύνολο των δεδομένων και τις Εξ. 14.13 και 14.14 για την ειδική περίπτωση των πολτών πολύ υψηλού αρχικού ποσοστού υγρασίας. Οι εξισώσεις αυτές γενικά ισχύουν για αργιλικά και μαργαϊκά υλικά και όχι για ιλείς και ιλυώδεις και αργιλοϊλυώδεις άμμους. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από τη σύγκριση των δεδομένων της παρούσας διατριβής με τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από τους Bardanis & Kavvas (2008) από τη διεθνή βιβλιογραφία και διαχωρίστηκαν και αυτά σε δεδομένα για αργίλους και δεδομένα για ιλείς και ιλυώδεις άμμους.

Τέλος, τονίζεται ότι οι εμπειρικές αυτές συσχετίσεις για τον παραμένοντα λόγο κενών έχουν σαφώς μεγαλύτερη ποιοτική και διδακτική αξία παρά αριθμητικής πρόβλεψης. Παρά το γεγονός ότι χαρακτηρίζονται από υψηλότατους συντελεστές συσχέτισης, η σύγκριση προβλεπόμενων και μετρηθεισών τιμών παραμένοντος λόγου κενών αποκάλυψε υπερβολικά μεγάλο εύρος προβλεπόμενων τιμών, κυμαινόμενο από περίπου -50% έως και +90% (περίπου για τις Εξ. 14.11 και 14.12), δηλ. με απλά λόγια πρόβλεψη από τιμή περίπου τη μισή της πραγματικής έως και διπλάσια της πραγματικής.

## 14.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που προσδιορίστηκαν για δεκατρία (13) διαφορετικά εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο ευρισκόμενα σε διάφορες καταστάσεις. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Η μέγιστη πίεση των 1500 kPa (15 Bar) που μπορεί να επιβληθεί με τον χρησιμοποιηθέντα θάλαμο μύζησης αποδείχτηκε ανεπαρκής για τη μέτρηση ακόμα και μόνο της πίεσης διείσδυσης αέρα αργιλικών και μαργαϊκών υλικών, πολλώ δε μάλλον και του δεύτερου σημείου καμψής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Για τον πλήρη προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού λοιπόν πρέπει να χρησιμοποιείται και μία ακόμα μέθοδος ικανή να εφαρμόζει μεγαλύτερες τιμές της μύζησης, όπως π.χ. η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης με κορεσμένα υδατικά διαλύματα αλάτων που εφαρμόστηκε στην πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.
- Γενικά τα φυσικά υλικά (Μάργα Κορίνθου, Μάργα Χαλκουτσίου και αργιλοποιημένος Ιλύλιθος Πάρνηθας) βρέθηκαν να έχουν μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης νερού στους πόρους τους σε σχέση με τα δοκίμια του ίδιου υλικού αναζυμωμένα/προσυμπιεσμένα για την ίδια τιμή της μύζησης. Η ικανότητα αυτή εκφράστηκε με τη μεγαλύτερη τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα που προσδιορίστηκε και πρακτικά ίδιο ρυθμό απώλειας ύδατος με τη μύζηση από το σημείο αυτό και μετά. Η ικανότητα αυτή αποδίδεται στη μεγαλύτερη «φαινόμενη» τάση προστεροποίησης (λόγω σιμέντωσης) των φυσικών υλικών και βρίσκεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα και άλλων ερευνητών (Huang et al, 1998) οι οποίοι διερεύνησαν την επιρροή της τάσης προστεροποίησης (πραγματικής λόγω μέγιστης φόρτισης σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά και όχι «φαινόμενης» λόγω άλλων παραγόντων που δημιουργούν δομή) στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού καθεαυτή και την καμπύλη μεταβολής του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό με τη μύζηση. Εξαίρεση ίσως αποτελεί το ένα από τα τρία υλικά (η Μάργα Χαλκουτσίου) και αυτό όμως μόνο για σχετικά χαμηλές τιμές της μύζησης.
- Αντίστοιχα όλα τα φυσικά υλικά σε σχέση με τα δοκίμια του ίδιου υλικού αναζυμωμένα/προσυμπιεσμένα διατήρησαν μεγαλύτερη τιμή του λόγου κενών για την ίδια μύζηση ως αποτέλεσμα της δομής τους (στην προκειμένη περίπτωση λόγω σιμέντωσης). Το ίδιο παρουσιάστηκε και στην περίπτωση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού της

Αργίλου Αμφιλοχίας μετά από προσθήκη 6% κατά βάρος ξηρού υλικού τσιμέντου. Δεν παρουσιάστηκε (τουλάχιστον τόσο καθαρά) το ίδιο και για την δομή που δημιουργήθηκε στο ίδιο υλικό λόγω ερπυσμού μετά από διατήρηση τάσης 500 kPa επί 14 ημέρες.

- Αντίθετα από τη δομή των φυσικών υλικών και τη δομή λόγω τεχνητής σιμέντωσης, η δομή που δημιουργείται σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά μόνο λόγω φόρτισης και αποφόρτισης δεν μοιάζει να μεταβάλλει τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης για τα περισσότερα από τα εξετασθέντα εδαφικά υλικά.
- Για αρκετά υλικά οι καμπύλες ποσοστού υγρασίας-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης προέκυψαν πρακτικά γραμμικές παρά την σαφώς ανάστροφη σιγμοειδή μορφή των καμπυλών λόγου κενών-μύζησης και βαθμού κορεσμού-μύζησης ανατρέποντας την περί του αντιθέτου κοινή διαπίστωση που καταγράφεται σε αρκετά σημεία στη διεθνή βιβλιογραφία. Όσο και αν αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί αναμενόμενο για πολτούς, δεν ήταν σε καμιά περίπτωση αναμενόμενο για υλικά αναζυμωμένα, συμπιεσμένα και αποφορτισμένα.
- Από τις δοκιμές στα ίδια υλικά αλλά με διαφορετικό αρχικό λόγο κενών λόγω συμπίεσης σε διαφορετικές τάσεις, προέκυψε ότι η διαφοροποίηση του αρχικού λόγου κενών με αυτόν τον τρόπο οδηγεί σε διαφορετικές καμπύλες όπως λόγου κενών-μύζησης, ποσοστού υγρασίας-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης αλλά δεν φαίνεται να μεταβάλλει την καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης και συγκεκριμένα τη μύζηση αποκορεσμού και τη θέση και κλίση του κλάδου της καμπύλης μετά τον αποκορεσμό. Μεταβολή λοιπόν του λόγου κενών μόνο λόγω συμπίεσης, χωρίς την ύπαρξη άλλων, γεωλογικής κλίμακας, αιτίων της μεταβολής της δομής των υλικών μοιάζει να μη μεταβάλλει τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης παρόλο που τη μεταβάλλει σε όρους λόγου κενών-μύζησης (μηχανική συμπεριφορά σε όρους τάσεων-παραμορφώσεων) και σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης (μηχανική συμπεριφορά σε ό,τι αφορά τη διαπερατότητα). Χρειάστηκε να φτάσουμε σε ένα υλικό πολύ μεγάλης πλαστικότητας και ορίου υδαρότητας όπως η Αργίλος Αμφιλοχίας για να εντοπιστούν διαφοροποιήσεις στις καμπύλες βαθμού κορεσμού-μύζησης λόγω μεταβολής του λόγου κενών μόνο λόγω συμπίεσης.
- Η μαθηματική προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού δεν κατέληξε σε κάποιες πολύ ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων προσομοίωσης (για τρία διαφορετικά προσομοιώματα) και των φυσικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών.

- Για όλα τα εδαφικά υλικά στα οποία υπήρχαν καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης προσδιορισθείσες επί δοκιμίων ευρισκόμενων στην ίδια κατάσταση με εκείνα στα οποία μετρήθηκαν χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού φαίνεται ότι πράγματι στις περιπτώσεις που το υλικό δεν έχει ακόμα αποκορευτεί (κατά συνέπεια στους πόρους του υπάρχει αρνητική πίεση πόρων και όχι μύζηση) οι κλίσεις των καμπυλών λόγου κενών-μύζησης/αρνητικής πίεσης πόρων, είναι πολύ κοντά σε εκείνες των καμπυλών λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης για το ίδιο μέγεθος τάσης και πάντα σε σχέση με την ίδια θέση ως προς την τάση διαρροής. Δηλαδή σε ένα εδαφικό υλικό συμπιεσμένο μέχρι μία κατακόρυφη τάση και στη συνέχεια αποφορτισμένο σε μηδενική τάση η κλίση της καμπύλης λόγου κενών-μύζησης συγκρίνεται κατ' αρχήν με τον δείκτη επαναφόρτισης, ενώ σε ένα αναζυμωμένο εδαφικό υλικό που ξηραίνεται από αρχική κατάσταση πολτού συγκρίνεται με τον δείκτη συμπίεσης. Και στην πρώτη περίπτωση μπορεί να γίνεται σύγκριση με τον δείκτη συμπίεσης αλλά για το τμήμα της καμπύλης λόγου κενών-μύζησης για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες της μέγιστης κατακόρυφης τάσης προ ξήρανσης.
- Οι προηγούμενες παρατηρήσεις δεν αποδεικνύουν καταληκτικά αν πράγματι ο δείκτης συμπίεσης μέχρι την πίεση διεύδυσης αέρα κατά την ξήρανση ταυτίζεται με τον δείκτη επαναφόρτισης κατά τη δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης, παρέχουν όμως αρκετές ενδείξεις ώστε μια τέτοια δυνατότητα να ενσωματωθεί στο νέο θεωρητικό πλαίσιο που παρουσιάζεται στο Κεφ. 19 του τρίτου μέρους. Αυτό βρίσκεται άλλωστε σε συμφωνία με τα αποτελέσματα και άλλων ερευνητών (π.χ. Fredlund & Rahardjo, 1993, Dineen, 1997) και αποτελεί συνέπεια της ισχύος της αρχής των ενεργών τάσεων για τιμές της πίεσης πόρων μέχρι την τιμή της πίεσης διεύδυσης αέρα των εδαφικών υλικών.
- Το σχήμα των καμπυλών ξήρανσης των δοκιμίων είτε στον φούρνο είτε στην ατμόσφαιρα είναι γεωμετρικά όμοιο του σχήματος της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (ποσοστό υγρασίας-μύζηση). Η γεωμετρική αυτή ομοιότητα δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη απόσταση των προκυπτουσών καμπυλών μεταξύ τους όπως συμβαίνει και με τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού των ίδιων υλικών, όποτε μάλλον δεν διαφαίνεται το ενδεχόμενο ανάπτυξης μίας συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων περιγραφής αυτών των καμπυλών και της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.
- Όπως επιδεικνύεται από τα πειραματικά αποτελέσματα, ο παραμένων λόγος κενών  $e_1$  αυξάνεται αρχικά όσο αυξάνεται ο αρχικός λόγος κενών των εδαφικών υλικών  $e_0$  και στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται πάλι για περαιτέρω αύξηση του αρχικού λόγου κενών. Κανονικοποιούμενος ο παραμένων λόγος κενών ως προς τον αρχικό λόγο κενών

διαπιστώνεται ότι ο λόγος του προς τον αρχικό λόγο κενών  $e_r/e_o$  αυξάνεται όσο μειώνεται ο αρχικός λόγος κενών. Παρουσιάζεται δε εντυπωσιακή σύμπτωση των πειραματικών σημείων για διαφορετικά αργιλικά εδαφικά υλικά αν κανονικοποιηθεί ο αρχικός λόγος κενών ως προς τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας  $e_L$  ή στο όριο πλαστικότητας  $e_P$  (το γινόμενο του κάθε ορίου με το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών  $G_s$ ). Παρατηρείται τότε ότι υφίσταται συσχέτιση μεταξύ του λόγου του παραμένοντος λόγου κενών προς τον αρχικό λόγο κενών  $e_r/e_o$  και του λόγου του αρχικού λόγου κενών προς τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας  $e_o/e_L$  ή στο όριο πλαστικότητας  $e_o/e_P$  και μάλιστα με αρκετά υψηλό συντελεστή συσχέτισης.

- Η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων κατέληξε στις Εξ. 14.11 και 14.12 για το σύνολο των δεδομένων και τις Εξ. 14.13 και 14.14 για την ειδική περίπτωση των πολύ υψηλού αρχικού ποσοστού υγρασίας. Οι εξισώσεις αυτές γενικά ισχύουν για αργιλικά και μαργαϊκά υλικά και όχι για ιλείς και ιλυώδεις και αργιλοϊλυώδεις άμμους. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από τη σύγκριση των δεδομένων της παρούσας διατριβής με τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από τους Bardanis & Kanvadas (2008) από τη διεθνή βιβλιογραφία και διαχωρίστηκαν και αυτά σε δεδομένα για αργίλους και δεδομένα για ιλείς και ιλυώδεις άμμους.
- Τονίζεται όμως ότι οι εμπειρικές αυτές συσχετίσεις για τον παραμένοντα λόγο κενών έχουν σαφώς μεγαλύτερη ποιοτική και διδακτική αξία παρά αριθμητικής πρόβλεψης. Παρά το γεγονός ότι χαρακτηρίζονται από υψηλότερους συντελεστές συσχέτισης, η σύγκριση προβλεπόμενων και μετρηθεισών τιμών παραμένοντος λόγου κενών αποκάλυψε υπερβολικά μεγάλο εύρος προβλεπόμενων τιμών, κυμαινόμενο από περίπου -50% έως και +90% (περίπου για τις Εξ. 14.11 και 14.12), δηλ. με απλά λόγια πρόβλεψη από τιμή περίπου τη μισή της πραγματικής έως και διπλάσια της πραγματικής.
- Υπάρχουν λοιπόν ενδείξεις που υποδεικνύουν τη συσχέτιση ανάμεσα στο παραμένοντα λόγο κενών και την αρχική κατάσταση των εδαφικών υλικών όπως αυτή εκφράζεται από τον αρχικό λόγο κενών τους κατά την έναρξη της ξήρανσης και την φύση τους όπως αυτή εκφράζεται με το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών και είτε το όριο υδαρότητας, είτε το όριο πλαστικότητας και μάλιστα και για το σύνολο των δεδομένων. Λιγότερες επίσης -αλλά υπαρκτές- ενδείξεις υποδεικνύουν ότι ο λόγος  $e_r/e_o$  για *ισχυρής δομής* φυσικά υλικά προκύπτει υψηλότερος από εκείνον των ίδιων υλικών αναζυμωμένων και επανασυμπίεσμένων για περίπου τον ίδιο λόγο  $e_o/e_L$  ή  $e_o/e_P$ .
- Από τις συσχετίσεις αυτές λοιπόν είναι δυνατή η πρόβλεψη του παραμένοντος λόγου κενών για κανονικά στερεοποιημένα αργιλικά εδάφη από τη φύση τους (όπως αυτή εκφράζεται από

το όριο πλαστικότητας  $w_p$  και το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών  $G_s$ ) και την αρχική τους κατάσταση (όπως εκφράζεται από τον αρχικό λόγο κενών  $e_0$ ). Η ύπαρξη μίας τέτοιας συσχέτισης είναι ιδιαίτερης σημασίας σε ό,τι αφορά την απλοποίηση της εκτίμησης παραμέτρων για ένα καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά και χρησιμοποιήθηκε στο θεωρητικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 15

## ΕΙΔΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

### 15.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν και ορισμένες ειδικές δοκιμές εκτός από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αναζυμωμένα και φυσικά εδαφικά υλικά και τις δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Οι δοκιμές αυτές ήταν δοκιμές προσδιορισμού διόγκωσης/κατάρρευσης (swelling/collapse), δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά και τέλος δοκιμές άμεσης διάτμησης, ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε δοκίμια αναζυμωμένων εδαφικών υλικών υπό διάφορες συνθήκες.

Οι πρώτες είναι δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης οι οποίες εκτελούνται υπό σταθερό ποσοστό υγρασίας μέχρι τη ζητούμενη κάθε φορά τάση στην οποία γίνεται η πλήρωση της κυψέλης του συμπιεσομέτρου με νερό και καταγράφεται η παρατηρούμενη διόγκωση ή συρρίκνωση (στην αγγλική ορολογία προτιμάται ο όρος collapse που αποδίδεται στην παρούσα διατριβή με τον όρο *κατάρρευση*). Δεδομένου ότι το νερό προστίθεται μετά από την ολοκλήρωση της συμπίεσης λόγω της επιβολής του φορτίου, η μεταβολή του ύψους του δοκιμίου κατά τη διαβροχή (είτε αυτή είναι διόγκωση, είτε είναι συρρίκνωση) οφείλεται αποκλειστικά στην απώλεια της αρνητικής πίεσης πόρων ή μύζησης που είχε εκείνη τη στιγμή το δοκίμιο και στην αύξηση της τιμής του βαθμού κορεσμού του από κάποια τιμή μικρότερη του 100% σε 100%<sup>1</sup>. Έτσι, αν η δοκιμή εκτελεστεί σε διάφορες τιμές της κατακόρυφης τάσης, τότε προκύπτει η εξέλιξη της μεταβολής όγκου λόγω διαβροχής του υλικού με την τάση, και ως επακόλουθο, με ιδιαίτερη

---

<sup>1</sup> Προκειμένου για διόγκωση, το φαινόμενο μπορεί να οφείλεται στην παροχή της απαιτούμενης ποσότητας νερού για ικανοποίηση της σχετικής απαίτησης των αργιλικών ορυκτών ενός αρχικά πλήρως κορεσμένου εδάφους υψηλής πυκνότητας με αργιλικά ορυκτά υψηλής δραστηρότητας το οποίο επιδεικνύει τάση για διόγκωση παρόλο που είναι αρχικά πλήρως κορεσμένο (Katti, et al., 2002). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή ενδιαφέρουν τέτοια φαινόμενα που συμβαίνουν μόνο σε μη κορεσμένα εδάφη.

μάλιστα αξιοπιστία, η τιμή της πίεσης διόγκωσης, ως η τιμή εκείνη της τάσης κατά την οποία η μεταβολή του ύψους του δοκιμίου κατά την προσθήκη νερού είναι μηδενική. Προκειμένου για συμπυκνωμένα εδάφη υπάρχει το επιπλέον ενδιαφέρον ότι η καμπύλη αυτή μπορεί να προσδιοριστεί για διάφορες υγρασίες συμπύκνωσης στο υλικό, οπότε διερευνάται κατ' αυτόν τον τρόπο η επιρροή της υγρασίας συμπύκνωσης στις παρατηρούμενες μεταβολές όγκου λόγω διαβροχής και στην εξέλιξή τους με την τάση. Εμμέσως δε, διερευνάται η επιρροή της πυκνότητας, λόγω των διαφορετικών τιμών της στις οποίες οδηγεί διαφορετική υγρασία του υλικού κατά την συμπύκνωση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών έχουν παρουσιαστεί από τους Bardanis & Grifiza (2010) και Μπαρδάνης & Γρίφιζα (2010), ενώ ο Bardanis (2014) παρουσίασε αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα και για πολύ χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά.

Οι δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού έγιναν με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε στο Κεφ. 14 αλλά παρουσιάζουν το ιδιαίτερο ενδιαφέρον της εκτέλεσής τους σε συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά. Έτσι, δεν προσδιορίστηκε μόνο μία χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού για κάθε υλικό αλλά τρεις: μία στη βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης, μία πιο «ξηρά» από αυτήν και μία πιο «υγρά» από αυτήν. Κατ' αυτόν τον τρόπο προσδιορίστηκε η επιρροή της υγρασίας συμπύκνωσης στη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού. Επιπλέον ενδιαφέρον σημείο είναι ότι τα συμπυκνωμένα εδαφικά υλικά δεν είναι αρχικά πλήρως κορεσμένα. Κατά συνέπεια πρωταρχικό ζητούμενο αποτελεί η μέτρηση της αρχικής τιμής της μύζης τους αμέσως μετά τη συμπύκνωση, ώστε πέραν αυτής της τιμής να επιβληθεί μεγαλύτερη μύζηση στη συνέχεια για να προσδιοριστεί η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού.

Οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα (brazilian) σε δοκίμια αναζυμωμένων εδαφικών υλικών έγιναν με σκοπό τον προσδιορισμό της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής των εδαφικών υλικών με τη μεταβολή της μύζησης κατά την ξήρανσή τους. Οι δοκιμές αυτές επιλέχθηκαν ως συνδυασμός δοκιμών που μπορεί να αποδώσει τμήμα της περιβάλλουσας διατμητικής αντοχής των εδαφικών υλικών στην ιδιαίτερη περιοχή πολύ χαμηλών ορθών τάσεων για διάφορες τιμές της μύζησης. Επίσης και οι δύο δοκιμές διαρκούν χρονικά εξαιρετικά λίγο οπότε μπορεί να θεωρηθεί βάσιμα ότι δεν αλλάζει αισθητά η μύζηση των δοκιμίων κατά τη διάρκεια των δοκιμών (κάτι το οποίο διερευνήθηκε άλλωστε μέσω της εκτέλεσης δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης με εγκατεστημένο αισθητήρα μέτρησης της μύζησης). Στα εδαφικά υλικά που εκτελέστηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα εκτελέστηκαν και βραδείες δοκιμές άμεσης διάτμησης σε πολλούς των υλικών αυτών.

Για τις δοκιμές προσδιορισμού διόγκωσης/κατάρρευσης επιλέχθηκε ο αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου που κατέστη διαθέσιμος σε μεγάλες ποσότητες κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής. Επιπλέον της διαθεσιμότητάς του, το υλικό αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε ό,τι αφορά τις μεταβολές όγκου που συμβαίνουν σε αυτό κατά τη διαβροχή του, είτε βρίσκεται στη φυσική του κατάσταση, είτε απαντάται συμπυκνωμένο για χρήση σε γεωτεχνικά έργα. Το συγκεκριμένο μάλιστα υλικό χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των σωμάτων στήριξης του φράγματος Φερεκάμπου Σκύρου. Για τις δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού επιλέχθηκε ο αποσαθρωμένος Σερπεντινίτης Σκύρου και η Άργιλος Αμαρουσίου. Έτσι διερευνήθηκε και η επιρροή της διαφορετικής φύσης των υλικών, αφού ο μιν αποσαθρωμένος σερπεντινίτης Σκύρου αποτελεί ένα ελλουβιακό εδαφικό υλικό χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας, ενώ η Άργιλος Αμαρουσίου μία ιζηματογενή άργιλο μέσης έως υψηλής πλαστικότητας. Εκτός από τις δοκιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές βραδείας διάτμησης με στερεοποίηση σε συμπυκνωμένα δείγματα αποσαθρωμένου σερπεντινίτη.

Για τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα (brazilian) σε δοκίμια αναζυμωμένων εδαφικών υλικών χρησιμοποιήθηκαν η Άργιλος Αμαρουσίου, η Μάργα Κορίνθου, η Μάργα Χαλκουσίου, ο αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου και ο αργιλοποιημένος Ιλύλιθος Πάρνηθας. Τα υλικά αυτά καλύπτουν επαρκές εύρος πλαστικότητας, κοκκομετρικής διαβάθμισης και γεωλογικής φύσης και προέλευσης για τη μελέτη της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση.

## **15.2 ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΕΙΣΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΣΕ Ο,ΤΙ ΑΦΟΡΑ ΤΙΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΟΓΚΟΥ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΟΧΗΣ**

### **15.2.1 Μεταβολές όγκου λόγω διαβροχής και εξέλιξή τους με την τάση**

Οι μεταβολές όγκου κατά τη διαβροχή ενός υλικού ενδιαφέρουν ιδιαίτερα σε εδαφικά υλικά που χαρακτηρίζονται ως «διογκώσιμα» λόγω της διόγκωσης που προκαλείται εξαιτίας της διαβροχής και των προβλημάτων που προκαλεί σε διάφορα τεχνικά έργα. Στο Κεφ. 5 του πρώτου μέρους επεξηγήθηκε γιατί η χρήση των όρων «διογκώσιμο» και «καταρρεύσιμο» έδαφος είναι μάλλον ατυχής αφού το ίδιο εδαφικό υλικό μπορεί να εκδηλώσει διόγκωση ή κατάρρευση κατά τη διαβροχή του ανάλογα με την τάση υπό την οποία γίνεται η διαβροχή.

Στην §5.5.2 στο Κεφ. 5 του πρώτου μέρους έγινε εισαγωγή στην έννοια του χώρου ολικής τάσης-μύζησης-λόγου κενών, καθώς και στο καταστατικό προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990) με βάση το οποίο εξηγήθηκε πως υπό χαμηλές τιμές της τάσης εκδηλώνεται διόγκωση των αρχικώς μη κορεσμένων εδαφών λόγω διαβροχής, ενώ για μεγάλες τιμές της τάσης εκδηλώνεται συρρίκνωση του ίδιου υλικού κατά τη διαβροχή του. Στο Κεφ. 18 του τρίτου μέρους παρουσιάζονται οι καταστατικές εξισώσεις του προσομοιώματος των Alonso, et al. (1990) που προβλέπουν τη μεταβολή της συρρίκνωσης που πρέπει να αναμένεται λόγω διαβροχής με την αύξηση της τάσης.

### **15.2.2 Σχολιασμός του συνήθους τρόπου μέτρησης της πίεσης διόγκωσης**

Η πίεση διόγκωσης προσδιορίζεται συνήθως ως η τάση που πρέπει να επιβληθεί σε δοκίμιο που υποβάλλεται σε μονοδιάστατη συμπίεση για να σταματήσει η διόγκωση που αυτό έχει την τάση να επιδείξει. Ο προσδιορισμός μάλιστα υψηλής τιμής αυτού του μεγέθους στα πλαίσια μιας γεωτεχνικής έρευνας αποτελεί συχνά αιτία έντονης ανησυχίας για τις κατασκευές που θα θεμελιωθούν επί τέτοιου εδάφους οδηγώντας συχνά και στην υιοθέτηση ακριβών λύσεων για την αντιμετώπιση της ενδεχόμενης εμφάνισης μεγάλης διόγκωσης. Μια τέτοια λύση είναι συνήθως η παρεμβολή στρώσεων σημαντικού πάχους από ομοιόκοκκο υλικό μεταξύ εδάφους υψηλής πίεσης διόγκωσης και κατασκευής, ώστε να μπορεί να απορροφηθεί η διόγκωση πριν μεταφερθεί στην κατασκευή, και σπανιότερα, και για περιπτώσεις πολύ σοβαρών προβλημάτων,

επεξεργασία του προβληματικού υλικού με κάποιο πρόσμικτο που περιορίζει την εκδήλωση της διόγκωσης όπως π.χ. η υδράσβεστος<sup>2</sup>.

Πριν το σχολιασμό της πίεσης διόγκωσης και της χρήσης της ως φυσικού μεγέθους σε προβλήματα μηχανικού παρουσιάζεται σύντομα ο τρόπος μέτρησής της. Ένα δοκίμιο εδαφικού υλικού μορφώνεται και τοποθετείται στην κυψέλη του συμπιεσομέτρου, εφαρμόζεται το πρώτο φορτίο που έχει καθοριστεί και αμέσως προστίθεται νερό στην κυψέλη και παρακολουθούνται οι μεταβολές του ύψους του δοκιμίου που εκδηλώνονται. Εφόσον υπάρχει τάση εκδήλωσης διόγκωσης προστίθεται το επόμενο διαθέσιμο φορτίο κ.ο.κ μέχρι σταθεροποίησης της μεταβολής του ύψους σε μηδενικές τιμές.

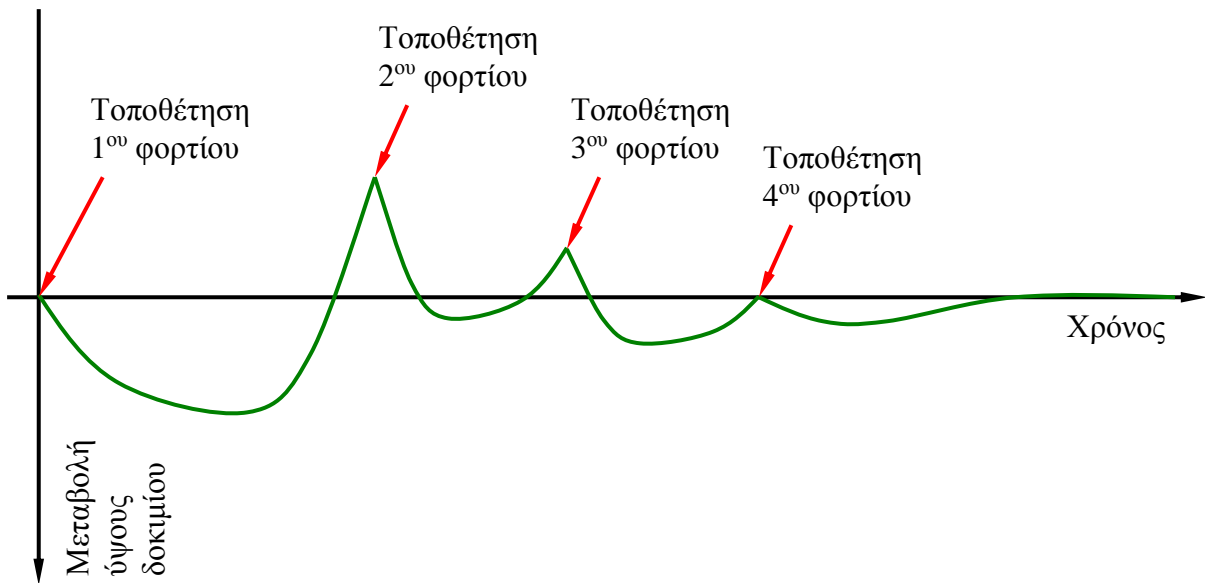
Στο Σχ. 15.1 παρουσιάζεται απλοποιημένο διάγραμμα της εξέλιξης των ενδείξεων του μηκυνσιομέτρου που παρακολουθείται κατά το στάδιο του υπολογισμού της πίεσης διόγκωσης με το χρόνο. Έστω ότι απαιτήθηκε η επιβολή τεσσάρων φορτίων. Με το που επιβλήθηκε το πρώτο, το δοκίμιο επέδειξε αρχικά καθίζηση και μετά διόγκωση, οπότε τοποθετήθηκε το δεύτερο φορτίο. Επέδειξε και για αυτό το φορτίο αρχικά καθίζηση, στη συνέχεια διόγκωση (μικρότερη) και τοποθετήθηκε το τρίτο φορτίο. Ακολούθησε η ίδια εξέλιξη (με ακόμα μικρότερη διόγκωση) έως ότου επιβλήθηκε και το τέταρτο φορτίο και η μεταβολή του ύψους μηδενίστηκε, οπότε το τέταρτο φορτίο θεωρείται ότι αντιστοιχεί στην πίεση διόγκωσης του υλικού. Σε ό,τι αφορά αυτή την ενδεικτική απλοποιημένη αναπαράσταση της εξέλιξης της καταγραφόμενης μεταβολής του ύψους του δοκιμίου κατά τη δοκιμή προσδιορισμού της πίεσης διόγκωσης υπάρχουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Καταρχάς πάντοτε, όσο μεγάλη πίεση διόγκωσης κι αν έχει ένα υλικό, αρχικά θα επιδειχθεί καθίζηση υπό το πρώτο φορτίο<sup>3</sup>. Η καθίζηση αυτή μάλιστα μπορεί να διαρκέσει αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα μέχρι να αρχίσουν να εμφανίζονται ενδείξεις που αντιστοιχούν σε αύξηση του ύψους του δοκιμίου, ανάλογα με τη διαπερατότητα του υλικού.

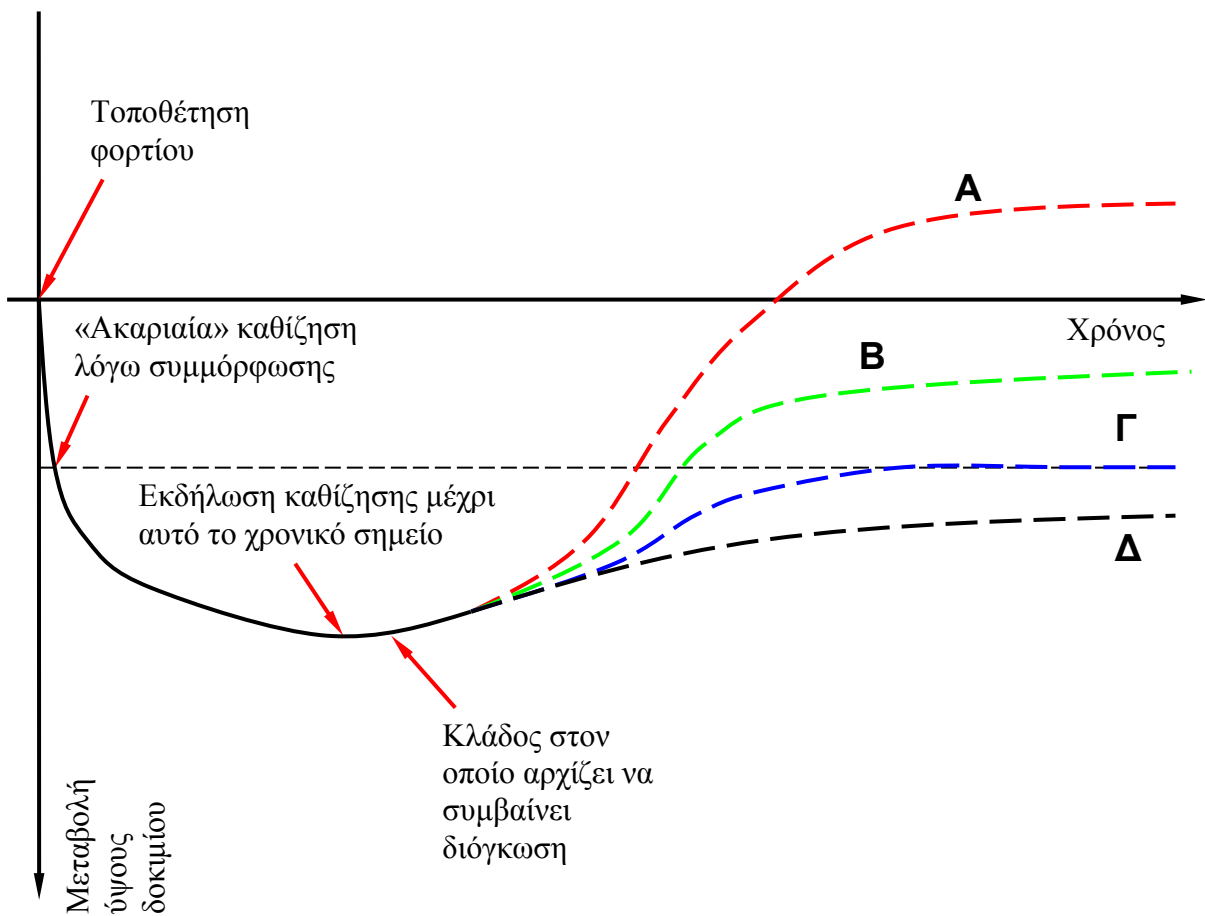
<sup>2</sup> Ειδικά η υδράσβεστος αποτελεί ιδανικό πρόσμικτο για τον περιορισμό της διόγκωσης αφού, αφενός αυξάνει την αντοχή και μειώνει την συμπιεστότητα του βελτιούμενου εδάφους, και αφετέρου μεταβάλλει τις ιδιότητές του προς τη μικρότερη πλαστικότητα και δραστηριότητα. Μειονέκτημα αποτελεί ότι για να εκδηλωθεί αυτού του είδους η βελτίωση ιδιοτήτων στο μέγιστο πρέπει να πρόκειται για εδαφικό υλικό ορυκτολογικής σύστασης που να επιτρέπει την εμφάνιση της ποζολανικής αντίδρασης (βλ. σχετικά Eads & Grim, 1996, και τη μέθοδό τους όπως έχει ενσωματωθεί στα πρότυπα της ASTM –βλ. D 6276-99a).

<sup>3</sup> Ο γράφων μέχρι σήμερα έχει συναντήσει μόνο ένα υλικό που δεν επέδειξε καθίζηση αρχικά και αυτό είχε όριο υδαρότητας πάνω από 100%. Τέτοιου είδους υλικά δεν αποτελούν σε καμία περίπτωση τον κανόνα των υλικών που απαντώνται στην καθημερινή επαγγελματική ή ερευνητική γεωτεχνική πρακτική.

- Εάν το δοκίμιο αφηθεί να επιδείξει πρώτα έστω και λίγη διόγκωση, τότε όλα τα επόμενα φορτία στην πραγματικότητα προσπαθούν να αναιρέσουν τη λίγη αυτή διόγκωση που καταγράφηκε με αποτέλεσμα τελικά το τέταρτο φορτίο (στο παράδειγμα του Σχ. 15.1) που θα επιβληθεί να αντιστοιχεί σε *μεγαλύτερη* τάση από εκείνη που θα έπρεπε να επιβληθεί αν θεωρητικά ήταν γνωστή εκ των προτέρων η πραγματική πίεση διόγκωσης και το φορτίο που αντιστοιχούσε σε αυτήν τοποθετείτο μονομιάς.
- Στο Σχ. 15.1 δεν έχει ληφθεί καθόλου υπόψη η επιρροή των παραμορφώσεων των ίδιων των συσκευών. Όπως προαναφέρθηκε και στο Κεφ. 13, σε καμμία συσκευή, και ειδικά στα συμπίεσόμετρα, δεν αντιστοιχεί το σύνολο της καταγραφόμενης στα μηκυνσιόμετρα μεταβολής του μήκους του κινούμενου στελέχους τους στην πραγματική μεταβολή του ύψους του δοκιμίου. Μέρος της μεταβολής που καταγράφεται στα μηκυνσιόμετρα οφείλεται στην παραμόρφωση των ίδιων των συσκευών, όσο μικρό κι αν είναι το φορτίο που επιβλήθηκε και γι' αυτόν τον λόγο πρέπει να εκτελούνται δοκιμές συμμόρφωσης (βλ. σχετικά Μπαρδάνης & Γρίφιζα, 2012). Κατά συνέπεια το «πραγματικό»  $\theta$  για το αρχικό ύψος του δοκιμίου βρίσκεται σε μία συγκεκριμένη «θλιπτική» μεταβολή του ύψους, η οποία πρέπει να έχει μετρηθεί εκ των προτέρων με δοκιμή συμμόρφωσης για το συγκεκριμένο κάθε φορά συνδυασμό κλίνης συμπίεσομέτρου-κυψέλης-απαρτίων κυψέλης-αλληλουχίας φορτίων όπως επιδεικνύεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο Σχ. 15.2. Η παρατήρηση αυτή επιτείνει ακόμα περισσότερο τον παράγοντα που αναφέρθηκε στο προηγούμενο σημείο στην περίπτωση που δεν έχουν εκτελεστεί δοκιμές συμμόρφωσης, προκαλώντας κατ' αυτόν τον τρόπο *ακόμα μεγαλύτερη υπερεκτίμηση* της πίεσης διόγκωσης.
- Έστω λοιπόν ότι επιδιώκεται μία πιο προσεκτική προσέγγιση στον χρόνο αύξησης του φορτίου που έχει τοποθετηθεί αρχικά. Όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 15.2, ευθύς μόλις τοποθετηθεί το φορτίο συμβαίνει πρακτικά ακαριαία η καθίζηση που οφείλεται στην παραμόρφωση της συσκευής και αρχίζει για ένα μικρό (έως και μεγάλο μερικές φορές) χρονικό διάστημα η εκδήλωση καθίζησης. Η καθίζηση αυτή υπερβαίνει προφανώς την μεταβολή ύψους λόγω παραμόρφωσης της συσκευής και κάποια στιγμή αρχίζει να υπάρχει μείωση στην καταγραφή της μεταβολής του ύψους. Εκεί λοιπόν πρέπει να ληφθεί μία απόφαση για αύξηση του φορτίου ή όχι, προκειμένου να προληφθεί η εκδήλωση πραγματικής διόγκωσης και να μην υπάρχει η υπερεκτίμηση που αναφέρθηκε πριν. Δεν μπορεί όμως εκ των προτέρων να είναι γνωστό ποια θα είναι η εξέλιξη που θα έχει η μεταβολή του ύψους με τον χρόνο. Αν αυτή θα είχε την εξέλιξη Α ή Β που παρουσιάζονται



**Σχήμα 15.1.** Ενδεικτική απλοποιημένη αναπαράσταση της εξέλιξης της καταγραφόμενης μεταβολής του ύψους του δοκιμίου κατά την δοκιμή προσδιορισμού της πίεσης διόγκωσης.



**Σχήμα 15.2.** Αναπαράσταση της εξέλιξης της καταγραφόμενης μεταβολής του ύψους του δοκιμίου μετά την επιβολή φορτίου σε υλικό που έχει την τάση σε κάποια χρονική στιγμή να επιδείξει τάση διόγκωσης.

στο Σχ. 15.2 (η εξέλιξη της μορφής Β παρουσιάζεται για να τονιστεί ότι πραγματική διόγκωση μπορεί να υπάρξει ακόμα και αν η μεταβολή του ύψους δεν υπερβεί το «0» του συμπιεσομέτρου λαμβάνοντας αρνητικές τιμές), τότε ορθώς στη χρονική αυτή στιγμή έγινε αύξηση του φορτίου. Δεν μπορεί να είναι όμως γνωστό αν όντως θα ακολουθούσε η εξέλιξη Α ή Β και όχι η Γ ή η Δ, όπου η Γ σημαίνει ότι το επιβληθέν φορτίο αντιστοιχούσε όντως στην πίεση διόγκωσης του υλικού και η Δ σε θλίψη υπό το επιβληθέν φορτίο. Τις περισσότερες φορές –ειδικά σε εμπορικά εργαστήρια και εάν μάλιστα πλησιάζει το τέλος της βάρδιας- η απόφαση που λαμβάνεται είναι για αύξηση του φορτίου και αν την επόμενη ημέρα διαπιστωθεί ότι το επόμενο φορτίο προκάλεσε θλίψη, τότε το προηγούμενο φορτίο αναφέρεται ότι αντιστοιχεί στην πίεση διόγκωσης. Αυτός είναι *άλλος ένας παράγοντας υπερεκτίμησης της πίεσης διόγκωσης, ή ακόμα και εφεύρεσής της εκεί που δεν υπάρχει.*

Αυτά όμως τα ζητήματα που παρουσιάστηκαν μέχρι αυτό το σημείο είναι τεχνικής φύσεως και απλώς επιδεικνύουν την επιφυλακτικότητα που πρέπει να επιδεικνύεται σε αναφερόμενες τιμές πίεσης διόγκωσης, ειδικά όταν υπάρχουν ενδείξεις ή υποψίες ότι δεν έχουν εκτελεστεί δοκιμές συμμόρφωσης των συσκευών και ότι δεν ελήφθη με τη δέουσα περίσκεψη η απόφαση αύξησης των φορτίων. Έστω ότι έχουμε ένα εδαφικό υλικό στο οποίο πράγματι καταγράφηκε πολύ υψηλή τιμή της πίεσης διόγκωσης και ότι αυτή είναι ακριβής, π.χ. 300 kPa. Τα ερωτήματα που δημιουργούνται είναι σε τί αποφάσεις οδηγεί ένα τέτοιο δεδομένο σε ό,τι αφορά τις αναμενόμενες μεταβολές όγκου αν π.χ. τοποθετηθεί πρόσθετο φορτίο 150 kPa, ή 250 kPa ή 290 kPa κ.ο.κ. Η σειρά αυτή των ρητορικών ερωτημάτων αποσκοπεί στο να επιστήσει την προσοχή στο ότι η πίεση διόγκωσης αποτελεί *ποιοτική* πληροφορία για μια θεωρητική τιμή της τάσης στην οποία όταν το δοκίμιο κορεστεί πλήρως από τον αρχικό μερικό κορεσμό του υπό αυτήν δεν εκδηλώνει μεταβολές όγκου. *Η ποιοτική αυτή πληροφορία περί αυτής της θεωρητικής τιμής της τάσης δεν συνοδεύεται από καμμία ποσοτική πληροφορία για τις αναμενόμενες μεταβολές όγκου (διογκώσεις) αν η διαβροχή συμβεί υπό χαμηλότερες τιμές της τάσης από τη θεωρητική αυτή τιμή.* Για παράδειγμα, εάν η πραγματική επιβαλλόμενη τάση στο παράδειγμα της σωστά μετρημένης πίεσης διόγκωσης 300 kPa είναι 280 kPa και η αναμενόμενη διόγκωση σε περίπτωση διαβροχής είναι μόλις 0.1%, αυτό μάλλον οδηγεί σε μία παραμόρφωση αμελητέα για την πλειοψηφία των τεχνικών έργων. Για να μπορεί λοιπόν να ληφθεί υπόψη η σημασία της ποιοτικής πληροφορίας που προσφέρει η θεωρητική τιμή της πίεσης διόγκωσης, και κυρίως να αξιολογηθεί για την λήψη αποφάσεων σε ό,τι αφορά επεμβάσεις για την πρόληψη διογκώσεων σε πραγματικά έργα, η μέτρησή της πρέπει να συνοδεύεται και με πληροφορία για το αναμενόμενο μέγεθος της διόγκωσης υπό διάφορες μικρότερες τιμές της τάσης. Αυτό είναι ένα σαφές σημείο υπεροχής



των δοκιμών προσδιορισμού διόγκωσης/κατάρρευσης, αφού αφενός η πίεση διόγκωσης υπολογίζεται πολύ πιο αξιόπιστα και αφετέρου συλλέγεται πληροφορία και για το μέγεθος των αναμενόμενων διογκώσεων αν η διαβροχή συμβεί σε τάσεις μικρότερες της πίεσης διόγκωσης, αλλά και για το μέγεθος των καθιζήσεων που θα προκύψουν αν η διαβροχή γίνει σε *μεγαλύτερες τιμές της τάσης* (το οποίο όπως θα επιδειχθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου μπορεί να συνιστά πολύ πιο ουσιαστικό πρόβλημα για ορισμένες κατηγορίες εδαφικών υλικών)<sup>4</sup>.

Ακόμα όμως και σε αυτήν την περίπτωση, που δηλαδή έχει υπολογιστεί αξιόπιστα η τιμή της πίεσης διόγκωσης και επίσης υπάρχει και πληροφορία για την εξέλιξη των αναμενόμενων μεταβολών όγκου με την τάση υπό την οποία γίνεται η διαβροχή, δημιουργείται το ερώτημα πόσο αξιόπιστο είναι το σύνολο αυτών των πληροφοριών για να αξιολογηθεί η επικινδυνότητα λόγω αναμονής διογκώσεων που θα προκαλέσουν ανυψώσεις στις θεμελιώσεις κτιρίων ή πρόσθετες πιέσεις πίσω από τοίχους αντιστήριξης. Έστω ότι σε ένα υλικό προερχόμενο από ομοιογενή σχηματισμό πάχους 20m έχει μετρηθεί πίεση διόγκωσης 300 kPa και προγραμματίζεται η επιβολή φορτίου 150 kPa επί αυτού, για το οποίο μετρήθηκε ότι το δοκίμιο διογκώνεται 1% όταν διαβραχεί και κορεστεί πλήρως. Αν προς στιγμήν υποθέσουμε ότι η κατανομή της φόρτισης αντιστοιχεί σε συνθήκες απείρως εκτεινόμενου φορτίου (μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως), τότε θα μπορούσε να ειπωθεί ότι αναμένεται σε περίπτωση διαβροχής διόγκωση  $1\% \cdot 20\text{m} = 0.2\text{m}$  η οποία αποτελεί μία πολύ μεγάλη τιμή για οποιοδήποτε τεχνικό έργο. Έστω δε ότι το εδαφικό υλικό σε αυτόν τον σχηματισμό είχε αρχικό βαθμό κορεσμού 95%, ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών 2.65, ποσοστό υγρασίας 19%, λόγο κενών 0.53 και ξηρό φαινόμενο βάρος 17.32 kN/m<sup>3</sup>. Για να γίνει πλήρης κορεσμός του υλικού αυτού που να οδηγήσει στην προαναφερθείσα διόγκωση, οι παραπάνω ιδιότητες πρέπει να μεταβληθούν ως εξής: το ξηρό φαινόμενο βάρος να γίνει 17.15 kN/m<sup>3</sup>, ο λόγος κενών 0.55, το ποσοστό υγρασίας 20.58% και βέβαια ο βαθμός κορεσμού 100%.

Αυτή η μεταβολή των ιδιοτήτων που προκάλεσε την διόγκωση που αναφέρθηκε μεταφράζεται σε προσθήκη 24.26 It ανά τετραγωνικό μέτρο της επιφάνειας ανά μέτρο πάχους του σχηματισμού, δηλ. για το συνολικό πάχος του σχηματισμού 490 It ανά τετραγωνικό μέτρο της

<sup>4</sup> Εναλλακτικός τρόπος αξιόπιστου προσδιορισμού της πίεσης διόγκωσης είναι η ελεύθερη διόγκωση εντός κυψέλης σε πλαίσιο με δυναμοκυψέλη παρεμπόδισης της διόγκωσης και παραλαβής του φορτίου λόγω διόγκωσης. Ειδικά μάλιστα αν το πλαίσιο έχει κινούμενα στελέχη και συνοδεύεται από κλειστό κύκλωμα ανάγνωσης της παραμόρφωσης της δυναμοκυψέλης και επιβολής της στην αντίθετη κατεύθυνση (virtual infinite stiffness), τότε προκύπτει εξαιρετικά αξιόπιστη και ακριβής μέτρηση της τιμής της πίεσης διόγκωσης. Δυστυχώς η πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης της πίεσης διόγκωσης με ένα τέτοιο σύστημα συνοδεύεται και από δυσανάλογα μεγάλη αύξηση του κόστους εκτέλεσης της δοκιμής (κυρίως λόγω κόστους εξοπλισμού).

επιφάνειας, δηλ. 490mm ύψους βροχής. Τέτοιες τιμές ύψους βροχής αποτελούν πρακτικά την συνολική ετήσια βροχόπτωση για τις πιο νότιες και ξηρές περιοχές του ελλαδικού χώρου και το 1/3 έως 1/4 της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης για τις πιο βόρειες και υγρές. Σίγουρα δε, αποτελούν τιμές ύψους βροχής που τουλάχιστον στον ελλαδικό χώρο είναι πολύ σπάνιο να προκύψουν από ένα μόνο επεισόδιο βροχόπτωσης (ή ακόμα και περισσότερα αλλά πολύ κοντινά μεταξύ τους).

Ακόμα δε και αν υποθεθεί ότι γίνεται σχεδιασμός για ένα τέτοιο επεισόδιο βροχόπτωσης, και ακόμα μάλιστα και αν επιχειρηθεί να αγνοηθεί προς στιγμήν η επιφανειακή απορροή και η εξατμισοδιαπνοή που μειώνουν το σύνολο του διαθέσιμου ύψους βροχής για κατείσδυση στον εδαφικό σχηματισμό, πρέπει και πάλι να ληφθεί υπόψη ο συντελεστής διαπερατότητας του υλικού. Δεδομένου μάλιστα ότι τα υλικά που παρουσιάζουν μεγάλη τάση διόγκωσης έχουν συνήθως πολύ μικρό συντελεστή διαπερατότητας (ακόμα και αν κοντά στην επιφάνεια του εδάφους που είναι πιο ξηρά έχουν και ρωγμές λόγω συρρίκνωσης) η ικανότητα κατείσδυσης όλης αυτής της ποσότητας νερού είναι τόσο πιο μικρή που οπωσδήποτε έχει μεσολαβήσει η επιρροή της επιφανειακής απορροής και της εξατμισοδιαπνοής και άρα τελικά δεν μπορεί να αγνοείται.

Αν στο προηγούμενο παράδειγμα που απαιτούνται 490mm ύψους βροχής υποθεθεί εύλογα ένας συντελεστής διαπερατότητας  $10^{-8}$  m/s, τότε η απορρόφηση όλης αυτής της ποσότητας αντιστοιχεί σε χρονικό διάστημα περίπου ενάμιση έτους. Κατά συνέπεια προκύπτει το ερώτημα, ότι ακόμα και εάν έχουμε έναν εδαφικό σχηματισμό με τέτοια τιμή της πίεσης διόγκωσης επί του οποίου θα προστεθεί το φορτίο αυτό που είναι μικρότερό της, τότε από πού θα υπάρξει η απαιτούμενη ποσότητα νερού για να προκληθεί το σύνολο της διόγκωσης που παρατηρήθηκε σε ένα δοκίμιο περίπου 80g που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο. Επίσης ακόμα και αν αγνοηθούν όλοι αυτοί οι παράγοντες ανακύπτει το ερώτημα πως μπορεί να εφαρμοστεί συνολικά στον εδαφικό σχηματισμό μία τέτοια οριακή συνθήκη όταν η κατασκευή έχει τέτοιες διαστάσεις που το εφαρμοζόμενο φορτίο της αντιστοιχεί σε «απείρω» εκτεινόμενο φορτίο.

Κατά συνέπεια οι ανησυχίες για πραγματική διόγκωση πρέπει να αφορούν τρεις κύριους παράγοντες που αποτελούν ρεαλιστικά σενάρια παροχής της απαιτούμενης ποσότητας νερού:

1. Το ενδεχόμενο κάποιας τοπικής διαρροής σε δίκτυο κοινής ωφελείας ή τμήμα του συστήματος αγωγών ύδρευσης ή αποχέτευσης του κτιρίου, η οποία θα παρέχει συνεχώς την

απαιτούμενη ποσότητα νερού. Ακόμα και έτσι η εμφάνιση της διόγκωσης θα είναι μάλλον ένα τοπικά περιοριζόμενο φαινόμενο, κοντά στη θέση της διαρροής (το οποίο όμως ενδέχεται και να είναι πιο σημαντικό από ένα καθολικά εμφανιζόμενο φαινόμενο, αφού μπορεί να εισάγει πολύ πιο έντονες διαφορικές καθιζήσεις/διογκώσεις).

2. Το ενδεχόμενο καθολικής ανύψωσης της στάθμης του υπόγειου ορίζοντα, όπως π.χ. συμβαίνει σε μεγάλες περιοχές όταν κοντά σε αυτές δημιουργούνται τεχνητές λίμνες ή ανασυστήνονται αποξηραμένες (φυσικά ή τεχνητά) λίμνες. Τέτοιου είδους φαινόμενα είναι πολύ μεγάλης κλίμακας και συχνά μπορεί να αφορούν ολόκληρους οικισμούς.
3. Την ανύψωση εξωτερικής στάθμης νερού σε άμεση γειτνίαση με την κατασκευή που ενδιαφέρει, π.χ. ένα χωμάτινο φράγμα στην λεκάνη του οποίου γίνεται κατάκλυση, όπως και σε όλες τις περιοχές που κατακλύζονται άμεσα από την τεχνητή λίμνη που δημιουργείται. Ειδικά σε ό,τι αφορά τα χωμάτινα φράγματα, άμεσο ενδιαφέρον έχουν τα αποτελέσματα δοκιμών προσδιορισμού διόγκωσης/κατάρρευσης σε συμπυκνωμένα εδάφη όπως αυτές που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και παρουσιάζονται στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

Συνοψίζοντας λοιπόν σε ό,τι αφορά την πίεση διόγκωσης:

- Όταν μετρείται με το συμβατικό τρόπο εγείρονται σημαντικές αμφιβολίες κατά πόσο είναι σωστά μετρημένη ή *ακόμα και αν υπάρχει*.
- Μόνη η τιμή της πίεσης διόγκωσης αποτελεί *μόνο ποιοτικής φύσης πληροφορία για το δυναμικό που έχει το εν λόγω υλικό να διογκωθεί*.
- *Δεν παρέχει καμμία πληροφορία για το μέγεθος της διόγκωσης που θα συμβεί αν γίνει διαβροχή του υλικού σε τιμές της τάσης χαμηλότερες από την πίεση διόγκωσης*.
- Για να υπάρχουν πληροφορίες για το μέγεθος της διόγκωσης που θα συμβεί αν γίνει διαβροχή του υλικού σε τιμές της τάσης χαμηλότερες από την πίεση διόγκωσης (και αντίστοιχα της συρρίκνωσης που θα συμβεί αν γίνει διαβροχή του υλικού σε τιμές της τάσης μεγαλύτερες από την πίεση διόγκωσης) πρέπει να εκτελεστούν δοκιμές προσδιορισμού

διόγκωσης/κατάρρευσης για διάφορες τάσεις, από τις οποίες θα προκύψει με μεγαλύτερη αξιοπιστία το αν υπάρχει πίεση διόγκωσης και ποια είναι αυτή.

- Ακόμα και στην περίπτωση που προκύπτει βεβαιωμένα ότι υπάρχει πίεση διόγκωσης και έχουν μετρηθεί και οι διογκώσεις που πρέπει να αναμένονται για διάφορες τιμές της τάσης, η σοβαρότητα του προβλήματος περιορίζεται στην πραγματικότητα στα τεχνικά προβλήματα που προαναφέρθηκαν, αφού η πραγματική διόγκωση που θα συμβεί σε έναν εδαφικό σχηματισμό περιορίζεται πρακτικά από τη διαθεσιμότητα του νερού και τη διαπερατότητα του εδαφικού υλικού.

Το προηγούμενο σχόλιο, πέραν του ότι εφιστά την προσοχή στην αξιολόγηση δεδομένων από συμβατικές δοκιμές μέτρησης πίεσης διόγκωσης και των αποφάσεων που λαμβάνονται για την αντιμετώπιση του ενδεχομένου εμφάνισης διόγκωσης σε πραγματικά τεχνικά έργα, τεκμηριώνει ακόμα περισσότερο την ανάγκη εκτέλεσης των δοκιμών προσδιορισμού διόγκωσης/κατάρρευσης για διάφορες τάσεις που πραγματοποιήθηκαν.

### 15.3 Ο ΑΠΟΣΑΘΡΩΜΕΝΟΣ ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΗΣ ΣΚΥΡΟΥ

#### 15.3.1 Τοποθεσία προέλευσης του υλικού – Στοιχεία για τη γεωλογική του προέλευση

Για την κατασκευή των σωμάτων στήριξης του φράγματος Φερέκαμπου Σκύρου έγινε χρήση του αποσαθρωμένου σερπεντινίτη που εμφανίζεται σε μεγάλες ποσότητες στην περιοχή του έργου. Ο ποταμός Φερέκαμπος έχει χειμαρρική παροχή, πρακτικά μόνο τους υγρούς μήνες του χρόνου. Το φράγμα Φερέκαμπος έχει ύψος 25m (πυθμένας όνυχα-στέψη) με πυρήνα πλάτους 5m στη στέψη και 35m στην βάση του. Ο πυρήνας κατασκευάστηκε από αμμώδη άργιλο που βρίσκεται στην περιοχή του έργου ως επιφανειακή στρώση υπερκείμενη του αποσαθρωμένου σερπεντινίτη. Ο αποσαθρωμένος σερπεντινίτης βρίσκεται κάτω από την αμμώδη άργιλο τουλάχιστον μέχρι βάθος 25m από την επιφάνεια, ενώ εμφανίζεται και στην επιφάνεια του εδάφους στις πλευρές της κοιλάδας προς τα μεγαλύτερα υψόμετρα. Το υλικό εμφανίζεται σε μορφή τέτοια που ο όγκος του μειώνεται αρκετά κατά τη διαβροχή ή/και τη μηχανική αναμόχλευσή του, όπως π.χ. κατά την εκσκαφή και μεταφορά με μηχανικά μέσα.

Γεωλογικά ο σερπεντινίτης της Σκύρου εντάσσεται στο Ηωελληνικό Τεκτονικό Κάλυμμα και απαντάται μαζί με οφειτασβεστίτες και το οφιολιθικό “mélange” (Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο «Νήσος Σκύρος»). Στην Φωτ. 15.1 φαίνεται γενική άποψη της περιοχής του έργου με τις εμφανίσεις του σερπεντινίτη και τους χώρους απόθεσης του υλικού που προκύπτει από εκσκαφές για μελλοντική χρήση στην κατασκευή του φράγματος. Στην άμεση περιοχή του έργου απαντάται άλλοτε πιο βραχώδης (Φωτ. 15.2) και άλλοτε πιο αποσαθρωμένος (συνήθως φυλλώδης, Φωτ. 15.3) με κάλυμμα αποτελούμενο από μεταβαλλόμενου πάχους στρώσεις αργίλου (Φωτ. 15.4), αμμώδους αργίλου και αμμοχαλικών εγγύτερα στην κοίτη του ποταμού, ή –προς τις πλαγιές της κοιλάδας- και λατυποπαγών και ασβεστολίθων (Φωτ. 15.5).

#### 15.3.2 Δειγματοληψία

Το δείγμα που ελήφθη ήταν διαταραγμένο και αποκόπηκε από το πρανές της εκσκαφής στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος για την χάραξη της οδού προς τη γέφυρα πάνω από τη διώρυγα προσαγωγής (Φωτ. 15.6). Επιχειρήθηκε η διεύθυνση τενσιομέτρου για τη μέτρηση της μύζησης του υλικού και αισθητήρα ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τη μέτρηση του ογκομετρικού

ποσοστού υγρασίας (βλ. Κεφ. 3 πρώτου μέρους), αλλά δεν κατέστη δυνατή η διείδυση κανενός από τα δύο όργανα. Το ίδιο συνέβη και με πενετρόμετρο χειρός για την εκτίμηση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη το οποίο όμως δεν διείδυσε περισσότερο από 1mm (η γραμμή ένδειξης μέτρησης του πενετρομέτρου βρίσκεται στα 5mm). Το διαταραγμένο υλικό του δείγματος τοποθετήθηκε σε σακούλες και μεταφέρθηκε σακευμένο στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. όπου και έγιναν οι δοκιμές σε αυτό.



**Φωτογραφία 15.1.** Γενική άποψη της περιοχής του έργου από ανάντη με τις εμφανίσεις του σερπεντινίτη αλλά και τους χώρους απόθεσης του υλικού που προκύπτει από εκσκαφές για μελλοντική χρήση στην κατασκευή του φράγματος.



**Φωτογραφία 15.2.** Σερπεντινίτης από την περιοχή του φράγματος στην πιο βραχώδη του μορφή.



**Φωτογραφία 15.3.** Αποσαθρωμένος σερπεντινίτης από την περιοχή του φράγματος με πιο φυλλώδη μορφή (ο ογκόλιθος στην αριστερή φωτογραφία έχει όγκο περί το 1m<sup>3</sup>).



**Φωτογραφία 15.4.** Αργιλοαμμώδες κάλυμμα με χάλικες πάνω από αποσαθρωμένο σερπεντινίτη σε πρανές εκσκαφής για την περιμετρική οδό του ταμιευτήρα του φράγματος.



**Φωτογραφία 15.5.** Δύο όψεις στις εκσκαφές στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος Φερεκάμπου όπου διακρίνεται βραχώδες κάλυμμα του αποσαθρωμένου σερπεντινίτη αποτελούμενο από ασβεστολίθους και λατυποπαγή.

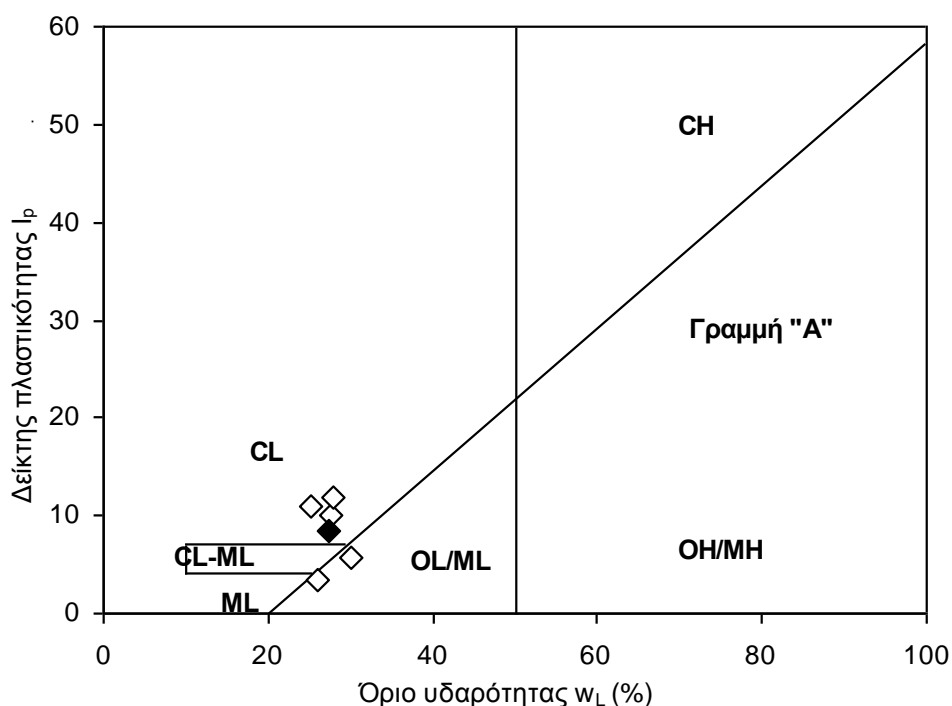




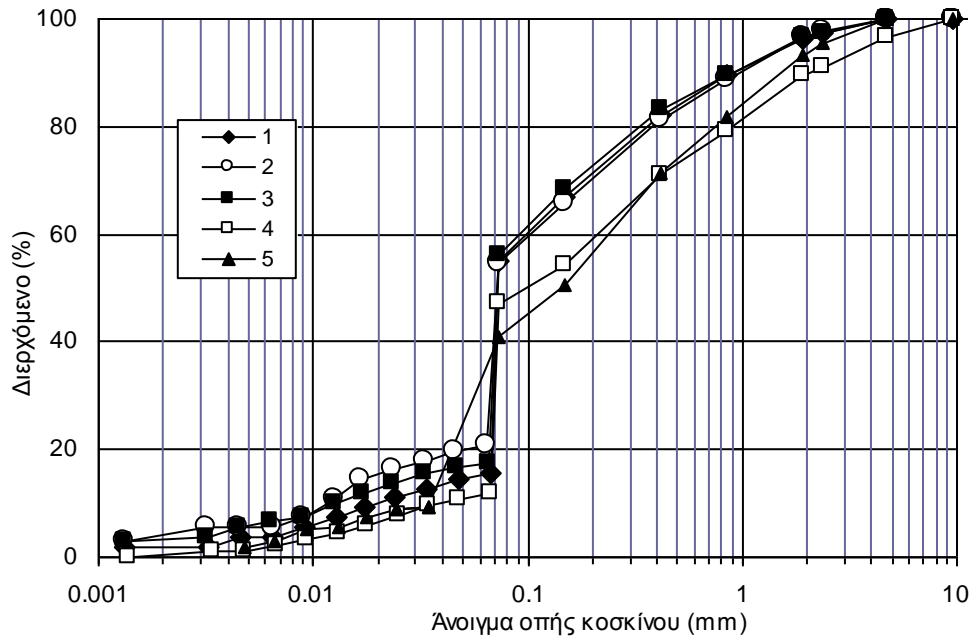
**Φωτογραφία 15.6.** Γενική άποψη του πρανούς εκσκαφής στο δεξιό αντέρεισμα του φράγματος Φερεκάμπου από όπου ελήφθη το δείγμα και κοντινή άποψη της θέσης δειγματοληψίας.

### 15.3.3 Φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού

Από την ποσότητα του υλικού που μεταφέρθηκε στο εργαστήριο επιλέχθηκαν 5 τυχαία δείγματα στα οποία έγιναν δοκιμές φυσικών χαρακτηριστικών. Το όριο υδαρότητας του υλικού ήταν κατά μέσο όρο 27.4% με τυπική απόκλιση 1.9%, ο δείκτης πλαστικότητας ήταν 8.4 με τυπική απόκλιση 3.7, το ειδικό βάρος στερεών 2.61 με τυπική απόκλιση 0.03, η περιεχόμενη άργιλος 2.1% με τυπική απόκλιση 1.3%, η περιεχόμενη ιλύς 48.5% με τυπική απόκλιση 5.8% και η περιεχόμενη άμμος 48.6% με τυπική απόκλιση 6.3%, ενώ σε όλα τα δείγματα υπήρχαν και ίχνη χαλίκων. Στο Σχ. 15.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande με τα πειραματικά σημεία και το μέσο όρο των αποτελεσμάτων και στο Σχ. 15.4 παρουσιάζονται οι καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης και για τα 5 δείγματα. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα το υλικό κατατάσσεται κατά USCS από SC έως CL με τις τιμές των μέσων όρων των φυσικών του χαρακτηριστικών να το κατατάσσουν ως CL. Με βάση το διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande τα δείγματα κατατάσσονται ως ML ή CL με τους μέσους όρους των ορίων Atterberg να κατατάσσουν το υλικό ως CL.



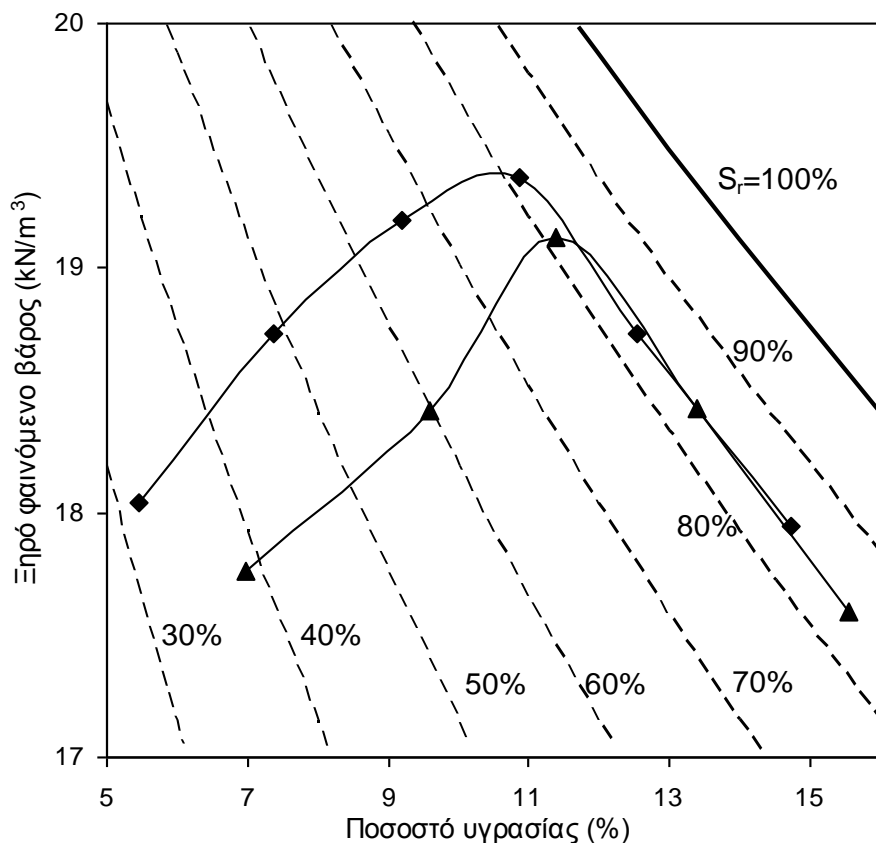
**Σχήμα 15.3.** Διάγραμμα πλαστικότητας Casagrande με τα πειραματικά σημεία και το μέσο όρο των αποτελεσμάτων για τον αποσαθρωμένο Σερπεντινίτη Σκύρου (σκούρο σημείο).



**Σχήμα 15.4.** Καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης και για τα 5 δείγματα στα οποία έγιναν δοκιμές προσδιορισμού φυσικών χαρακτηριστικών στον αποσαθρωμένο Σερπεντινίτη Σκύρου.

### 15.3.4 Χαρακτηριστικά συμπίκνωσης του υλικού

Εκτός από δοκιμές προσδιορισμού φυσικών χαρακτηριστικών, σε δύο δείγματα πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές συμπίκνωσης κατά Proctor με την πρότυπη ενέργεια συμπίκνωσης (standard Proctor test, ASTM D-698-07e1). Οι καμπύλες ξηρού φαινόμενου βάρους-υγρασίας συμπίκνωσης για τα δύο δείγματα παρουσιάζονται στο Σχ. 15.5. Από τις δοκιμές αυτές προέκυψε κατά μέσο όρο μέγιστο ξηρό φαινόμενο βάρος  $19.3 \text{ kN/m}^3$  και βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης 11.1%. Και τα δύο αυτά μεγέθη απείχαν πολύ λίγο στις δύο δοκιμές, αλλά είχαν σημαντική απόσταση μεταξύ τους οι κλάδοι των καμπυλών «ξηρά» από τη βέλτιστη υγρασία. Έτσι, από τις μορφές των καμπυλών ξηρού φαινόμενου βάρους-υγρασίας συμπίκνωσης προέκυψε ότι 95% του μέγιστου ξηρού φαινόμενου βάρους προκύπτει μέχρι και 2.5% «υγρά» από τη βέλτιστη υγρασία (με τις δύο καμπύλες να βρίσκονται πολύ κοντά), ενώ «ξηρά» από τη βέλτιστη, η διασπορά των καμπυλών είναι τέτοια που αυτό το ξηρό φαινόμενο βάρος μπορεί να προκύπτει (ανάλογα με την καμπύλη) από 4% έως 1.5% «ξηρά» από την βέλτιστη υγρασία. Οι επιπτώσεις αυτής της διαφοροποίησης στα χαρακτηριστικά συμπίκνωσης του υλικού συζητώνται και στην επόμενη παράγραφο.



**Σχήμα 15.5.** Καμπύλες ξηρού φαινόμενου βάρους-υγρασίας συμπίκνωσης για τα δύο δείγματα του αποσαθρωμένου Σερπεντινίτη Σκύρου από τις δοκιμές συμπίκνωσης Proctor με την πρότυπη ενέργεια (Standard Proctor Test).

Στο Σχ. 15.5 έχουν προστεθεί και οι καμπύλες σταθερού βαθμού κορεσμού (για το μέσο ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών του υλικού), από τις οποίες προκύπτει, ότι –τουλάχιστον για το εύρος του ποσοστού υγρασίας που συνεχίστηκαν οι δοκιμές συμπίκνωσης μετά την επίτευξη μέγιστης τιμής- δεν υπάρχει στο συγκεκριμένο υλικό τάση σύμπτωσης των καμπυλών ξηρού φαινόμενου βάρους-υγρασίας με την καμπύλη πλήρους κορεσμού.

Οι δοκιμές συμπίκνωσης έγιναν σε αυτόματο κόπανο εντός μικρού μεγέθους μητρών κατά τα προβλεπόμενα για την κοκκομετρική διαβάθμιση του συγκεκριμένου υλικού στο πρότυπο της ASTM D-698-07e1.

## **15.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΟ ΠΟΣΟΣΤΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΒΡΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΤΑΣΕΙΣ**

### **15.4.1 Γενικά**

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που υιοθετήθηκε και τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν τα οποία και συζητώνται.

### **15.4.2 Πειραματική διαδικασία**

Για την εκτέλεση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια δυναμικά συμπτυκνωμένα στον ίδιο αυτόματο κόπανο που πραγματοποιήθηκαν και οι δοκιμές προσδιορισμού των καμπυλών ξηρού φαινόμενου βάρους-υγρασίας. Πριν από την προετοιμασία των δοκιμών, όλο το υλικό ξεράθηκε σε φούρνο σταθερής θερμοκρασίας 105 °C και περάστηκε από το κόσκινο Νο 4. Μετά από την συμπτύκνωσή τους, τα δείγματα εξάγονταν από τις μήτρες συμπτύκνωσης μέσω υδραυλικού εξολκέα και τα δοκίμια στα οποία επρόκειτο να γίνουν δοκιμές αποκόπτονταν προσεκτικά από τα συμπτυκνωμένα δείγματα με αργή διείσδυση των χειλιών του δακτυλίου των κυψελών των συμπιεσομέτρων και κοπή του υπόλοιπου δείγματος περιμετρικά με μαχαίρι, όπως ακριβώς μορφώθηκαν και τα αδιατάρακτα δείγματα για τις δοκιμές σε φυσικά υλικά που αναφέρθηκαν ήδη στο Κεφ. 13.

Για την αξιολόγηση της ποιότητας των δοκιμών που μορφώθηκαν, αυτά ελέγχοντο πάντα οπτικά αμέσως μετά την ολοκλήρωση κάθε δοκιμής και την εξαγωγή του δοκιμίου από τον δακτύλιο για την παρουσία τυχόν κενών επί της περιφέρειας του δοκιμίου, όπως μπορεί πράγματι να συμβεί σε δυναμικά συμπτυκνωμένα δοκίμια εάν πράγματι ο δακτύλιος κοπής δεν έχει προωθηθεί πολύ αργά μέσα στο δείγμα. Εάν παρατηρούντο τέτοια κενά στο τέλος της δοκιμής μετά την εξαγωγή του δοκιμίου από το δακτύλιο, τα αποτελέσματα σε αυτό το δοκίμιο απορρίπτοντο και η συγκεκριμένη δοκιμή επαναλαμβανόταν μέχρι η ποιότητα του παρασκευασθέντος δοκιμίου να προέκυπτε τέτοιου επιπέδου που δεν υπήρχαν καθόλου ή μόνο ασήμαντου μεγέθους κενά στην περιφέρεια του δοκιμίου. Στις Φωτ. 15.7α και 15.7β παρουσιάζονται αντίστοιχα ένα δοκίμιο που απορρίφθηκε λόγω του μεγέθους των κενών του και ένα δοκίμιο χωρίς κενά στην περιφέρειά του.



(α)



(β)

**Φωτογραφία 15.7.** α) Δοκίμιο (ένα διαμέτρου 63.5mm στην προκειμένη περίπτωση) που απορρίφθηκε λόγω μεγάλων κενών στην περιφέρειά του (επισημαίνονται με διακεκομμένες μαύρες γραμμές), και β) δοκίμιο που έγινε αποδεκτό λόγω αμελητέων μακρο-κενών στην περιφέρειά του (ένα διαμέτρου 50mm στην προκειμένη περίπτωση).

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε κρίθηκε απαραίτητη προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή των συμπυκνωμένων δειγμάτων ο ίδιος αυτόματος συμπυκνωτής που χρησιμοποιήθηκε και στις δοκιμές Proctor. Εάν χρησιμοποιείτο στατική συμπίκνωση αντί για δυναμική για την παρασκευή των δοκιμίων στη ζητούμενη υγρασία και με

τη ζητούμενη πυκνότητα, αυτές καθεαυτές οι συνθήκες συμπύκνωσης των δειγμάτων για την εκτέλεση των δοκιμών προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών δεν θα ήταν ίδιες με τις συνθήκες συμπύκνωσης κατά τη δοκιμή Proctor για τον προσδιορισμό της βέλτιστης υγρασίας και της μέγιστης πυκνότητας. Απορρίφθηκε επίσης η χειροκίνητη δυναμική συμπύκνωση του υλικού εντός των κυψελών των συμπιεσομέτρων αφού μια τέτοια διαδικασία κρίθηκε ότι δεν θα εξασφάλιζε ομοιογένεια από δοκίμιο σε δοκίμιο είτε ως προς την υγρασία είτε ως προς την πυκνότητα (ούτε βέβαια και πάλι αντιστοιχία με τη δοκιμή Proctor με αυτόματο κόπανο). Παρά το πρόβλημα με τα κενά στην περιφέρεια των δοκιμών που αποκόπτονταν από τα δείγματα που είχαν συμπυκνωθεί στον αυτόματο κόπανο, το οποίο δημιουργεί την απαίτηση για την επανάληψη αρκετών δοκιμών (στη σειρά των πειραμάτων που εκτελέστηκαν και παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο, επαναλήφθηκαν περίπου το 30% των δοκιμών), κρίνεται ότι η διαδικασία παρασκευής δοκιμών που υιοθετήθηκε εξασφάλισε τη μέγιστη δυνατή ομοιογένεια μεταξύ δοκιμών και κυρίως την καλύτερη δυνατή συμβατότητα με τα χαρακτηριστικά συμπύκνωσης που προσδιορίστηκαν στη δοκιμή Proctor. Μία κρίσιμη λεπτομέρεια είναι ότι οι τομείς των συμπυκνωμένων δειγμάτων που χρησιμοποιούνται δεν πρέπει να περιέχουν τις διεπιφάνειες μεταξύ διαφορετικών στρώσεων που συμπυκνώθηκαν μέσα στη μήτρα. Ακόμα και αν γίνει χαράκωση (scarification, βλ. πρότυπο ASTM D-698-07e1) της επιφάνειας κάθε συμπυκνωμένης στρώσης μέσα στη μήτρα πριν τοποθετηθεί το υλικό της επόμενης στρώσης (όπως άλλωστε προβλέπεται από το πρότυπο ASTM D-698-07e1, ειδικά όταν το παρασκευαζόμενο δείγμα προορίζεται να χρησιμοποιηθεί σε δοκιμή προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών), είναι γενικά πολύ δύσκολο να μορφωθεί δοκίμιο από το τμήμα του δείγματος που περιέχει τη διεπιφάνεια μεταξύ διαδοχικών στρώσεων χωρίς να δημιουργηθούν σημαντικού μεγέθους κενά στην περιφέρειά του. Από την άλλη πλευρά βέβαια, πρέπει να τονιστεί ότι η διαδικασία ελέγχου των δοκιμών κατέστη δυνατή επειδή το συγκεκριμένο υλικό στο οποίο έγινε αυτή η σειρά δοκιμών δεν είναι τόσο συμπιεστό ακόμα και μέχρι τις πολύ μεγάλες τάσεις που εφαρμόστηκαν. Αν το υλικό καθεαυτό ήταν πιο συμπιεστό, ή το συγκεκριμένο υλικό είχε μικρότερη πυκνότητα, η οποία θα επέτρεπε μεγαλύτερη συμπίεση, τότε η μέθοδος αυτή δε θα μπορούσε να υιοθετηθεί.

Μόλις παρασκευαζόταν κάθε δοκίμιο τοποθετείτο εντός της κυψέλης του συμπιεσομέτρου. Και ο κάτω και ο πάνω πορόλιθος της κυψέλης ήταν απολύτως ξηροί πριν τοποθετηθούν σε επαφή με το δοκίμιο εντός της κυψέλης. Εάν χρησιμοποιούντο πλήρως κορεσμένοι πορόλιθοι (όπως όταν εκτελείται μία συμβατική δοκιμή συμπιεσομέτρου), τότε μέρος της διόγκωσης ή συρρίκνωσης λόγω διαβροχής θα άρχιζε να συμβαίνει πριν την ολοκλήρωση της

συναρμολόγησης της κυψέλης και της εφαρμογής του ζητούμενου φορτίου ως αποτέλεσμα της προσρόφησης μέρους της απαιτούμενης υγρασίας από τους υγρούς πορολίθους, ειδικά μάλιστα στην περίπτωση των δοκιμίων με το χαμηλότερο ποσοστό υγρασίας. Από την άλλη πλευρά, η ξήρανση των δοκιμίων λόγω της επαφής τους με τους τελείως ξηρούς πορολίθους θεωρήθηκε πολύ μικρής πιθανότητας, αφού οι πορολίθοι των συμπιεσομέτρων είναι αρκετά χονδρόκοκκοι και άρα έχουν αρκετά μεγάλο μέγεθος πόρων (αφού πρέπει να είναι όσο πιο διαπερατοί γίνεται για να μην δυσχεραίνουν την αποτόνωση των υπερπίεσεων πόρων στα δοκίμια κατά τη στερεοποίησή τους) ώστε εντός αυτών να μπορούν να αναπτυχθούν σημαντικού μεγέθους τριχοειδείς δυνάμεις για να απορροφήσουν νερό από τα δοκίμια. Εάν από την άλλη πλευρά το υλικό στο οποίο γινόταν η δοκιμή ήταν σημαντικά πιο χονδρόκοκκο από το σερπεντινίτη, τότε η επαφή υλικού-ξηρών πορολίθων θα μπορούσε να είχε δημιουργήσει πρόβλημα αλλοίωσης της υγρασίας του δοκιμίου.

Μόλις τα δοκίμια τοποθετούντο στις κυψέλες και αυτές επί των συμπιεσομέτρων, το άνοιγμα των κυψελών καλυπτόταν με διαφανή μεμβράνη επιμελώς έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια υγρασίας που θα μπορούσε να συμβεί διά του άνω πορολίθου των συσκευών προς την ατμόσφαιρα. Ακόμα και έτσι, εκτιμάται ότι κάποια απώλεια υγρασίας σίγουρα συνέβη, καθώς η μεμβράνη είναι σχεδόν βέβαιο ότι δεν έκλεινε απολύτως αεροστεγώς το άνοιγμα των κυψελών. Σε κάθε περίπτωση μία μικρή διόρθωση στην υγρασία συμπύκνωσης επιδιωκόταν για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο αυτό, το οποίο όμως εκτιμάται ότι επηρέασε όλα τα δοκίμια με τον ίδιο τρόπο και γι' αυτό μπορεί να αγνοηθεί τουλάχιστον κατά τη σύγκριση της παρατηρηθείσας συμπεριφοράς μεταξύ ομάδων δειγμάτων διαφορετικής υγρασίας.

Σε ό,τι αφορά αυτή καθεαυτή τη μονοδιάστατη συμπίεση των δοκιμίων, η σειρά αυτή των δοκιμών έγινε σε αυτόματα, πνευματικά ελεγχόμενης πίεσης συμπιεσόμετρα, μέγιστης εφαρμοζόμενης δύναμης 15 kN (Φωτ. 15.8) κατασκευής VJTech, με κυψέλες δακτυλίων χωρίς δυνατότητα κίνησης ως προς τον κάτω πορολίθο, και δακτυλίους λείας εσωτερικής επιφάνειας η οποία λιπαινόταν επιμελώς πριν την μόρφωση κάθε δοκιμίου προς υλοποίηση των συνθηκών μονοδιάστατης συμπίεσης σε όλο τον όγκο του δοκιμίου. Οι διαθέσιμοι δακτύλιοι είχαν εσωτερική διάμετρο 63.5mm και 50mm με ύψος 20mm. Για τη μέτρηση των μεταβολών ύψους χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακά μηκυσιόμετρα ακρίβειας 0.001mm και με οπτική ανάγνωση των ενδείξεων και με ηλεκτρονική καταγραφή τους, ενώ χάρη στον πνευματικό έλεγχο της πίεσης στα συμπιεσόμετρα είναι δυνατός ο προγραμματισμός του συνόλου της δοκιμής χωρίς να απαιτείται η φυσική παρουσία του χειριστή για την αύξηση ή μείωση των φορτίων. Η



απαιτούμενη πίεση αέρα εξασφαλίζεται από κεντρικό αεροσυμπιεστή μόνιμα σε λειτουργία στο εύρος παρεχόμενης πίεσης 8-10 Bar (παράγει ξηρό αέρα), ενώ η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα συμπιεσόμετρα, το καταγραφικό και τον ηλεκτρονικό υπολογιστή ελέγχου των δοκιμών γίνεται από δίκτυο αδιάλειπτης διορθούμενης ηλεκτρικής τάσης χάρη σε κεντρικό UPS και γεννήτρια. Η μέγιστη τάση με τους δακτυλίους της μεγάλης διαμέτρου στα συγκεκριμένα συμπιεσόμετρα έφτανε τα 4.74 MPa και με τους δακτυλίους της μικρής διαμέτρου τα 7.64 MPa.



**Φωτογραφία 15.8.** Αυτόματο πνευματικά ελεγχόμενης πίεσης συμπιεσόμετρο μέγιστης εφαρμοζόμενης δύναμης 15 kN κατασκευής VJTech του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.

Δοκιμές συμμόρφωσης λόγω της φόρτισης των συμπιεσομέτρων εκτελέστηκαν σε όλα τα συμπιεσόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε συνδυασμό συμπιεσομέτρου και κυψέλης και της ακριβούς αλληλουχίας φορτίσεων κάθε δοκιμής, προκειμένου να μπορούν να γίνουν διορθώσεις των μετρούμενων μεταβολών ύψους των δοκιμών λόγω της παραμόρφωσης των ίδιων των συσκευών και των κυψελών. Η σημασία των δοκιμών αυτών έχει ήδη τονιστεί και στο κεφάλαιο αυτό και στο Κεφ. 13 και δεν αναλύεται περαιτέρω (Μπαρδάνης & Γρίφιζα, 2012).

Εκτός όμως από τις τυπικές δοκιμές συμμόρφωσης για τη διόρθωση των μετρήσεων που καταγράφονται λόγω φόρτισης, πραγματοποιήθηκαν και ειδικές δοκιμές συμμόρφωσης για τη διερεύνηση της επιρροής της διαβροχής των αρχικώς ξηρών πορολίθων. Όπως ακριβώς στην περίπτωση της φόρτισης, που από μία δοκιμή συμμόρφωσης προκύπτει πόση από την καταγραφόμενη μεταβολή ύψους σε μία κανονική δοκιμή οφείλεται στην παραμόρφωση της συσκευής και πόση στην παραμόρφωση του δοκιμίου, έτσι και οι ειδικές αυτές δοκιμές συμμόρφωσης προορίζονταν να επιδείξουν πόση από την καταγραφόμενη μεταβολή ύψους κατά τη διαβροχή ενός δοκιμίου υπό δεδομένη τάση οφείλεται στην παραμόρφωση των αρχικώς ξηρών πορολίθων και πόση στη διόγκωση ή τη συρρίκνωση του υλικού του δοκιμίου. Έτσι τοποθετούντο κυψέλες συμπιεσομέτρου στις συσκευές οι οποίες περιείχαν χαλύβδινα δοκίμια της ίδιας διαμέτρου με την εσωτερική διάμετρο των δακτυλίων και τελείως ξηρούς πορολίθους, όπως και στην περίπτωση των κανονικών δοκιμών προσδιορισμού διόγκωσης/κατάρρευσης στα δοκίμια του εδαφικού υλικού, γινόταν η φόρτιση μέχρι τη ζητούμενη τάση και στη συνέχεια η διαβροχή με πλήρωση της κυψέλης με νερό. Από τις τρεις πρώτες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε ότι ακόμα και για τη διαβροχή υπό τη μέγιστη τάση (7.64 MPa) η μείωση του ύψους των δοκιμών που καταγραφόταν ήταν μικρότερη από 0.002mm, ενώ στις χαμηλές τάσεις ήταν προφανώς μικρότερη από 0.0005mm αφού τα μηκυνσιόμετρα των συμπιεσομέτρων είχαν ακρίβεια 0.001mm και δεν έδειξαν καμμία ένδειξη. Δεδομένου ότι αυτού του είδους οι δοκιμές συμμόρφωσης παίρνουν πολύ μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για να υλοποιηθούν (αφού μετά από κάθε πλήρωση της κυψέλης σε κάθε φορτίο, το συμπιεσόμετρο πρέπει να αποφορτιστεί, η κυψέλη να αποσυναρμολογηθεί και οι πορόλιθοι να ξεραθούν και πάλι πλήρως, πριν να μπορεί να γίνει και πάλι η ίδια δοκιμή για το επόμενο φορτίο στο ίδιο συμπιεσόμετρο), αυτά τα αποτελέσματα θεωρήθηκαν αρκετά και αποφασίστηκε ότι η επιρροή της διαβροχής των πορολίθων στα συγκεκριμένα συμπιεσόμετρα ήταν αμελητέα ακόμα και για τις μέγιστες τάσεις και δε θα λαμβανόταν υπόψη. Γενικά ωστόσο συνιστάται να εκτελούνται τέτοιες δοκιμές στο συγκεκριμένο εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε κάθε εργαστήριο για το ενδεχόμενο η παραμόρφωση των πορολίθων λόγω διαβροχής να είναι σημαντική. Άλλωστε τα

συμπιεσόμετρα που έγιναν αυτές οι δοκιμές ήταν ολοκαίνουργια υψηλής ποιότητας. Σε παλαιότερες, πιο φθαρμένες συσκευές ή μικρότερης ποιότητας δεν είναι απαραίτητο ότι θα προέκυπταν κατ' ανάγκη τα ίδια αποτελέσματα.

Τρεις τύποι δειγμάτων παρασκευάστηκαν: σε υγρασία 2.5% «υγρά» από την βέλτιστη (δηλ. 13.6%), στην βέλτιστη υγρασία (11.1%) και 2.5% «ξηρά» από την βέλτιστη (δηλ. 8.6%). Για κάθε υγρασία γινόταν αποδεκτή απόκλιση  $\pm 0.25\%$  από την υγρασία-στόχο. Σε ό,τι αφορά το επιτυγχανόμενο ξηρό φαινόμενο βάρος, έπρεπε να είναι τουλάχιστον 95% του μέγιστου από την δοκιμή Proctor δηλ.  $18.3 \text{ kN/m}^3$ . Λόγω της απόκλισης των μετρηθεισών καμπυλών ξηρού φαινόμενου βάρους-ποσοστού υγρασίας στον κλάδο πιο «ξηρά» από τη βέλτιστη υγρασία, σε δείγματα που παρασκευάζονταν «ξηρά» από τη βέλτιστη υγρασία υπήρχαν κάποια προβλήματα ανομοιογένειας. Δείγματα που δεν πληρούσαν τους προαναφερθέντες όρους απλά απορρίπτονταν και παρασκευάζονταν καινούργια στην θέση τους.

Για κάθε μία από τις τρεις υγρασίες συμπίκνωσης που προαναφέρθηκαν, μία δοκιμή εκτελείτο με χρονικούς διαχωρισμούς 24h. Αυτή ήταν εκείνη στην οποία η διαβροχή του δοκιμίου γινόταν μόνο με το φορτίο του σκεπάσματος της κυψέλης. Σε όλες τις υπόλοιπες δοκιμές για κάθε υγρασία συμπίκνωσης το φορτίο αυξανόταν μόλις ολοκληρωνόταν η πρωτεύουσα στερεοποίηση του υλικού (συν ένα ασφαλές περιθώριο). Γενικά αυτός ο χρόνος κυμαινόταν από 4 έως 8 ώρες ανάλογα με το φορτίο και την υγρασία συμπίκνωσης. Η χρήση αυτόματων πνευματικών συμπιεσομέτρων επέτρεψε τον προγραμματισμό μίας τέτοιας χρονικής αλληλουχίας φορτίσεων, η οποία μπορούσε να συνεχίζει και κατά τη διάρκεια της νύχτας με τον ίδιο χρονικό διαχωρισμό μεταξύ φορτίων χωρίς να απαιτείται η φυσική παρουσία του χειριστή. Αυτή η μείωση των χρονικών διαχωρισμών μεταξύ διαδοχικών φορτίων κρίθηκε απαραίτητη προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι θα είχε προκληθεί η ελάχιστη δυνατή απώλεια υγρασίας λόγω εξάτμισης διά της μεμβράνης μέχρι να φτάσει το δοκίμιο την τάση υπό την οποία θα γινόταν η διαβροχή. Μόνο το τελευταίο φορτίο στο οποίο θα γινόταν η διαβροχή αφηνόταν ολόκληρη τη νύχτα μέχρι την επόμενη ημέρα για να εξασφαλιστεί ότι κατά τη διαβροχή δε θα είχαν απομείνει καθόλου υπερπιέσεις πόρων μέσα στο δοκίμιο.

Με την ολοκλήρωση της φόρτισης μέχρι την ζητούμενη τάση για να γίνει η διαβροχή, αφαιρείτο η μεμβράνη από το άνοιγμα της κυψέλης και προστίθετο απαερωμένο, απιονισμένο νερό εντός 10-15 sec από την αφαίρεση της μεμβράνης και άρχιζε να καταγράφεται η παρατηρούμενη μεταβολή του ύψους του δοκιμίου. Νερό προστίθετο στην κυψέλη μέχρι να καλυφθεί πλήρως

και το δοκίμιο και ο πάνω πορόλιθος. Δεδομένου ότι οι δοκιμές συμμόρφωσης για τη διαβροχή έδειξαν αμελητέα παραμόρφωση λόγω διαβροχής των τελείως ξηρών πορολιθών, η διόγκωση ή συρρίκνωση λόγω διαβροχής του δοκιμίου λαμβανόταν ως η διαφορά της αρχικής ένδειξης του μηκυνσιομέτρου πριν την διαβροχή από την ένδειξή του μετά από 24 ώρες. Η παραμόρφωση λόγω διαβροχής λαμβανόταν ως ο λόγος της μεταβολής του ύψους λόγω διαβροχής προς το ύψος του δοκιμίου αμέσως πριν την διαβροχή (διορθωμένο για την παραμόρφωση της συσκευής μέχρι το φορτίο αυτό). Μέρος της καταγραφόμενης μεταβολής του ύψους του δοκιμίου κατά την διάρκεια των 24 ωρών που παρακολουθείτο η επιρροή της διαβροχής ενδέχεται να οφειλόταν σε παραμόρφωση λόγω ερπυσμού, αλλά για διάρκεια παρακολούθησης μόνο 24 ώρες, αυτό το ποσοστό θεωρήθηκε αμελητέο (εξαιρουμένων των περιπτώσεων που αναφέρονται στην §15.4.5). Μετά από τις 24 ώρες που παρακολουθείτο η διαβροχή, τα δοκίμια αποφορτιζόνταν μέχρι μηδενικής τάσης σε βήματα διπλάσια αυτών της φόρτισης και στη συνέχεια εξάγονταν από τις κυψέλες για οπτική επιθεώρηση της περιφέρειάς τους για κενά όπως προαναφέρθηκε, ζύγιση και υπολογισμό του ποσοστού υγρασίας τους. Σε αυτό το στάδιο της έρευνας δεν διερευνήθηκε η περαιτέρω φόρτιση των δοκιμίων μετά την ολοκλήρωση της διαβροχής υπό δεδομένη τάση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στην §15.4.5.

### **15.4.3 Μετρήσεις αρχικής μύζησης αμέσως μετά τη συμπίκνωση**

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δοκιμών προσδιορισμού διόγκωσης/κατάρρευσης για διάφορες τιμές της τάσης παρουσιάζονται οι μετρήσεις μύζησης που έγιναν στα συμπυκνωμένα δείγματα αμέσως μετά τη συμπίκνωσή τους. Για όλες τις υγρασίες συμπίκνωσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και της μύζησης εδαφικού σκελετού με εργαστηριακά τενσιόμετρα (Φωτ. 15.9) καθώς και της ολικής μύζησης με υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου. Στο υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου πραγματοποιούνται μετρήσεις με πρότυπα διαλύματα KCl συγκέντρωσης 0.2M πριν από κάθε μέτρηση σε δείγματα εδαφικού υλικού. Μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πολλά δείγματα και σε πολλές θέσεις καθενός (προκειμένου για τα τενσιόμετρα) από τις οποίες μετά την αφαίρεση του οργάνου λαμβάνοντο δείγματα για τη μέτρηση της ολικής μύζησης στο υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου. Στον Πιν. 15.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σχετικών μετρήσεων.

Όπως αναμενόταν, η αρχική μύζηση εδαφικού σκελετού αμέσως μετά τη συμπίκνωση αυξάνεται με τη μείωση του ποσοστού υγρασίας κατά τη συμπίκνωση με παρόμοια αλλά όχι

ακριβώς την ίδια τάση και για την ολική μύζηση. Γενικά η ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης (οριζόμενη ως η διαφορά μεταξύ μύζησης εδαφικού σκελετού και ολικής μύζησης) θα αναμενόταν να είναι η ίδια, ανεξάρτητα από την υγρασία συμπύκνωσης αφού αποτελεί χαρακτηριστικό του υλικού<sup>5</sup>. Από την άλλη πλευρά, η μέτρηση της ολικής μύζησης παραμένει λεπτεπίλεπτη διαδικασία ακόμα και όταν χρησιμοποιείται υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου. Επίσης, για δείγματα με υγρασία συμπύκνωσης στη βέλτιστη και «υγρά» από αυτήν, το εργαστηριακό τενσιόμετρο αποκρίθηκε πολύ γρήγορα και διατήρησε μία σταθερή τιμή της μύζησης εδαφικού σκελετού για αρκετές ώρες, υποδεικνύοντας έτσι ορθή μέτρηση με το όργανο αυτό. Αντίθετα, για δείγματα συμπυκνωμένα σε υγρασία «ξηρά» από τη βέλτιστη το τενσιόμετρο αποκρίθηκε γρήγορα αρχικά, αλλά στη συνέχεια με πιο αργό ρυθμό καταλήγοντας σε μία σταθερή τιμή μετά από 24 ώρες. Αυτός ο πολύ μεγάλος χρόνος εξισορρόπησης και η ίδια η αρκετά υψηλή τιμή (για κοινό εργαστηριακό τενσιόμετρο) της μύζησης εδαφικού σκελετού που μετρήθηκε υποδεικνύουν ότι η πραγματική τιμή της μύζησης εδαφικού σκελετού για αυτήν την υγρασία είναι ενδεχομένως υψηλότερη από τη μετρηθείσα. Κάτι τέτοιο θα μείωνε τη διαφορά της μύζησης εδαφικού σκελετού από την ολική μύζηση για αυτήν την υγρασία φέρνοντας την τιμή της εκτιμώμενης συνιστώσας της μύζησης εδαφικού σκελετού πιο κοντά στις τιμές που εκτιμήθηκαν για τη βέλτιστη υγρασία και την υγρασία «υγρά» από αυτήν. Σε κάθε περίπτωση για το υλικό αυτό προκύπτει (για τη χρήση απαερωμένου απιονισμένου νερού που έγινε στο εργαστήριο) ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης μεταξύ 200 και 300 kPa περίπου, η οποία και πάλι αποτελεί αρκετά ακριβή εκτίμηση για την ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης οποιουδήποτε εδαφικού υλικού.

Η σημασία των μετρήσεων της μύζησης των συμπυκνωμένων δειγμάτων αμέσως μετά τη συμπύκνωσή τους που παρουσιάστηκε ως εδώ εξηγείται στην §15.4.5.

**Πίνακας 15.1.** Μύζηση αμέσως μετά την συμπύκνωση.

Υγρασία συμπύκνωσης	Μύζηση εδαφικού σκελετού (kPa)	Ολική μύζηση (kPa)	Ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης (kPa)
«Ξηρά» από την βέλτιστη	69±2	384±46	314±47
Στην βέλτιστη	30±5	234±27	205±25
«Υγρά» από την βέλτιστη	12±2	239±30	227±31

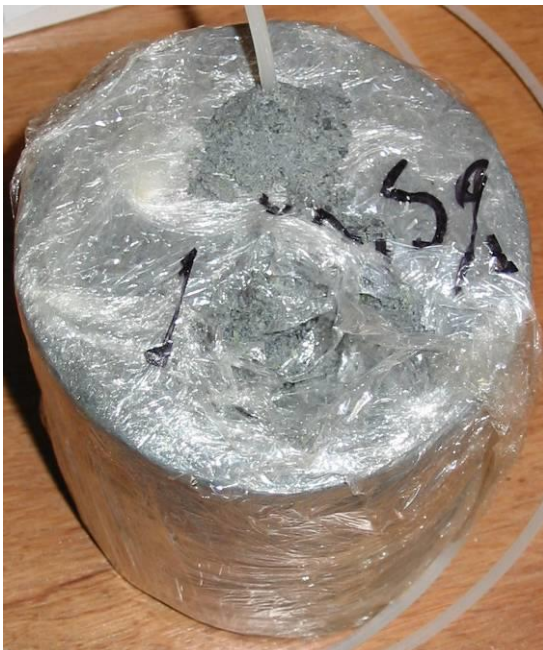
<sup>5</sup> Και του νερού των πόρων, αλλά αυτό ήταν σε όλη την εργαστηριακή διερεύνηση το ίδιο, οπότε δεν υπεισέρχεται η επιρροή του στα παρατηρούμενα φαινόμενα.



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(στ)

**Φωτογραφία 15.9.** α) Γενική διάταξη του εργαστηριακού тенσιομέτρου του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. για την μέτρηση της μύζησης εδαφικού σκελετού, β) κοντινή άποψη του μανομέτρου μέτρησης της μύζησης (η ένδειξη είναι από την μέτρηση της μύζησης σε συμπυκνωμένο δείγμα αποσαθρωμένου σερπεντινίτη με υγρασία «υγρά» από την βέλτιστη), γ) τοποθετημένο το πορώδες άκρο του тенσιομέτρου στην πάνω πλευρά του δείγματος με δείγμα σερπεντινίτη γύρω από την οπή εισόδου του πορώδους άκρου για να μην υπάρχει απώλεια υγρασίας, δ) το χαρτί που τοποθετείται γύρω από αυτό το δείγμα και υγραίνεται περιοδικά για να δυσχεραίνεται ακόμα περισσότερο η ξήρανση από την οπή εισαγωγής του πορώδους άκρου, ε) τοποθετημένο το πορώδες άκρο του тенσιομέτρου στην περιφέρεια του συμπυκνωμένου δείγματος με το χαρτί για την περιοδική διαβροχή της περιοχής, και στ) η πίσω πλευρά του πορώδους άκρου που έχει τοποθετηθεί εντός του δείγματος. Προφανώς κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο συμπυκνωμένο δείγμα, αυτό παραμένει επιμελώς τυλιγμένο με μεμβράνη για να αποτρέπεται η απώλεια υγρασίας.

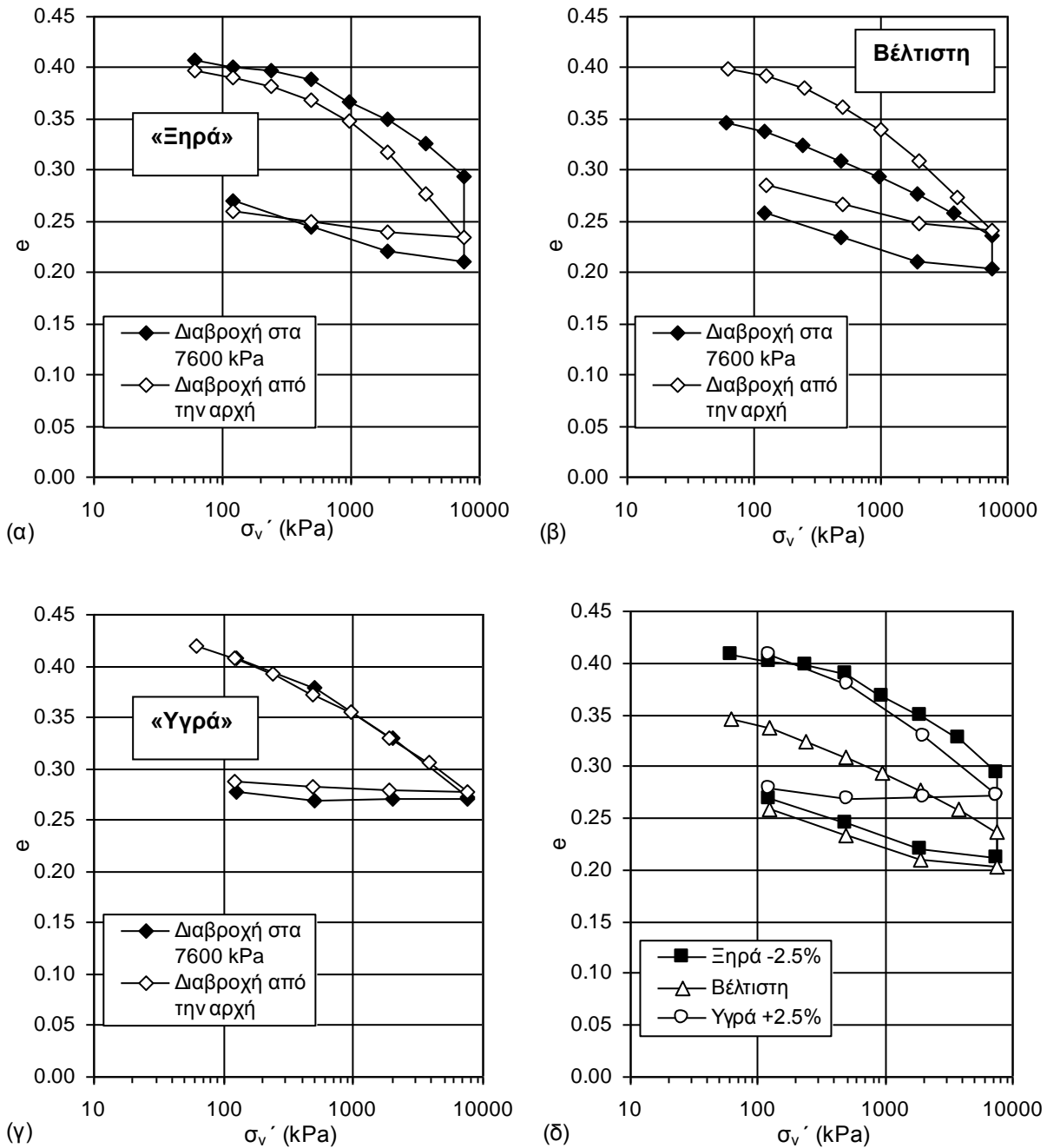
#### 15.4.4 Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης

Η πρώτη ομάδα δοκιμών προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών που πραγματοποιήθηκε, ήταν δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι κατακόρυφη τάση 7600 kPa (Σχ. 15.6). Οι δοκιμές έγιναν σε κυψέλες με δακτυλίους διαμέτρου 50mm. Σε όλα τα συμπιεσόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν, προηγήθηκαν δοκιμές συμμόρφωσης επί χαλύβδινων δοκιμίων της ίδιας διαμέτρου με την εσωτερική διάμετρο των δακτυλίων. Εκτός από τις συμβατικές δοκιμές που έγιναν με διαβροχή των δοκιμίων από την αρχή (όπως γίνεται στις συνήθεις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης), πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές σταθερού ποσοστού υγρασίας μέχρι τη μέγιστη κατακόρυφη τάση, κατά τις οποίες η διαβροχή έγινε αφού ολοκληρώθηκε η στερεοποίηση υπό τη μέγιστη κατακόρυφη τάση. Στο Σχ. 15.6 παρουσιάζονται οι καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης και για τα δύο είδη δοκιμών ανά υγρασία συμπίκνωσης (Σχ. 15.6α «ξηρά» από τη βέλτιστη, Σχ. 15.6β στην βέλτιστη, και Σχ. 15.6γ «υγρά» από τη βέλτιστη) και για όλες τις υγρασίες συμπίκνωσης μαζί (Σχ. 15.6δ, μόνο οι δοκιμές με διαβροχή στα 7600 kPa). Όπως προκύπτει από τα Σχ. 15.6α, 15.6β και 15.6γ, σε όλες τις υγρασίες συμπίκνωσης το δοκίμιο στο οποίο έγινε διαβροχή από την αρχή ήταν πιο συμπιεστό από το δοκίμιο που συμπίεστηκε υπό σταθερό ποσοστό υγρασίας, με τη διαφορά να είναι μεγαλύτερη για υγρασία συμπίκνωσης «ξηρά» από την βέλτιστη και τη βέλτιστη και μικρότερη για υγρασία συμπίκνωσης «υγρά» από την βέλτιστη (η διαφορά είναι μικρότερη της ακρίβειας αναφοράς του δείκτη συμπίεσης για την υγρασία «υγρά» από τη βέλτιστη). Οι τιμές του δείκτη συμπίεσης παρουσιάζονται στον Πιν. 15.2. Επίσης η μεταβολή του λόγου κενών κατά την διαβροχή στην τάση των 7600 kPa ήταν τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερη ήταν η υγρασία συμπίκνωσης του προετοιμασμένου δοκιμίου (βλ. συγκριτικά το Σχ. 15.6δ). Το φαινόμενο αυτό επεξηγείται αναλυτικά στην επόμενη παράγραφο όπου παρουσιάζεται και η σχετική πειραματική διερεύνηση της εξέλιξης της μεταβολής όγκου λόγω διαβροχής για διάφορες τιμές της κατακόρυφης τάσης.

**Πίνακας 15.2.** Δείκτης συμπίεσης για όλες τις συνθήκες συμπίκνωσης και διαβροχής.

Υγρασία συμπίκνωσης	Δείκτης συμπίεσης	
	Διαβροχή εξ αρχής	Διαβροχή στα 7600 kPa
«Ξηρά» από τη βέλτιστη	0.14	0.09
Στη βέλτιστη	0.12	0.07
«Υγρά» από τη βέλτιστη	0.09	0.09





**Σχήμα 15.6.** Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης σε αποσαθρωμένο σερπεντινίτη με διαβροχή εξ αρχής ή στα 7600 kPa για υγρασία συμπίκνωσης: α) «ξηρά» από την βέλτιστη, β) στην βέλτιστη, γ) «υγρά» από την βέλτιστη, και δ) όλες μαζί οι δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης για όλες τις υγρασίες συμπίκνωσης μόνο για διαβροχή στα 7600 kPa.

### 15.4.5 Μεταβολές όγκου κατά την ύγρανση υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης

Εκτός από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης της §15.4.4 έγιναν και δοκιμές με διαβροχή σε διάφορες τιμές της κατακόρυφης τάσης προκειμένου να διερευνηθεί η εξέλιξη της παραμόρφωσης λόγω διαβροχής με την τάση. Στο Σχ. 15.7 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών.

Για υγρασίες συμπύκνωσης 2.5% ξηρά από τη βέλτιστη, η θλιπτική παραμόρφωση κατά την ύγρανση αρχίζει να αυξάνεται ραγδαία από την κατακόρυφη τάση των 250 kPa και μετά, ενώ σταθεροποιείται από τα 4000 kPa και μετά. Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση έφτασε το 6.4%. Μηδενική παραμόρφωση παρατηρήθηκε στην τάση των 125 kPa. Για τάσεις μικρότερες από αυτήν παρουσιάστηκε διόγκωση με μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης (κατ' απόλυτη τιμή) 0.19% για την ελάχιστη εφαρμοσθείσα τάση των 8 kPa.

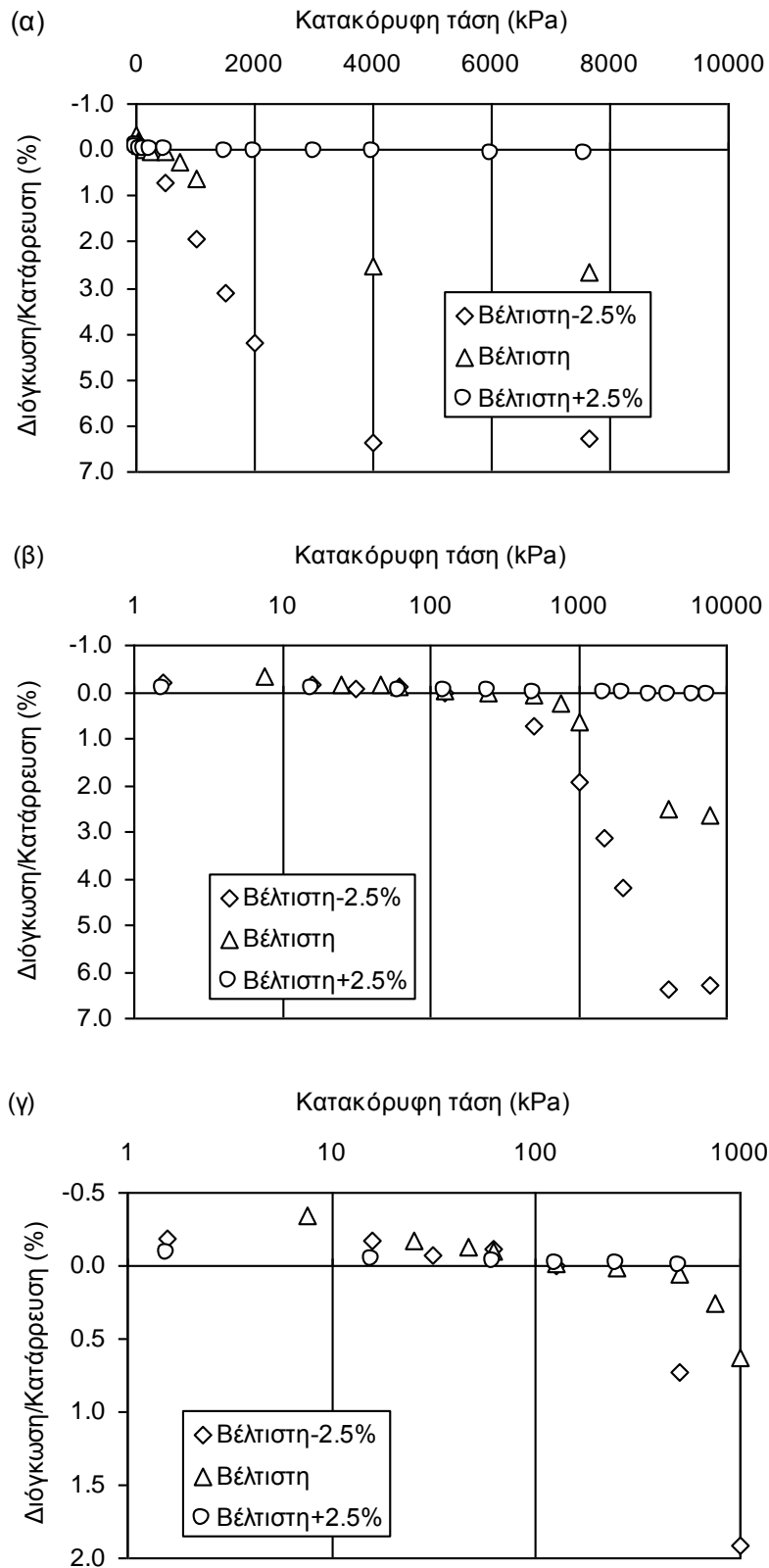
Για υγρασίες συμπύκνωσης στη βέλτιστη οι παρατηρήσεις ήταν αντίστοιχες, με τη θλιπτική παραμόρφωση κατά την ύγρανση να αρχίζει να αυξάνεται ραγδαία μεν αλλά λιγότερο από την προηγούμενη περίπτωση από την κατακόρυφη τάση μεταξύ 500 και 750 kPa και μετά, και να σταθεροποιείται όπως και πριν από τα 4000 kPa και μετά. Η μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση έφτασε το 2.7%. Μηδενική παραμόρφωση παρατηρήθηκε στην τάση των 225 kPa. Για τάσεις μικρότερες από αυτήν παρουσιάστηκε διόγκωση με μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης (κατ' απόλυτη τιμή) 0.34% για την ελάχιστη εφαρμοσθείσα τάση των 8 kPa.

Τέλος, για υγρασίες συμπύκνωσης υγρά από τη βέλτιστη η θλιπτική παραμόρφωση κατά την ύγρανση που μετρήθηκε ακόμα και κατά τη διαβροχή στην κατακόρυφη τάση των 7600 kPa ήταν πρακτικά αμελητέα. Σε αυτήν τη συγκεκριμένη περίπτωση θα μπορούσε να επιχειρηματολογήσει κανείς ότι στην πραγματικότητα δεν υπήρξε συρρίκνωση λόγω διαβροχής αλλά ότι οι παρατηρηθείσες παραμορφώσεις είναι απλώς η δευτερεύουσα στερεοποίηση που συνεχίστηκε για τις 24h που μετρούντο οι παραμορφώσεις λόγω διαβροχής μετά τη διαβροχή (ειδικά μάλιστα προκειμένου για τις πολύ μεγάλες τάσεις). Ανεξάρτητα από αυτό, μηδενική μεταβολή όγκου κατά τη διαβροχή παρατηρήθηκε στην τάση των 500 kPa. Για χαμηλότερες τιμές της τάσης παρατηρήθηκε διόγκωση με μέγιστη τιμή (κατ' απόλυτη τιμή) 0.09% για την ελάχιστη εφαρμοσθείσα τάση των 8 kPa.

Αν η πίεση διόγκωσης οριστεί ως η τάση σε ένα δοκίμιο κατά την οποία δεν παρατηρείται καμιά μεταβολή όγκου όταν πραγματοποιείται διαβροχή του δοκιμίου (αφού έχει παρέλθει επαρκής χρόνος για να ολοκληρωθούν οι παραμορφώσεις λόγω επιβολής της τάσης αυτής), τότε οι τιμές που αντιστοιχούν στο υλικό αυτό για κάθε υγρασία συμπίκνωσης είναι 125 kPa, 225 kPa και 500 kPa αντίστοιχα για «ξηρά» από τη βέλτιστη, τη βέλτιστη και «υγρά» από αυτήν. Δεδομένης της υψηλότερης πυκνότητας για συμπίκνωση στη βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης η υψηλότερη τιμή της τάσης διόγκωσης από εκείνη για την υγρασία συμπίκνωσης «ξηρά» από τη βέλτιστη είναι λογική παρά τον χαμηλότερο βαθμό κορεσμού και την υψηλότερη αρχική τιμή της μύζησης των δοκιμίων αυτών. Αντίθετα η αρκετά υψηλότερη τιμή της τάσης διόγκωσης για την υγρασία συμπίκνωσης «υγρά» από τη βέλτιστη μοιάζει να μην έχει φυσικό νόημα. Εάν ληφθεί υπόψη το μέγεθος των παραμορφώσεων πριν και μετά από αυτήν την τιμή της τάσης διόγκωσης μπορεί να υποτεθεί εύλογα ότι μέχρι αυτή την τάση το δοκίμιο έχει ήδη κορεστεί και κατά συνέπεια η διόγκωση που παρατηρείται για τάσεις μικρότερες από αυτή την «πίεση διόγκωσης» δεν είναι αυτές που αντιστοιχούν στις μεταβολές του βαθμού κορεσμού και της μύζησης ενός αρχικά μη κορεσμένου εδάφους αλλά στην –ελάχιστη έστω, αλλά υπαρκτή- διογκωσιμότητα κάποιων εκ των περιεχόμενων αργιλικών ορυκτών ακόμα και όταν το εδαφικό υλικό είναι αρχικά πλήρως κορεσμένο, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι έχει αρκετά μεγάλη πυκνότητα (Katti, et al., 2002).

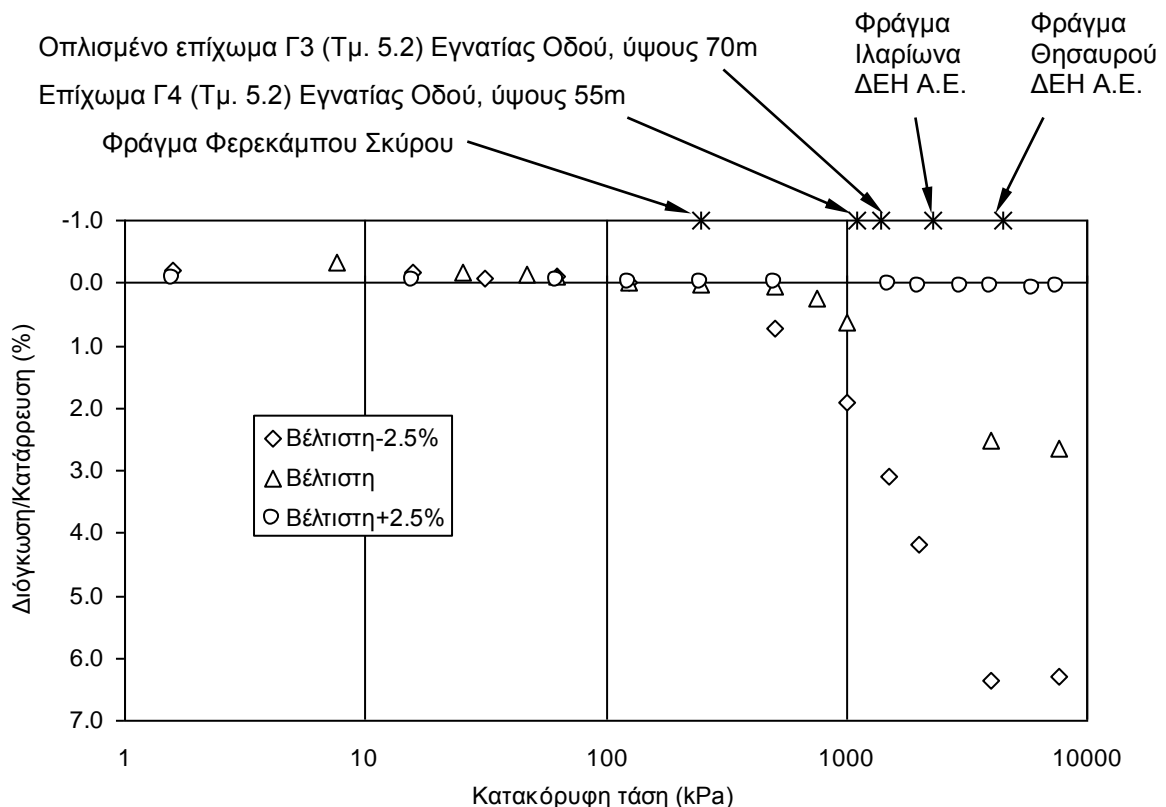
Οι μετρήσεις της μύζησης άλλωστε που παρουσιάστηκαν στην §15.4.3 ενδέχεται να εξηγούν εν μέρει τις προσδιορισθείσες τιμές της πίεσης διόγκωσης. Μύζηση μόλις 12 kPa για τα συμπεκνωμένα δοκίμια «υγρά» από τη βέλτιστη υγρασία μπορεί να θεωρηθεί λογικό ότι πράγματι εξελίχθηκε κατά τη συμπίεση μέχρι μέτριες έως μεγάλες τιμές της τάσης, και άρα πιθανότατα η εξήγηση για τη μεγαλύτερη τιμή της πίεσης διόγκωσης σε αυτήν την υγρασία που δόθηκε προηγουμένως να είναι λογική. Άλλωστε σε κάθε περίπτωση, στις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης με διαβροχή εξαρχής σε δείγματα συμπεκνωμένα σε αυτήν την υγρασία δεν παρατηρήθηκε καμιά διόγκωση ακόμα και για τη μικρότερη εφαρμοσθείσα τάση (όπως εξηγήθηκε στην §15.2.2, η πίεση διόγκωσης που μετρείται με αυτή την μέθοδο είναι συστηματικά λαθασμένη και μάλιστα μεγαλύτερη από αυτήν που μετρείται με τη μέθοδο της διαβροχής σε διάφορες τάσεις).

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα από τις δοκιμές αυτές, προκύπτει ότι προκειμένου για υγρασίες συμπίκνωσης στη βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης και «ξηρά» από αυτήν η παρατηρούμενη συρρίκνωση του υλικού λόγω διαβροχής είναι πολύ μεγάλη και μάλιστα αρχίζει να παρατηρείται από τιμές της κατακόρυφης τάσης που αναπτύσσονται σε μεγάλα αλλά ακόμα και συνήθη τεχνι-



**Σχήμα 15.7.** Παραμόρφωση λόγω διαβροχής με την κατακόρυφη τάση για κάθε μια από τις υγρασίες συμπίκνωσης με την κατακόρυφη τάση σε α) γραμμική κλίμακα, β) λογαριθμική κλίμακα, και γ) λογαριθμική κλίμακα αλλά στο εύρος 1-1000 kPa.

κα έργα. Η συρρίκνωση αυτή μάλιστα αρχίζει να σταθεροποιείται στη μέγιστη τιμή της μόνο για πολύ μεγάλη τιμή της τάσης (4 MPa), η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη των τάσεων που αναπτύσσονται στα περισσότερα έργα. Η παρατήρηση έχει σημασία για την καταστατική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών αφού πράγματι μετρήθηκε σταθεροποίηση της συρρίκνωσης των υλικών λόγω διαβροχής από μία τιμή της τάσης και μετά (εν αντιθέσει με τις συνέπειες των καταστατικών εξισώσεων στο προσομοίωμα των Alonso, et al., 1990), αλλά –τουλάχιστον για το συγκεκριμένο υλικό- το εύρος τιμών της κατακόρυφης τάσης εντός του οποίου είναι δυνατόν να συμβούν πολύ μεγάλες παραμορφώσεις λόγω συρρίκνωσης είναι πολύ μεγάλο ξεκινώντας από μέτριες τιμές της τάσης μέχρι πολύ μεγάλες. Στο Σχ. 15.8 παρουσιάζεται το Σχ. 15.7β ξανά με επισήμανση των μέγιστων τιμών τάσης που αντιστοιχούν σε ορισμένα τεχνικά έργα διαφόρων ειδών που έχουν κατασκευαστεί στον ελληνικό χώρο. Τονίζεται ότι δεν υπονοείται ότι τέτοιου μεγέθους θα έπρεπε να είναι οι τιμές της συρρίκνωσης των εδαφικών υλικών σε αυτά τα έργα, αλλά δίνεται η αίσθηση της τάσης στην οποία αντιστοιχούν οι τιμές της τάσης στις οποίες μετρήθηκαν αυτές οι συρρικνώσεις σε αυτό το πρόγραμμα δοκιμών.



**Σχήμα 15.8.** Παραμόρφωση λόγω διαβροχής με την κατακόρυφη τάση για κάθε μια από τις υγρασίες συμπίκνωσης με την κατακόρυφη τάση σε λογαριθμική κλίμακα, με επισήμανση της τιμής της τάσης που αντιστοιχεί σε διάφορα έργα από τον ελληνικό χώρο.

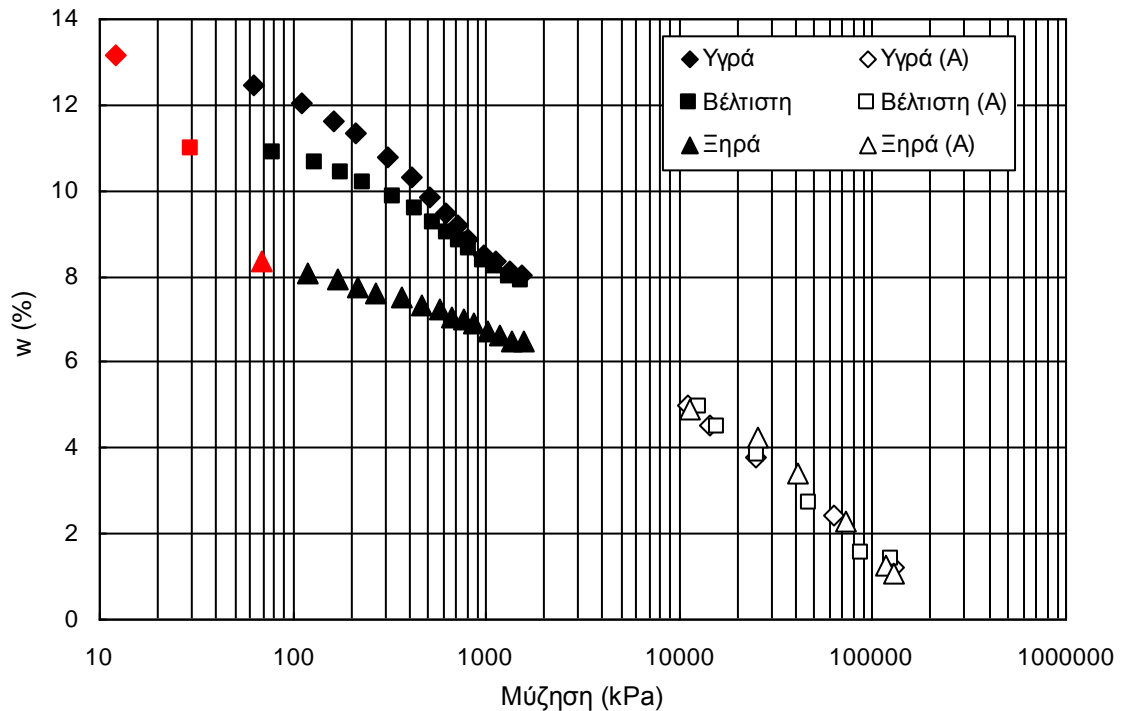
## 15.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ

### 15.5.1 Αποσαθρωμένος σερπεντινίτης

Εκτός από τις προηγούμενες κατηγορίες εργαστηριακών δοκιμών πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές προσδιορισμού των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού για κάθε υγρασία συμπίκνωσης. Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες μέθοδοι ελέγχου της μύζησης που υιοθετήθηκαν και για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων καμπυλών που παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 14 (για μοναδικό δοκίμιο υποκείμενο στη διαδρομή ξήρανσης εντός του θαλάμου μύζησης και διαφορετικά δοκίμια στους θαλάμους των υδατικών διαλυμάτων αλάτων). Στο Σχ. 15.9 παρουσιάζονται οι κλάδοι ξήρανσης των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού του υλικού συμπυκνωμένου στις τρεις επιλεχθείσες υγρασίες (το «Α» συμβολίζει τιμές μύζησης ρυθμισμένες με υδατικά διαλύματα αλάτων). Στο σχήμα αυτό επισημαίνεται με κόκκινο χρώμα η αρχική κατάσταση των δοκιμίων για κάθε μία από τις υγρασίες συμπίκνωσης. Αυτό γίνεται γιατί η ιδιαιτερότητα των συμπυκνωμένων υλικών είναι μεταξύ άλλων, ότι ξεκινούν από μία αρχική κατάσταση στην οποία έχουν ήδη μύζηση και άρα κάθε επόμενη τιμή της μύζησης που ασκείται προστίθεται σε αυτή που έχουν ήδη, ειδικά για τη μέθοδο μετατόπισης άξονα. Αντίθετα, στη μέθοδο ελέγχου της μύζησης με υδατικά διαλύματα η αρχική κατάσταση μεταπίπτει στη νέα που καθορίζεται από τη σχετική υγρασία που δημιουργεί το υδατικό διάλυμα, οπότε η επιτυγχάνομενη νέα τιμή της μύζησης είναι αυτή που δημιούργησε το διάλυμα. Δεν διακρίνεται με ακρίβεια μία τιμή της μύζησης στην οποία έχει γίνει αποκορεσμός<sup>6</sup> (εξάιρεση αποτελούν ίσως το δείγμα που συμπυκνώθηκε υγρά από τη βέλτιστη υγρασία και το δείγμα που συμπυκνώθηκε στη βέλτιστη που παρουσιάζεται ένα σημείο καμπής περί τα 100 kPa μύζησης), ενώ εξίσου αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι δεν παρατηρείται δεύτερο σημείο καμπής, δηλωτικό του προσδιορισμού του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας του υλικού για κάθε υγρασία συμπίκνωσης. Η διαφορά των καμπυλών για κάθε υγρασία συμπίκνωσης συνεχίζεται σε όλο το εύρος τιμών της μύζησης. Αξιοσημείωτη είναι επίσης η ανάγκη για χρήση στο μέλλον μίας μεθόδου ελέγχου της μύζησης, ικανής να καλύψει το κενό μεταξύ τιμών που ελέγχει η μέθοδος μετατόπισης άξονα και των τιμών που ελέγχει η μέθοδος κορεσμένων υδατικών διαλυμάτων αλάτων.

---

<sup>6</sup> Το οποίο άλλωστε δεν ήταν και απαραίτητο να συμβεί δεδομένου ότι τα υλικά είχαν αρχικά μία μύζηση, άρα υπάρχει το ενδεχόμενο να ήταν εξαρχής μη κορεσμένα (ειδικά για υγρασία συμπίκνωσης «ξηρά» από τη μέγιστη που η μύζηση εδαφικού σκελετού ήταν μέγιστη).



**Σχήμα 15.9.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού συμπυκνωμένου σερπεντινίτη για τις τρεις υγρασίες συμπύκνωσης σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνεται η αρχική κατάσταση των δοκιμίων για κάθε μία από τις υγρασίες συμπύκνωσης.

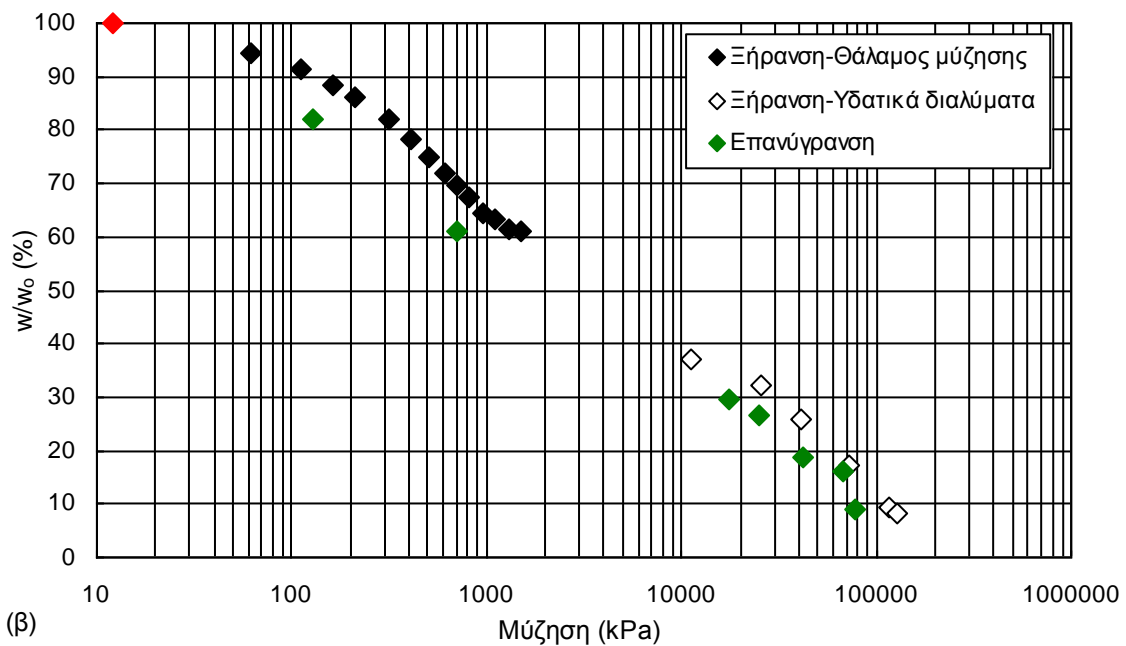
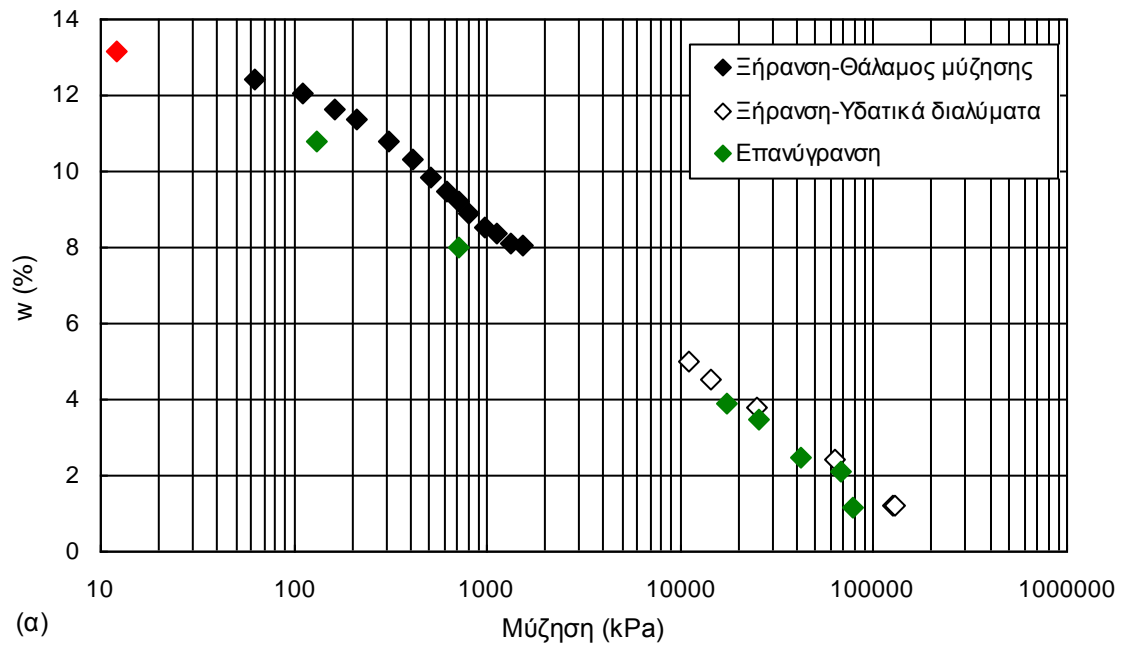
Στα πλαίσια των δοκιμών αυτών, εκτός από τους κλάδους ξήρανσης των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού έγινε προσπάθεια να προσδιοριστούν και οι κλάδοι επανύγρυνσης μετά από ξήρανση των υλικών. Δείγματα του υλικού συμπυκνωμένου σε κάθε μία από τις υγρασίες συμπύκνωσης που επιλέχθηκαν, αφέθηκαν για ξήρανση στον ατμοσφαιρικό αέρα του εργαστηρίου και μετά από εξισορρόπηση του συνολικού τους βάρους, τμήματά τους τοποθετήθηκαν στα 4 υδατικά διαλύματα μικρότερης μύζησης -BaCl<sub>2</sub>, KCl, NaCl και Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>- καθώς και σε δοχεία που σφραγίστηκαν αεροστεγώς μετά από προσθήκη νερού στα δοκίμια. Όλα αυτά τα δοκίμια αφέθηκαν επαρκές χρονικό διάστημα για να υπάρξει υδραυλική ισορροπία εκ νέου και στη συνέχεια μετρήθηκε η ολική τους μύζηση στο υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου και το ποσοστό υγρασίας τους. Ειδικά τα δοκίμια που τοποθετήθηκαν σε δοχεία μετά από προσθήκη νερού σφραγίστηκαν αεροστεγώς με μεμβράνη και αφέθηκαν σε σκοτεινό μέρος για 7 ημέρες. Στα Σχ. 15.10 έως 15.12 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού του υλικού για υγρασία συμπύκνωσης «υγρά» από τη βέλτιστη υγρασία, στη βέλτιστη υγρασία και «ξηρά» από τη βέλτιστη υγρασία αντίστοιχα και με τον κλάδο ξήρανσης και με τον

κλάδο επανύγρανσης. Τα σημεία που αντιστοιχούν στους κλάδους επανύγρανσης είναι πολύ πιο λίγα από αυτά των κλάδων ξήρανσης για να προκύψει σαφής εικόνα για τη μορφή της καμπύλης αυτών των κλάδων. Προκύπτουν όμως ενδιαφέροντα συμπεράσματα σε ό,τι αφορά την υστέρηση μεταξύ κλάδων ξήρανσης και επανύγρανσης καθώς και για την υγρασία στην οποία μπορεί να επανυγρανθεί ένα συμπυκνωμένο εδαφικό υλικό υψηλής πυκνότητας και χαμηλής υγρασίας συμπύκνωσης. Στο Σχ. 15.10 που παρουσιάζεται η καμπύλη του δείγματος που η υγρασία συμπύκνωσής του βρισκόταν «υγρά» από τη βέλτιστη φαίνεται ότι υπάρχει υστέρηση μεταξύ κλάδου ξήρανσης και επανύγρανσης, ενώ το ποσοστό υγρασίας επί του κλάδου επανύγρανσης ακόμα και για τη μικρότερη τιμή της μύζησης κατά μήκος του είναι μικρότερο του ποσοστού υγρασίας επί του κλάδου ξήρανσης για την ίδια μύζηση. Στο Σχ. 15.11 που παρουσιάζεται η καμπύλη του δείγματος που η υγρασία συμπύκνωσής του βρισκόταν στη βέλτιστη φαίνεται ότι υπάρχει υστέρηση μεταξύ κλάδου ξήρανσης και επανύγρανσης στο τμήμα των καμπυλών που αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές της μύζησης, αλλά για τις μικρότερες, το ποσοστό υγρασίας επί του κλάδου επανύγρανσης είναι μεγαλύτερο του ποσοστού υγρασίας επί του κλάδου ξήρανσης για την ίδια μύζηση, φτάνοντας ακόμα και στο 112% της υγρασίας συμπύκνωσης του δείγματος για την ελάχιστη τιμή της μύζησης που υλοποιήθηκε (134 kPa) όπως προκύπτει από το Σχ. 15.11β. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στο Σχ. 15.12 που παρουσιάζεται η καμπύλη του δείγματος που η υγρασία συμπύκνωσής του βρισκόταν «ξηρά» από τη βέλτιστη και φαίνεται ότι η υστέρηση μεταξύ κλάδου ξήρανσης και επανύγρανσης περιορίζεται μόνο στο τμήμα των καμπυλών που αντιστοιχούν σε πολύ μεγάλες τιμές της μύζησης, αλλά για τις μικρότερες το ποσοστό υγρασίας επί του κλάδου επανύγρανσης είναι και πάλι μεγαλύτερο του ποσοστού υγρασίας επί του κλάδου ξήρανσης για την ίδια μύζηση και μάλιστα πολύ, φτάνοντας ακόμα και στο 143% της υγρασίας συμπύκνωσης του δείγματος για την ελάχιστη τιμή της μύζησης που υλοποιήθηκε (230 kPa) όπως προκύπτει από το Σχ. 15.12β. Από τα πειραματικά αυτά αποτελέσματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

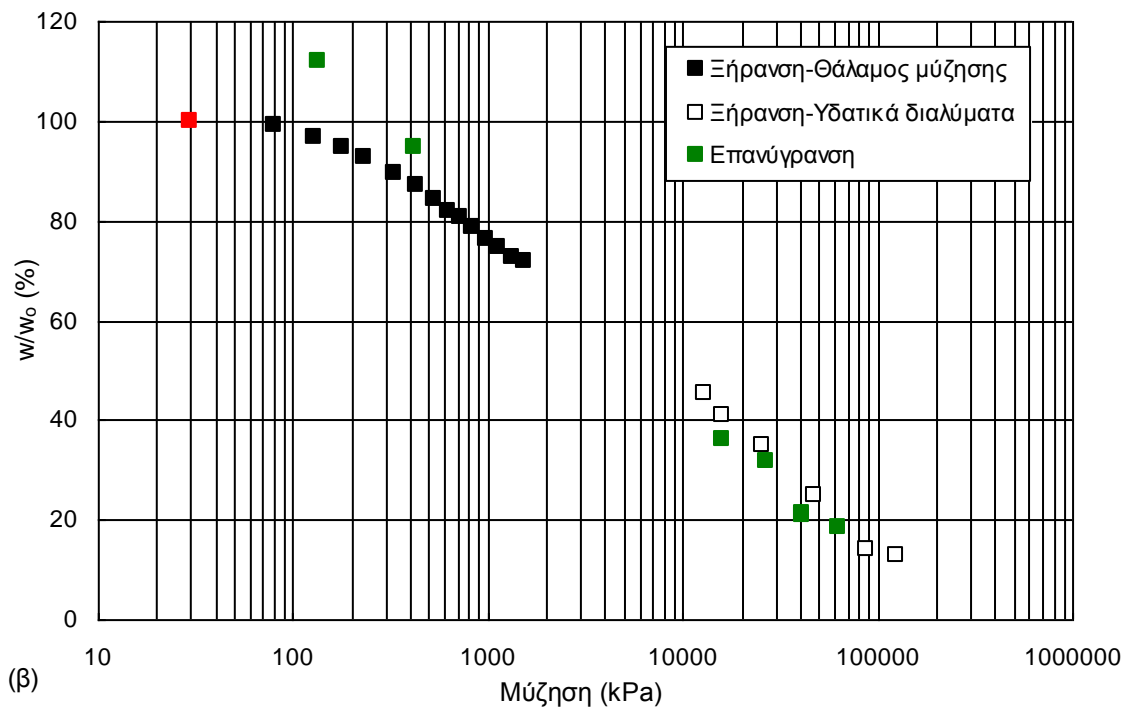
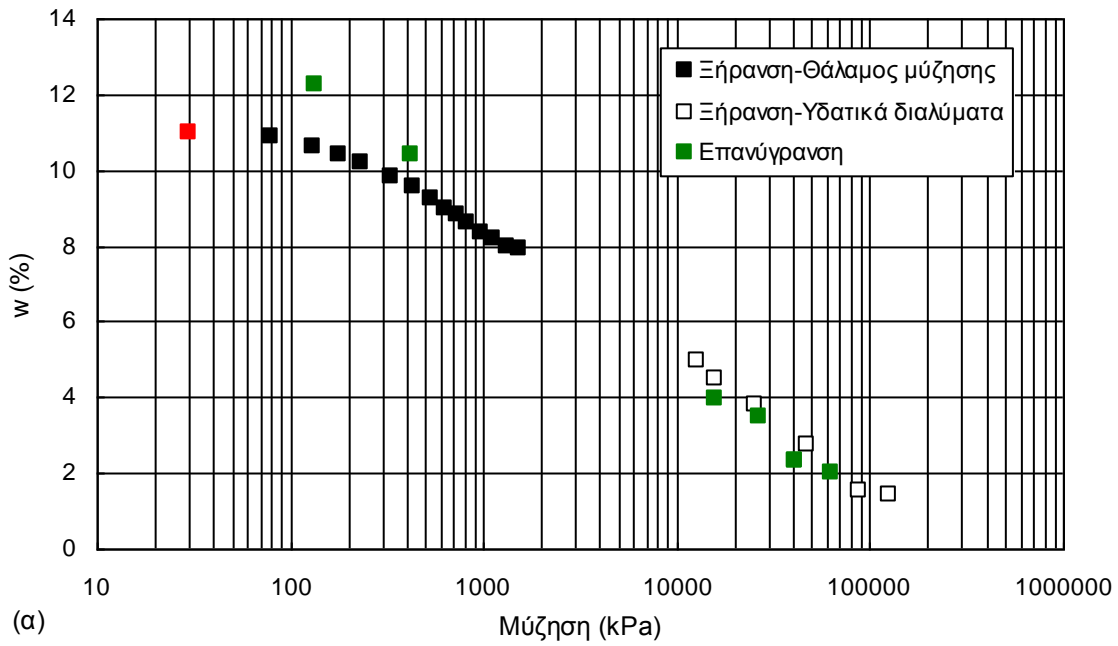
- Μείωση της υγρασίας συμπύκνωσης «ξηρά» από τη βέλτιστη οδηγεί σε μεγαλύτερη αρχική μύζηση αμέσως μετά τη συμπύκνωση σε σχέση με υγρασία συμπύκνωσης στη βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης και «υγρά» από αυτήν.
- Οι κλάδοι επανύγρανσης για όλες τις υγρασίες συμπύκνωσης παρουσιάζουν υστέρηση ως προς τους κλάδους ξήρανσης, αλλά τόσο το μέγεθος της υστέρησης αυτής (μετρούμενο ως η απόσταση των κλάδων επανύγρανσης από τους κλάδους ξήρανσης κατά μήκος του άξονα του ποσοστού υγρασίας) όσο και το εύρος τιμών της μύζησης στο οποίο παρατηρείται μειώνονται με τη μείωση της υγρασίας συμπύκνωσης.



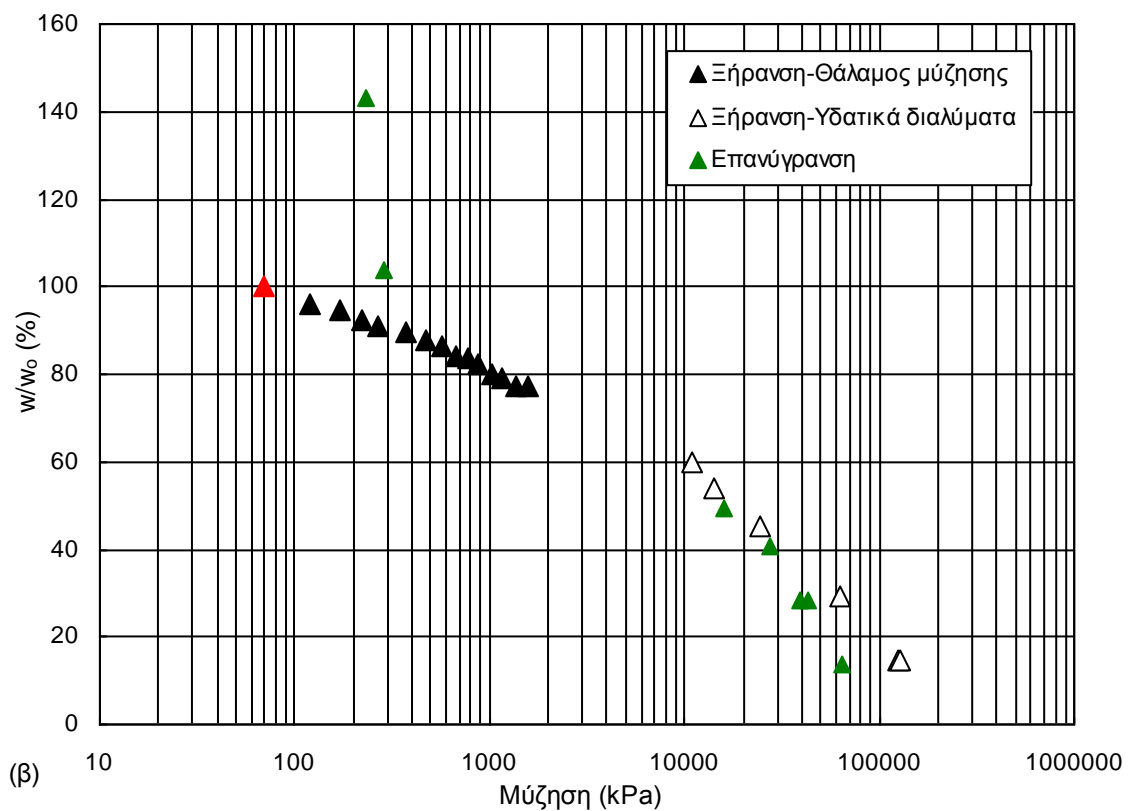
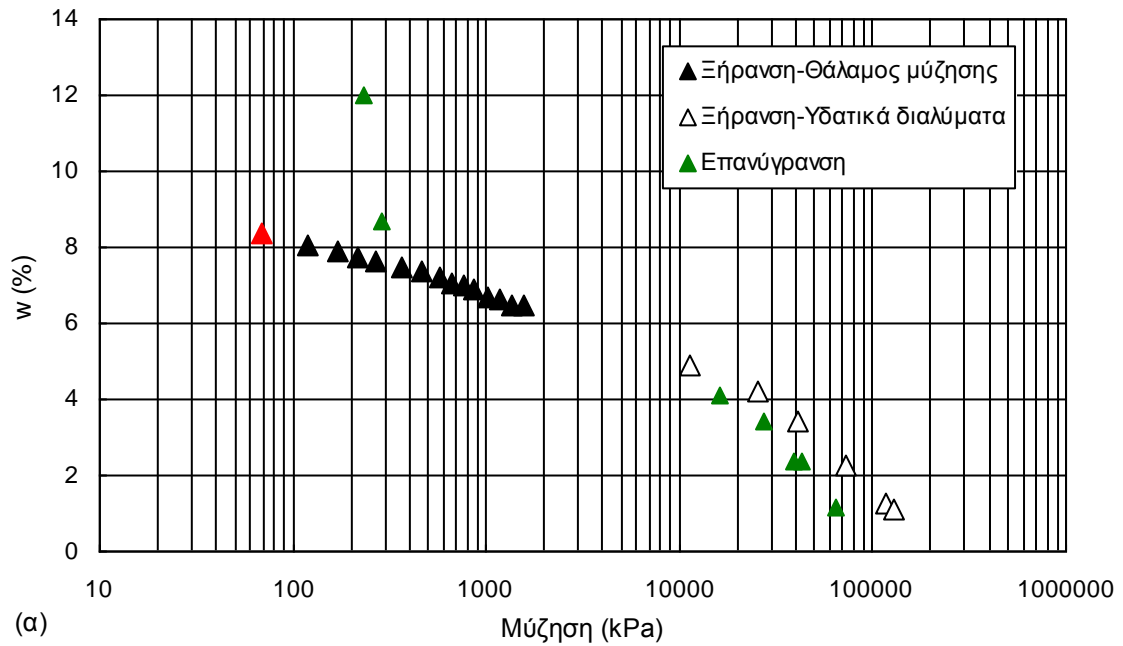
- Για υγρασία συμπίκνωσης «ξηρά» από τη βέλτιστη και ακόμα και στη βέλτιστη υγρασία κατά την επανύγρανση μέχρι μικρές τιμές της μύζησης το υλικό μπορεί να αποκτήσει ποσοστά υγρασίας μεγαλύτερα ακόμα και από την υγρασία συμπίκνωσης.



**Σχήμα 15.10.** Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού συμπυκνωμένου σερπεντινίτη για υγρασία συμπίκνωσης **υγρά από τη βέλτιστη υγρασία** (κλάδος ξήρανσης και κλάδος επανύγρανσης) σε όρους α) ποσοστού υγρασίας-μύζησης, και β) κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας-μύζησης. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνεται η αρχική κατάσταση των δοκιμίων για την υγρασία συμπίκνωσής τους.



**Σχήμα 15.11.** Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού συμπυκνωμένου σερπεντινίτη για υγρασία συμπίκνωσης **στη βέλτιστη υγρασία** (κλάδος ξήρανσης και κλάδος επανύγρανσης) σε όρους α) ποσοστού υγρασίας-μύζησης, και β) κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας-μύζησης. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνεται η αρχική κατάσταση των δοκιμίων για την υγρασία συμπίκνωσής τους.



**Σχήμα 15.12.** Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού συμπυκνωμένου σερπεντινίτη για υγρασία συμπύκνωσης **ξηρά από τη βέλτιστη υγρασία** (κλάδος ξήρανσης και κλάδος επανύγρυνσης) σε όρους α) ποσοστού υγρασίας-μύζησης, και β) κανονικοποιημένου ποσοστού υγρασίας-μύζησης. Με κόκκινο χρώμα επισημαίνεται η αρχική κατάσταση των δοκιμίων για την υγρασία συμπύκνωσής τους.

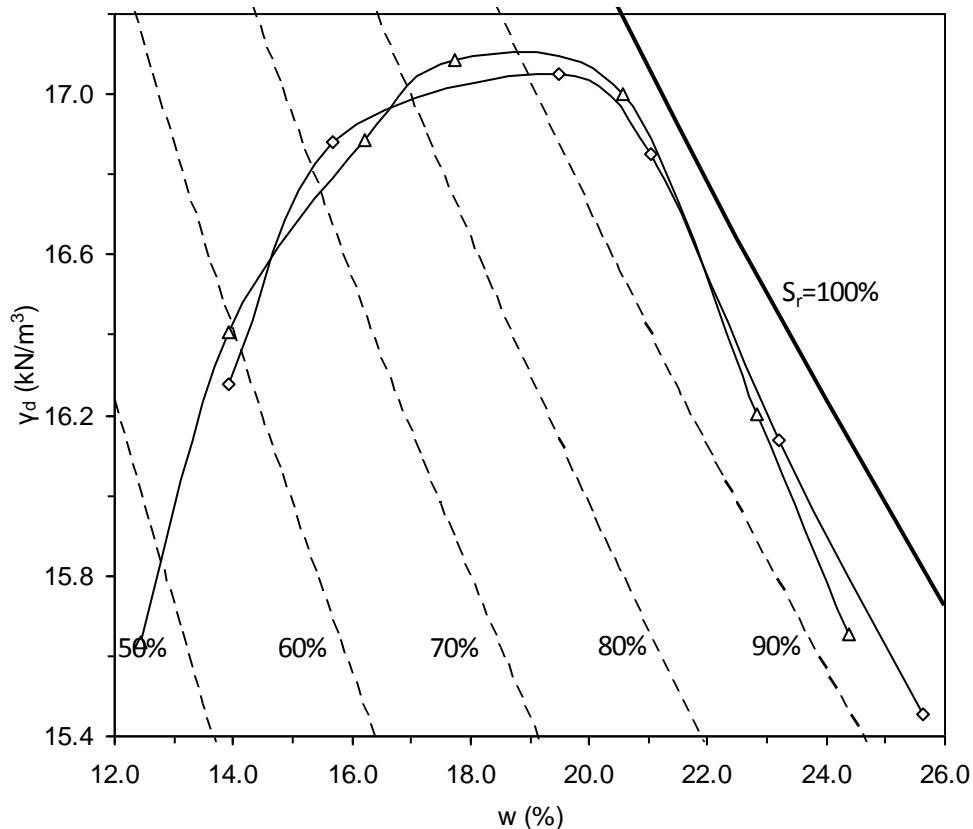
### 15.5.2 Άργιλος Αμαρουσίου

Η Άργιλος Αμαρουσίου που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού σε συμπυκνωμένα δείγματά της είχε ελαφρώς διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες του υλικού που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης (Κεφ. 13). Προέρχεται δε από λίγο πιο μακρυνή τοποθεσία στο Μαρούσι από το πρώην Διεθνές Κέντρο Ραδιοτηλεόρασης των Ολυμπιακών Αγώνων του 2004, κοντά στον κόμβο της Λεωφόρου Κηφισίας στον Παράδεισο Αμαρουσίου. Στο υλικό αυτό πραγματοποιήθηκαν τέσσερις πλήρεις δοκιμές κατάταξης. Το όριο υδαρότητας αυτού του υλικού ήταν  $47\pm 2\%$  (έναντι  $47.5\%$  του υλικού από το IBC), το όριο πλαστικότητας  $19\pm 1\%$  (έναντι  $23\%$  του υλικού από το IBC), ο δείκτης πλαστικότητας  $28\pm 1.5$  (έναντι  $24.5$  του υλικού από το IBC), το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεάς φάσης  $2.66\pm 0.00$  (έναντι  $2.75$  του υλικού από το IBC), και τέλος η περιεχόμενη άργιλος, ιλύς και άμμος,  $40.1\pm 2.7\%$ ,  $41.9\pm 2.7\%$  και  $18.0\pm 0.2\%$  αντίστοιχα (έναντι  $34.2\%$ ,  $51.8\%$  και  $13.0\%$  αντίστοιχα στο υλικό από το IBC –με παρουσία μάλιστα και  $1\%$  λεπτών χαλίκων).

Εκτός από τις δοκιμές κατάταξης, στο υλικό αυτό πραγματοποιήθηκαν και δύο δοκιμές συμπίκνωσης με την πρότυπη ενέργεια συμπίκνωσης (πρότυπο ASTM D-698-07e1). Οι καμπύλες ξηρού φαινομένου βάρους-υγρασίας συμπίκνωσης για τα δύο δείγματα της Αργίλου Αμαρουσίου που έγιναν οι δοκιμές παρουσιάζονται στο Σχ. 15.13. Η υγρασία επίτευξης μέγιστης συμπίκνωσης προέκυψε  $18.6\%$  κατά μέσο όρο και το μέγιστο ξηρό φαινόμενο βάρος  $17.07 \text{ kN/m}^3$  κατά μέσο όρο με καλή σύμπτωση των αποτελεσμάτων των δύο δοκιμών και στον κλάδο «υγρά» από τη βέλτιστη υγρασία και στον κλάδο «ξηρά» από αυτήν.

Δοκίμια παρασκευάστηκαν σε υγρασίες ίσες με τη βέλτιστη καθώς και  $2.5\%$  «ξηρά» από αυτήν και  $3\%$  «υγρά» από αυτήν (αφού στις υγρασίες αυτές επιτυγχανόταν ξηρό φαινόμενο βάρος ίσο με  $98\%$  του μέγιστου). Αμέσως μετά την παρασκευή των συμπυκνωμένων δοκιμίων, μετρήθηκε και στην περίπτωση των δειγμάτων της Αργίλου Αμαρουσίου η ολική μύζηση και η μύζηση εδαφικού σκελετού, όπως έγινε και στα συμπυκνωμένα δείγματα Αποσαθρωμένου Σερπεντινίτη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πιν. 15.3. Οι διασπορές είναι μεγάλες, ενώ η πολύ μεγάλη τιμή της ολικής μύζησης στα δείγματα που συμπυκνώθηκαν «ξηρά» από τη βέλτιστη υγρασία κατέστησε χωρίς νόημα την απόπειρα μέτρησης της μύζησης εδαφικού σκελετού με τενσιόμετρο πορολίθου χαμηλής πίεσης διεϊσδυσης αέρα. Η πολύ υψηλή μύζηση σε αυτά τα

δείγματα μάλιστα κατέστησε χωρίς νόημα και τον έλεγχο της μύζησης με τη μέθοδο μετατόπισης άξονα στο θάλαμο μύζησης με πορολίθους υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα. Έτσι, ενώ στα δείγματα που συμπυκνώθηκαν στη βέλτιστη υγρασία ή και «υγρά» από αυτήν χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος μετατόπισης άξονα και η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης με υδατικά διαλύματα αλάτων, στην περίπτωση των δειγμάτων που συμπυκνώθηκαν «ξηρά» από τη βέλτιστη υγρασία χρησιμοποιήθηκε μόνο η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης με υδατικά διαλύματα αλάτων.



**Σχήμα 15.13.** Καμπύλες ξηρού φαινόμενου βάρους-υγρασίας συμπύκνωσης για τα δύο δείγματα της Αργίλου Αμαρουσίου από τον Κόμβο της Λεωφόρου Κηφισίας στον Παράδεισο Αμαρουσίου από τις δοκιμές συμπύκνωσης Proctor με την πρότυπη ενέργεια (Standard Proctor Test).

**Πίνακας 15.3.** Μύζηση αμέσως μετά την συμπύκνωση στα δείγματα Αργίλου Αμαρουσίου.

Υγρασία συμπύκνωσης	Μύζηση εδαφικού σκελετού (kPa)	Ολική μύζηση (kPa)	Ωσμωτική συνιστώσα της μύζησης (kPa)
«Ξηρά» από την βέλτιστη	-	2462±247	Άγνωστη
Στην βέλτιστη	80	334±7	250±7
«Υγρά» από την βέλτιστη	60	130±32	70±32

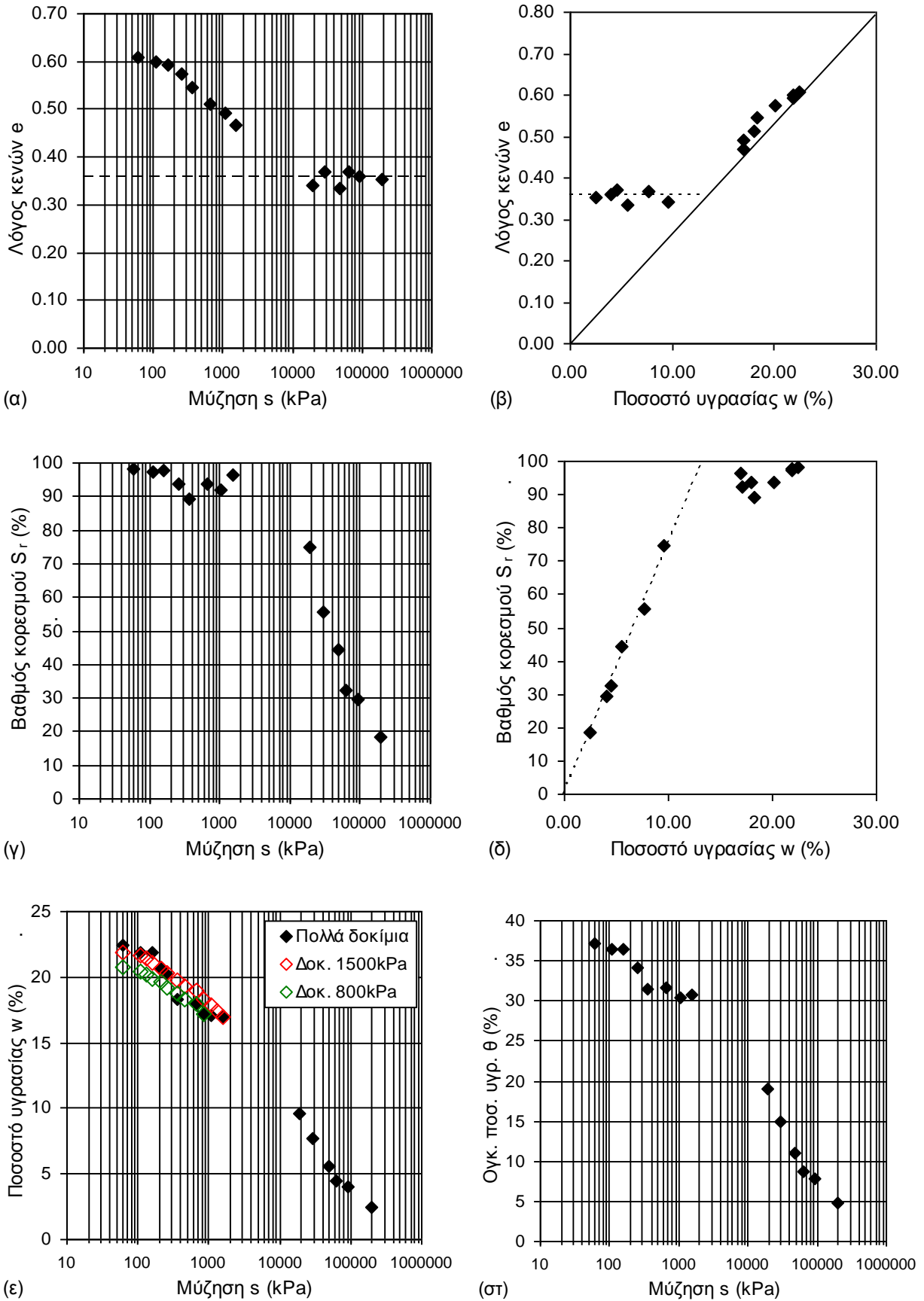
Στα Σχ. 15.14 έως 15.16 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που προέκυψαν για κάθε μία από τις τρεις υγρασίες συμπύκνωσης για την Άργιλο Αμαρουσίου, και στο Σχ. 15.17 οι καμπύλες και για τις τρεις υγρασίες συμπύκνωσης μαζί. Στην περίπτωση του αποσαθρωμένου σερπεντινίτη, διάφορες απόπειρες μέτρησης του ολικού όγκου που έγιναν επέδειξαν αφενός διείσδυση της υδροποιημένης παραφίνης σε μεγάλο βάθος και αφετέρου ασήμαντες μεταβολές του ολικού όγκου. Έτσι κατά τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε αυτό το υλικό μετρήθηκε μόνο η μεταβολή του ποσοστού υγρασίας με τη μύζηση. Στην περίπτωση της Αργίλου Αμαρουσίου ωστόσο, το υλικό αυτό επιδεικνύει σημαντικές μεταβολές όγκου κατά την ξήρανσή του οπότε αποφασίστηκε η μέτρησή τους με χρήση της μεθόδου παραφίνωσης των δοκιμίων.

Έτσι, όπως προκύπτει από τα Σχ. 15.14α και 15.15α, αλλά και λιγότερο το Σχ. 15.16α, στα οποία έχει σχεδιαστεί η εξέλιξη του λόγου κενών με τη μύζηση, καθώς και τα αντίστοιχα Σχ. 15.14β, 15.15β και 15.16β στα οποία έχει σχεδιαστεί η εξέλιξη του λόγου κενών με το ποσοστό υγρασίας, παρατηρείται ότι το υλικό έχει και για τις τρεις υγρασίες συμπύκνωσης σημαντικές μεταβολές όγκου. Αυτές είναι κατά σειρά μεγαλύτερες για το υλικό που συμπυκνώθηκε «υγρά» από τη βέλτιστη υγρασία λόγω μέγιστου ποσοστού υγρασίας και μικρότερης πυκνότητας από τη βέλτιστη, αμέσως μικρότερες για το υλικό που συμπυκνώθηκε «ξηρά» από τη βέλτιστη υγρασία λόγω μικρότερης πυκνότητας από τη βέλτιστη, και τέλος οι ελάχιστες για το υλικό που συμπυκνώθηκε στη βέλτιστη υγρασία λόγω μεγάλης πυκνότητας. Όπως προκύπτει από τα σχήματα που προαναφέρθηκαν, και για τις τρεις υγρασίες συμπύκνωσης εμφανίζεται παραμένον λόγος κενών για μεγάλες τιμές της μύζησης (αυτές που επιβλήθηκαν με τη μέθοδο των υδατικών διαλυμάτων) ο οποίος παίρνει την ελάχιστη τιμή για το υλικό που συμπυκνώθηκε στη βέλτιστη υγρασία (0.323), τη δεύτερη μικρότερη για το υλικό που συμπυκνώθηκε «υγρά» από τη βέλτιστη υγρασία (0.355) και τέλος τη μέγιστη για το υλικό που συμπυκνώθηκε «ξηρά» από τη βέλτιστη υγρασία (0.416). Ειδικά για το υλικό που συμπυκνώθηκε «ξηρά» από τη βέλτιστη υγρασία η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι μεγάλη λόγω των κενών στην περιφέρεια των δοκιμίων που προκύπτουν σε αυτήν την υγρασία συμπύκνωσης<sup>7</sup>. Επιπλέον αβεβαιότητες εισάγει και ο πολύ μικρότερος αριθμός πειραματικών σημείων για αυτή την υγρασία, αφού λόγω της μεγάλης αρχικής μύζησης αμέσως μετά τη συμπύκνωση δεν ήταν δυνατόν να υιοθετηθεί και η μέθοδος μετατόπισης άξονα εκτός από τη μέθοδο υδατικών διαλυμάτων. Στα Σχ. 15.17α και 15.17β παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες για όλες τις υγρασίες συμπύκνωσης συγκεντρωμένες.

<sup>7</sup> Παρά την άφεση για σημαντικό χρονικό διάστημα του μίγματος στην υγρασία αυτή (όπως και στις άλλες) πριν τη συμπύκνωση σε αυτόματο κόπανο.

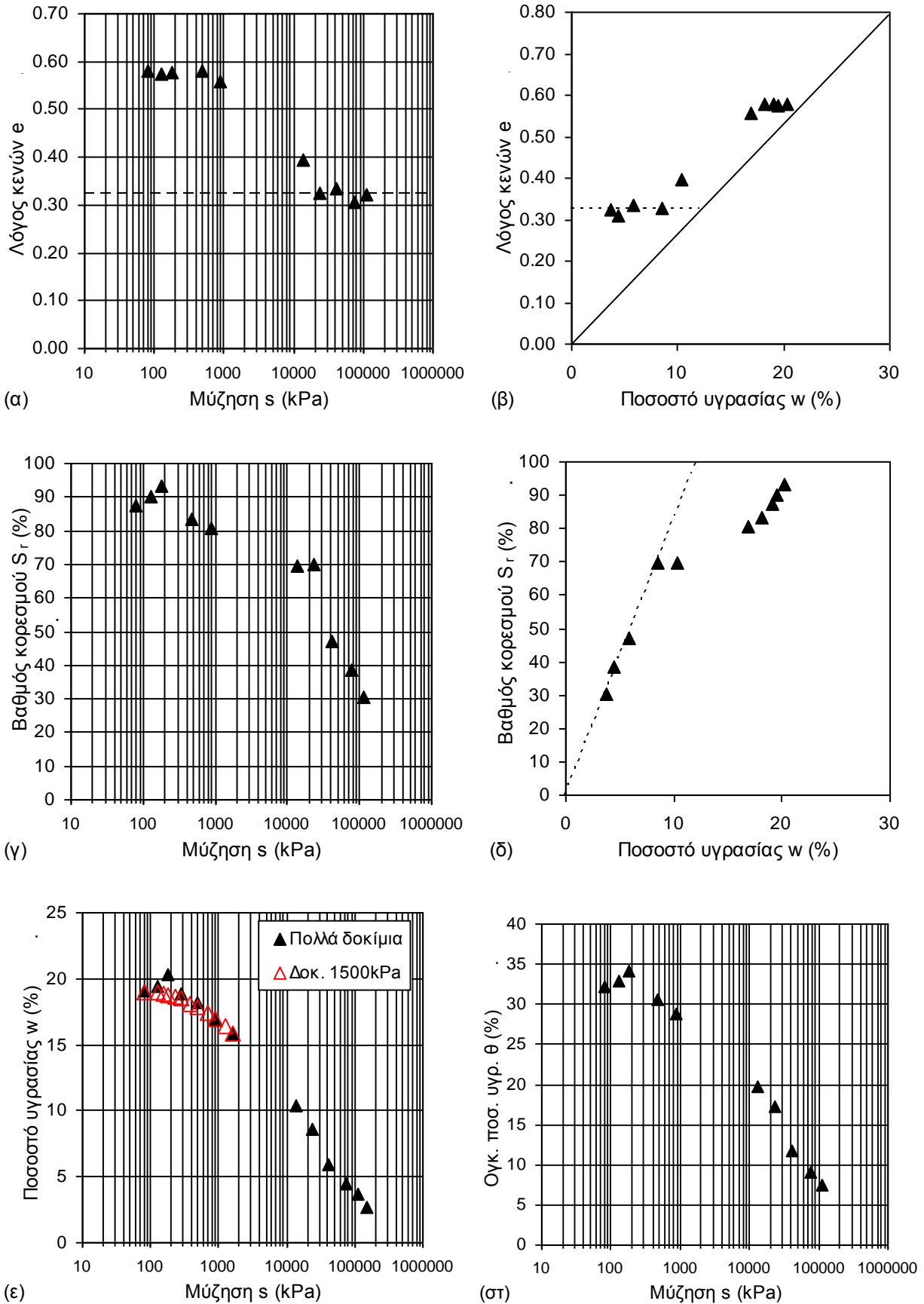
Από τα Σχ. 15.14γ, 15.15γ και 15.16γ προκύπτει ότι και στις τρεις υγρασίες συμπύκνωσης, ο αρχικός βαθμός κορεσμού είναι μικρότερος του 100% καθώς και ότι το πρώτο σημείο καμπής μοιάζει να βρίσκεται πέρα από τα 1500 kPa. Από τα Σχ. 15.14δ, 15.15δ και 15.16δ προκύπτει καλή σύμπτωση με τις καμπύλες κλίσης  $G_s/e_r$ . Και στα δύο είδη διαγραμμάτων η λιγότερο σαφής εικόνα προκύπτει για τα δοκίμια του υλικού που συμπυκνώθηκε «ξηρά» από τη βέλτιστη υγρασία.

Τέλος στα Σχ. 15.14ε, 15.15ε και 15.16ε και στα Σχ. 15.14στ, 15.15στ και 15.16στ παρουσιάζονται αντίστοιχα οι καμπύλες εξέλιξης του ποσοστού υγρασίας και του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας με τη μύζηση για κάθε μία από τις τρεις υγρασίες συμπύκνωσης, ενώ στα Σχ. 15.17ε και 15.17στ παρουσιάζονται οι αντίστοιχες καμπύλες και για τις τρεις υγρασίες συμπύκνωσης μαζί. Στα Σχ. 15.14ε, 15.15ε και 15.16ε φαίνονται οι διασπορές που προκαλεί η χρήση διαφορετικών δοκιμίων όταν πρέπει να μετρηθεί η μεταβολή όγκου σε θαλάμους μύζησης που τοποθετούνται πολλά δοκίμια. Κατά τη συμπύκνωση των δειγμάτων, παρά την προσπάθεια ακριβούς ελέγχου της υγρασίας συμπύκνωσης, προκύπτουν διαφορές στην αρχική υγρασία, όπως π.χ. αυτές που φαίνονται στο Σχ. 15.14ε, όπου φαίνεται το ποσοστό υγρασίας αρχικά να αυξάνεται λίγο και στη συνέχεια να μειώνεται. Αυτό βέβαια δεν συμβαίνει, αλλά το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο ότι τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις σε κάθε μία από τις τιμές της τάσης είχαν αντίστοιχη διαφορά στο ποσοστό υγρασίας τους αρχικά πριν την ξήρανση στο θάλαμο μύζησης. Έτσι, προκειμένου να υπάρχει και μια αίσθηση για την εξέλιξη του ποσοστού υγρασίας σε ένα μόνο δοκίμιο, ειδικά στην υγρασία συμπύκνωσης «υγρά» από τη βέλτιστη και στη βέλτιστη παρακολούθηθηκε η εξέλιξη του βάρους δύο δοκιμίων στην πρώτη από τις δύο υγρασίες και ενός δοκιμίου στη δεύτερη. Όπως προκύπτει από το Σχ. 15.14ε και το Σχ. 15.15ε η εξέλιξη του ποσοστού υγρασίας σε ένα δοκίμιο είναι ομαλή (δοκίμια που έφτασαν μέχρι τη μύζηση των 800 kPa και των 1500 kPa για υγρασία συμπύκνωσης «υγρά» από τη βέλτιστη και δοκίμιο που έφτασε μέχρι τα 1500 kPa για τη βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης) με την εμφάνιση του σημείου καμπής να γίνεται μάλλον δυσδιάκριτη παρά και τα περισσότερα σημεία στις καμπύλες αυτές. Από την άλλη πλευρά η απόκλιση των σημείων από τα ξεχωριστά δοκίμια δείχνει το μέτρο της αναμενόμενης απόκλισης της μεθόδου. Τέλος στις προσδιορισθείσες καμπύλες δεν προκύπτει με σαφήνεια το δεύτερο σημείο καμπής που θα υποδήλωνε ένα σαφώς οριζόμενο παραμένον ποσοστό υγρασίας.

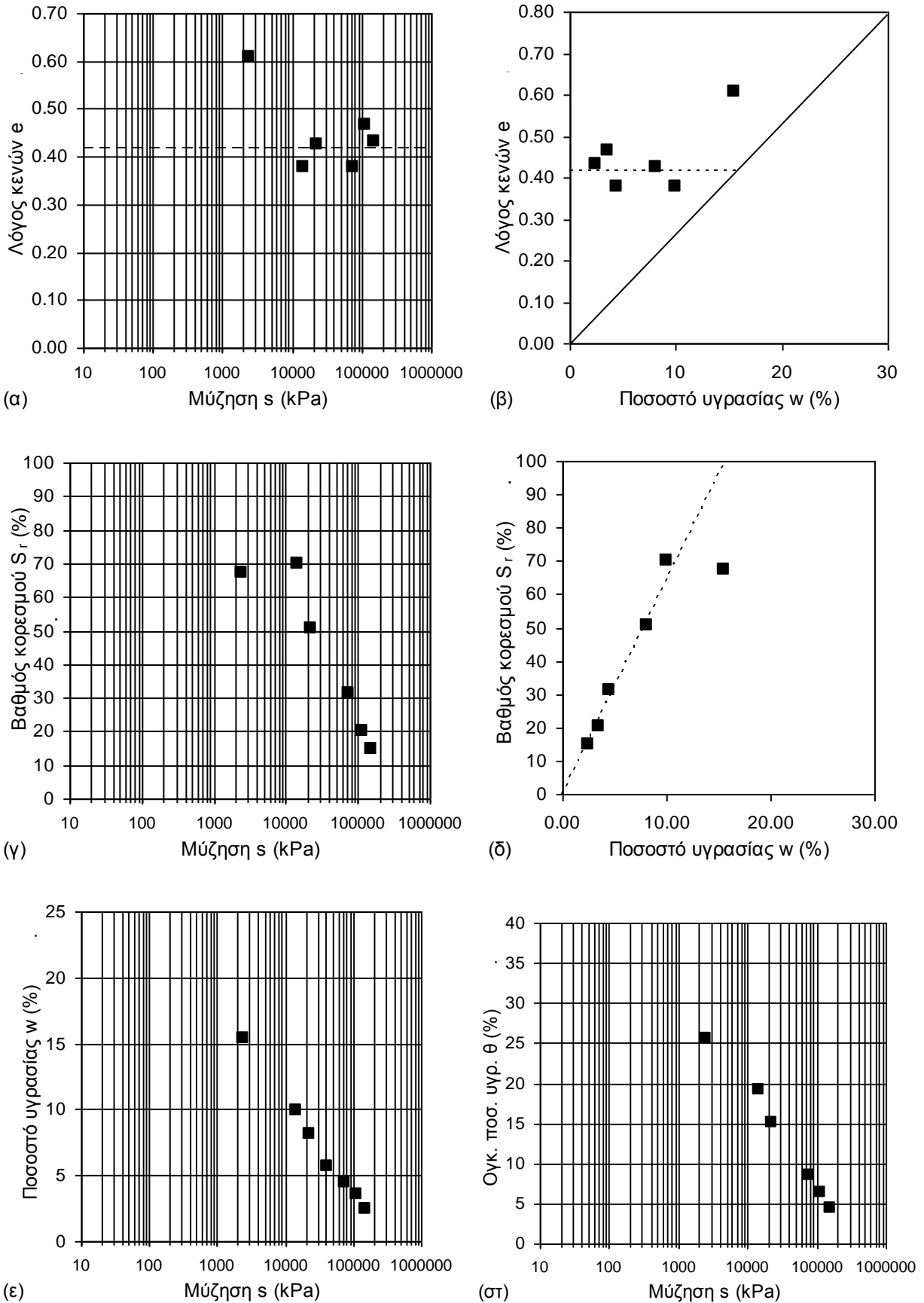


**Σχήμα 15.14.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Αμαρουσίου συμπυκνωμένης «υγρά» από τη βέλτιστη υγρασία.

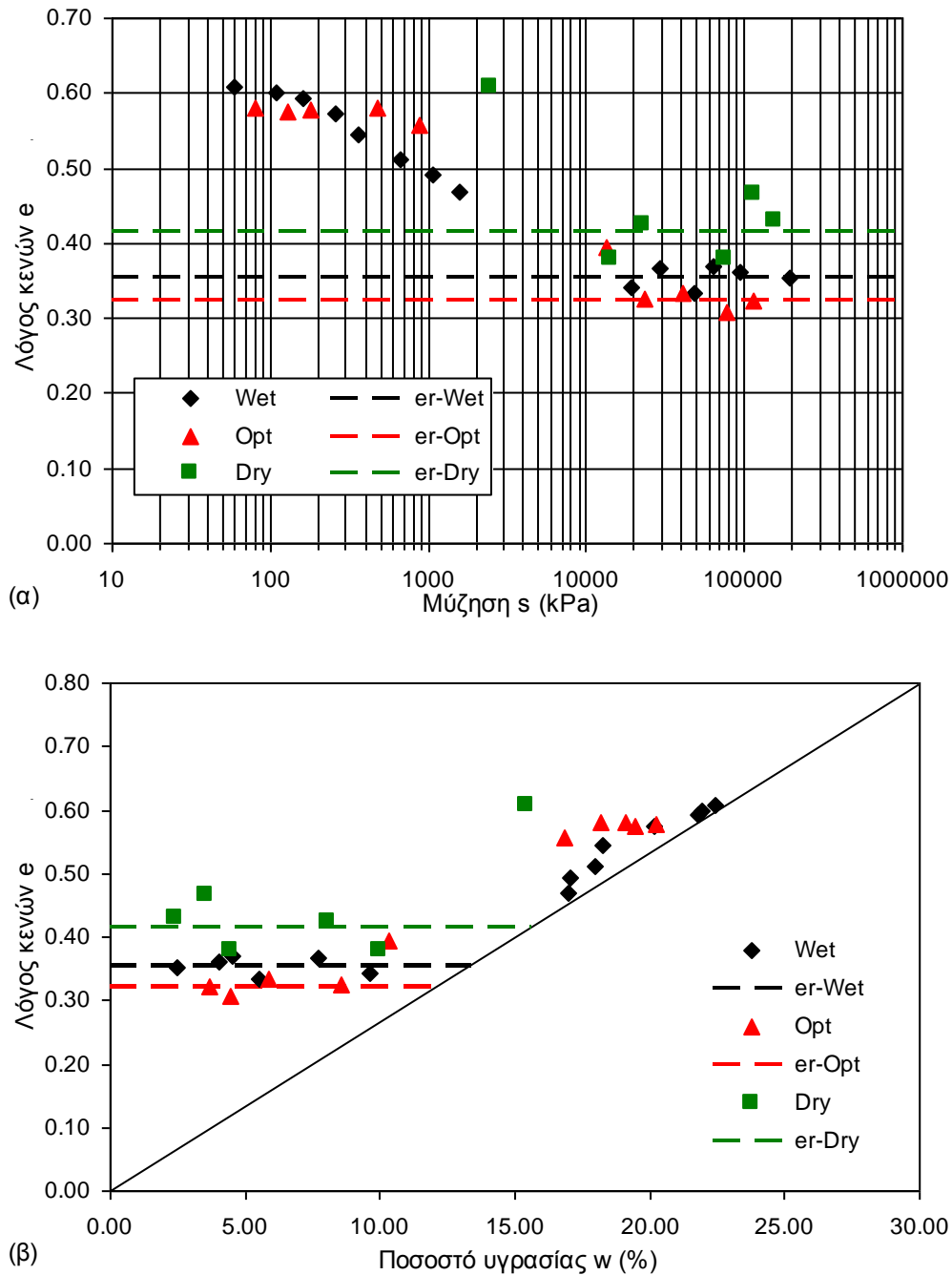




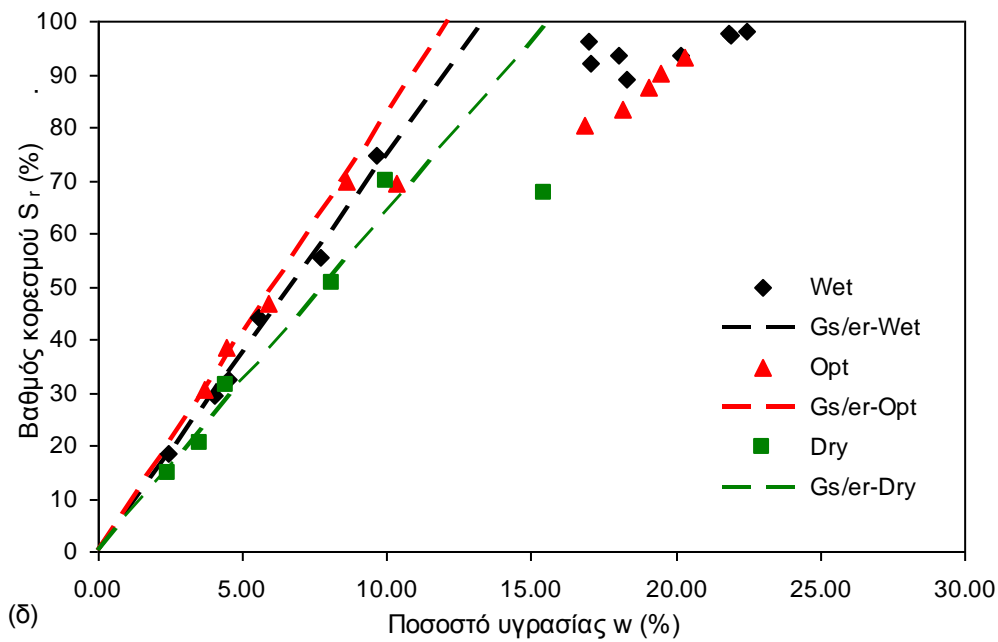
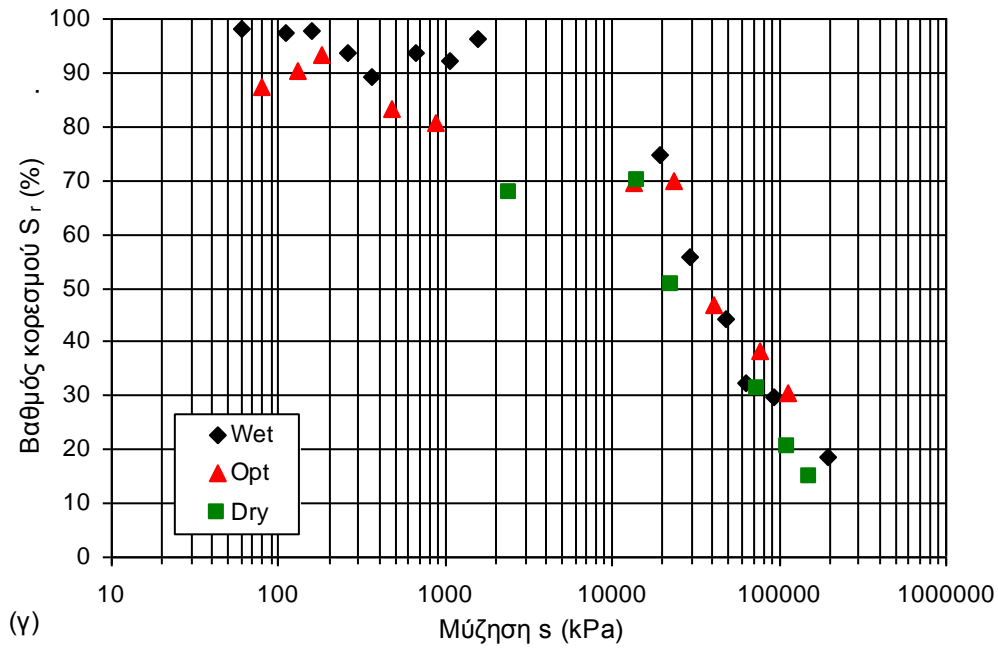
Σχήμα 15.15. Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Αμαρουσίου συμπυκνωμένης στη βέλτιστη υγρασία.



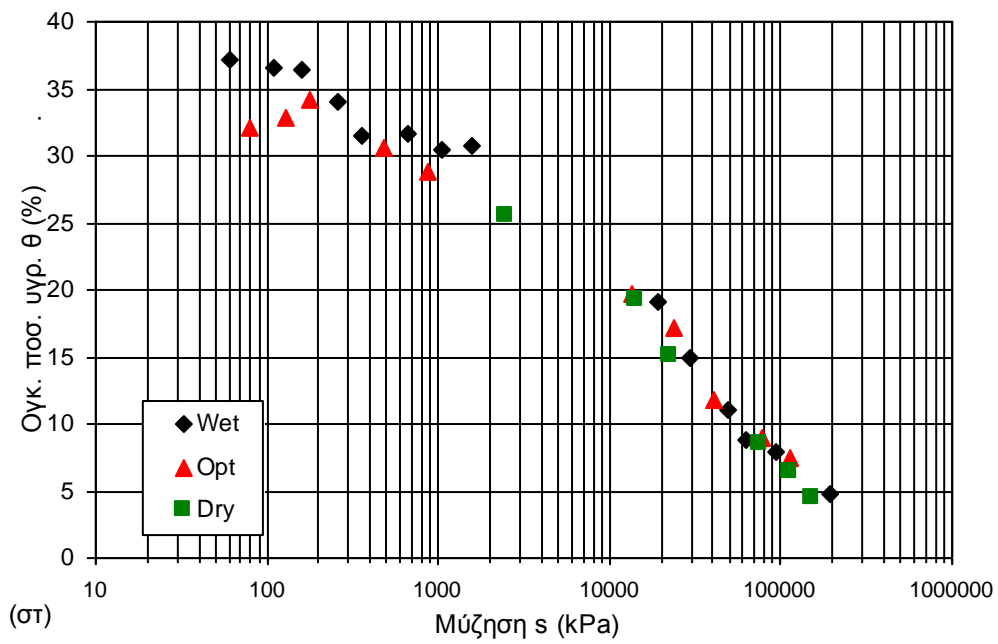
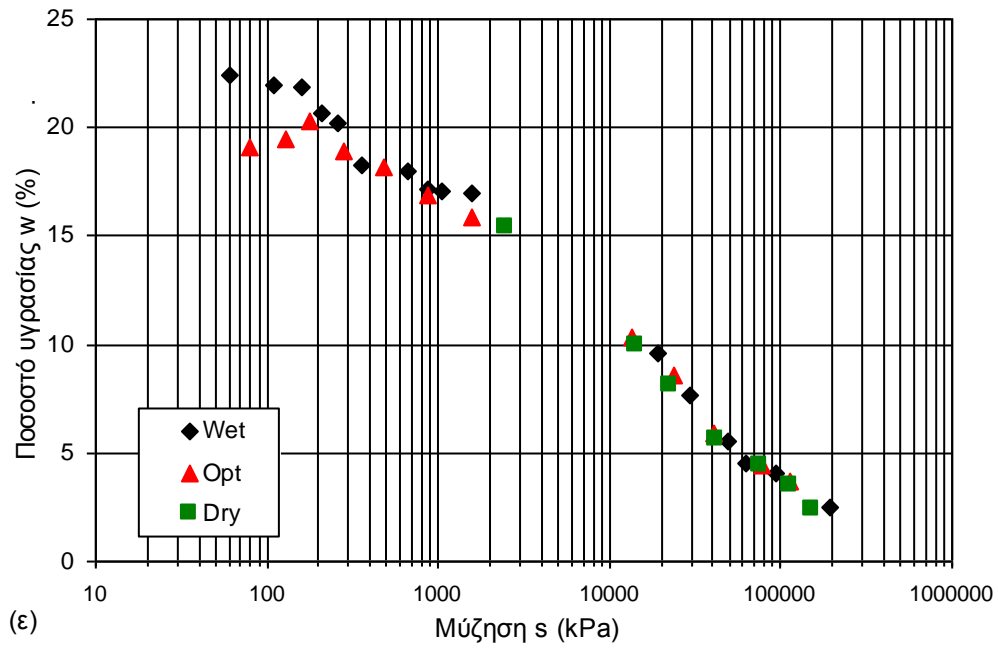
**Σχήμα 15.16.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Αμαρουσίου συμπυκνωμένης «ξηρά» από τη βέλτιστη υγρασία.



**Σχήμα 15.17.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Αμαρουσίου για όλες τις υγρασίες συμπίκνωσης: α) σε όρους λόγου κενών-μύζησης (παρατίθενται και οι ευθείες που αντιστοιχούν στην εκτίμηση για τον παραμένοντα λόγο κενών για κάθε υγρασία συμπίκνωσης), β) σε όρους λόγου κενών-ποσοστού υγρασίας (παρατίθενται και οι ευθείες που αντιστοιχούν στην εκτίμηση για τον παραμένοντα λόγο κενών για κάθε υγρασία συμπίκνωσης, καθώς και η ευθεία πλήρους κορεσμού με βάση το  $G_s$  του υλικού).



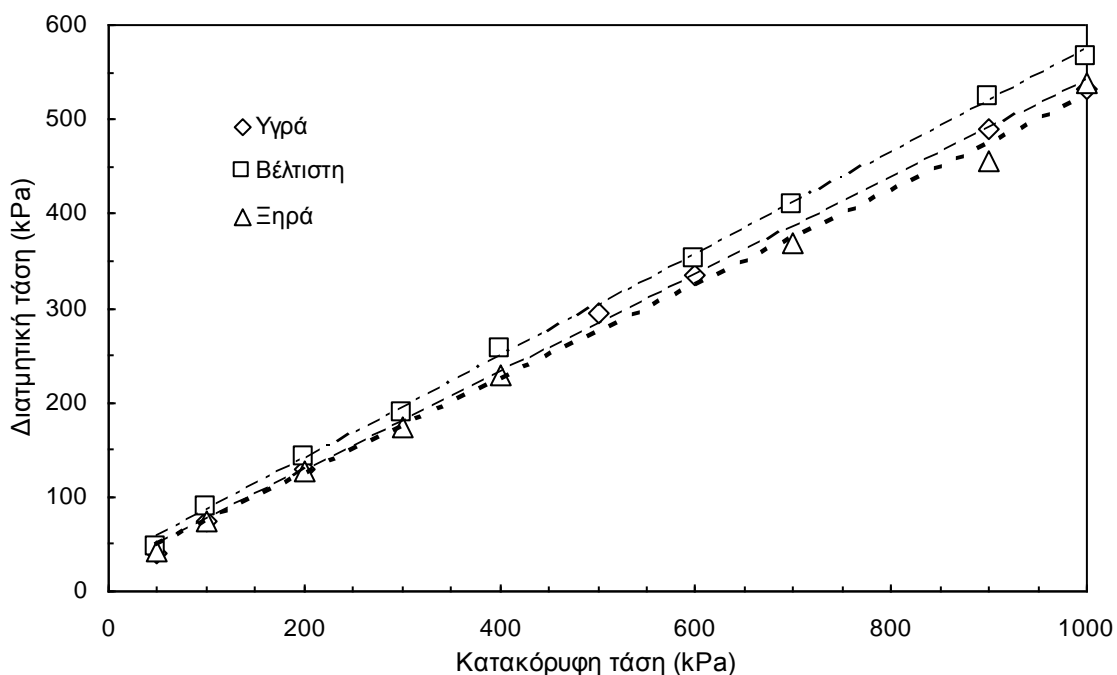
**Σχήμα 15.17** (συνέχεια). Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Αμαρουσίου για όλες τις υγρασίες συμπίκνωσης: γ) σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, δ) σε όρους βαθμού κορεσμού-ποσοστού υγρασίας (παρατίθενται και οι ευθείες που αντιστοιχούν στην εκτίμηση για τον παραμένοντα λόγο κενών για κάθε υγρασία συμπίκνωσης).



**Σχήμα 15.17** (συνέχεια). Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού της Αργίλου Αμαρουσίου για όλες τις υγρασίες συμπίκνωσης: ε) σε όρους ποσοστού υγρασίας-μύζησης, και στ) σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης.

## 15.6 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΤΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΕ Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

Για τις δοκιμές βραδείας άμεσης διάτμησης με στερεοποίηση προετοιμάστηκαν και πάλι συμπυκνωμένα δείγματα αποσαθρωμένου σερπεντινίτη στον αυτόματο συμπυκνωτή στις τρεις επιλεγθείσες υγρασίες για αυτό το υλικό και από αυτά μορφώθηκαν δοκίμια ύψους 25.4mm και διαμέτρου 63.5mm για την εκτέλεση των δοκιμών. Σε αυτήν την φάση της ερευνητικής προσπάθειας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κατά τις οποίες η στερεοποίηση συνδυαζόταν με διαβροχή από την αρχή. Οι δοκιμές έγιναν σε κατακόρυφες τάσεις από 50 έως 1000 kPa. Η ταχύτητα διάτμησης για όλες τις δοκιμές ήταν 0.05mm/min, η οποία ήταν επαρκώς αργή οδηγώντας σε χρόνο διάρκειας της διάτμησης πολύ μεγαλύτερο από τον ελάχιστο προβλεπόμενο που ισούται με 50 φορές τον χρόνο ολοκλήρωσης του 50% της στερεοποίησης t50 προσδιοριζόμενο από το προηγηθέν στάδιο της στερεοποίησης (ASTM D3080-04). Στο Σχ. 15.18 παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες διατμητικής αντοχής και για τις τρεις υγρασίες συμπύκνωσης και στον Πιν. 15.4 οι τιμές των παραμέτρων διατμητικής αντοχής.



**Σχήμα 15.18.** Περιβάλλουσες διατμητικής αντοχής συμπεκνωμένου αποσαθρωμένου σερπεντινίτη για τις τρεις υγρασίες συμπύκνωσης.

**Πίνακας 15.4.** Παράμετροι διατμητικής αντοχής.

Υγρασία συμπύκνωσης	Συνοχή $c'$ (kPa)	Γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'$ (°)
«Ξηρά» από την βέλτιστη	23	26.5
Στην βέλτιστη	30	28.5
«Υγρά» από την βέλτιστη	23	27.5

Όπως προκύπτει από τα στοιχεία του Πιν. 15.4 και το Σχ. 15.18, οι μέγιστες τιμές παραμέτρων διατμητικής αντοχής προέκυψαν για το υλικό που είχε συμπυκνωθεί στην βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης. Αξιοσημείωτη είναι η μη διαφοροποίηση της τιμής της συνοχής μεταξύ δειγμάτων συμπυκνωμένων «ξηρά» -για τα οποία θα αναμενόταν υψηλότερη συνοχή- και «υγρά» από την βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης. Αυτό αποτελεί ένα σημείο που χρήζει περαιτέρω εργαστηριακής διερεύνησης στο μέλλον.

## **15.7 ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΤΑ ΓΕΝΕΤΕΙΡΑ ΣΕ ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΥΠΟΒΕΒΛΗΜΕΝΩΝ ΣΕ ΞΗΡΑΝΣΗ**

### **15.7.1 Εισαγωγή – Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν – Το σκεπτικό των εκτελεσθεισών δοκιμών**

Μέχρι και αυτό το στάδιο της διδακτορικής διατριβής έχουν παρουσιαστεί αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών μέσω των οποίων μελετήθηκε και διερευνήθηκε η ξήρανση/ύγρυνση και οι μεταβολές όγκου υπό διάφορες καταστάσεις των πλήρως και των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής δεν κατέστη δυνατή η προμήθεια εξοπλισμού για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών με έλεγχο της μύζησης<sup>8</sup>. Προκειμένου ωστόσο να μελετηθεί με κάποιο τρόπο και η διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών αναζητήθηκε και ένας τρόπος να γίνει αυτό παρά την έλλειψη εξειδικευμένου εξοπλισμού. Καταστρώθηκε λοιπόν ένα πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών που βασίστηκε στις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα (brazilian).

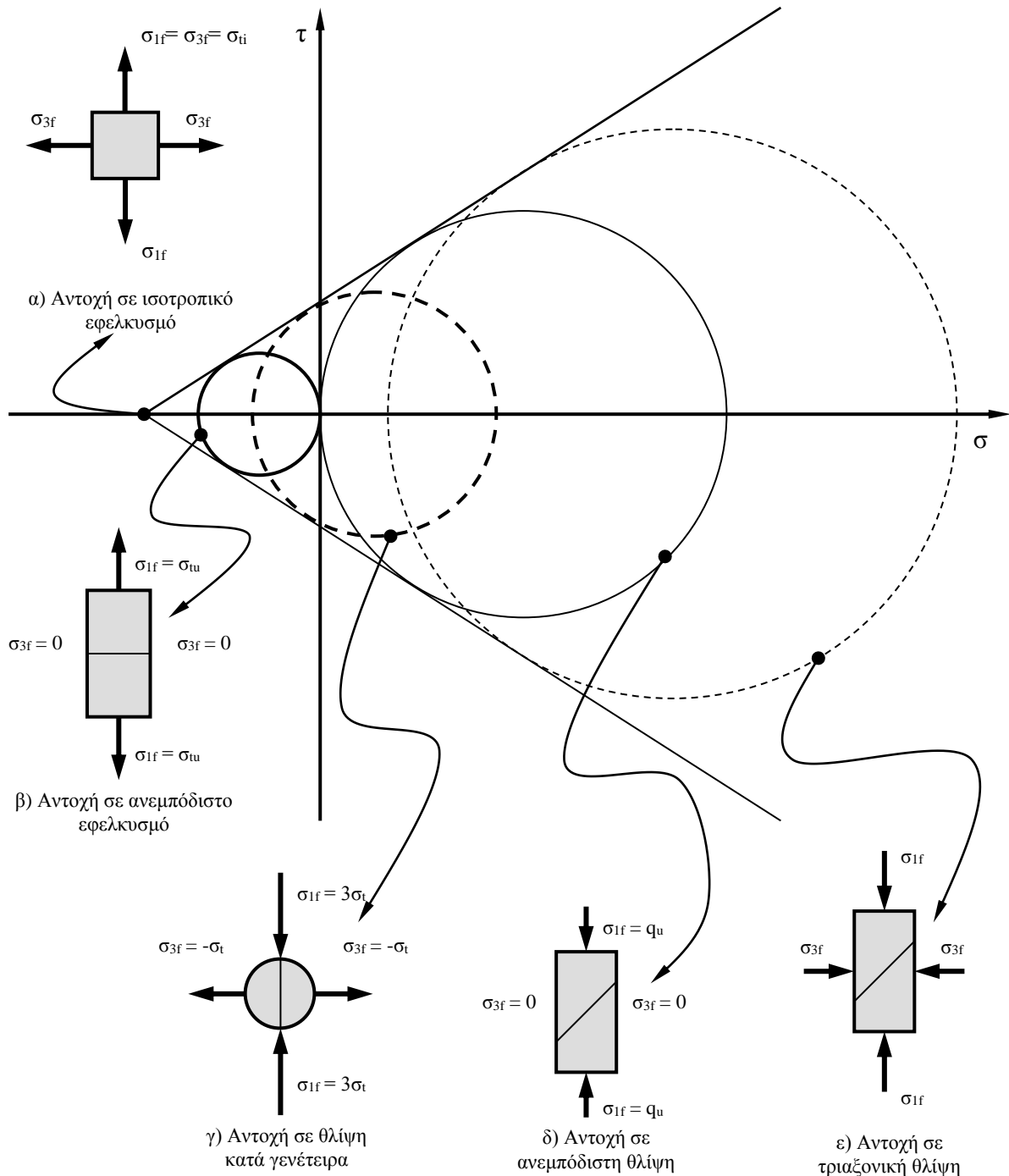
Στο Σχ. 15.19 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διάφορες μορφές φόρτισης από τις οποίες προκύπτουν χαρακτηριστικοί κύκλοι Mohr. Εκφυλισμένος κύκλος Mohr είναι το σημείο τομής της περιβάλλουσας διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb με τον άξονα της ορθής τάσης που προκύπτει εάν εφαρμοστεί ισοτροπικός εφελκυσμός μέχρι την αστοχία (εξ όσων γνωρίζει ο γράφων κάτι τέτοιο δεν έχει επιτευχθεί ποτέ πειραματικά). Το θεωρητικό σημείο τομής της περιβάλλουσας διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb με τον άξονα της ισοτροπικής τάσης ορίζει την αντοχή σε ισοτροπικό εφελκυσμό,  $\sigma_{ii} = c' / \tan \phi'$  (Σχ. 15.19α). Χαρακτηριστικός κύκλος Mohr είναι αυτός που αντιστοιχεί στην εντατική κατάσταση του ανεμπόδιστου εφελκυσμού (Σχ. 15.19β). Ο κύκλος αυτός εφάπτεται πάντοτε από δεξιά στον άξονα της διατμητικής τάσης και τέμνει τον άξονα της ορθής τάσης στην τιμή της αντοχής σε ανεμπόδιστο εφελκυσμό,  $\sigma_{ii}$ . Το αντίστοιχο αυτού του χαρακτηριστικού κύκλου Mohr για τη θλίψη είναι αυτός που αντιστοιχεί στην εντατική κατάσταση της ανεμπόδιστης θλίψης (Σχ. 15.19δ). Ο κύκλος αυτός εφάπτεται πάντοτε από αριστερά στον άξονα της διατμητικής τάσης και τέμνει τον άξονα της ορθής τάσης στην τιμή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη,  $q_u$ . Μεταξύ των δύο αυτών χαρακτηριστικών κύκλων Mohr βρίσκεται η εντατική κατάσταση που αντιστοιχεί στη θλίψη κατά γενέτειρα (Σχ.

---

<sup>8</sup> Οριακή εξαίρεση αποτελεί η δοκιμή που περιγράφηκε στο Κεφ. 6 του 1<sup>ου</sup> Μέρους της διατριβής



15.19γ). Στην εντατική αυτή κατάσταση, δισκοειδή δοκίμια αστοχούν σε εφελκυσμό κάθετα στη γενέτειρά τους κατά μήκος της οποίας εξασκείται θλιπτική τάση. Κατά την αστοχία, η εφελκυστική αντοχή κάθετα στη γενέτειρα,  $\sigma_{1b}$ , είναι κατ' απόλυτη τιμή 3 φορές μικρότερη της



**Σχήμα 15.19.** Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb με τον ορισμό των εξής χαρακτηριστικών εντατικών καταστάσεων: α) ισοτροπικός εφελκυσμός, β) ανεμπόδιστος εφελκυσμός, γ) θλίψη κατά γενέτειρα, δ) ανεμπόδιστη θλίψη, και ε) τριαξονική θλίψη.

ασκούμενης θλιπτικής τάσης κατά μήκος της γενέτειρας (Hondros, 1959). Οι δύο αυτές τιμές της τάσης επιτρέπουν τον καθορισμό του κύκλου Mohr που αντιστοιχεί στην εντατική αυτή κατάσταση όπως φαίνεται στο Σχ. 15.19γ. Κάθε άλλη εντατική κατάσταση υπό μια πλευρική τάση αντιστοιχεί σε συνθήκες τριαξονικής θλίψης (Σχ. 15.19ε), ενώ προφανώς μπορούν να οριστούν και οι συνθήκες φόρτισης υπό άμεση διάτμηση (κατά τις οποίες όμως δεν μπορεί να απεικονιστεί κύκλος Mohr) κατά τις συνήθεις φορτίσεις υπό θλιπτική κατακόρυφη τάση, αλλά όπως κατέστη δυνατόν σχετικά πρόσφατα και υπό εφελκυστική κατακόρυφη τάση (Vesga, 2009).

Οποιοδήποτε δύο από τους χαρακτηριστικούς κύκλους Mohr του Σχ. 15.19 (ή και των σημείων θραύσης υπό συνθήκες άμεσης διάτμησης) επιτρέπουν την εκτίμηση μίας τιμής της συνοχής και της γωνίας διατμητικής αντοχής, με υπόθεση φυσικά της ισχύος της γραμμικότητας του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb. Περισσότεροι από αυτούς τους κύκλους επιτρέπουν την προσέγγιση και εναλλακτικών περιβαλλουσών διατμητικής αντοχής που μπορούν να μην είναι γραμμικές (κάτι αρκετά σύνηθες για πάρα πολύ μικρές τιμές της ορθής τάσης, πολλώ δε μάλλον για εφελκυστικές τιμές). Με αυτό το σκεπτικό και δεδομένης της απλότητάς τους και της δυνατότητας εκτέλεσής τους σε υφιστάμενες συσκευές, επιλέχθηκε να εκτελεστούν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε δοκίμια αναζυμωμένων εδαφικών υλικών τα οποία είχαν υποβληθεί εντός θαλάμου μύζησης σε διάφορες τιμές της μύζησης. Τα υλικά επιλέχθηκε να είναι αναζυμωμένα, ώστε αφενός να μην υπεισέρχονται στην ιστορία φόρτισης-αποφόρτισής τους άλλοι παράγοντες πλην της ξήρανσής τους και της μύζησης που έχουν τα δοκίμια και αφετέρου να μπορούν να μορφωθούν δοκίμια με διαστάσεις και λόγους διαστάσεων σύμφωνους με τους προβλεπόμενους από τα πρότυπα εκτέλεσης των δύο αυτών δοκιμών. Προηγούμενη φόρτιση δοκιμίων πριν την επιβολή της μύζησης θα απαιτούσε ειδικούς τύπους εντός των οποίων θα έπρεπε να γίνει η συμπίεση.

Επιλέχθηκαν πέντε (5) διαφορετικά υλικά που υπήρχαν ποσότητές τους σε περίσσεια για την εκτέλεση αυτής της σειράς δοκιμών. Αυτά ήταν: ο φυλλίτης Σκύρου, η Μάργα Κορίνθου, η Μάργα Χαλκουτσίου, η Άργιλος Αμαρουσίου και ο αποσαθρωμένος ιλυόλιθος Πάρνηθας. Δοκίμια αυτών των υλικών σε μορφή πολτού υποβλήθηκαν αρχικά σε δοκιμές άμεσης διάτμησης με σκοπό τον προσδιορισμό της γωνίας διατμητικής αντοχής τους όταν είναι αναζυμωμένα και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν σε τύπους που παρασκευάστηκαν ειδικά για το σκοπό αυτό από σωλήνες από PVC και κολλήθηκαν επί των κεραμικών πορολίθων του θαλάμου μύζησης του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. (Φωτ. 15.10). Στα δοκίμια αυτά εφαρμοζόταν η

τιμή της μύζησης που είχε καθοριστεί και μετά από επαρκή χρόνο για την εφαρμογή αυτής ο θάλαμος ανοιγόταν, τα δοκίμια αφαιρούντο από τους τύπους και οδηγούνται στο πλαίσιο φόρτισης για εκτέλεση της αντίστοιχης δοκιμής (ανεμπόδιστης θλίψης ή θλίψης κατά γενέτειρα).



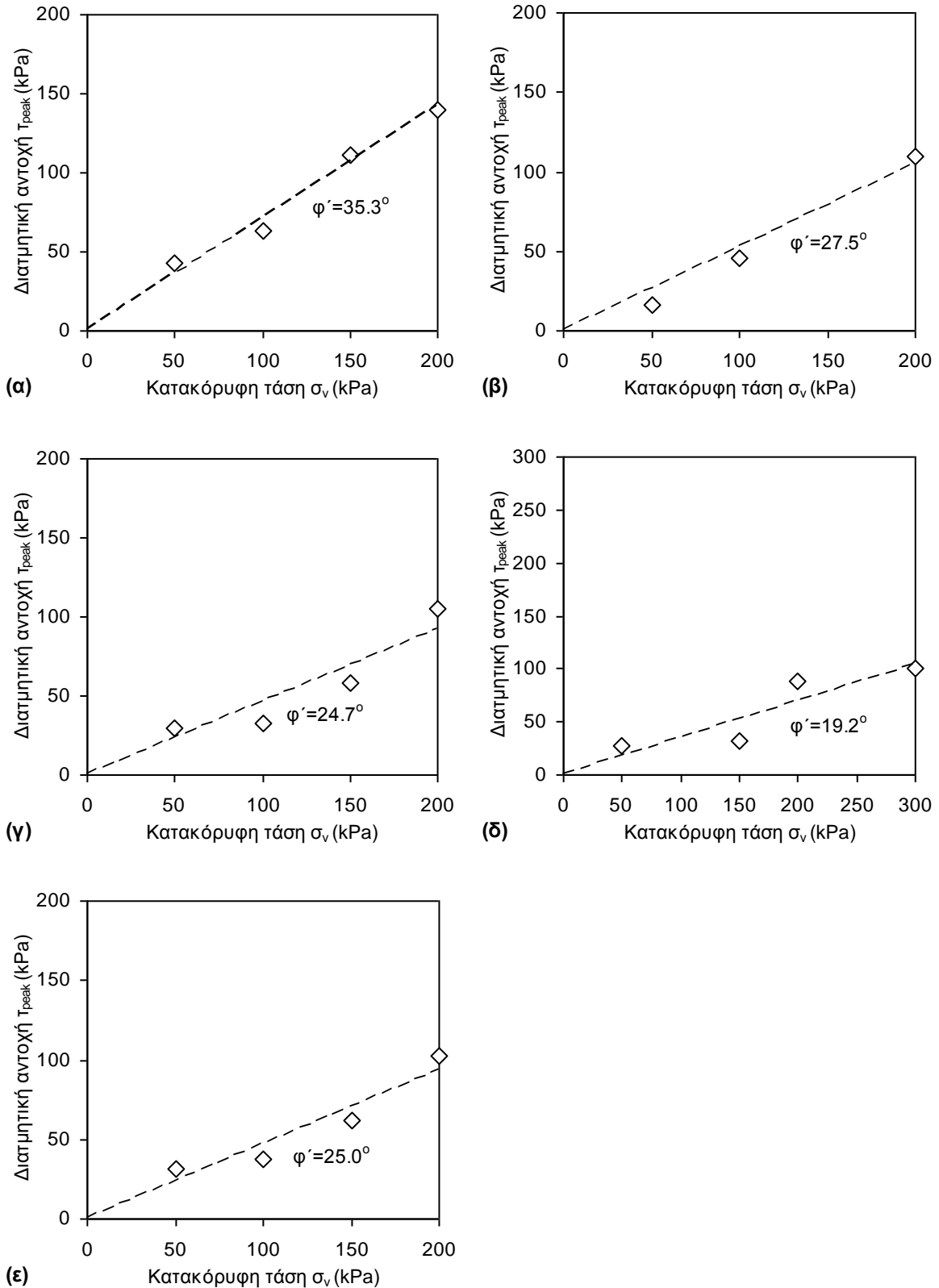
**Φωτογραφία 15.10.** Διάταξη προετοιμασίας δοκιμίων ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα, α) προσωρινή κόλληση επί του κεραμικού πορολίθου των σωλήνων από PVC και λίπανση της εσωτερικής παρειάς τους, β) παράδειγμα τοποθέτησης πορολίθου με σωλήνες περιέχοντες πολτό μάργας Κορίνθου, γ) παράδειγμα τοποθέτησης πορολίθου με σωλήνες περιέχοντες πολτούς μάργας Κορίνθου και αργίλου Αμαρουσίου μετά την ξήρανσή τους (διακρίνεται πράσινη πλαστελίνη που χρησιμοποιήθηκε για τη σφράγιση διαρροής πολτού από την κάτω πλευρά ενός σωλήνα), και δ) ένα ακόμα παράδειγμα τοποθέτησης πορολίθου με σωλήνες περιέχοντες πολτούς αργίλου Αμαρουσίου μετά την ξήρανσή τους.

### 15.7.2 Διατμητική αντοχή αναζυμωμένων εδαφικών υλικών

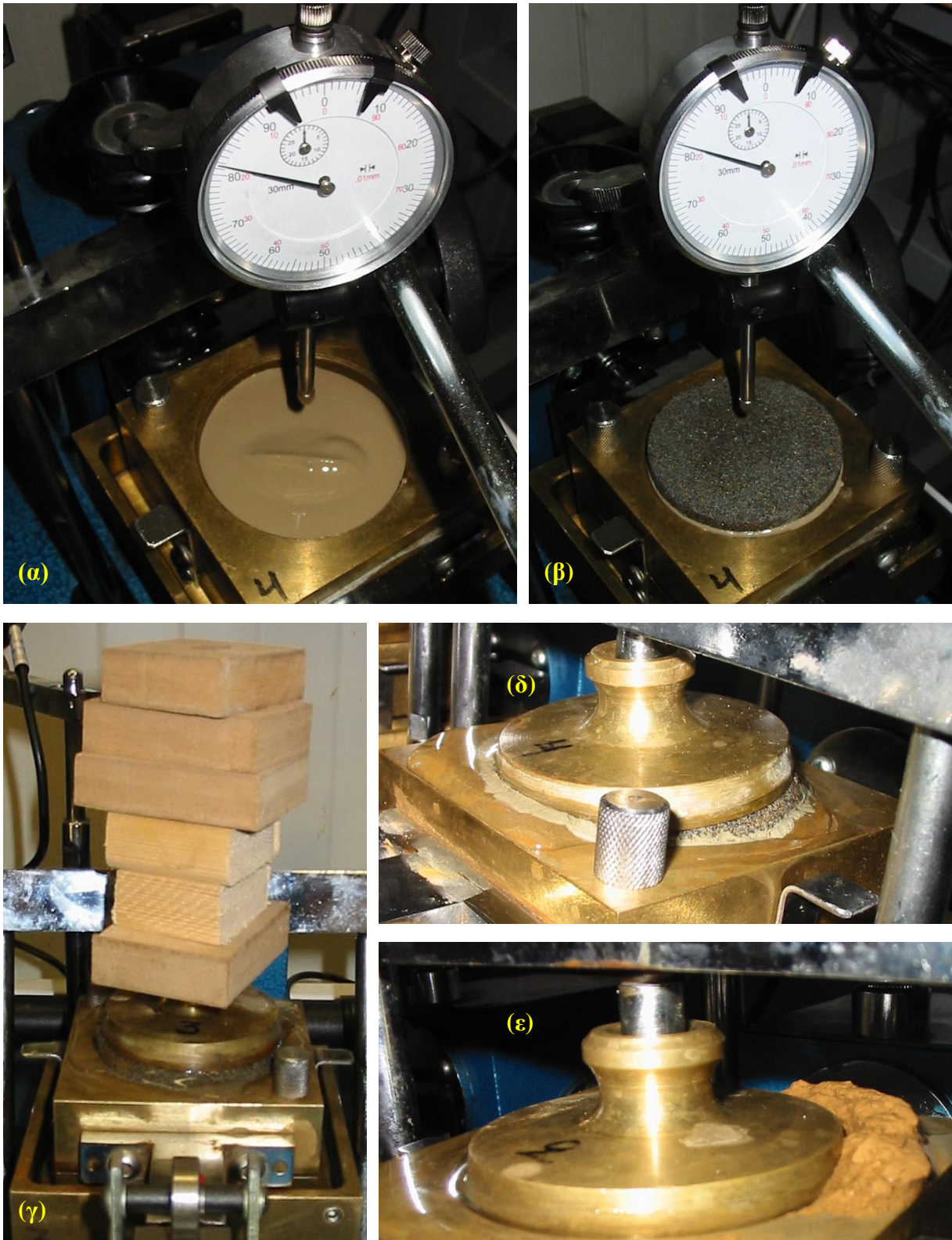
Πριν την εκτέλεση των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για να μετρηθεί η γωνία διατμητικής αντοχής των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη σειρά δοκιμών όταν είναι αναζυμωμένα. Οι δοκιμές έγιναν σε κατακόρυφες τάσεις από 50 έως 300 kPa. Η ταχύτητα διάτμησης για όλες τις δοκιμές ήταν 0.05mm/min, η οποία ήταν επαρκώς χαμηλή οδηγώντας σε χρόνο διάρκειας της διάτμησης πολύ μεγαλύτερο από τον ελάχιστο προβλεπόμενο που ισούται με 50 φορές τον χρόνο ολοκλήρωσης του 50% της στερεοποίησης  $t_{50}$  προσδιοριζόμενο από το προηγηθέν στάδιο της στερεοποίησης (ASTM D3080-04). Στο Σχ. 15.20 παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες διατμητικής αντοχής που προσδιορίστηκαν για κάθε ένα από τα πέντε εδαφικά υλικά με τις γωνίες διατμητικής αντοχής να συνοψίζονται στον Πιν. 15.5. Όπως φαίνεται στο Σχ. 15.20 οι ευθείες βέλτιστης προσέγγισης έχει ζητηθεί να διέλθουν από το 0, το οποίο είναι λογικό για αναζυμωμένα εδαφικά υλικά, ενώ η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι σημαντική ως αποτέλεσμα των προβλημάτων που δημιουργούνται με την παρασκευή δοκιμών αναζυμωμένων υλικών για την εκτέλεση τέτοιων δοκιμών. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η Φωτ. 15.11 όπου φαίνεται η εισαγωγή αναζυμωμένης Μάργας Χαλκουτσίου στις κυψέλες της συσκευής με την χαρακτηριστική υπερχειλίση πολλού κατά την τοποθέτηση του άνω πορολίθου. Τέτοιες υπερχειλίσεις προκαλούν αλλοιώσεις του ύψους των δοκιμών ή ακόμα και στροφή των κατακίων των κυψελών άμεσης διάτμησης με αποτέλεσμα την καταγραφή τιμών της διατμητικής τάσης που μπορεί να μην είναι ακριβείς. Έτσι για τη συγκεκριμένη κατηγορία δοκιμών γίνεται αποδεκτή μια μεγαλύτερη διασπορά όπως παρατηρηθείσα και κατά τον καθορισμό της περιβάλλουσας ζητείται η διέλευσή της από το 0.

**Πίνακας 15.5.** Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά.

Εδαφικό υλικό	Εύρος εφαρμοσθεισών τάσεων (kPa)	Γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'$ (°)
Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου	50 - 200	35.3
Μάργα Κορίνθου	50 - 200	27.5
Αργιλοποιημένος Πυρόλιθος Πάρνηθας	50 - 200	24.7
Άργιλος Αμαρουσίου	50 - 300	19.2
Μάργα Χαλκουτσίου	50 - 200	25.0



**Σχήμα 15.20.** Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά, α) αποσαθρωμένου Φυλλίτη Σκύρου, β) Μάργας Κορίνθου, γ) αργιλοποιημένου Ιλυόλιθου Πάρνηθας, δ) Αργίλου Αμαρουσίου, και ε) Μάργας Χαλκουτσίου.



**Φωτογραφία 15.11.** α) Πολτός Μάργας Χαλκουτσιού μετά την τοποθέτησή του στην κυψέλη άμεσης διάτμησης, β) αμέσως μετά την τοποθέτηση του άνω πορολίθου (διακρίνεται η υπερχειλίση πολτού μεταξύ των ορίων του πορολίθου και των χειλέων της κυψέλης), γ) παράδειγμα τρόπου εφαρμογής μικρών τάσεων για σταδιακή φόρτιση δοκιμίων, δ) & ε) παραδείγματα υπερχειλίσεων πολτού.

### 15.7.3 Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης

Το πρόβλημα με την εκτέλεση και των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και των δοκιμών θλίψης κατά γενέτειρα είναι ότι ακόμα και με την ακολουθηθείσα διαδικασία η μύζηση δεν ελέγχεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής καθεαυτής. Η μύζηση έχει καθοριστεί στο δοκίμιο πράγματι, πριν ξεκινήσει η εκτέλεση κάθε μιας από αυτές τις δύο δοκιμές, αλλά δεν υπάρχει έλεγχος κατά το – σύντομο- γενικά χρονικό διάστημα που το δοκίμιο μεταφέρεται από τον θάλαμο μύζησης και τοποθετείται στη συσκευή αλλά και όσο διαρκεί αυτή καθεαυτή η δοκιμή.

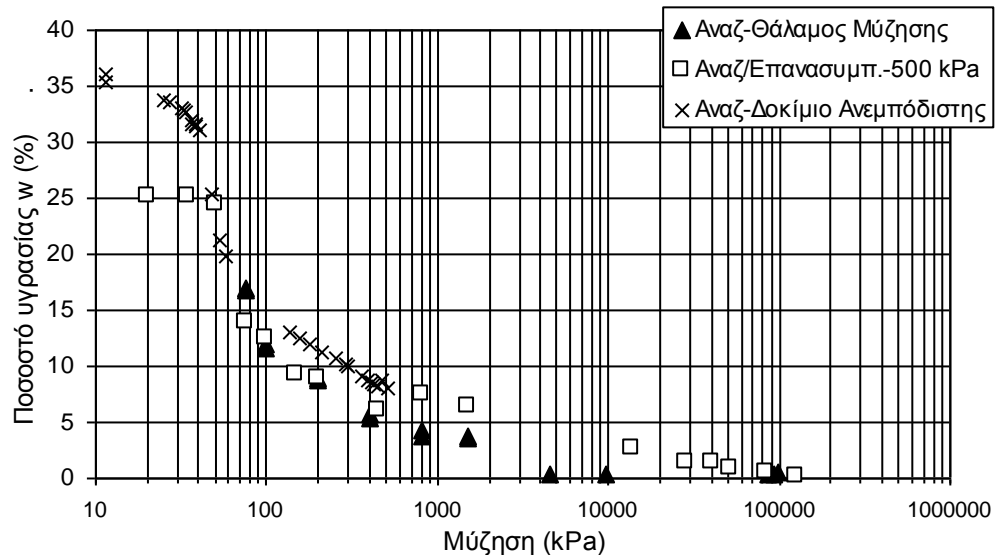
Προκειμένου να εκτιμηθεί αυτή η μεταβολή της μύζησης κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης των δοκιμών εκτελέστηκε μια πρώτη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης με μέτρηση της τιμής της μύζησης με χρήση αισθητήρα MPS-2 της Decagon Devices του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. Ο αισθητήρας αυτός έχει αρκετά καλή ακρίβεια ειδικά σε τιμές της μύζησης από 100 έως 1500 kPa (της τάξης των  $\pm 5$  kPa) και ταχεία απόκριση σε μεταβολές ταχύτητας ανάλογης με αυτή που επιβάλλεται από τη σχετική υγρασία του αέρα σε έναν κλειστό χώρο, όπως ο χώρος ενός εργαστηρίου. Αρχικά μορφώθηκε κατάλληλα πλαστικός τύπος εντός του οποίου τοποθετήθηκε ο αισθητήρας MPS-2 και προσαρμόστηκε σταθερά μέσω πλαστελίνης (Φωτ. 15.12α & 15.12β). Ο αισθητήρας είχε αφεθεί πρώτα για επαρκές χρονικό διάστημα εντός απιονισμένου ύδατος ώστε όταν μπει στον τύπο και προστεθεί ο πολτός του αναζυμωμένου υλικού γύρω του να είναι πλήρως κορεσμένος. Για τη δοκιμή αυτή επιλέχθηκε ως υλικό ο Φυλλίτης Σκύρου. Το σκεπτικό της επιλογής ήταν ότι αυτό ήταν το λιγότερο πλαστικό (για την ακρίβεια μη πλαστικό) από τα πέντε υλικά αυτής της σειράς δοκιμών αλλά και το πιο χονδρόκοκκο. Αν λοιπόν σε αυτό το υλικό, που λόγω αυτών των ιδιοτήτων είναι το πιο διαπερατό και άρα το πιο εύκολο να επηρεαστεί από τις συνθήκες της ατμόσφαιρας του εργαστηρίου, δεν παρουσιάζονταν μεγάλες μεταβολές της μύζησης από τη στιγμή της εξαγωγής του δοκιμίου από το θάλαμο μύζησης μέχρι την εκτέλεση της δοκιμής αλλά και κατά τη διάρκειά της, τότε πόσο μάλλον για τα υπόλοιπα πολύ πιο πλαστικά και λεπτόκοκκα υλικά. Το υλικό λοιπόν παρασκευάστηκε στη μορφή πολτού με αρχικό ποσοστό υγρασίας 50%, το οποίο εξασφάλιζε επαρκή ρευστότητα του μίγματος, και τοποθετήθηκε μέσα στον ετοιμασμένο τύπο και αυτός όλος μαζί επί ζυγού για ταυτόχρονη παρακολούθηση της απώλειας υγρασίας στην ατμόσφαιρα του εργαστηρίου (Φωτ. 15.12γ). Έτσι μέσω αυτής της διάταξης κατέστη δυνατό να παρακολουθείται ταυτόχρονα και το ποσοστό υγρασίας αλλά και η αναπτυσσόμενη μύζηση εντός του δοκιμίου. Στο Σχ. 15.21 παρουσιάζεται η εξέλιξη της μεταβολής του ποσοστού υγρασίας με τη μύζηση κατά την παρακολούθηση αυτών των μεγεθών στην προαναφερθείσα διάταξη. Στο ίδιο σχήμα παρατίθενται και οι μετρη-



**Φωτογραφία 15.12.** α) Ο πλαστικός τύπος εντός του οποίου μορφώθηκε το δείγμα αναζυμωμένου αποσαθρωμένου Φυλλίτη Σκύρου με ενσωματωμένο τον αισθητήρα MPS-2 πριν την τοποθέτηση του πολτού του υλικού στο εσωτερικό του, β) ο ίδιος τύπος όπως φαινόταν εξωτερικά από την πλευρά της εξόδου του σώματος και του καλωδίου του αισθητήρα, και γ) ο ίδιος τύπος αμέσως μετά την τοποθέτησή του πάνω στον ζυγό και την εισαγωγή του πολτού του αναζυμωμένου υλικού.

θείσες χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού του ίδιου υλικού (και σε μορφή πολτού και μετά από συμπίεση στα 500 kPa υπό συνθήκες μονοδιάστατης φόρτισης), όπως προσδιορίστηκαν συνδυάζοντας τη μέθοδο μετατόπισης άξονα και υδατικών διαλυμάτων και παρουσιάστηκαν στην §14.3.13 και ειδικά στο Σχ. 14.21. Γενικά προκύπτει καλή σύμπτωση μεταξύ των προηγούμενων μετρήσεων και της νεώτερης μέσω ξήρανσης στην ατμόσφαιρα του εργαστηρίου.





**Σχήμα 15.21.** Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού αποσαθρωμένου Φυλλίτη Σκύρου σε όρους ποσοστού υγρασίας μύζησης και για το υλικό σε μορφή πολτού και μετά από συμπίεση υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως μέχρι τα 500 kPa με συνδυασμό των μεθόδων μετατόπισης άξονα και υδατικών διαλυμάτων (§14.3.13) και σε μορφή πολτού κατά την ξήρανση στην ατμόσφαιρα του εργαστηρίου του δοκιμίου που υποβλήθηκε σε ανεμπόδιστη θλίψη.

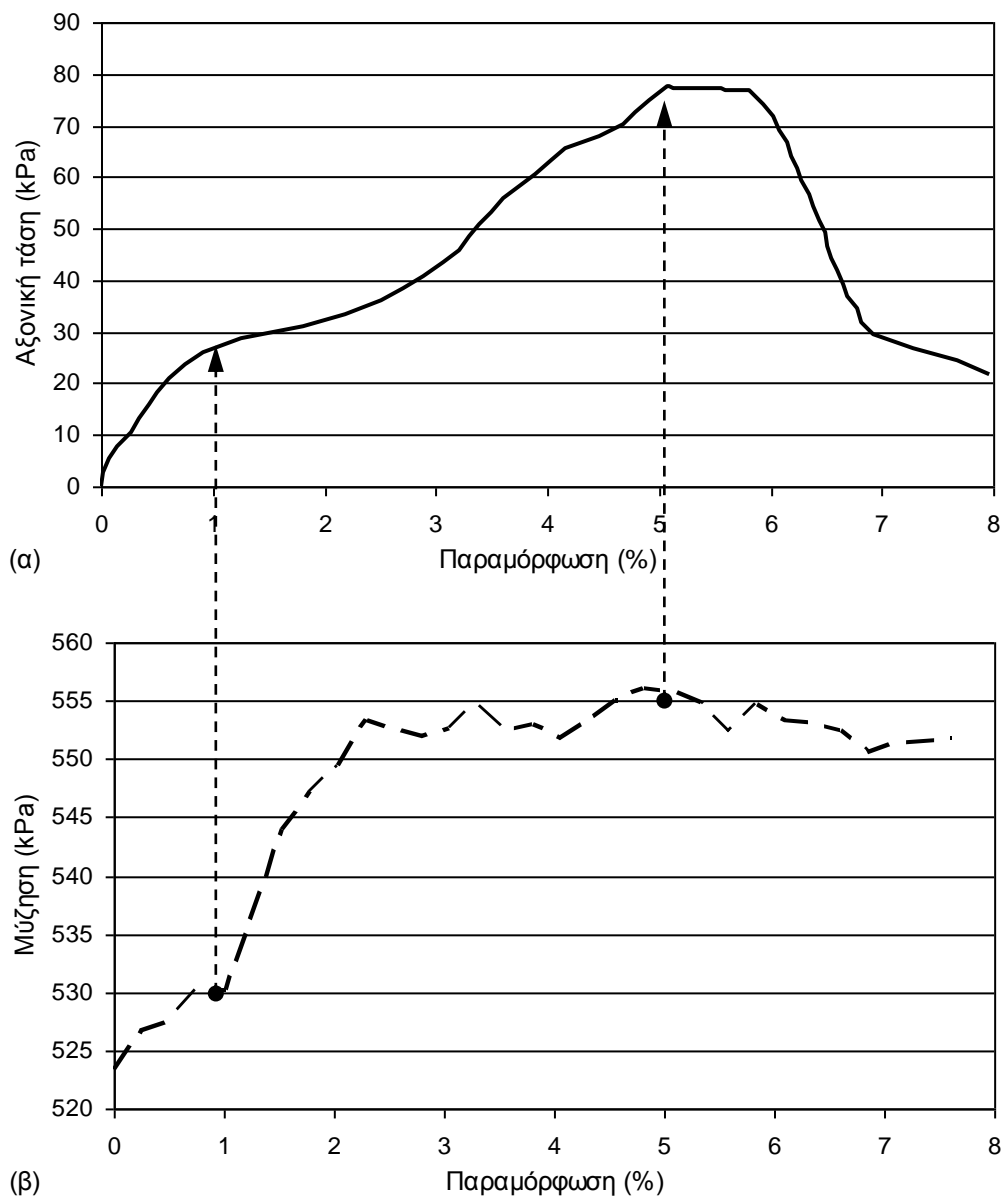
Το δοκίμιο αφέθηκε στις ατμοσφαιρικές συνθήκες του εργαστηρίου προκειμένου να υποστεί ξήρανση μέχρι τιμές της μύζησης που αντιστοιχούσαν περί το μέσον των ασκούμενων τιμών με τη μέθοδο μετατόπισης άξονα όπως αυτή υλοποιείται στο θάλαμο μύζησης με πορολίθους πίεσης διεύθυνσης αέρα 15 Bar. Όταν φάνηκε ότι το δοκίμιο δεν ήταν πια σε ύδαρη κατάσταση αφαιρέθηκε η πλαστελίνη που έκλεινε τη σχισμή στον τύπο (απεικονίζεται στις Φωτ. 15.12α & 15.12β) και ολόκληρος ο πλαστικός τύπος προς επιτάχυνση της επίδρασης των ατμοσφαιρικών συνθηκών στο δοκίμιο και άρα στην ξήρανσή του (Φωτ. 15.13α) μέσω της έκθεσης μεγαλύτερης επιφάνειας του δοκιμίου στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Όπως απεικονίζεται στη Φωτ. 15.13β δεν αλλοιώθηκε η μορφή ή οι γεωμετρικές διαστάσεις του δοκιμίου κατά την αφαίρεση του πλαστικού τύπου, αφήνοντας ως μόνη επιρροή κατά την εκτέλεση της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης αυτή καθεαυτή την παρουσία του αισθητήρα MPS-2 (Φωτ. 15.13β & 15.13γ).

Όταν η τιμή της μύζησης έφτασε περί τα 500 kPa (για την ακρίβεια 510 kPa), το δοκίμιο μεταφέρθηκε από τον ζυγό που βρισκόταν (η ξήρανση διήρκεσε περί τις 10 ημέρες) στο πλαίσιο εκτέλεσης της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης, αφού πρώτα μετρήθηκαν οι διαστάσεις του. Κατά τον χρόνο που παρήλθε μεταξύ απομάκρυνσης από τον ζυγό παρακολούθησης της απώλειας υγρασίας μέχρι την έναρξη της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης (περίπου 10 λεπτά), η μύζηση του



**Φωτογραφία 15.13.** α) Δείγμα αναζυμωμένου αποσαθρωμένου Φυλλίτη Σκύρου μετά την ξήρανσή του σε βαθμό τέτοιο που να μπορεί να αφαιρεθεί ο πλαστικός τύπος εντός του οποίου μορφώθηκε, ο οποίος διακρίνεται δεξιά με την οπή για την τοποθέτηση του MPS-2, β) το δοκίμιο με καλύτερη άποψη του άκρου του MPS-2 όπως εξέρχεται από αυτό, γ) το δοκίμιο επί του πλαισίου φόρτισης κατά την θλίψη, και δ) ο αισθητήρας μετά την αφαίρεσή του από το δοκίμιο (διακρίνεται η καλή επαφή υλικού και πορώδους υλικού αισθητήρα).

δοκιμίου μεταβλήθηκε από τα 510 στα 523 kPa (μεταβολή 13 kPa, στην προκειμένη περίπτωση 2.5% επί της αρχικής τιμής της μύζησης). Στο Σχ. 15.22α παρουσιάζεται η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης και στο Σχ. 15.22β παρουσιάζεται η εξέλιξη της μύζησης κατά τη διάρκεια της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης με τον χρόνο ανηγμένο στην παραμόρφωση κατά τη δοκιμή για ευθεία αντιστοίχιση με την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης στο Σχ. 15.22α. Ο ρυθμός μετατόπισης κατά τη δοκιμή ήταν 0.3mm/min που αντιστοιχούσε σε περίπου 0.25%/min ρυθμό παραμόρφωσης, ο οποίος σημειώνεται ότι με βάση το πρότυπο ASTM D 2166 είναι δύο φορές



**Σχήμα 15.22.** α) Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, και β) εξέλιξη της μύζησης κατά τη διάρκεια της δοκιμής (με τον χρόνο να έχει αντιστοιχηθεί στην παραμόρφωση για ευθεία σύγκριση με την καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης).

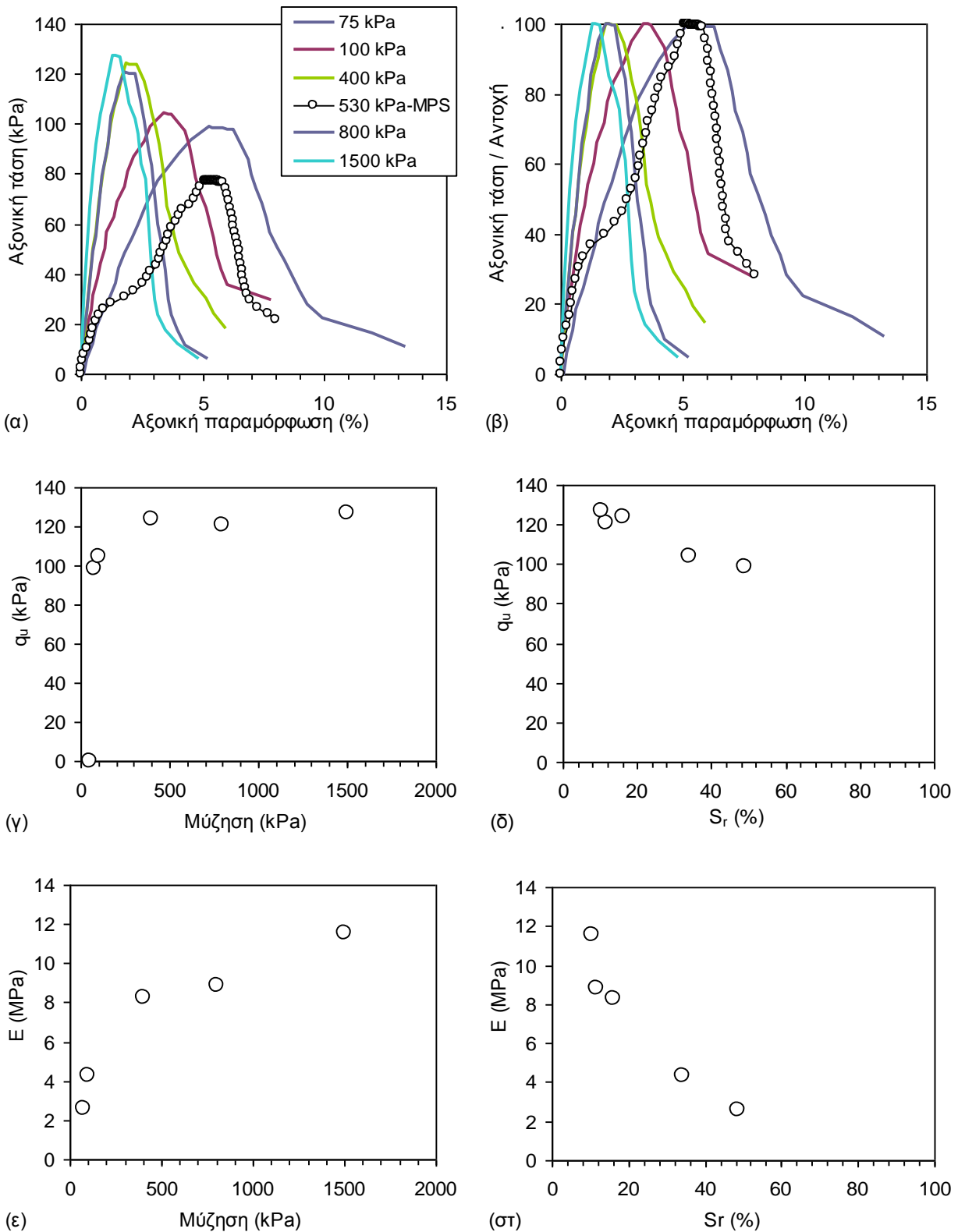
μικρότερος από τον ελάχιστο απαιτούμενο με βάση το ύψος του δοκιμίου. Ο συνολικός χρόνος που διήρκεσε η δοκιμή ήταν 31.5 λεπτά. Όπως προκύπτει από το Σχ. 15.22α υπήρξε μια πρώτη «διαρροή» σε παραμόρφωση περί το 1% μέχρι την οποία η μύζηση είχε μεταβληθεί από 523 kPa σε 530 kPa. Από το σημείο αυτό μέχρι και την τελική αστοχία σε παραμόρφωση 5% η μύζηση ανήλθε τελικά σε 556 kPa. Ακόμα και αν δεχτούμε αυτή τη μέγιστη τιμή, από το τέλος της παρακολούθησης ξήρανσης (το ισοδύναμο της εξαγωγής ενός δοκιμίου από τον θάλαμο μύζησης) μέχρι την επίτευξη θραύσης σε μια δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης (πολύ μεγαλύτερης διάρκειας από τη δοκιμή θλίψης κατά γενέτειρα), η οποία μάλιστα εκτελέστηκε με δυο φορές πιο αργό ρυθμό από τον απαιτούμενο από το πρότυπο και μάλιστα σε ένα μη πλαστικό υλικό, η μεταβολή στη μύζηση είναι από 510 kPa σε 556 kPa (ποσοστιαία μεταβολή 9%). Όπως ωστόσο φαίνεται στις Φωτ. 15.13α και 15.13β η επιφάνεια του δοκιμίου στην πάνω πλευρά του είναι αρκετά ανώμαλη (και επιλέχθηκε να αφεθεί έτσι, ώστε αφενός να μην καθυστερήσει κι άλλο η προετοιμασία του δοκιμίου, και αφετέρου να μην υπάρξει κίνδυνος θραύσης του δοκιμίου κατά λάθος αφού ήταν αρκετά ψαθυρό). Αυτό πιθανόν να οδήγησε σε μικρορωγμές και τοπικές μικροαστοχίες (γι' αυτό και μια πρώτη «διαρροή» σε παραμόρφωση 1%) οι οποίες προκάλεσαν τοπική αποκόλληση υλικού από τον αισθητήρα (στον οποίο κατά τα άλλα ήταν γενικά πολύ καλή η επαφή με το δοκίμιο όπως φαίνεται από τα ίχνη του υλικού στη Φωτ. 15.13δ) και άρα μεγαλύτερη πρόσβαση του ατμοσφαιρικού αέρα σε αυτόν. Αυτό πιθανότατα εξηγεί τη μεγάλη αύξηση της μύζησης από την παραμόρφωση 1% και μετά μέχρι το 2.5% περίπου. Κατά συνέπεια, υπάρχει το ενδεχόμενο, μέρος της παρατηρηθείσας αύξησης της μύζησης να μην αφορά σε πραγματική αύξηση της μύζησης του δοκιμίου αλλά σε αύξηση της καταγραφόμενης από τον αισθητήρα τιμής της μύζησης λόγω επαφής –μέρους της επιφάνειάς του- με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Δεδομένων όλων αυτών η καταγραφείσα αύξηση της μύζησης πρέπει να θεωρείται μάλλον άνω όριο για δοκιμές όπως η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης και η δοκιμή θλίψης κατά γενέτειρα. Μάλιστα λαμβανομένου υπόψη του ενδεχόμενου που προαναφέρθηκε η καταγραφείσα αύξηση να είναι πλασματική, ενώ αυτό ήταν το λιγότερο πλαστικό και πιο διαπερατό υλικό από τα υλικά αυτής της σειράς δοκιμών, και μάλιστα η δοκιμή διήρκεσε επίτηδες διπλάσιο χρόνο, εκτιμάται ότι η μεταβολή της μύζησης από τη στιγμή της εξαγωγής δοκιμίων από το θάλαμο μύζησης ή το θάλαμο υδατικών διαλυμάτων είναι κατά τάξη μεγέθους περί το 5% και αυτό για τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης. Για τις δοκιμές θλίψης κατά γενέτειρα, αναμένεται να είναι ακόμα πιο μικρή, λόγω της πολύ μικρότερης διάρκειας της δοκιμής. Αυτή η συγκεκριμένη δοκιμή τεκμηριώνει τη διατήρηση της μύζησης πρακτικά σταθερής κατά τη διάρκεια εκτέλεσης δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και δοκιμών θλίψης κατά

γενέτειρα σε δοκίμια που έχουν υποβληθεί προηγούμενα σε ξήρανση μέχρι αποκατάστασης μιας τιμής της μύζησης εντός θαλάμων μύζησης και θαλάμων υδατικών διαλυμάτων.

Στο Σχ. 15.23α παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης από όλες τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν σε δοκίμια αποσθρωμένου Φυλλίτη Σκύρου. 50 kPa ήταν η μεγαλύτερη τιμή της μύζησης για την οποία δεν καταγράφηκε αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη (υπενθυμίζεται ότι όλα τα υλικά σε αυτές τις δοκιμές ξεκίνησαν από αρχική κατάσταση πολτού). Στο Σχ. 15.23β παρουσιάζονται οι ίδιες καμπύλες με την τάση κανονικοποιημένη ως προς την αντοχή όπως προέκυψε για κάθε δοκιμή. Στα δύο αυτά σχήματα παρατίθεται και η καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του δοκιμίου στο οποίο παρακολουθείτο η μύζηση και στο οποίο μετρήθηκε μικρότερη τιμή της αντοχής λόγω μεγαλύτερου μεγέθους δοκιμίου και παρουσίας του ίδιου του αισθητήρα. Στο Σχ. 15.23γ παρουσιάζεται η εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση και στο Σχ. 15.23δ η εξέλιξή της με τον βαθμό κορεσμού. Τέλος στο Σχ. 15.23ε παρουσιάζεται η εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων με τη μύζηση και στο Σχ. 15.23στ η εξέλιξή του με τον βαθμό κορεσμού.

Όπως προκύπτει από το Σχ. 15.23α και 15.23γ η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη αυξάνει με την αύξηση της μύζησης και όπως προκύπτει από το Σχ. 15.23δ αυξάνεται με την αντίστοιχη μείωση του βαθμού κορεσμού. Όπως φαίνεται επίσης στα Σχ. 15.23ε και 15.23στ αντίστοιχα το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με τη μύζηση και μειώνεται με τον βαθμό κορεσμού. Η αύξηση της μύζησης επίσης προκαλεί έντονη αύξηση της ψαθυρότητας των υλικών όπως φαίνεται και από το Σχ. 15.23α αλλά και κυρίως από το Σχ. 15.23β στο οποίο η αξονική τάση έχει κανονικοποιηθεί ως προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη για κάθε τιμή της μύζησης.

Στο Σχ. 15.24α παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης από όλες τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν σε δοκίμια Μάργας Κορίνθου. Στο Σχ. 15.24β παρουσιάζονται οι ίδιες καμπύλες με την τάση κανονικοποιημένη ως προς την αντοχή όπως προέκυψε για κάθε δοκιμή. Στο Σχ. 15.24γ παρουσιάζεται η εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση για τιμές της μύζησης έως 1500 kPa και στο Σχ. 15.24δ η εξέλιξή της με τον βαθμό κορεσμού. Τέλος στο Σχ. 15.24ε παρουσιάζεται η εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων με τη μύζηση για τιμές της μύζησης έως 1500 kPa και στο Σχ. 15.24στ η εξέλιξή του με τον βαθμό κορεσμού. Η εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση για όλες τις τιμές της μύζησης παρουσιάζεται στο Σχ. 15.25α και του μέτρου ελαστικότητας για όλες τις τιμές της μύζησης στο Σχ. 15.25β. Στο υλικό αυτό εκτελέστηκαν και δοκιμές σε δοκίμια που εί-

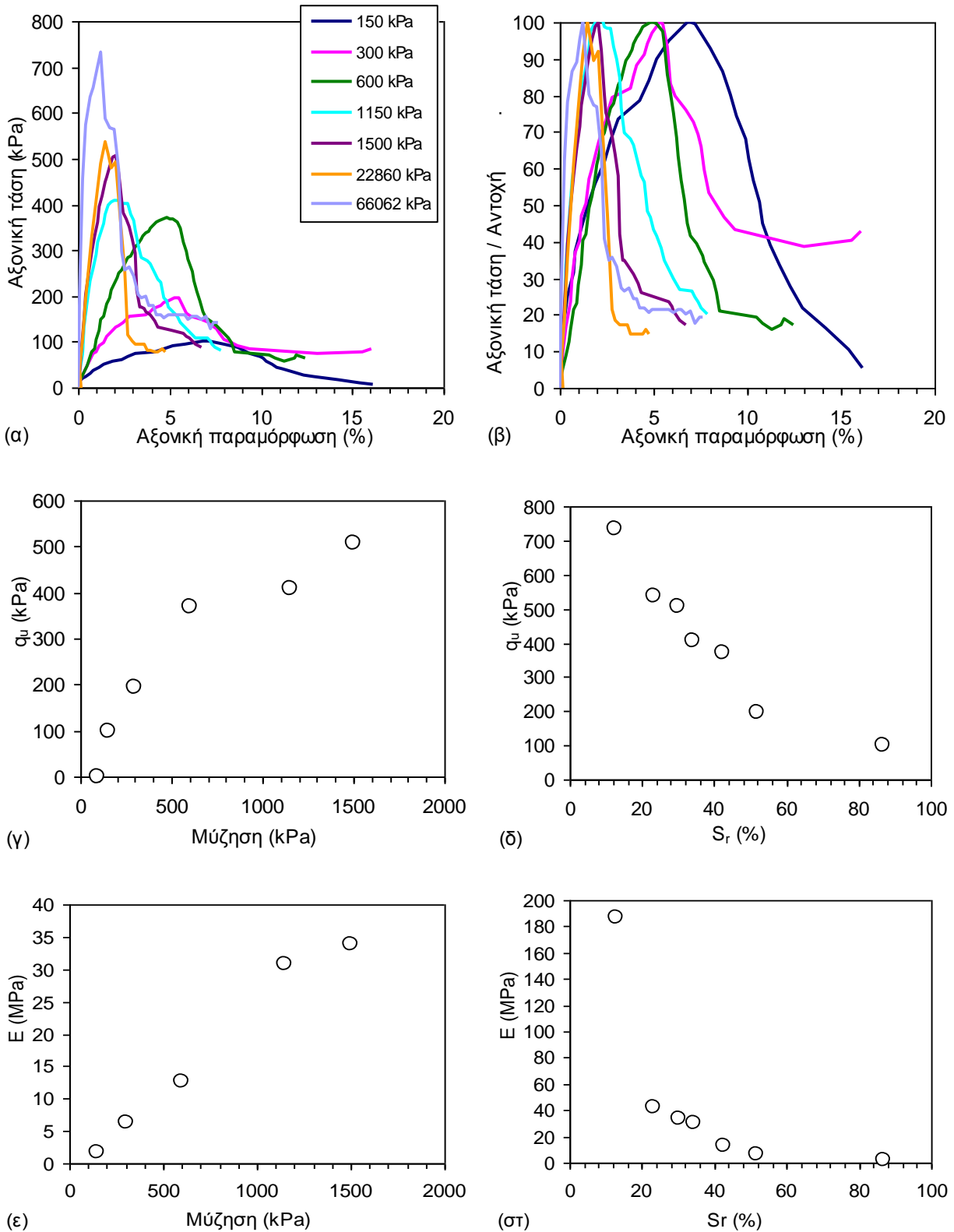


**Σχήμα 15.23.** Φυλλίτης Σκόρου: α) Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, β) οι ίδιες καμπύλες κανονικοποιημένες με την αντοχή για κάθε τιμή της μύζησης, γ) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση, δ) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τον βαθμό κορεσμού, ε) εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας με τη μύζηση, και στ) εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας με τον βαθμό κορεσμού.

χαν παραμείνει για ξήρανση σε θάλαμο με κορεσμένο υδατικό διάλυμα NaCl και σε θάλαμο με διάλυμα MgCl<sub>2</sub>, αποκτώντας τιμές της μύζησης 22860 και 66062 kPa αντίστοιχα. Λόγω του μεγάλου μεγέθους αυτών των τιμών της μύζησης σχεδιάστηκαν και τα Σχ. 15.24γ και 15.24ε για τιμές της μύζησης έως 1500 kPa αλλά και τα Σχ. 15.25α και 15.25β για όλο το εύρος των τιμών της μύζησης. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν και για τις δοκιμές στη Μάργα Κορίνθου είναι τα ίδια όπως και για τον αποσαθρωμένο Φυλλίτη Σκύρου.

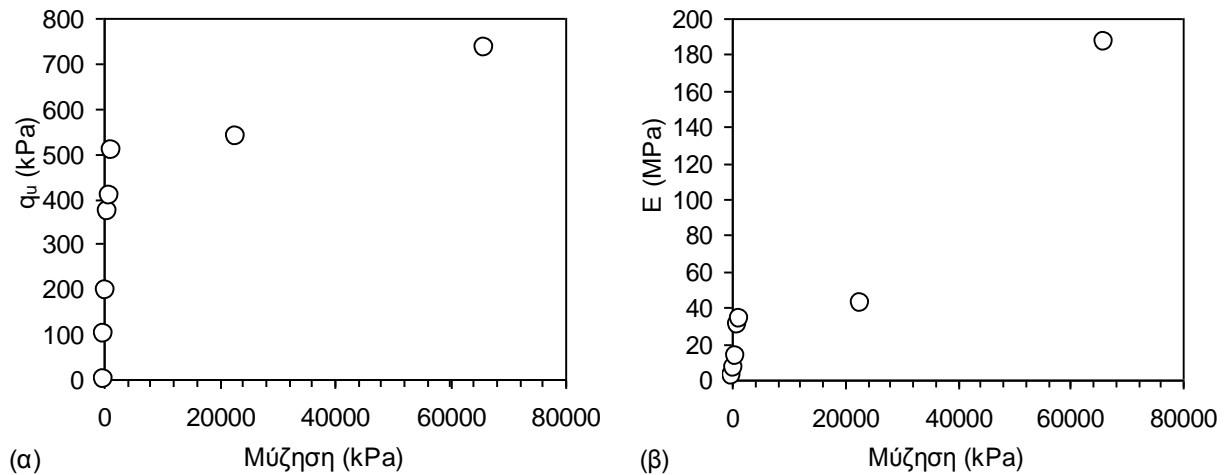
Στο Σχ. 15.26α παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης από όλες τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν σε δοκίμια αργιλοποιημένου Ιλυόλιθου Πάρνηθας. Στο Σχ. 15.26β παρουσιάζονται οι ίδιες καμπύλες με την τάση κανονικοποιημένη ως προς την αντοχή όπως προέκυψε για κάθε δοκιμή. Στο Σχ. 15.26γ παρουσιάζεται η εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση για τιμές της μύζησης έως 1500 kPa και στο Σχ. 15.26δ η εξέλιξή της με τον βαθμό κορεσμού. Τέλος στο Σχ. 15.26ε παρουσιάζεται η εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων με τη μύζηση για τιμές της μύζησης έως 1500 kPa και στο Σχ. 15.26στ η εξέλιξή του με τον βαθμό κορεσμού. Η εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση για όλες τις τιμές της μύζησης παρουσιάζεται στο Σχ. 15.27α και του μέτρου ελαστικότητας για όλες τις τιμές της μύζησης στο Σχ. 15.27β. Στο υλικό αυτό εκτελέστηκε και δοκιμή σε ένα δοκίμιο που είχε αφηθεί για ξήρανση στον ατμοσφαιρικό αέρα και ανέπτυξε μύζηση 107500 kPa. Λόγω του μεγάλου μεγέθους αυτής της τιμής της μύζησης σχεδιάστηκαν και τα Σχ. 15.26γ και 15.26ε για τιμές της μύζησης έως 1500 kPa αλλά και τα Σχ. 15.27α και 15.27β για όλο το εύρος των τιμών της μύζησης. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν και για τις δοκιμές στον αργιλοποιημένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας είναι τα ίδια όπως και για τον αποσαθρωμένο Φυλλίτη Σκύρου και για τη Μάργα Κορίνθου.

Στο Σχ. 15.28α παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης από όλες τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν σε δοκίμια Αργίλου Αμαρουσίου. Στο Σχ. 15.28β παρουσιάζονται οι ίδιες καμπύλες με την τάση κανονικοποιημένη ως προς την αντοχή όπως προέκυψε για κάθε δοκιμή. Στο Σχ. 15.28γ παρουσιάζεται η εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση και στο Σχ. 15.26δ η εξέλιξή της με τον βαθμό κορεσμού. Τέλος στο Σχ. 15.26ε παρουσιάζεται η εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων με τη μύζηση και στο Σχ. 15.26στ η εξέλιξή του με τον βαθμό κορεσμού. Και για την αναζυμωμένη Άργιλο Αμαρουσίου προέκυψαν τα ίδια αποτελέσματα όπως και για τα προηγούμενα υλικά στα οποία εκτέλεστηκαν οι αντίστοιχες δοκιμές.



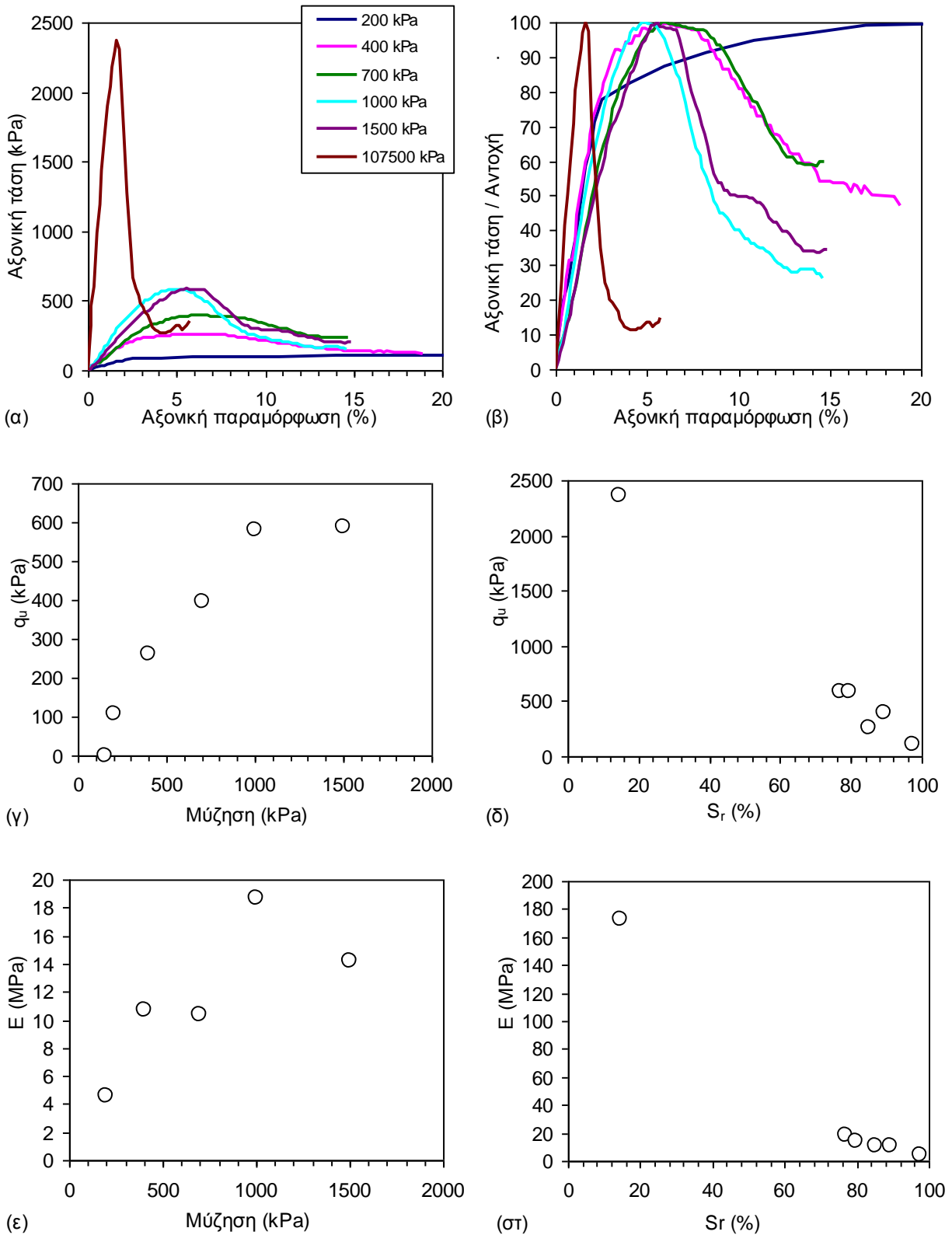
**Σχήμα 15.24.** Μάργα Κορίνθου: α) Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, β) οι ίδιες καμπύλες κανονικοποιημένες με την αντοχή για κάθε τιμή της μύζησης, γ) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση, δ) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τον βαθμό κορεσμού, ε) εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας με τη μύζηση, και στ) εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας με τον βαθμό κορεσμού.



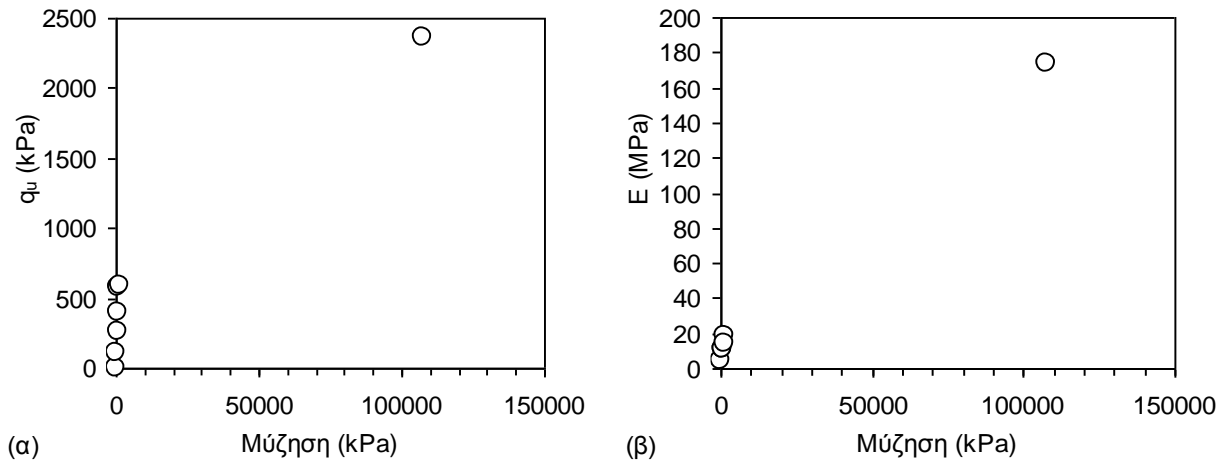


**Σχήμα 15.25.** Μάργα Κορίνθου: α) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση για όλες τις τιμές της μύζησης, και β) εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας με τη μύζηση για όλες τις τιμές της μύζησης.

Στο Σχ. 15.29α παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης από όλες τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν σε δοκίμια Μάργας Χαλκουτσίου. Στο Σχ. 15.29β παρουσιάζονται οι ίδιες καμπύλες με την τάση κανονικοποιημένη ως προς την αντοχή όπως προέκυψε για κάθε δοκιμή. Στο Σχ. 15.29γ παρουσιάζεται η εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση για τιμές της μύζησης έως 1500 kPa και στο Σχ. 15.29δ η εξέλιξή της με τον βαθμό κορεσμού. Τέλος στο Σχ. 15.29ε παρουσιάζεται η εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων με τη μύζηση για τιμές της μύζησης έως 1500 kPa και στο Σχ. 15.29στ η εξέλιξή του με τον βαθμό κορεσμού. Η εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση για όλες τις τιμές της μύζησης παρουσιάζεται στο Σχ. 15.30α και του μέτρου ελαστικότητας για όλες τις τιμές της μύζησης στο Σχ. 15.30β. Στο υλικό αυτό εκτελέστηκε και δοκιμή σε ένα δοκίμιο που είχε αφεθεί για ξήρανση στον ατμοσφαιρικό αέρα και ανέπτυξε μύζηση 123000 kPa. Λόγω του μεγάλου μεγέθους αυτής της τιμής της μύζησης σχεδιάστηκαν και τα Σχ. 15.29γ και 15.29ε για τιμές της μύζησης έως 1500 kPa αλλά και τα Σχ. 15.30α και 15.30β για όλο το εύρος των τιμών της μύζησης. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν και για τις δοκιμές στη Μάργα Χαλκουτσίου είναι τα ίδια όπως και για τα υπόλοιπα υλικά.

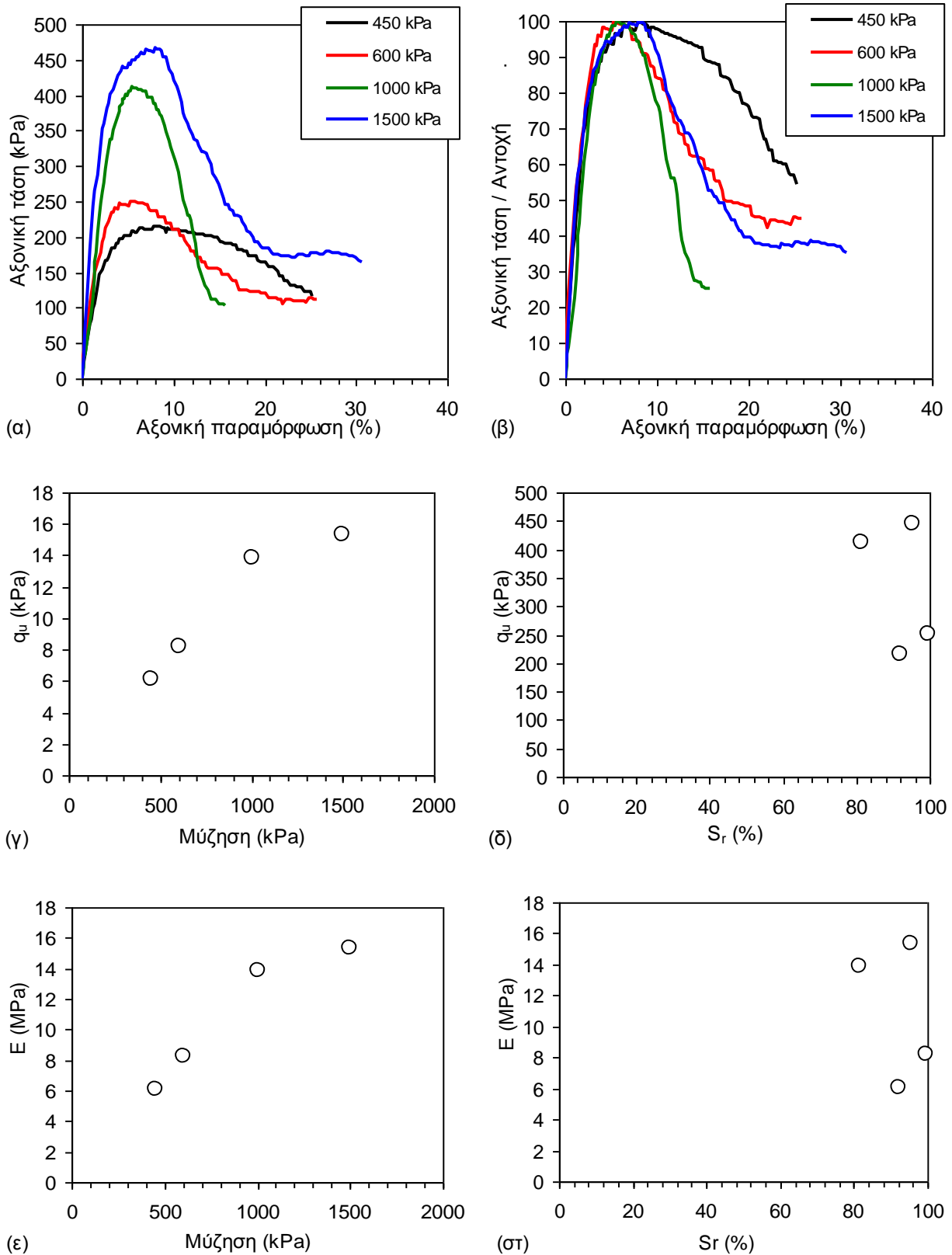


**Σχήμα 15.26.** Αργιλοποιημένος Ιλύολιθος Πάρνηθας: α) Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, β) οι ίδιες καμπύλες κανονικοποιημένες με την αντοχή για κάθε τιμή της μύζησης, γ) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση, δ) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τον βαθμό κορεσμού, εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας ε) με τη μύζηση, και στ) με τον βαθμό κορεσμού.

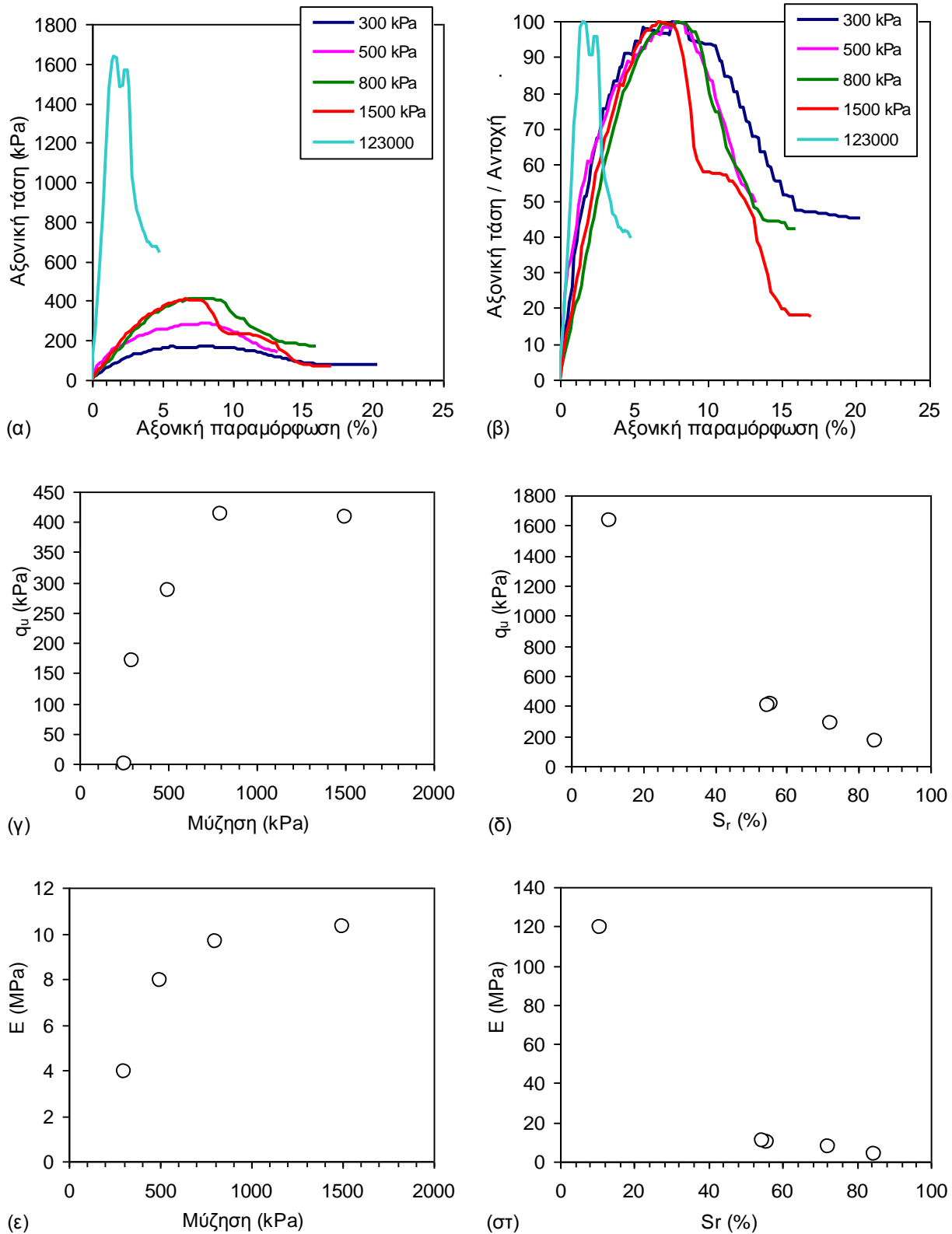


**Σχήμα 15.27.** Αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας: α) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση για όλες τις τιμές της μύζησης, και β) εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας με τη μύζηση για όλες τις τιμές της μύζησης.

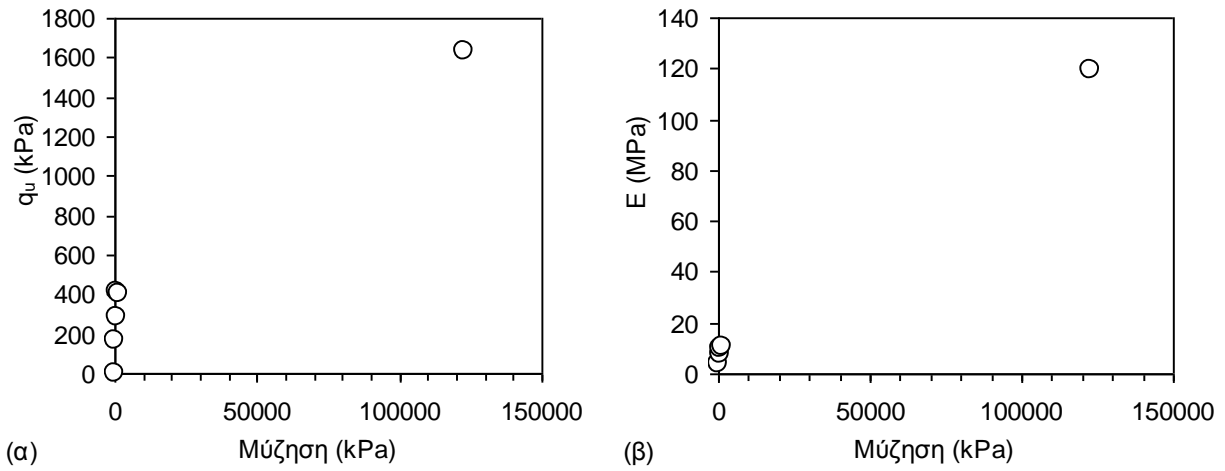
Στο Σχ. 15.31 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα για όλα τα υλικά με την εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση και με το βαθμό κορεσμού, και στο Σχ. 15.32 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα για όλα τα υλικά με την εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας με τη μύζηση και με το βαθμό κορεσμού. Όπως προκύπτει από το Σχ. 15.31α για όλα τα υλικά υπάρχει μια τιμή της μύζησης πέρα από την οποία η αντοχή τους σε ανεμπόδιστη θλίψη σταθεροποιείται ή αρχίζει να αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό. Επίσης, όπως φαίνεται και από το Σχ. 15.31α αλλά και από το Σχ. 15.31β, ο μερικός κορεσμός επιδρά σε διαφορετικό βαθμό ανάλογα με την πλαστικότητα των υλικών. Λιγότερο πλαστικά υλικά αναπτύσσουν μικρότερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας για τις ίδιες τιμές του βαθμού κορεσμού σε σχέση με πιο πλαστικά υλικά. Είναι χαρακτηριστικές οι διαφορές και στο Σχ. 15.31β και στο Σχ. 15.32β μεταξύ αργιλοποιημένου Ιλυολίθου Πάρνηθας και Μάργας Χαλκουτσίου σε σχέση με τη Μάργα Κορίνθου και τον αποσαθρωμένο Φυλλίτη Σκύρου.



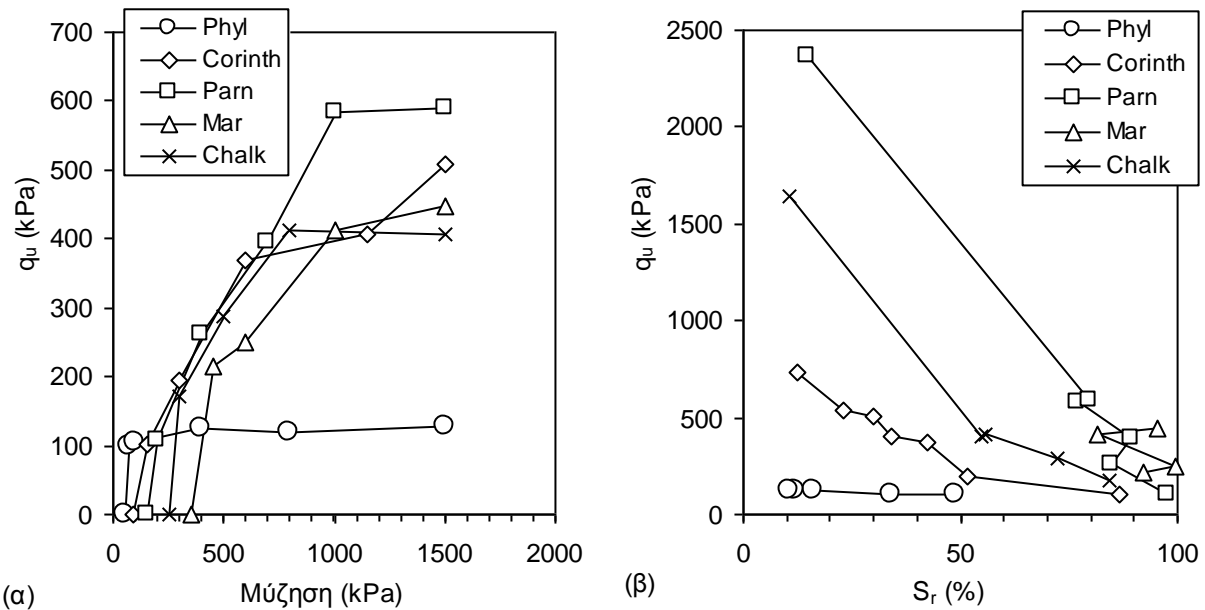
**Σχήμα 15.28.** Άργιλος Αμαρουσίου: α) Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, β) οι ίδιες καμπύλες κανονικοποιημένες με την αντοχή για κάθε τιμή της μύζησης, γ) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση, δ) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τον βαθμό κορεσμού, ε) εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας ε) με τη μύζηση, και στ) με τον βαθμό κορεσμού.



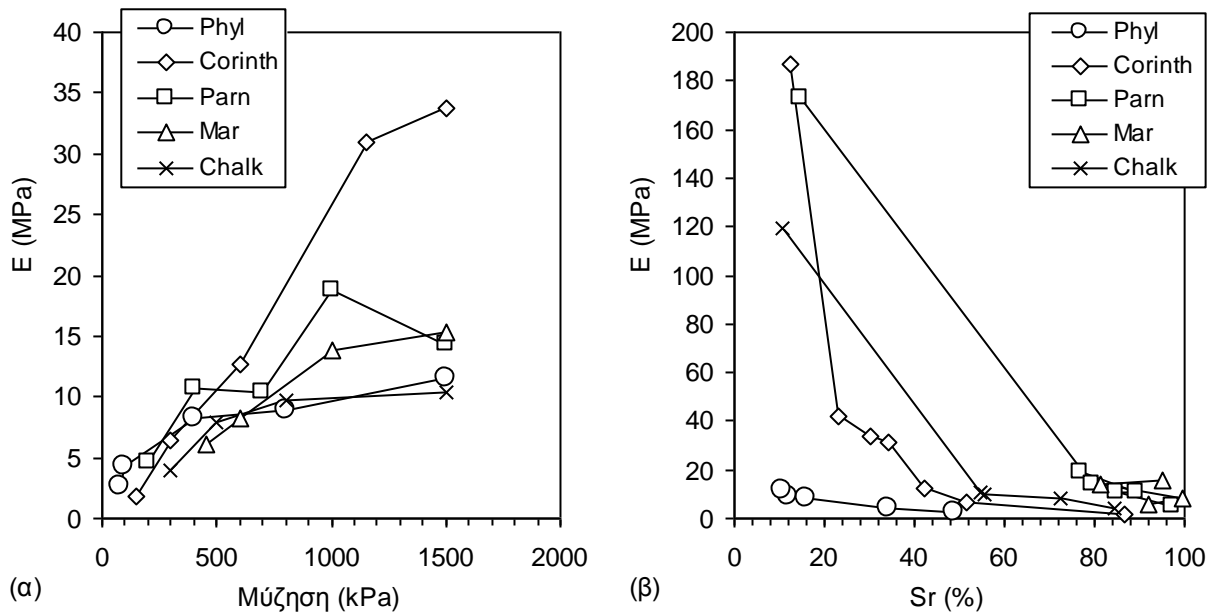
**Σχήμα 15.29.** Μάργα Χαλκουτσίου: α) Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης, β) οι ίδιες καμπύλες κανονικοποιημένες με την αντοχή για κάθε τιμή της μύζησης, γ) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση, δ) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τον βαθμό κορεσμού, ε) εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας με τη μύζηση, και στ) εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας με τον βαθμό κορεσμού.



**Σχήμα 15.30.** Μάργα Χαλκουτσίου: α) εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση για όλες τις τιμές της μύζησης, και β) εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας με τη μύζηση για όλες τις τιμές της μύζησης.



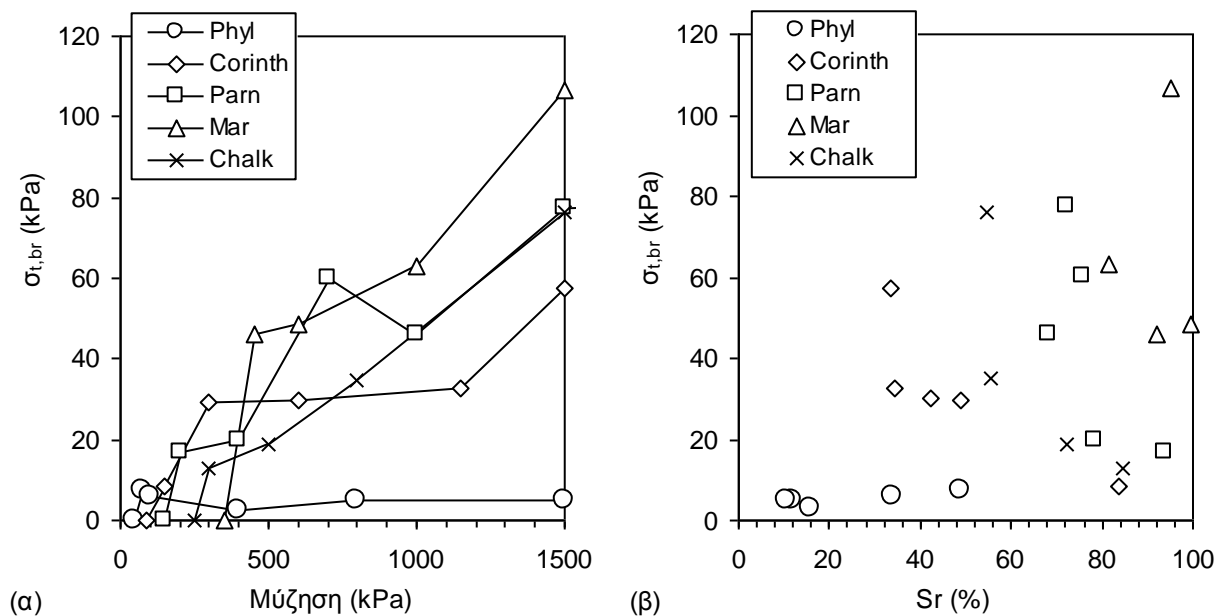
**Σχήμα 15.31.** Εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη για όλα τα υλικά αυτής της σειράς δοκιμών α) με τη μύζηση (για τιμές μέχρι τα 1500 kPa), και β) με το βαθμό κορεσμού.



**Σχήμα 15.32.** Εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας από τη δοκιμή σε ανεμπόδιστη θλίψη για όλα τα υλικά αυτής της σειράς δοκιμών α) με τη μύζηση (για τιμές μέχρι τα 1500 kPa), και β) με το βαθμό κορεσμού.

#### 15.7.4 Δοκιμές θλίψης κατά γενέτειρα

Στο Σχ. 15.33 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα για όλα τα υλικά με την εξέλιξη της αντοχής σε θλίψη κατά γενέτειρα με τη μύζηση και με το βαθμό κορεσμού. Όπως προκύπτει από το Σχ. 15.33α για όλα τα υλικά υπάρχει μια τιμή της μύζησης πέρα από την οποία η αντοχή τους σε θλίψη κατά γενέτειρα σταθεροποιείται ή αρχίζει να αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό, ή αρχίζει ακόμα και να μειώνεται όπως στην περίπτωση του φυλλίτη. Επίσης, όπως φαίνεται και από το Σχ. 15.33α αλλά και από το Σχ. 15.33β, ο μερικός κορεσμός επιδρά σε διαφορετικό βαθμό ανάλογα με την πλαστικότητα των υλικών. Λιγότερο πλαστικά υλικά αναπτύσσουν μικρότερη αντοχή για τις ίδιες τιμές του βαθμού κορεσμού σε σχέση με πιο πλαστικά υλικά. Είναι χαρακτηριστικές οι διαφορές στο Σχ. 15.33 μεταξύ αργιλοποιημένου Ιλυολίθου Πάρνηθας, Αργίλου Αμαρουσίου και Μάργας Χαλκουτσίου σε σχέση με τη Μάργα Κορίνθου και τον αποσαθρωμένο Φυλλίτη Σκύρου.



**Σχήμα 15.33.** Εξέλιξη της αντοχής σε θλίψη κατά γενέτειρα για όλα τα υλικά αυτής της σειράς δοκιμών α) με τη μύζηση (για τιμές μέχρι τα 1500 kPa), και β) με το βαθμό κορεσμού.

### 15.7.5 Συνδυασμός αποτελεσμάτων

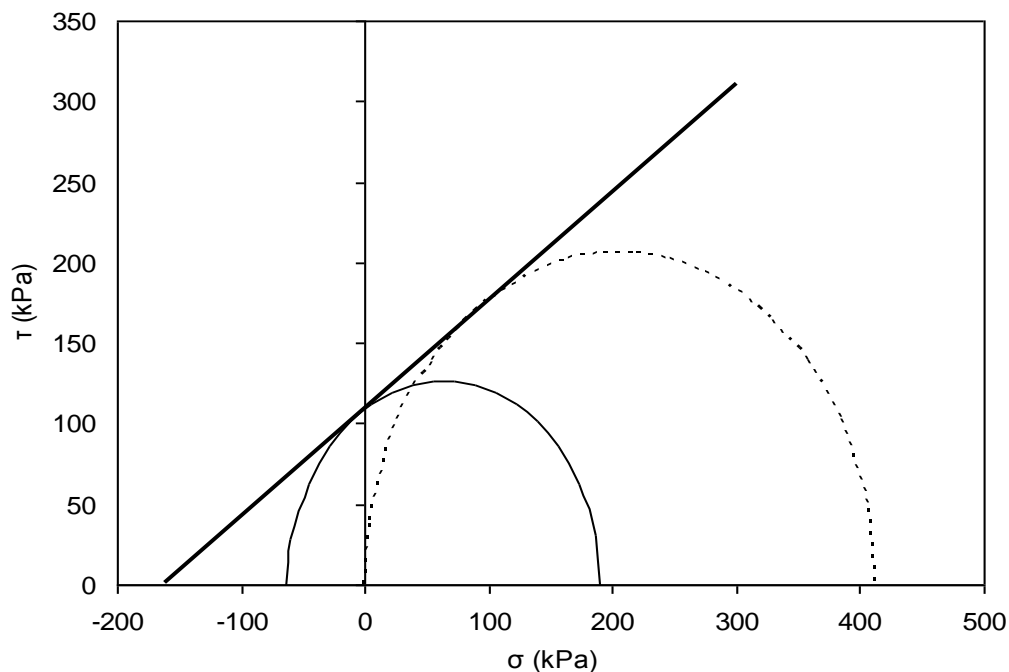
Όπως αναφέρθηκε στην §15.7.1 αντικειμενικός σκοπός αυτής της σειράς δοκιμών ήταν να συνδυαστούν για τα πέντε εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα υπό την ίδια τάση για να εκτιμηθεί η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής των εδαφικών αυτών υλικών με τη μύζηση μέσω της εκτίμησης της τομής της περιβάλλουσας διατμητικής αντοχής για κάθε μύζηση με τον άξονα της διατμητικής τάσης (βλ. Σχ. 15.19) που συνιστά τη «φαινόμενη» συνοχή του γενικευμένου κριτηρίου Mohr-Coulomb. Για αυτόν το λόγο άλλωστε επιλέχθηκε στις §15.7.3 και §15.7.4 να μην γίνει αναφορά στις τιμές της μύζησης που μοιάζει να συμβαίνει κάποια μεταβολή στην εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη ή της θλίψης κατά γενέτειρα με την μύζηση, αφού αυτές οι τιμές της μύζησης δεν συνιστούν κάτι χαρακτηριστικό. Αυτές οι τιμές θα επισημανθούν στη συνέχεια για τη «φαινόμενη» συνοχή.

Στο Σχ. 15.34 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του τρόπου χρήσης των κύκλων Mohr για την περίπτωση της Αργίλου Αμαρουσίου υπό 1000 kPa μύζησης. Έχει χαραχθεί η περιβάλλουσα που εφάπτεται στους δύο κύκλους και περιγράφεται από τιμή της φαινόμενης συνοχής 110 kPa



και γωνία διατμητικής αντοχής  $33.8^\circ$ . Η υπόθεση που έχει γίνει είναι ότι τουλάχιστον στο εύρος τιμών τάσης μεταξύ των δύο κύκλων Mohr μπορεί να υποθεθεί γραμμικότητα της περιβάλλουσας και τότε να προσδιοριστούν τιμές φαινόμενης συνοχής και γωνίας διατμητικής αντοχής. Αυτό επισημαίνεται γιατί πράγματι όπως φαίνεται από το Σχ. 5.34 μπορεί κάποιος να υποθέσει ισχύ της γραμμικότητας για όλο το εύρος τάσεων και να επιχειρήσει να προσδιορίσει την τιμή της αντοχής σε ανεμπόδιτο εφελκυσμό ή ακόμα και την τιμή της αντοχής σε ισοτροπικό εφελκυσμό. Γνώμη του γράφοντος ωστόσο είναι ότι κάτι τέτοιο πιθανότατα δεν ισχύει ακριβώς γιατί δεν ισχύει η γραμμικότητα των περιβαλλουσών διατμητικής αντοχής για προέκταση των τάσεων προς αρνητικές τιμές.

Επαναλαμβάνοντας τους υπολογισμούς που αναφέρθηκαν για το παράδειγμα του Σχ. 15.34 για όλους τους συνδυασμούς δοκιμών για κάθε τιμή της μύζησης (στην οποία είχαν εκτελεστεί και τα δυο είδη δοκιμών) και για κάθε εδαφικό υλικό προέκυψαν οι τιμές που παρατίθενται στον Πιν. 15.6. Στο Σχ. 15.35 παρουσιάζεται η εξέλιξη της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση για κάθε εδαφικό υλικό παραθέτοντας ταυτόχρονα την περιβάλλουσα που προκύπτει αν χρησιμοποιηθεί η τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής που προέκυψε για το κάθε υλικό από τις

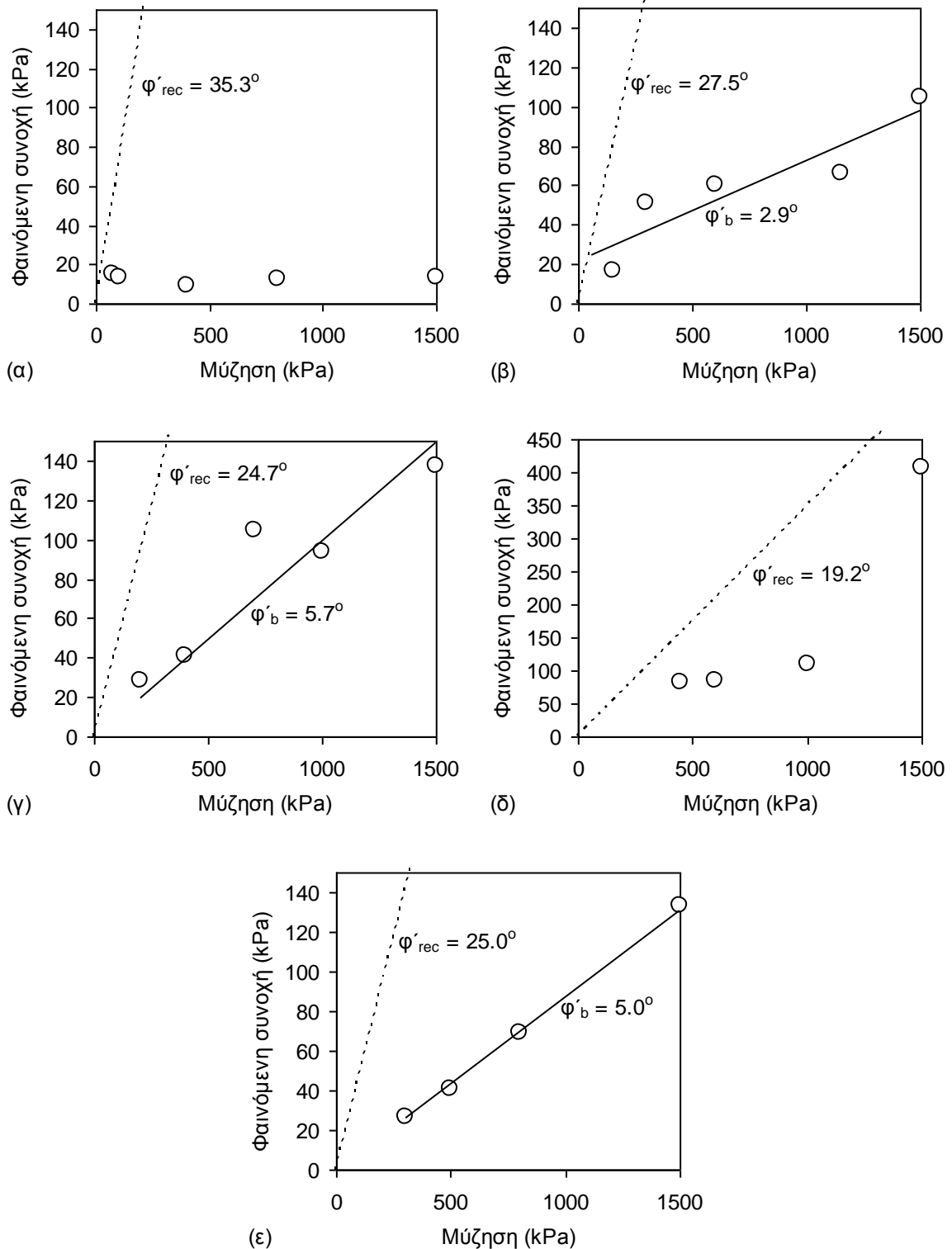


**Σχήμα 15.34.** Κύκλοι Mohr για την θλίψη κατά γενέτειρα (συνεχής γραμμή) και την ανεμπόδιστη θλίψη (διακεκομμένη γραμμή) δοκιμών Αργίλου Αμαρουσίου υπό μύζηση 1000 kPa. Έχει χαραχθεί η περιβάλλουσα που εφάπτεται στους δύο κύκλους και περιγράφεται από φαινόμενη συνοχή 110 kPa και γωνία διατμητικής αντοχής  $33.8^\circ$ .

**Πίνακας 15.6.** Συνόπιση τιμών αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη, αντοχής σε θλίψη κατά γενέτειρα και εκτιμώμενων τιμών φαινόμενης συνοχής και γωνίας διατμητικής αντοχής για όλα τα εδαφικά υλικά στα οποία εκτελέστηκαν δοκιμές αυτής της σειράς και όλες τις τιμές της μύζησης.

	Μύζηση	Θλίψη κατά γενέτειρα		Ανεμπόδιστη θλίψη		Φαινόμενη συνοχή	Γωνία διατμητικής αντοχής
		$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_1$	$\sigma_3$		
		(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)		
Φυλλίτης Σκύρου	75	22.2	-7.4	98.8	0	15	55.4
	100	17.3	-5.8	104.3	0	13	61.1
	400	8.2	-2.7	124.1	0	10	72.6
	800	14.7	-4.9	120.5	0	13	65.7
	1500	15.2	-5.1	127.2	0	14	66.0
Μάργα Κορίνθου	150	25.2	-8.4	100.3	0	17	53.0
	300	88.2	-29.4	195.5	0	51	34.8
	600	89.8	-29.9	369.8	0	60	53.8
	1150	98.2	-32.7	407.4	0	66	54.0
	1500	172.2	-57.4	507.7	0	105	45.1
Μάργα Χαλκουτσίου	300	38.8	-12.9	170.5	0	27	55.2
	500	56.5	-18.8	286.5	0	41	58.1
	800	104.6	-34.9	413.6	0	69	52.9
	1500	228.8	-76.3	407.3	0	133	23.6
	123000	591.5	-197.2	1637.4	0	355	43.1
Αποσαθρωμένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας	200	50.0	-16.7	107.1	0	29	33.3
	400	59.5	-19.8	260.5	0	41	55.1
	700	180.2	-60.1	395.9	0	104	34.4
	1000	138.0	-46.0	582.4	0	94	54.3
	1500	232.2	-77.4	589.1	0	137	40.1
	107500	1037.8	-345.9	2367.3	0	604	36.0
Άργιλος Αμαρουσίου	450	137.8	-45.9	215.5	0	83	14.9
	600	145.3	-48.4	251.0	0	85	21.8
	1000	189.7	-63.2	411.6	0	110	33.8
	1500	319.7	-106.6	446.5	0	406	59.9

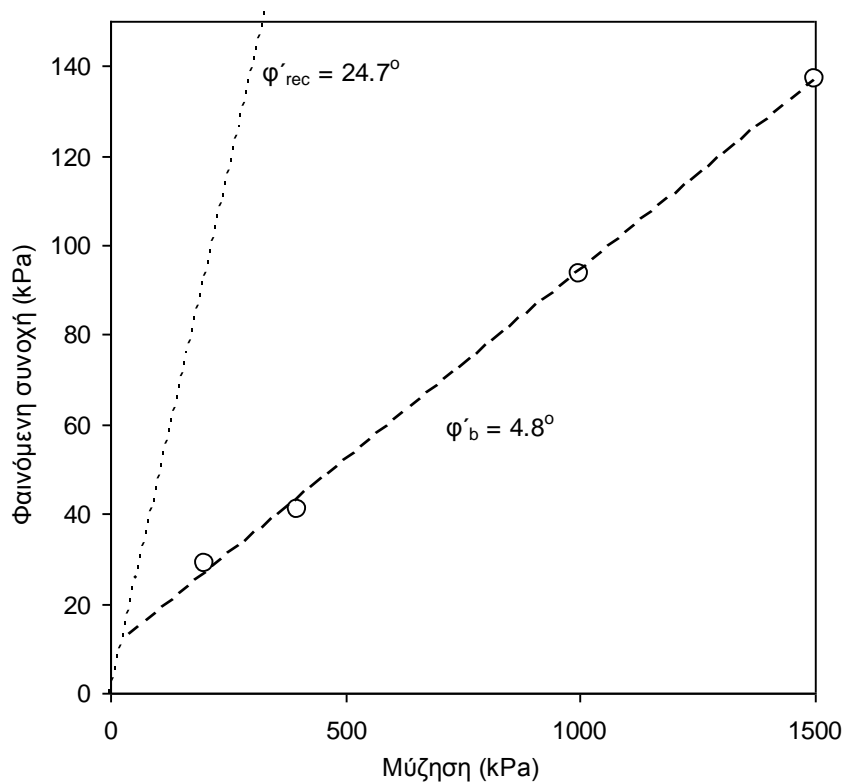
δοκιμές άμεσης διάτμησης στο κάθε υλικό αναζυμωμένο (βλ. Πιν. 15.5 και Σχ. 15.20). Όπως προκύπτει από το Σχ. 15.35 στην περίπτωση του Φυλλίτη Σκύρου (Σχ. 15.35α) έχουμε πρακτικά σταθερή τιμή της φαινόμενης συνοχής με την αύξηση της μύζησης, στην περίπτωση της Μάργας Κορίνθου και της Αργίλου Αμαρουσίου (Σχ. 15.35β και 15.35δ αντίστοιχα) έχουμε αρχική μικρή αύξηση της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση, η οποία όμως μετά τα 1000-1150 kPa μοιάζει να αυξάνει ραγδαία (ειδικά στην περίπτωση της Αργίλου Αμαρουσίου), ενώ τέλος για τον Αργιλοποιημένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας και τη Μάργα Χαλκουτσίου (Σχ. 15.35γ και 15.35ε αντίστοιχα) έχουμε πρακτικά σταθερο ρυθμό αύξησης της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση (εξαιρουμένου ένος πειραματικού σημείου για τον Ιλυόλιθο Πάρνηθας).



**Σχήμα 15.35.** Εξέλιξη της εκτιμώμενης φαινόμενης συνοχής από το συνδυασμό δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτεira με τη μύζηση (παρατίθενται και οι περιβάλλουσες που αντιστοιχούν στη γωνία διατμητικής αντοχής από δοκιμές άμεσης διάτμησης στα ίδια εδαφικά υλικά αναζυμωμένα), για α) αποσαθρωμένο Φυλλίτη Σκύρου, β) Μάργα Κορίνθου, γ) αργιλοποιημένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας, δ) Αργίλο Αμαρουσίου, και ε) Μάργα Χαλκουντίου.

Ο αναζυμωμένος αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου λοιπόν με πίεση διείδυσης αέρα περί τα 30-50 kPa (βλ. Σχ. 14.21γ και 15.21), αμέσως μετά τον αποκορεσμό του επέδειξε μικρή μείωση της φαινόμενης συνοχής και πρακτικά σταθεροποίηση. Η αναζυμωμένη Μάργα Κορίνθου με πίεση διείδυσης αέρα μεταξύ 50 και 100 kPa (βλ. Σχ. 14.15γ) επέδειξε μέχρι τα 300 kPa αύξηση της φαινόμενης συνοχής με ρυθμό μικρότερο αλλά αρκετά κοντά σε αυτόν που αντιστοιχεί στη γωνία διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου αναζυμωμένου εδάφους, στη συνέχεια μείωση του ρυθμού αύξησης μέχρι τα 1150 kPa και στη συνέχεια και πάλι ραγδαία αύξηση αλλά με μικρότερο ρυθμό από αυτόν του αρχικού σταδίου (σε κάθε περίπτωση στο Σχ. 15.35 έχει χαραχθεί και μία γραμμή βέλτιστης προσέγγισης η οποία αντιστοιχεί σε γωνία αύξησης της διατμητικής αντοχής  $2.9^\circ$  που συναντά την περιβάλλουσα που αντιστοιχεί στην γωνία διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου αναζυμωμένου υλικού στα 15 kPa μύζησης). Επισημαίνεται ότι με βάση το Σχ. 14.15γ περί τα 1200 kPa τοποθετείται το δεύτερο σημείο καμπής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού της αναζυμωμένης Μάργας Κορίνθου (διάκριση μεταξύ Περιοχής II και III). Ο αργιλοποιημένος Ιλύολιθος Πάρνηθας με πίεση διείδυσης αέρα μεταξύ 100 και 200 kPa (βλ. Σχ. 14.20γ) επέδειξε πρακτικά σταθερή αύξηση της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση για το εύρος μέχρι 1500 kPa (αγνοώντας το ένα σημείο που ξεφεύγει στα 700 kPa και υποθέτοντας διέλευση από την αρχή των αξόνων προέκυψε η αναφερόμενη στο Σχ. 15.35γ τιμή των  $5.7^\circ$ ). Αν επιχειρηθεί η χρησιμοποίηση του διγραμμικού γενικευμένου κριτηρίου Mohr-Coulomb για μη κορεσμένα εδάφη, τότε (αγνοώντας το σημείο στα 700 kPa) μπορεί να θεωρηθεί ότι για μύζηση μέχρι 50 kPa η τομή της περιβάλλουσας επιφάνειας αστοχίας με το επίπεδο  $\sigma=0$  περιγράφεται από γωνία ίση με τη γωνία διατμητικής αντοχής του υλικού ( $24.7^\circ$ ) και μετά από αυτή τη μύζηση και μέχρι τα 1500 kPa με ρυθμό αύξησης που αντιστοιχεί σε γωνία  $4.8^\circ$  (βλ. Σχ. 15.36). Δεδομένου ότι στο υλικό αυτό υπήρχαν και στοιχεία για πολύ μεγάλη τιμή της μύζησης (107.5 MPa), προέκυψε ότι η μύζηση σταθεροποιείται πρακτικά από μια τιμή της μύζησης και μετά (αν υποθεθεί από τα 1500 kPa και μετά, τότε μεταξύ 1500 kPa και 107500 kPa προκύπτει ρυθμός αύξησης που αντιστοιχεί σε μόλις  $0.25^\circ$ , ο οποίος είναι απειροελάχιστος). Η αναζυμωμένη Άργιλος Αμαρουσίου με πίεση διείδυσης αέρα μεταξύ 1000 και 1500 kPa (βλ. Σχ. 14.9γ) επέδειξε μέχρι τα 1000 kPa αύξηση της φαινόμενης συνοχής με ρυθμό μικρότερο από αυτόν που αντιστοιχεί στη γωνία διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου αναζυμωμένου εδάφους και στη συνέχεια ραγδαία αύξηση του ρυθμού αύξησης μέχρι τα 1500 kPa. Η διαφορά αυτή μάλλον πρέπει να αποδοθεί στον μικρότερο ρυθμό αύξησης της φαινόμενης συνοχής ενός υλικού πλήρως κορεσμένου αλλά με αρνητικές πιέσεις πόρων και του ίδιου υλικού μη κορεσμένου. Σε κάθε περίπτωση και ειδικά για την περιοχή μέχρι τα 1000 kPa σημειώνεται η διαφορά του ρυθμού αύξησης από τον ρυθμό που

αντιστοιχεί στη γωνία διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου αναζυμωμένου υλικού. Τέλος, η Μάργα Χαλκουτσίου με πίεση διείσδυσης αέρα μεταξύ 50 και 100 kPa (βλ. Σχ. 14.17γ) επέδειξε πρακτικά σταθερή αύξηση της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση για το εύρος μέχρι 1500 kPa με την βέλτιστη ευθεία που προσομοιώνει τα πειραματικά σημεία στο εύρος τιμών της μύζησης μέχρι τα 1500 kPa να διέρχεται αβίαστα από την αρχή των αξόνων, δηλ. να μην έχει νόημα να επιχειρηθεί προσομοίωση με το διγραμμικό γενικευμένο κριτήριο Mohr-Coulomb όπως έγινε με τον αργιλοποιημένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας. Δεδομένου ότι στο υλικό αυτό υπήρχαν και στοιχεία για πολύ μεγάλη τιμή της μύζησης (123 MPa), προέκυψε ότι η μύζηση σταθεροποιείται πρακτικά από μια τιμή της μύζησης και μετά (αν υποθεθεί από τα 1500 kPa και μετά, τότε μεταξύ 1500 kPa και 123000 kPa προκύπτει ρυθμός αύξησης που αντιστοιχεί σε μόλις  $0.17^\circ$ , ο οποίος είναι απειροελάχιστος).



**Σχήμα 15.36.** Εξέλιξη της εκτιμώμενης φαινόμενης συνοχής από το συνδυασμό δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα με τη μύζηση για τον αργιλοποιημένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας με τις τιμές παραμέτρων που θα περιέγραφαν το διγραμμικό γενικευμένο κριτήριο Mohr-Coulomb για μη κορεσμένα εδάφη στο εύρος τιμών μύζησης 0-1500 kPa.

### 15.7.6 Συμπεράσματα

Κλείνοντας αυτήν την παράγραφο και μαζί της την ενασχόληση με την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών, επισημαίνονται τα εξής:

- Οι δοκιμές που παρουσιάστηκαν έγιναν χωρίς έλεγχο της μύζησης κατά το κρίσιμο στάδιο της θραύσης. Οι μετρήσεις στο πιο διαπερατό υλικό που ήταν ο αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου κατά την θραύση με ενσωματωμένο αισθητήρα μέτρησης της μύζησης τεκμηριώνουν βέβαια ότι δεν πρέπει να αναμένεται μεγάλη μεταβολή.
- Οι δοκιμές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα. Οι δοκιμές αυτές επιτρέπουν να χαραχθούν κύκλοι Mohr και να προσδιοριστούν περιβάλλουσες που εφάπτονται σε αυτούς, αφορούν όμως σε πολύ μικρό επίπεδο τάσης οπότε γενικά υπάρχουν θέματα για τη μορφή του κριτηρίου Mohr-Coulomb σε τόσο μικρές τάσεις ακόμα και για πλήρως κορεσμένα εδάφη. Για αυτόν το λόγο άλλωστε δεν έγινε καν αναφορά στις τιμές της γωνίας διατμητικής αντοχής υπό σταθερή μύζηση που εκτιμήθηκαν για κάθε τιμή της μύζησης.
- Από την άλλη πλευρά οι δοκιμές εκτελέστηκαν σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά σε μορφή πολτού αρχικά, ακριβώς προκειμένου να καταστεί πιο καθαρή η εικόνα που θα προκύψει και ανεπηρέαστη από την ιστορία φόρτισης που θα είχαν αναζυμωμένα και επανασυμπιεσμένα δοκίμια, πολλώ δε μάλλον την γεωλογική ιστορία που θα είχαν δοκίμια φυσικού υλικού.
- Με βάση αυτές τις παραδοχές τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:
  - Δεν πρέπει να θεωρείται καθόλου βέβαιη η αύξηση της αντοχής με τη μύζηση και μόνο,
  - ακόμα και όταν παρατηρείται αύξηση της αντοχής με τη μύζηση δεν είναι υποχρεωτικό να είναι μονοτονική,
  - ακόμα και όταν αυτή η αύξηση παρουσιάστηκε μονοτονική, ο ρυθμός της ήταν πολύ μικρότερος εκείνου που αντιστοιχούσε στη γωνία διατμητικής αντοχής του ίδιου εδάφους αναζυμωμένου και πλήρως κορεσμένου,
  - τα λιγοστά αποτελέσματα σε πολύ μεγάλες τιμές της μύζησης τεκμηριώνουν την βεβαιότητα της σταθεροποίησης της αντοχής σε κάποιο σημείο, και
  - διακρίνονται συσχετίσεις των σημείων μεταβολής της εξέλιξης της αντοχής με τη μύζηση με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού χωρίς όμως το πλήθος των δοκιμών να επιτρέπει γενικευμένα συμπεράσματα.

- Σε κάθε περίπτωση, δοκιμές του είδους θα πρέπει να πραγματοποιηθούν και στο μέλλον και κυρίως να συσχετιστούν και με δοκιμές στα ίδια υλικά υπό ελεγχόμενη μύζηση π.χ. σε συσκευή άμεσης διάτμησης με ελεγχόμενη μύζηση.

## 15.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι πιο ειδικές εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ως μέρος της πειραματικής διερεύνησης που έγινε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής. Αυτές ήταν: δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης με διαβροχή υπό σταθερή κατακόρυφη τάση για διάφορες τιμές της κατακόρυφης τάσης σε συμπυκνωμένο αποσαθρωμένο σερπεντινίτη, δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε συμπυκνωμένα δοκίμια αποσαθρωμένου σερπεντινίτη και αργίλου Αμαρουσίου, δοκιμές βραδείας άμεσης διάτμησης με στερεοποίηση σε συμπυκνωμένα δοκίμια αποσαθρωμένου σερπεντινίτη και αναζυμωμένα εδαφικά υλικά, και δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά μετά από ξήρανσή τους σε θάλαμο μύζησης ή θάλαμο υδατικών διαλυμάτων αλάτων.

Από τις δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης με διαβροχή υπό σταθερή κατακόρυφη τάση για διάφορες τιμές της κατακόρυφης τάσης, προκύπτει ότι προκειμένου για υγρασίες συμπίκνωσης στην βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης και «ξηρά» από αυτήν, η παρατηρούμενη συρρίκνωση του υλικού λόγω διαβροχής είναι πολύ μεγάλη. Η συρρίκνωση αυτή μάλιστα αρχίζει να σταθεροποιείται στην μέγιστη τιμή της μόνο για πολύ μεγάλη τιμή της τάσης (4 MPa). Η παρατήρηση έχει σημασία για την καταστατική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών αφού πράγματι μετρήθηκε σταθεροποίηση της συρρίκνωσης των υλικών λόγω διαβροχής από μία τιμή της τάσης και μετά, αλλά –τουλάχιστον για το συγκεκριμένο υλικό- το εύρος τιμών της κατακόρυφης τάσης εντός του οποίου είναι δυνατόν να συμβούν πολύ μεγάλες παραμορφώσεις λόγω συρρίκνωσης είναι πολύ μεγάλο ξεκινώντας από μέτριες τιμές της τάσης μέχρι πολύ μεγάλες.

Από τις δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε συμπυκνωμένα δοκίμια προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Μείωση της υγρασίας συμπίκνωσης «ξηρά» από την βέλτιστη οδηγεί σε μεγαλύτερη αρχική μύζηση αμέσως μετά την συμπίκνωση σε σχέση με υγρασία συμπίκνωσης στην βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης και «υγρά» από αυτήν.
- Οι κλάδοι επανύγρυνσης –στα δείγματα αποσαθρωμένου σερπεντινίτη για τα οποία μετρήθηκαν- για όλες τις υγρασίες συμπίκνωσης παρουσιάζουν υστέρηση ως προς τους κλάδους ξήρανσης, αλλά τόσο το μέγεθος της υστέρησης αυτής (μετρούμενο ως η απόσταση



των κλάδων επανύγρανσης από τους κλάδους ξήρανσης κατά μήκος του άξονα του ποσοστού υγρασίας) όσο και το εύρος τιμών της μύζησης στο οποίο παρατηρείται μειώνονται με την μείωση της υγρασίας συμπίκνωσης.

- Για υγρασία συμπίκνωσης «ξηρά» από την βέλτιστη και ακόμα και στην βέλτιστη υγρασία κατά την επανύγρανση μέχρι μικρές τιμές της μύζησης το υλικό μπορεί να αποκτήσει ποσοστά υγρασίας μεγαλύτερα ακόμα και από την υγρασία συμπίκνωσης.
- Στα δείγματα συμπυκνωμένης αργίλου Αμαρουσίου που μετρήθηκαν και οι μεταβολές όγκου κατά την ξήρανση παρατηρήθηκε ότι το υλικό έχει και για τις τρεις υγρασίες συμπίκνωσης σημαντικές μεταβολές όγκου. Αυτές είναι κατά σειρά μεγαλύτερες για το υλικό που συμπυκνώθηκε «υγρά» από την βέλτιστη υγρασία λόγω μέγιστου ποσοστού υγρασίας και μικρότερης πυκνότητας από την βέλτιστη, αμέσως μικρότερες για το υλικό που συμπυκνώθηκε «ξηρά» από την βέλτιστη υγρασία λόγω μικρότερης πυκνότητας από την βέλτιστη, και τέλος οι ελάχιστες για το υλικό που συμπυκνώθηκε στην βέλτιστη υγρασία λόγω μεγάλης πυκνότητας.
- Προέκυψε επίσης ότι και για τις τρεις υγρασίες συμπίκνωσης εμφανίζεται παραμένων λόγος κενών για μεγάλες τιμές της μύζησης (αυτές που επιβλήθηκαν με την μέθοδο των υδατικών διαλυμάτων) ο οποίος παίρνει την ελάχιστη τιμή για το υλικό που συμπυκνώθηκε στην βέλτιστη υγρασία (0.323), την δεύτερη μικρότερη για το υλικό που συμπυκνώθηκε «υγρά» από την βέλτιστη υγρασία (0.355) και τέλος την μέγιστη για το υλικό που συμπυκνώθηκε «ξηρά» από την βέλτιστη υγρασία (0.416).

Η πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των συμπυκνωμένων εδαφικών υλικών που παρουσιάστηκε σε αυτό το κεφάλαιο δεν μπορεί να θεωρηθεί σε καμμία περίπτωση καταληκτική ή εξαντλητική. Επέδειξε ωστόσο κρίσιμες ιδιαιτερότητες αυτών των υλικών, όπως οι μεγάλες παραμορφώσεις τους κατά την διαβροχή υπό σταθερή τάση, οι διαφορετικές τιμές της μύζησης που έχουν αμέσως μετά την συμπίκνωσή τους για κάθε υγρασία συμπίκνωσης και τέλος οι διαφορετικές χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που προκύπτουν ανάλογα με την υγρασία συμπίκνωσης. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται περαιτέρω εργαστηριακή διερεύνηση των ιδιοτήτων των συμπυκνωμένων εδαφικών υλικών.

Τέλος σε ό,τι αφορά τη διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών όπως αυτή διερευνήθηκε μέσω συνδυασμού δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε δοκίμια αναζυμωμένων εδαφικών υλικών από μορφή πολτού που υποβάλλονταν σε ξήρανση:

- Δεν πρέπει να θεωρείται καθόλου βέβαιη η αύξηση της αντοχής με τη μύζηση και μόνο,
- ακόμα και όταν παρατηρείται αύξηση της αντοχής με τη μύζηση δεν είναι υποχρεωτικό να είναι μονοτονική,
- ακόμα και όταν αυτή η αύξηση παρουσιάστηκε μονοτονική, ο ρυθμός της ήταν πολύ μικρότερος εκείνου που αντιστοιχούσε στη γωνία διατμητικής αντοχής του ίδιου εδάφους αναζυμωμένου και πλήρως κορεσμένου,
- τα λιγοστά αποτελέσματα σε πολύ μεγάλες τιμές της μύζησης τεκμηριώνουν την βεβαιότητα της σταθεροποίησης της αντοχής από κάποια τιμή της μύζησης και μετά, και
- διακρίνονται συσχετίσεις των σημείων μεταβολής της εξέλιξης της αντοχής με τη μύζηση με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού χωρίς όμως το πλήθος των δοκιμών να επιτρέπει γενικευμένα συμπεράσματα.

Σε κάθε περίπτωση, δοκιμές του είδους θα πρέπει να πραγματοποιηθούν και στο μέλλον και κυρίως να συσχετιστούν και με δοκιμές στα ίδια υλικά υπό ελεγχόμενη μύζηση π.χ. σε συσκευή άμεσης διάτμησης με ελεγχόμενη μύζηση για την πληρέστερη διερεύνηση της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών και κυρίως την τεκμηρίωση της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε καθώς παρουσιάζεται ως ενδιαφέρουσα εναλλακτική πιο ακριβών μεθόδων. Σε κάθε περίπτωση, η δοκιμή που έγινε σε δοκίμιο αποσαθρωμένου Φυλλίτη Σκύρου (το πιο χονδρόκοκκο από τα υλικά αυτής της σειράς δοκιμών και μάλιστα μη πλαστικό) με εγκατεστημένο αισθητήρα μέτρησης της μύζησης επέδειξε ότι από τη στιγμή της ολοκλήρωσης της ξήρανσης μέχρι και την ολοκλήρωση της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης (η οποία είναι και η δοκιμή από τα δύο είδη που διαρκεί περισσότερο χρόνο) η μεταβολή της μύζησης είναι πολύ μικρή, πρακτικά τόσο μικρή που να μπορεί να υποτεθεί εύλογα (ειδικά μάλιστα για τα πιο λεπτόκοκκα και πλαστικά υλικά) ότι παραμένει σταθερή.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 16

## ΣΥΝΟΨΙΣΗ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΜΕΡΟΥΣ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

### 16.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το δεύτερο μέρος της διδακτορικής διατριβής αποτελεί το κείμενο στο οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκαν. Έχει ήδη προηγηθεί το πρώτο μέρος στο οποίο παρουσιάζεται η φύση και η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών και ακολουθεί το τρίτο μέρος στο οποίο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση των καταστατικών προσομοιωμάτων για μη κορεσμένα εδάφη και το νέο θεωρητικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε.

Στο παρόν κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα των κεφαλαίων που προηγήθηκαν στο δεύτερο μέρος της διατριβής.

### 16.2 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΝΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Τα επιλεγθέντα εδαφικά υλικά καλύπτουν επαρκώς όλο το φάσμα της κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών ποικίλλοντας από την πλέον λεπτόκοκκη άμμο μέχρι άργιλο υψηλής πλαστικότητας. Τα επιλεγθέντα εδαφικά υλικά επίσης καλύπτουν επαρκώς όλο το φάσμα της ορυκτολογικής σύστασης που ενδιαφέρει. Δόθηκε έμφαση στα εδαφικά υλικά πολύ χαμηλής πλαστικότητας για τα οποία ενδιαφέρει η συμπιεστότητά τους όταν είναι αναζυμωμένα. Από την πλειοψηφία των εδαφικών υλικών ελήφθησαν διαταραγμένα δείγματα τα οποία προσέφεραν πληθώρα στοιχείων για τη συμπεριφορά των αναζυμωμένων εδαφικών υλικών αλλά

και αδιατάρακτα δείγματα μέσης έως πολύ υψηλής ποιότητας από τα οποία προέκυψαν τιμές παραμέτρων για τα εδαφικά υλικά κατά το δυνατόν πιο κοντά στη φυσική τους κατάσταση. Επί τη βάση των παραπάνω θεωρείται ότι εξασφαλίστηκε μία επαρκώς ευρεία βάση δεδομένων σε ό,τι αφορά το είδος των δοκιμασθέντων υλικών με τιμές παραμέτρων για αναζυμωμένα εδαφικά υλικά και για εδαφικά υλικά όσο πιο κοντά στη φυσική τους κατάσταση. Ο μεγάλος αριθμός των δοκιμασθέντων υλικών και η επαρκής κάλυψη της κοκκομετρικής διαβάθμισης και της ορυκτολογικής σύστασης προσθέτουν στην αξιοπιστία αυτής της βάσης δεδομένων.

### **16.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΑΝΑΖΥΜΩΜΕΝΑ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ**

Η πειραματική διερεύνηση της εγγενούς συμπιεστότητας των εδαφικών υλικών υπό μονοδιάστατες συνθήκες φορτίσεως αποτελεί μία από τις πιο διεξοδικές που έχουν εκπονηθεί διεθνώς. Στα συμπεράσματά της περιλαμβάνονται η εμπέδωση καταρχάς, καθώς και η περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας που συνοδεύει την παρασκευή αναζυμωμένων εδαφικών υλικών και την εκτέλεση δοκιμών σε αυτά. Αυτή καθεαυτή η βάση πειραματικών δεδομένων για αναζυμωμένα εδαφικά υλικά διευρύνθηκε εντυπωσιακά για εδαφικά υλικά μάλιστα από τον ελλαδικό χώρο αλλά και τα όρια για τα οποία διατυπώθηκε για πρώτη φορά το θεωρητικό πλαίσιο της εγγενούς συμπιεστότητας (Burland, 1990). Ειδικά η σειρά των δοκιμών με την οποία διερευνήθηκε η επιρροή του αρχικού ποσοστού υγρασίας των πολτών αναζυμωμένων εδαφικών υλικών επέτρεψε την επαναδιατύπωση του βασικού ορισμού των αναζυμωμένων εδαφικών υλικών αφού η αρχική πρόταση του Burland (1990) για τα αναζυμωμένα εδάφη, ότι αποτελούν υλικά μηχανικά αναμοχλευμένα και αναμεμιγμένα με νερό τόσο ώστε να αποκτήσουν ποσοστό υγρασίας μεταξύ μίας και 1.5 φορές το όριο υδαρότητας του υλικού, πρέπει να αναθεωρηθεί προς τα πάνω και να γίνει μεταξύ 1.4 και 2.0 φορές το όριο υδαρότητας. Τιμές του αρχικού ποσοστού υγρασίας των πολτών μάλιστα μικρότερες του ορίου υδαρότητας των υλικών πρέπει να αποφεύγονται οπωσδήποτε αφού οδηγούν σε τιμές του αρχικού βαθμού κορεσμού των πολτών τόσο μικρές που μεταβάλλεται ριζικά η μορφή των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης, τόσο μάλιστα ώστε να μεταβάλλεται ακόμα και η φορά που στρέφουν τα κοίλα (προς τα πάνω ή προς τα κάτω). Επίσης στην ίδια κατεύθυνση έχει σημαντικότερο ρόλο ο χρόνος ύγρυνσης, ειδικά όσο αυξάνεται η πλαστικότητα των εδαφικών υλικών. Τέλος, είναι καλό να αποφεύγεται η χρήση του εγγενούς λόγου κενών στο 1 kPa αφού αυξάνεται ραγδαία με το αρχικό ποσοστό υγρασίας των πολτών αποτελώντας συνάρτησή του, παρά συνάρτηση της

εντατικής κατάστασης στο υλικό, σε αντίθεση με τις τιμές του λόγου κενών στα 100 kPa και 1000 kPa καθώς και του δείκτη συμπίεσης και του δείκτη αποφόρτισης που αποτελούν σταθερές κάθε υλικού εξαρτώμενες μόνο από την φύση του.

Σε ό,τι αφορά την γενικευμένη γραμμή εγγενούς συμπίεσης και την εγγενή παράμετρο απόστασης (σε συνδυασμό και με την θεωρητική επεξεργασία του Κεφ. 10), προέκυψε σαφώς ότι η γραμμή εγγενούς συμπίεσης δεν είναι μοναδική γραμμή και δεν πρέπει να θεωρείται τέτοια. Αν έχει νόημα μία γραμμή στον χώρο δείκτη κενών-κατακόρυφης τάσης (λογαριθμική κλίμακα), αυτή είναι η Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης ως μία μοναδική γραμμή αναφοράς που επιτρέπει την αξιολόγηση των καμπυλών εγγενούς συμπίεσης ως προς την φορά και το μέγεθος της καμπυλότητάς τους. Για τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και με ακόμα μεγαλύτερη σαφήνεια για τα εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης προέκυψε ότι οι κανονικοποιημένες καμπύλες εγγενούς συμπίεσής τους έχουν καμπυλότητα φοράς και μεγέθους (εκφραζόμενα με επιτυχία από το πρόσημο και το απόλυτο μέγεθος της εγγενούς παραμέτρου απόστασης) που εξαρτώνται από την περιεκτικότητα σε άργιλο των εδαφικών υλικών και την δραστηριότητα του περιεχόμενου αργιλικού ορυκτού και τον δείκτη πλαστικότητας των υλικών.

Όπως επιδείχθηκε από τις δοκιμές σε αδιατάρακτα δοκίμια φυσικών εδαφικών υλικών με δομή και ειδικά τις δοκιμές στην Μάργα Κορίνθου, εάν δεν χρησιμοποιηθεί η πραγματική καμπύλη εγγενούς συμπίεσης του ίδιου του υλικού σε αδιατάρακτο δοκίμιο του οποίου έγινε η δοκιμή, μπορεί να προκύψουν ακόμα και αποτελέσματα στερούμενα φυσικού νοήματος αν η σύγκριση της κανονικοποιημένης καμπύλης γίνει με κάποια από τις υφιστάμενες εμπειρικές συσχετίσεις για την γραμμή εγγενούς συμπίεσης (π.χ. Burland, 1990, Chandler, 2000), ή ακόμα και την ΘΓΕΣ. Η παρατήρηση αυτή αποτελεί το σπουδαιότερο λόγο που τεκμηριώνει την αξία της γενικευμένης γραμμής εγγενούς συμπίεσης και της εγγενούς παραμέτρου απόστασης ως μέσο έκφρασης της γραμμής αυτής, δικαιολογώντας την εκπόνηση της πειραματικής διερεύνησης που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο αυτό. Η ίδια η γενικευμένη γραμμή εγγενούς συμπίεσης δε, επεκτείνει το εύρος της ισχύος και δυνατότητας χρησιμοποίησης του θεωρητικού πλαισίου των εγγενών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών, όπως πρωτοδιατυπώθηκε για αργιλικά εδαφικά υλικά, ακόμα και για φυσικά ιλυώδη (π.χ. η Μάργα Κορίνθου) ή και πολύ λεπτόκοκκα αμμόδη εδάφη με δομή.

Η σχετική πειραματική διερεύνηση μπορεί να συνεχιστεί και στο μέλλον με επιπλέον εδαφικά υλικά φυσικών χαρακτηριστικών διαφορετικών από αυτά των υλικών της διερεύνησης που παρουσιάστηκε (πολύ υψηλής πλαστικότητας, οργανικά κλπ) καθώς και άλλες εντατικές καταστάσεις (π.χ. συνθήκες ισοτροπικής συμπίεσης).

#### **16.4 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ**

Στα Κεφάλαια 14 και 15 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που προσδιορίστηκαν για δεκατέσσερα (14) διαφορετικά εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο. Σε 13 από τα υλικά προσδιορίστηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού σε δοκίμιά τους αναζυμωμένα και επανασυμπιεσμένα στην επιτόπου τάση των υλικών και σε δύο μόνο από αυτά και σε δοκίμια αδιατάρακτου υλικού. Σε δύο υλικά επίσης προσδιορίστηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού σε συμπυκνωμένα δοκίμιά τους, «ξηρά» από την βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσής τους, στην βέλτιστη και «υγρά» από αυτήν. Τέλος σε τέσσερα εξ αυτών των υλικών προσδιορίστηκαν χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού για διάφορους αρχικούς λόγους κενών των υλικών, διερευνώντας έτσι την επιρροή του αρχικού λόγου κενών των εδαφικών υλικών στη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Σποραδικά δε μετρήθηκαν καμπύλες με τις οποίες διερευνήθηκε η τεχνητή σιμέντωση των εδαφικών υλικών και ο ερπυσμός. **Συνολικά προσδιορίστηκαν σαράντα (40) διαφορετικές χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού οι οποίες αποτελούν τη μεγαλύτερη βάση πειραματικών δεδομένων του είδους για εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο και μια από τις μεγαλύτερες διεθνώς.**

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού σε δοκίμια των υλικών αναζυμωμένα και επανασυμπιεσμένα στην επιτόπου τάση και σε ένα μόνο από αυτά και σε δοκίμια αδιατάρακτου υλικού είναι τα εξής:

- Η μέγιστη πίεση των 1500 kPa (15 Bar) που μπορεί να επιβληθεί με τον χρησιμοποιηθέντα θάλαμο μύζησης αποδείχτηκε ανεπαρκής για τη μέτρηση ακόμα και μόνο της πίεσης διείδυσης αέρα αργιλικών και μαργαϊκών υλικών, πολλώ δε μάλλον και του δεύτερου σημείου καμψής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Για τον πλήρη προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού λοιπόν πρέπει να

χρησιμοποιείται και μία ακόμα μέθοδος ικανή να εφαρμόζει μεγαλύτερες τιμές της μύζησης, όπως π.χ. η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης με κορεσμένα υδατικά διαλύματα αλάτων που εφαρμόστηκε στην πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

- Γενικά τα φυσικά υλικά (Μάργα Κορίνθου, Μάργα Χαλκουτσίου και αργιλοποιημένος Πλυόλιθος Πάρνηθας) βρέθηκαν να έχουν μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης νερού στους πόρους τους σε σχέση με τα δοκίμια του ίδιου υλικού αναζυμωμένα/προσυμπιεσμένα για την ίδια τιμή της μύζησης. Η ικανότητα αυτή εκφράστηκε με τη μεγαλύτερη τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα που προσδιορίστηκε και πρακτικά ίδιο ρυθμό απώλειας ύδατος με τη μύζηση από το σημείο αυτό και μετά. Η ικανότητα αυτή αποδίδεται στη μεγαλύτερη «φαινόμενη» τάση προστερεοποίησης (λόγω σιμέντωσης) των φυσικών υλικών και βρίσκεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα και άλλων ερευνητών (Huang et al, 1998) οι οποίοι διερεύνησαν την επιρροή της τάσης προστερεοποίησης (πραγματικής λόγω μέγιστης φόρτισης σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά και όχι «φαινόμενης» λόγω άλλων παραγόντων που δημιουργούν δομή) στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού καθεαυτή και την καμπύλη μεταβολής του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό με τη μύζηση. Εξαιρετική ίσως αποτελεί το ένα από τα τρία υλικά (η Μάργα Χαλκουτσίου) και αυτό όμως μόνο για σχετικά χαμηλές τιμές της μύζησης.
- Αντίστοιχα όλα τα φυσικά υλικά σε σχέση με τα δοκίμια του ίδιου υλικού αναζυμωμένα/προσυμπιεσμένα διατήρησαν μεγαλύτερη τιμή του λόγου κενών για την ίδια μύζηση ως αποτέλεσμα της δομής τους (στην προκειμένη περίπτωση λόγω σιμέντωσης). Το ίδιο παρουσιάστηκε και στην περίπτωση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού της Αργίλου Αμφιλοχίας μετά από προσθήκη 6% κατά βάρος ξηρού υλικού τσιμέντου. Δεν παρουσιάστηκε (τουλάχιστον τόσο καθαρά) το ίδιο και για την δομή που δημιουργήθηκε στο ίδιο υλικό λόγω ερπυσμού μετά από διατήρηση τάσης 500 kPa επί 14 ημέρες.
- Αντίθετα από τη δομή των φυσικών υλικών και τη δομή λόγω τεχνητής σιμέντωσης, η δομή που δημιουργείται σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά μόνο λόγω φόρτισης και αποφόρτισης δεν μοιάζει να μεταβάλλει τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης για τα περισσότερα από τα εξετασθέντα εδαφικά υλικά.
- Για αρκετά υλικά οι καμπύλες ποσοστού υγρασίας-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης προέκυψαν πρακτικά γραμμικές παρά την σαφώς ανάστροφη σιγμοειδή μορφή των καμπυλών λόγου κενών-μύζησης και βαθμού κορεσμού-μύζησης ανατρέποντας την περί του αντιθέτου κοινή διαπίστωση που καταγράφεται σε αρκετά σημεία στη διεθνή

βιβλιογραφία. Όσο και αν αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί αναμενόμενο για πολτούς, δεν ήταν σε καμιά περίπτωση αναμενόμενο για υλικά αναζυμωμένα, συμπιεσμένα και αποφορτισμένα.

- Από τις δοκιμές στα ίδια υλικά αλλά με διαφορετικό αρχικό λόγο κενών λόγω συμπίεσης σε διαφορετικές τάσεις, προέκυψε ότι η διαφοροποίηση του αρχικού λόγου κενών με αυτόν τον τρόπο οδηγεί σε διαφορετικές καμπύλες όπως λόγου κενών-μύζησης, ποσοστού υγρασίας-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης αλλά δεν φαίνεται να μεταβάλλει την καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης και συγκεκριμένα τη μύζηση αποκορεσμού και τη θέση και κλίση του κλάδου της καμπύλης μετά τον αποκορεσμό. Μεταβολή λοιπόν του λόγου κενών μόνο λόγω συμπίεσης, χωρίς την ύπαρξη άλλων, γεωλογικού χαρακτήρα, αιτίων της μεταβολής της δομής των υλικών μοιάζει να μη μεταβάλλει τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης παρόλο που τη μεταβάλλει σε όρους λόγου κενών-μύζησης (μηχανική συμπεριφορά σε όρους τάσεων-παραμορφώσεων) και σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης (μηχανική συμπεριφορά σε ό,τι αφορά τη διαπερατότητα). Χρειάστηκε να φτάσουμε σε ένα υλικό πολύ μεγάλης πλαστικότητας και ορίου υδαρότητας όπως η Άργιλος Αμφιλοχίας για να εντοπιστούν διαφοροποιήσεις στις καμπύλες βαθμού κορεσμού-μύζησης λόγω μεταβολής του λόγου κενών μόνο λόγω συμπίεσης.
- Η μαθηματική προσομοίωση των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού δεν κατέληξε σε κάποιες πολύ ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων προσομοίωσης (για τρία διαφορετικά προσομοιώματα) και των φυσικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών.
- Για όλα τα εδαφικά υλικά στα οποία υπήρχαν καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης προσδιορισθείσες επί δοκιμίων ευρισκόμενων στην ίδια κατάσταση με εκείνα στα οποία μετρήθηκαν χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού φαίνεται ότι πράγματι στις περιπτώσεις που το υλικό δεν έχει ακόμα αποκορεστεί (κατά συνέπεια στους πόρους του υπάρχει αρνητική πίεση πόρων και όχι μύζηση) οι κλίσεις των καμπυλών λόγου κενών-μύζησης/αρνητικής πίεσης πόρων, είναι οι ίδιες με εκείνες των καμπυλών λόγου κενών-κατακόρυφης τάσης για το ίδιο μέγεθος τάσης και πάντα σε σχέση με την ίδια θέση ως προς την τάση διαρροής. Δηλαδή σε ένα εδαφικό υλικό συμπιεσμένο μέχρι μία κατακόρυφη τάση και στη συνέχεια αποφορτισμένο σε μηδενική τάση η κλίση της καμπύλης λόγου κενών-μύζησης συγκρίνεται κατ' αρχήν με τον δείκτη επαναφόρτισης, ενώ σε ένα αναζυμωμένο εδαφικό υλικό που ξηραίνεται από αρχική κατάσταση πολτού συγκρίνεται με τον δείκτη συμπίεσης. Και στην πρώτη περίπτωση μπορεί να γίνεται σύγκριση με τον δείκτη συμπίεσης



αλλά για το τμήμα της καμπύλης λόγου κενών-μύζησης για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες της μέγιστης κατακόρυφης τάσης προ ξήρανσης.

- Οι προηγούμενες παρατηρήσεις δεν αποδεικνύουν καταληκτικά αν πράγματι ο δείκτης συμπίεσης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα κατά την ξήρανση ταυτίζεται με τον δείκτη επαναφόρτισης κατά τη δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης, παρέχουν όμως αρκετές ενδείξεις ώστε μια τέτοια δυνατότητα να ενσωματωθεί στο νέο θεωρητικό πλαίσιο που παρουσιάζεται στο Κεφ. 19 του τρίτου μέρους. Αυτό βρίσκεται άλλωστε σε συμφωνία με τα αποτελέσματα και άλλων ερευνητών (π.χ. Fredlund & Rahardjo, 1993, Dineen, 1997) και αποτελεί συνέπεια της ισχύος της αρχής των ενεργών τάσεων για τιμές της πίεσης πόρων μέχρι την τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα των εδαφικών υλικών.
- Το σχήμα των καμπυλών ξήρανσης των δοκιμίων είτε στον φούρνο είτε στην ατμόσφαιρα είναι γεωμετρικά όμοιο του σχήματος της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (ποσοστό υγρασίας-μύζηση). Η γεωμετρική αυτή ομοιότητα δεν συνοδεύεται από αντίστοιχη απόσταση των προκυπτουσών καμπυλών μεταξύ τους όπως συμβαίνει και με τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού των ίδιων υλικών, όποτε μάλλον δεν διαφαίνεται το ενδεχόμενο ανάπτυξης μίας συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων περιγραφής αυτών των καμπυλών και της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.
- Όπως επιδεικνύεται από τα πειραματικά αποτελέσματα, ο παραμένων λόγος κενών  $e_r$  αυξάνεται αρχικά όσο αυξάνεται ο αρχικός λόγος κενών των εδαφικών υλικών  $e_0$  και στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται πάλι για περαιτέρω αύξηση του αρχικού λόγου κενών. Κανονικοποιούμενος ο παραμένων λόγος κενών ως προς τον αρχικό λόγο κενών διαπιστώνεται ότι ο λόγος του προς τον αρχικό λόγο κενών  $e_r/e_0$  αυξάνεται όσο μειώνεται ο αρχικός λόγος κενών. Παρουσιάζεται δε εντυπωσιακή σύμπτωση των πειραματικών σημείων για διαφορετικά αργιλικά εδαφικά υλικά αν κανονικοποιηθεί ο αρχικός λόγος κενών ως προς τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας  $e_L$  ή στο όριο πλαστικότητας  $e_P$  (το γινόμενο του κάθε ορίου με το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών  $G_s$ ). Παρατηρείται τότε ότι υφίσταται συσχέτιση μεταξύ του λόγου του παραμένοντος λόγου κενών προς τον αρχικό λόγο κενών  $e_r/e_0$  και του λόγου του αρχικού λόγου κενών προς τον λόγο κενών στο όριο υδαρότητας  $e_0/e_L$  ή στο όριο πλαστικότητας  $e_0/e_P$  και μάλιστα με αρκετά υψηλό συντελεστή συσχέτισης.
- Η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων κατέληξε στις Εξ. 14.11 και 14.12 για το σύνολο των δεδομένων και τις Εξ. 14.13 και 14.14 για την ειδική περίπτωση των πολύ υψηλού αρχικού ποσοστού υγρασίας. Οι εξισώσεις αυτές γενικά ισχύουν για αργιλικά και μαργαϊκά υλικά και όχι για ιλεις και ιλυώδεις και αργιλοϊλυώδεις άμμους. Αυτό

επιβεβαιώθηκε και από τη σύγκριση των δεδομένων της παρούσας διατριβής με τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν από τους Bardanis & Kanvadas (2008) από τη διεθνή βιβλιογραφία και διαχωρίστηκαν και αυτά σε δεδομένα για αργίλους και δεδομένα για ιλιείς και ιλυώδεις άμμους.

- Τονίζεται όμως ότι οι εμπειρικές αυτές συσχετίσεις για τον παραμένοντα λόγο κενών έχουν σαφώς μεγαλύτερη ποιοτική και διδακτική αξία παρά αριθμητικής πρόβλεψης. Παρά το γεγονός ότι χαρακτηρίζονται από υψηλότατους συντελεστές συσχέτισης, η σύγκριση προβλεπόμενων και μετρηθεισών τιμών παραμένοντος λόγου κενών αποκάλυψε υπερβολικά μεγάλο εύρος προβλεπόμενων τιμών, κυμαινόμενο από περίπου -50% έως και +90% (περίπου για τις Εξ. 14.11 και 14.12), δηλ. με απλά λόγια πρόβλεψη από τιμή περίπου τη μισή της πραγματικής έως και διπλάσια της πραγματικής.
- Υπάρχουν λοιπόν ενδείξεις που υποδεικνύουν τη συσχέτιση ανάμεσα στο παραμένοντα λόγο κενών και την αρχική κατάσταση των εδαφικών υλικών όπως αυτή εκφράζεται από τον αρχικό λόγο κενών τους κατά την έναρξη της ξήρανσης και την φύση τους όπως αυτή εκφράζεται με το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών και είτε το όριο υδαρότητας, είτε το όριο πλαστικότητας και μάλιστα και για το σύνολο των δεδομένων. Λιγосτές επίσης -αλλά υπαρκτές- ενδείξεις υποδεικνύουν ότι ο λόγος  $e_r/e_o$  για *ισχυρής δομής* φυσικά υλικά προκύπτει υψηλότερος από εκείνον των ίδιων υλικών αναζυμωμένων και επανασυμπιεσμένων για περίπου τον ίδιο λόγο  $e_o/e_L$  ή  $e_o/e_P$ .
- Από τις συσχετίσεις αυτές λοιπόν είναι δυνατή η πρόβλεψη του παραμένοντος λόγου κενών για κανονικά στερεοποιημένα αργιλικά εδάφη από τη φύση τους (όπως αυτή εκφράζεται από το όριο πλαστικότητας  $w_P$  και το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών  $G_s$ ) και την αρχική τους κατάσταση (όπως εκφράζεται από τον αρχικό λόγο κενών  $e_o$ ). Η ύπαρξη μίας τέτοιας συσχέτισης είναι ιδιαίτερης σημασίας σε ό,τι αφορά την απλοποίηση της εκτίμησης παραμέτρων για ένα καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά και χρησιμοποιήθηκε στο θεωρητικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού σε δοκίμια των υλικών συμπυκνωμένα «ξηρά» από την βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσής τους, στην βέλτιστη και «υγρά» από αυτήν, είναι τα εξής:

- Μείωση της υγρασίας συμπύκνωσης «ξηρά» από την βέλτιστη οδηγεί σε μεγαλύτερη αρχική μύζηση αμέσως μετά την συμπύκνωση σε σχέση με υγρασία συμπύκνωσης στην βέλτιστη

υγρασία συμπίκνωσης και «υγρά» από αυτήν.

- Οι κλάδοι επανύγρανσης –στα δείγματα αποσαθρωμένου σερπεντινίτη για τα οποία μετρήθηκαν- για όλες τις υγρασίες συμπίκνωσης παρουσιάζουν υστέρηση ως προς τους κλάδους ξήρανσης, αλλά τόσο το μέγεθος της υστέρησης αυτής (μετρούμενο ως η απόσταση των κλάδων επανύγρανσης από τους κλάδους ξήρανσης κατά μήκος του άξονα του ποσοστού υγρασίας) όσο και το εύρος τιμών της μύζησης στο οποίο παρατηρείται μειώνονται με την μείωση της υγρασίας συμπίκνωσης.
- Για υγρασία συμπίκνωσης «ξηρά» από την βέλτιστη και ακόμα και στην βέλτιστη υγρασία κατά την επανύγρανση μέχρι μικρές τιμές της μύζησης το υλικό μπορεί να αποκτήσει ποσοστά υγρασίας μεγαλύτερα ακόμα και από την υγρασία συμπίκνωσης.
- Στα δείγματα συμπεκνωμένης αργίλου Αμαρουσίου που μετρήθηκαν και οι μεταβολές όγκου κατά την ξήρανση παρατηρήθηκε ότι το υλικό έχει και για τις τρεις υγρασίες συμπίκνωσης σημαντικές μεταβολές όγκου. Αυτές είναι κατά σειρά μεγαλύτερες για το υλικό που συμπεκνώθηκε «υγρά» από την βέλτιστη υγρασία λόγω μέγιστου ποσοστού υγρασίας και μικρότερης πυκνότητας από την βέλτιστη, αμέσως μικρότερες για το υλικό που συμπεκνώθηκε «ξηρά» από την βέλτιστη υγρασία λόγω μικρότερης πυκνότητας από την βέλτιστη, και τέλος οι ελάχιστες για το υλικό που συμπεκνώθηκε στην βέλτιστη υγρασία λόγω μεγάλης πυκνότητας.
- Προέκυψε επίσης ότι και για τις τρεις υγρασίες συμπίκνωσης εμφανίζεται παραμένων λόγος κενών για μεγάλες τιμές της μύζησης (αυτές που επιβλήθηκαν με την μέθοδο των υδατικών διαλυμάτων) ο οποίος παίρνει την ελάχιστη τιμή για το υλικό που συμπεκνώθηκε στην βέλτιστη υγρασία, την δεύτερη μικρότερη για το υλικό που συμπεκνώθηκε «υγρά» από την βέλτιστη υγρασία και τέλος την μέγιστη για το υλικό που συμπεκνώθηκε «ξηρά» από την βέλτιστη υγρασία.

## 16.5 ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ/ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα από τις δοκιμές αυτές, προκύπτει ότι προκειμένου για υγρασίες συμπίκνωσης στην βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης και «ξηρά» από αυτήν η παρατηρούμενη συρρίκνωση του υλικού λόγω διαβροχής είναι πολύ μεγάλη και μάλιστα αρχίζει να παρατηρείται από τιμές της κατακόρυφης τάσης που αναπτύσσονται σε μεγάλα αλλά ακόμα και συνήθη τεχνικά έργα. Η συρρίκνωση αυτή μάλιστα αρχίζει να σταθεροποιείται στην μέγιστη τιμή της μόνο για πολύ μεγάλη τιμή της τάσης (4 MPa), η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη των τάσεων που

αναπτύσσονται στα περισσότερα έργα. Η παρατήρηση έχει σημασία για την καταστατική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών αφού πράγματι μετρήθηκε σταθεροποίηση της συρρίκνωσης των υλικών λόγω διαβροχής από μία τιμή της τάσης και μετά, αλλά –τουλάχιστον για το συγκεκριμένο υλικό- το εύρος τιμών της κατακόρυφης τάσης εντός του οποίου είναι δυνατόν να συμβούν πολύ μεγάλες παραμορφώσεις λόγω συρρίκνωσης είναι πολύ μεγάλο ξεκινώντας από μέτριες τιμές της τάσης μέχρι πολύ μεγάλες.

## **16.6 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ**

Σε ό,τι αφορά τη διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών όπως αυτή διερευνήθηκε μέσω συνδυασμού δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε δοκίμια αναζυμωμένων εδαφικών υλικών από μορφή πολτού που υποβάλλονταν σε ξήρανση:

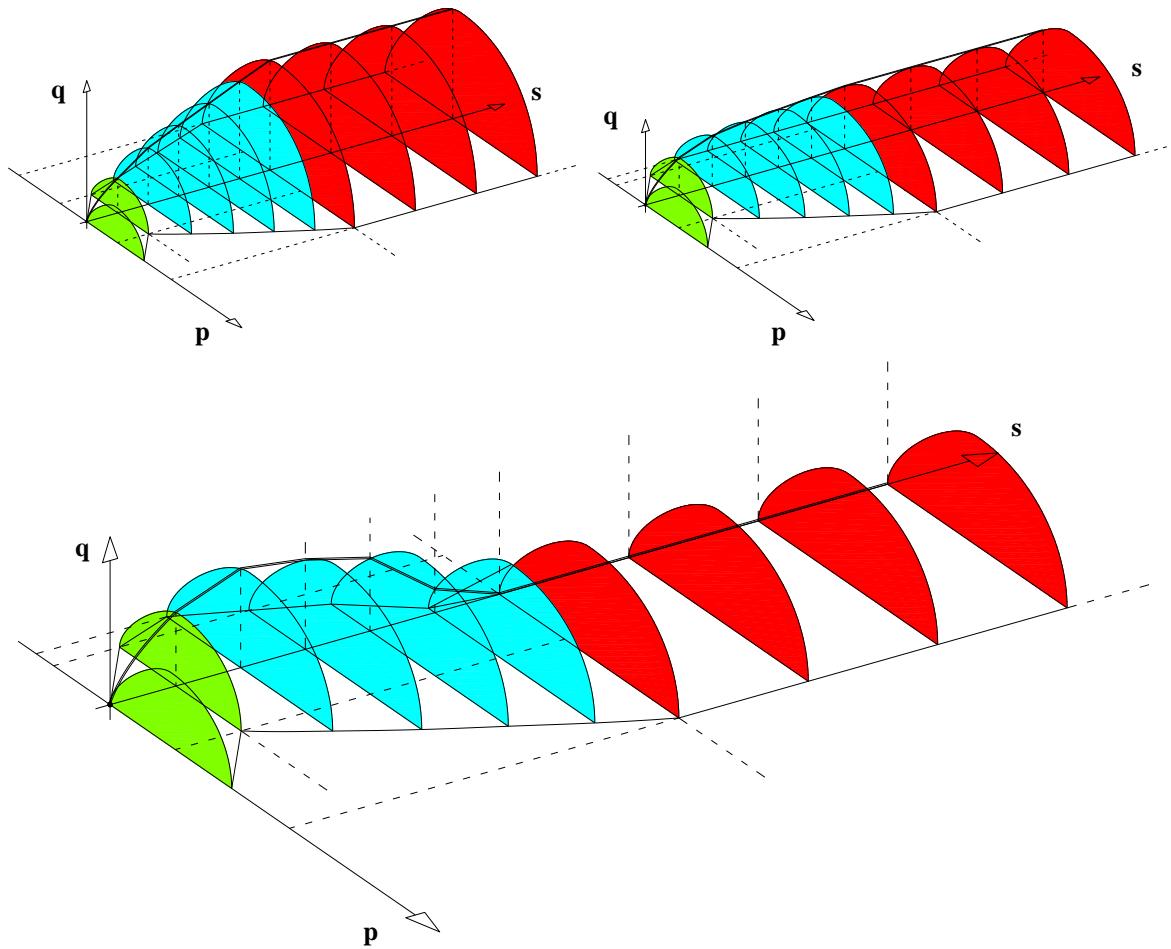
- Δεν πρέπει να θεωρείται καθόλου βέβαιη η αύξηση της αντοχής με τη μύζηση και μόνο,
- ακόμα και όταν παρατηρείται αύξηση της αντοχής με τη μύζηση δεν είναι υποχρεωτικό να είναι μονοτονική,
- ακόμα και όταν αυτή η αύξηση παρουσιάστηκε μονοτονική, ο ρυθμός της ήταν πολύ μικρότερος εκείνου που αντιστοιχούσε στη γωνία διατμητικής αντοχής του ίδιου εδάφους αναζυμωμένου και πλήρως κορεσμένου,
- τα λιγοστά αποτελέσματα σε πολύ μεγάλες τιμές της μύζησης τεκμηριώνουν την βεβαιότητα της σταθεροποίησης της αντοχής σε κάποιο σημείο, και
- διακρίνονται συσχετίσεις των σημείων μεταβολής της εξέλιξης της αντοχής με τη μύζηση με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού χωρίς όμως το πλήθος των δοκιμών να επιτρέπει γενικευμένα συμπεράσματα.

Σε κάθε περίπτωση, δοκιμές του είδους θα πρέπει να πραγματοποιηθούν και στο μέλλον και κυρίως να συσχετιστούν και με δοκιμές στα ίδια υλικά υπό ελεγχόμενη μύζηση π.χ. σε συσκευή άμεσης διάτμησης με ελεγχόμενη μύζηση για την πληρέστερη διερεύνηση της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών και κυρίως την τεκμηρίωση της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε καθώς παρουσιάζεται ως ενδιαφέρουσα εναλλακτική πιο ακριβών μεθόδων. Σε κάθε περίπτωση, η δοκιμή που έγινε σε δοκίμιο αποσαθρωμένου Φυλλίτη Σκύρου (το πιο

χονδρόκοκκο από τα υλικά αυτής της σειράς δοκιμών και μάλιστα μη πλαστικό) με εγκατεστημένο αισθητήρα μέτρησης της μύζησης επέδειξε ότι από τη στιγμή της ολοκλήρωσης της ξήρανσης μέχρι και την ολοκλήρωση της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης (η οποία είναι και η δοκιμή από τα δύο είδη που διαρκεί περισσότερο χρόνο) η μεταβολή της μύζησης είναι πολύ μικρή, πρακτικά τόσο μικρή που να μπορεί να υποτεθεί εύλογα (ειδικά μάλιστα για τα πιο λεπτόκοκκα και πλαστικά υλικά) ότι παραμένει σταθερή.



# ΜΕΡΟΣ ΙΙΙ



**ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ  
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΛΑΦΩΝ**

**CONSTITUTIVE MODELLING OF THE MECHANICAL  
BEHAVIOUR OF UNSATURATED SOILS**





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 17

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΜΕΡΟΥΣ ΙΙΙ

### 17.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το παρόν τρίτο μέρος της διδακτορικής διατριβής αποτελεί το κείμενο στο οποίο παρουσιάζεται το νέο θεωρητικό πλαίσιο της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Έχει ήδη προηγηθεί το πρώτο μέρος στο οποίο παρουσιάζεται η υπάρχουσα κατάσταση της γνώσης (state-of-the-art) σε ό,τι αφορά τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών και το δεύτερο μέρος στο οποίο παρουσιάστηκαν και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η σκοπιμότητα πραγματοποίησης της αναλυτικής διερεύνησης που κατέληξε στη διατύπωση του νέου καταστατικού προσομοιώματος, το περίγραμμα του τρίτου μέρους και η κατάληξή του.

### 17.2 ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΑΡΟΝΤΟΣ ΤΡΙΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

Αφού προηγήθηκε το πρώτο μέρος στο οποίο παρουσιάστηκε η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών και το δεύτερο μέρος στο οποίο παρουσιάστηκαν και αξιολογήθηκαν οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, στο παρόν τρίτο μέρος παρουσιάζεται η αξιολόγηση των συγκεντρωθέντων καταστατικών προσομοιωμάτων για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά και το νέο θεωρητικό πλαίσιο. Οι απαιτήσεις για τις προβλέψεις ενός καταστατικού προσομοιώματος για

μη κορεσμένα εδαφικά υλικά προκειμένου αυτές να θεωρούνται επιτυχείς, συνοψίζονται στις εξής:

- Η πρόβλεψη της σταθεροποίησης της τιμής της χρησιμοποιούμενης παραμορφωσιακής μεταβλητής (λόγος κενών ή ειδικός όγκος) όταν το ποσοστό υγρασίας του υλικού γίνεται ίσο ή μικρότερο του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας.
- Η πρόβλεψη διαφορετικής εξέλιξης της διατμητικής αντοχής (της «φαινόμενης» συνοχής) με τη μύζηση για διαφορετικά εδαφικά υλικά (κοκκώδη ή αργιλικά και χαμηλής ή υψηλής πλαστικότητας προκειμένου για αργιλικά εδαφικά υλικά).

Στο μέρος αυτό της διατριβής παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα διατυπωμένα καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά (Κεφάλαιο 18). Όπως προκύπτει από την αξιολόγηση των καταστατικών αυτών προσομοιωμάτων, κανένα δεν πληροί όλες μαζί τις βασικές από τις προαναφερθείσες απαιτήσεις επιτυχούς πρόβλεψης. Γι' αυτόν το λόγο διατυπώθηκε το νέο θεωρητικό πλαίσιο το οποίο ικανοποιεί τις προαναφερθείσες απαιτήσεις. Αυτό παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 19.

### **17.3 ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ ΤΟΥ ΤΡΙΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ**

Το τρίτο μέρος της διδακτορικής διατριβής αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια (συμπεριλαμβανομένης και της παρούσας εισαγωγής). Τα κεφάλαια που ακολουθούν είναι:

- Κεφάλαιο 18. Καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη.
- Κεφάλαιο 19. Το νέο θεωρητικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδάφη.
- Κεφάλαιο 20. Συμπεράσματα – Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Στο Κεφάλαιο 18 παρουσιάζονται τα διατυπωμένα καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά. Παρουσιάζεται πρώτα αναλυτικά το πρώτο ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά, το καταστατικό προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990). Η αναλυτική παρουσίασή του θεωρήθηκε σκόπιμη, αφενός γιατί αποτελεί το πρώτο προσομοίωμα που περιέγραψε ένα ενοποιημένο θεωρητικό πλαίσιο της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και αφετέρου γιατί όλα τα καταστατικά

προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη που διατυπώθηκαν μετά από αυτό, βασίζονται σε αυτό σε μικρό ή μεγαλύτερο βαθμό και είναι πολύ εύκολη η παρουσίασή τους αν έχει γίνει κατανοητό το προσομοίωμα αυτό. Έτσι, στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα σημαντικότερα από τα υπόλοιπα καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά που διατυπώθηκαν μετά από το προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990). Για κάθε καταστατικό προσομοίωμα επισημαίνονται οι διαφορές του από το προσομοίωμα των Alonso et al, 1990, και πως συγκρίνονται οι ικανότητές του για την πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών προκειμένου οι προβλέψεις του να θεωρούνται επιτυχείς.

Στο Κεφάλαιο 19 παρουσιάζεται το νέο θεωρητικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Αρχικά επισημαίνονται οι ελλείψεις των διατυπωμένων καταστατικών προσομοιωμάτων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 18. Στη συνέχεια προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά στα οποία εντοπίζεται η εξέλιξη του νέου θεωρητικού προσομοιώματος και είναι:

- α. Η δυνατότητα πρόβλεψης διαφορετικής εξέλιξης της διατμητικής αντοχής συναρτήσει της μύζησης ανάλογα με την φύση του εδαφικού υλικού (κοκκώδες ή αργιλικό, χαμηλής ή υψηλής πλαστικότητας).
- β. Η πρόβλεψη σταθεροποίησης του ολικού όγκου του εδαφικού υλικού για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες της μύζησης επίτευξης παραμένουτος ποσοστού υγρασίας.

Το Κεφάλαιο 19 συμπληρώνεται με την επίδειξη της αξιοποίησης των αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε εδαφικά υλικά από τον ελλαδικό χώρο και παρουσιάστηκαν στο δεύτερο μέρος της παρούσας διατριβής.

Στο Κεφάλαιο 20 συνοψίζονται τα συμπεράσματα από το τρίτο μέρος της διατριβής καταλήγοντας σε προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

#### **17.4 ΚΑΤΑΛΗΞΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Ο παρών τρίτος τόμος της διδακτορικής διατριβής αποτελεί το πρώτο κείμενο στην ελληνική γλώσσα όπου συγκεντρώθηκαν, παρουσιάστηκαν και αξιολογήθηκαν τα διατυπωμένα

καταστατικά προσομοιώματα για τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Αποτελεί το κείμενο αναφοράς για μελλοντικές εργασίες στην περιοχή της αναλυτικής διερεύνησης της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και το κείμενο στο οποίο παρουσιάστηκε το νέο θεωρητικό πλαίσιο για αυτήν που αναπτύχθηκε.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την αξιολόγηση των συγκεντρωθέντων καταστατικών προσομοιωμάτων είναι τα εξής:

- α. Κανένα από τα διατυπωμένα καταστατικά προσομοιώματα δεν έχει ικανότητα πρόβλεψης διαφορετικής εξέλιξης της διατμητικής αντοχής συναρτήσει της μύζησης. Όλα τα προσομοιώματα προβλέπουν συστηματική αύξηση ή το πολύ σταθεροποίηση της διατμητικής αντοχής με την αύξηση της μύζησης, αλλά κανένα δεν προβλέπει μείωση όπως γνωρίζουμε ότι συμβαίνει σε κοκκώδη εδαφικά υλικά και ορισμένα αργιλικά εδαφικά υλικά χαμηλής πλαστικότητας.
- β. Κανένα από τα διατυπωμένα καταστατικά προσομοιώματα δεν προβλέπει σταθεροποίηση του ολικού όγκου για τιμές της μύζησης που υπερβαίνουν την μύζηση που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας με ταυτόχρονη κατάληξη σε δεδομένη τιμή της παραμορφωσιακής μεταβλητής (λόγου κενών ή ειδικού όγκου).

Μετά τη συγκέντρωση, παρουσίαση και αξιολόγηση των διατυπωμένων καταστατικών προσομοιωμάτων για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά, παρουσιάστηκε το νέο θεωρητικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Τα κύρια χαρακτηριστικά του νέου θεωρητικού πλαισίου είναι τα εξής:

- Προβλέπει παύση της περαιτέρω μείωσης του λόγου κενών των εδαφικών υλικών από την μύζηση που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών και μετά. Όπως επιδείχθηκε, προηγούμενα προσομοιώματα δεν έχουν τέτοια δυνατότητα, ενώ ακόμα και προσομοιώματα που ενσωματώνουν τέτοιες δυνατότητες δεν έχουν την ικανότητα να «στοχεύσουν» την ορθή τιμή του παραμένοντος ειδικού όγκου όπως το νέο θεωρητικό πλαίσιο χάρη στις Εξ. 19.5 και 19.6. Η εισαγωγή και χρήση των εξισώσεων αυτών αναδεικνύει και τη σημασία των εμπειρικών συσχετίσεων που αναπτύχθηκαν με βάση την πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής (βλ. §14.6.4, Εξ. 14.11 έως 14.16 στον Πιν. 14.7). Χρησιμοποιώντας τις εμπειρικές αυτές συσχετίσεις ως εργαλείο πρόβλεψης του παραμένοντος λόγου κενών (και άρα του παραμένοντος ειδικού όγκου) ακόμα και με

μεγάλα κενά στο εύρος τιμών της μύζησης μεταξύ της μεθόδου μετατόπισης άξονα και της μεθόδου υδατικών διαλυμάτων για τον έλεγχο της μύζησης, μπορεί να εκτιμηθεί μία τιμή της μύζησης επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών/ειδικού όγκου ώστε οι προσομοιώσεις να καταλήγουν στην επιθυμητή τιμή του ειδικού όγκου.

- Διά της μορφής των Εξ. 19.5 και 19.6, το νέο θεωρητικό πλαίσιο μπορεί να προβλέψει την δυνατή περιοχή εμφάνισης πλαστικών ογκομετρικών μεταβολών λόγω μεταβολής της μύζησης.
- Περιγράφει την εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση έτσι ώστε να είναι δυνατόν να προβλεφθεί οποιαδήποτε δυνατή εξέλιξη της διατμητικής αντοχής μετά την πίεση διείσδυσης αέρα (περαιτέρω αύξηση της αντοχής, σταθεροποίηση ή μείωση) διά της Εξ. 19.16 με αξιοσημείωτη μάλιστα ευελιξία.
- Λόγω της νέας μορφής του νόμου εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με την μύζηση απαιτεί την εισαγωγή και της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του εδαφικού υλικού.

Το MBBM ισχύει για τα εξής εδαφικά υλικά και εντατικές καταστάσεις:

- Εδαφικά υλικά με ένα κυρίαρχο μέγεθος πόρων, πρακτικά ομοιογενή ως προς τον βαθμό κορεσμού τους (ή με μικρές μόνο διαφορές), τα οποία παρουσιάζουν μόνο ελαστική διόγκωση κατά την μείωση της μύζησης.
- Λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα εδάφη τα οποία επιδεικνύουν είτε αύξηση, είτε σταθεροποίηση, είτε και μείωση ακόμα της διατμητικής τους αντοχής με την αύξηση της μύζησης.
- Παραμορφώσιμα εδάφη η ξήρανση των οποίων έχει φτάσει ή ακόμα και υπερβεί την μύζηση επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών.
- Για λόγους συνέπειας με το πρώτο σημείο, εδαφικά υλικά με χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού δύο μόνο σημείων καμπής (δηλαδή ενός κυρίαρχου μεγέθους πόρων). Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού εισάγεται ουσιαστικά για την δυνατότητα πρόβλεψης της διατμητικής αντοχής και όχι της συμπιεστότητας του προσομοιούμενου εδαφικού υλικού, οπότε θα μπορούσε να εισαχθεί καμπύλη οποιασδήποτε γεωμετρικής μορφής. Αυτό όμως δεν θα βρισκόταν σε συνέπεια με την δυνατότητα προσομοίωσης μεταβολών όγκου και μεταβολών της επιφάνειας διαρροής του προσομοιώματος.
- Εδαφικά υλικά με απλή ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρυνσης που περιορίζεται σε απλές, ανεξάρτητες του ρυθμού φόρτισης, φορτίσεις και αποφορτίσεις και ξηράνσεις και υγράνσεις.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 18

## ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

### 18.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά που έχουν διατυπωθεί μέχρι σήμερα. Η συγκέντρωση προσομοιωμάτων περιορίστηκε σε προσομοιώματα δημοσιευμένα σε διεθνή περιοδικά ή ειδικές διαλέξεις μεγάλων συνεδρίων για μη κορεσμένα εδάφη, και επεκτάθηκε σε δημοσιεύσεις σε συνέδρια μόνο για πολύ σημαντικές συνεισφορές που δεν βρέθηκαν σε άρθρα δημοσιευμένα σε περιοδικά.

Η παρουσίαση αυτή προϋποθέτει βασικές γνώσεις ελαστοπλαστικής καταστατικής προσομοίωσης πλήρως κορεσμένων εδαφών με βάση τη θεωρία κρίσιμης κατάστασης (critical state theory) και τη βηματική θεωρία της πλαστικότητας (incremental theory of plasticity), και γνώση του καταστατικού προσομοιώματος Modified Cam-Clay (Roscoe & Burland, 1968). Επίσης δεν δίνεται βαρύτητα στην ταυτόχρονη επίδειξη της εισαγωγής και της προσομοίωσης της δομής των φυσικών πλήρως κορεσμένων εδαφικών υλικών (π.χ. Pinyol, et al., 2007, Rouainia & Pereira, 2010, Yang, et al., 2010) ή της επιρροής της ταχύτητας φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών (π.χ. Pereira & de Gennaro, 2010, για ερπυσμό, και Bian, et al., 2010, για δυναμική φόρτιση), αλλά μόνο της ιδιαιτερότητας της προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς που επιβάλλει ο μερικός κορεσμός ενός εδαφικού υλικού.

Τα πρώτα καταστατικά προσομοιώματα διατυπώθηκαν σε δύο παραμέτρους τάσης, τη μύζηση και την ολική τάση αφαιρουμένης της πίεσης της αέριας φάσης. Προοδευτικά όμως άρχισαν να εμφανίζονται καταστατικά προσομοιώματα στα οποία επιχειρείτο να εισαχθεί μία μοναδική

παράμετρος τάσης (κάποιες φορές, ατυχώς καλούμενη «ενεργός» τάση) με τη γενική μαθηματική διατύπωση του Bishop (1959) –βλ. σχετικά Κεφ. 2, §2.4.2. Το πρόβλημα με την προσέγγιση της μίας παραμέτρου έχει ήδη επεξηγηθεί στο Κεφ. 2 γενικότερα και όχι μόνο σε σχέση με την καταστατική προσομοίωση. Η Jommi (2000) υπήρξε η πρώτη που επιχείρησε να παρουσιάσει με έναν απλό και παραστατικό τρόπο τις διαφορές στις δύο προσεγγίσεις και ο Gens (2010) συνόψισε, ομαδοποίησε και απέδωσε καλύτερα από όλους μέχρι σήμερα τις διαφορές μεταξύ τους. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρουσιάζονται κυρίως τα καταστατικά προσομοιώματα που έχουν διατυπωθεί σε δύο παραμέτρους τάσης.

Εκτός από την παρουσίαση των υφιστάμενων καταστατικών προσομοιωμάτων στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται η ομαδοποίησή τους για τη δυνατότητα καλύτερης αξιολόγησής τους και αποτίμησής της δυνατότητάς τους για επιτυχή πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών. Προκειμένου όμως να γίνει αυτό με μεγαλύτερη ευκολία στην αναγνώριση κοινών και διαφορετικών χαρακτηριστικών, παρουσιάζεται πρώτα το πρώτο ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα για μή κορεσμένα εδάφη, το προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990).



## 18.2 ΤΟ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΤΩΝ ALONSO, ET AL. (1990)

### 18.2.1 Εισαγωγή

Το πρώτο ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά ήταν αυτό των Alonso, et al. (1990). Από τότε έχουν παρουσιαστεί πολλά καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά. Για να μπορέσει να γίνει η ομαδοποίηση και παρουσίαση των ήδη διατυπωμένων καταστατικών προσομοιωμάτων για μη κορεσμένα εδάφη στην §18.3, θεωρήθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί πρώτα αυτό το καταστατικό προσομοίωμα προκειμένου να υπάρξει άμεση εξοικείωση με τις κεντρικές ιδέες που διέπουν την καταστατική προσομοίωση των μη κορεσμένων εδαφών από προσομοιώματα δύο παραμέτρων τάσης.

### 18.2.2 Παράμετροι τάσης διατύπωσης του προσομοιώματος

Ακολουθώντας τους Fredlund & Morgenstern (1977), το καταστατικό προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990) είναι διατυπωμένο στις εξής παραμέτρους τάσης:

- $p = \sigma_m - u_a$ , που αποτελεί την περίσσεια της μέσης τάσης  $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  επί της πίεσης της αέριας φάσης  $u_a$ ,
- $q = \sigma_1 - \sigma_3$ , η διεκτροπική τάση,
- $s = u_a - u_w$ , η μύζηση
- $v = 1 + e$ , ο ειδικός όγκος

$\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  είναι οι ολικές κύριες τάσεις,  $u_a$  και  $u_w$  είναι η πίεση στην αέρια και στην υγρή φάση των πόρων του εδαφικού υλικού αντίστοιχα και  $e$  είναι ο λόγος κενών.

### 18.2.3 Επιφάνειες διαρροής

Η επιφάνεια διαρροής στο επίπεδο  $p$ - $q$  για οποιαδήποτε τιμή της μύζησης ορίζεται από την Εξ. 18.1. Η τάση  $p_0$  είναι η τάση διαρροής κατά μήκος καμπυλών ιστροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση  $s$  και η τάση  $p_s$  είναι η εφελκυστική αντοχή του εδαφικού υλικού υπό την ίδια

μύζηση  $s$ . Η τάση διαρροής  $p_o$  μεταβάλλεται με τη μύζηση όπως προβλέπει η Εξ. 18.2 και η εφελκυστική αντοχή όπως προβλέπει η Εξ. 18.3.  $M$  είναι η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης, όπως ορίζεται σε επίπεδα  $p$ - $q$  σταθερής μύζησης<sup>1</sup>. Θεωρείται δε σταθερή με τη μύζηση.  $\lambda(0)$  και  $\kappa$  είναι αντίστοιχα ο δείκτης συμπίεσης και ο δείκτης αποφόρτισης/επαναφόρτισης όταν η μύζηση έχει γίνει 0 και ορίζονται στο επίπεδο  $v$ - $\ln p$  για  $s=0$ , ενώ  $\lambda(s)$  είναι ο δείκτης συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση  $s$  όπως ορίζεται στο επίπεδο  $v$ - $\ln p$  για  $s \neq 0$  και καθορίζεται από την Εξ. 18.4, όπου  $r$  και  $\beta$  εμπειρικές παράμετροι.  $p_o^*$  είναι η τάση διαρροής κατά μήκος της καμπύλης ιστροπικής συμπίεσης υπό μηδενική μύζηση και  $p^c$  είναι ουσιαστικά μία τυχαία τάση αναφοράς. Τέλος,  $k$  είναι η σταθερά αύξησης της εφελκυστικής αντοχής συναρτήσει της μύζησης. Η διαρροή κατά μήκος καμπυλών ξήρανσης (αύξησης της μύζησης  $s$ ) καθορίζεται από μία μοναδική τιμή της μύζησης  $s_o$ , οπότε η «επιφάνεια» διαρροής που συνδέεται απευθείας με τη μύζηση εκφράζεται από την Εξ. 18.5. Στο Σχ. 18.1 παρουσιάζεται γραφική απεικόνιση του προσομοιώματος των Alonso, et al. (1990).

$$f_1(p, q, s, p_o^*) \equiv q^2 - M^2(p + p_s)(p_o - p) = 0 \quad (18.1)$$

$$\frac{p_o}{p^c} = \left( \frac{p_o^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \kappa}{\lambda(s) - \kappa}} \quad (18.2)$$

$$p_s = k \cdot s \quad (18.3)$$

$$\lambda(s) = \lambda(0) \cdot [(1-r)\exp(-\beta s) + r] \quad (18.4)$$

$$f_2(s, s_o) \equiv s - s_o = 0 \quad (18.5)$$

Στο Σχ. 18.1α παρουσιάζεται η εξέλιξη του ειδικού όγκου  $v$  με την αύξηση της τάσης  $p$  κατά μήκος καμπυλών ιστροπικής συμπίεσης υπό μύζηση  $s=0$  και υπό κάποια τιμή της μύζησης  $s \neq 0$ .

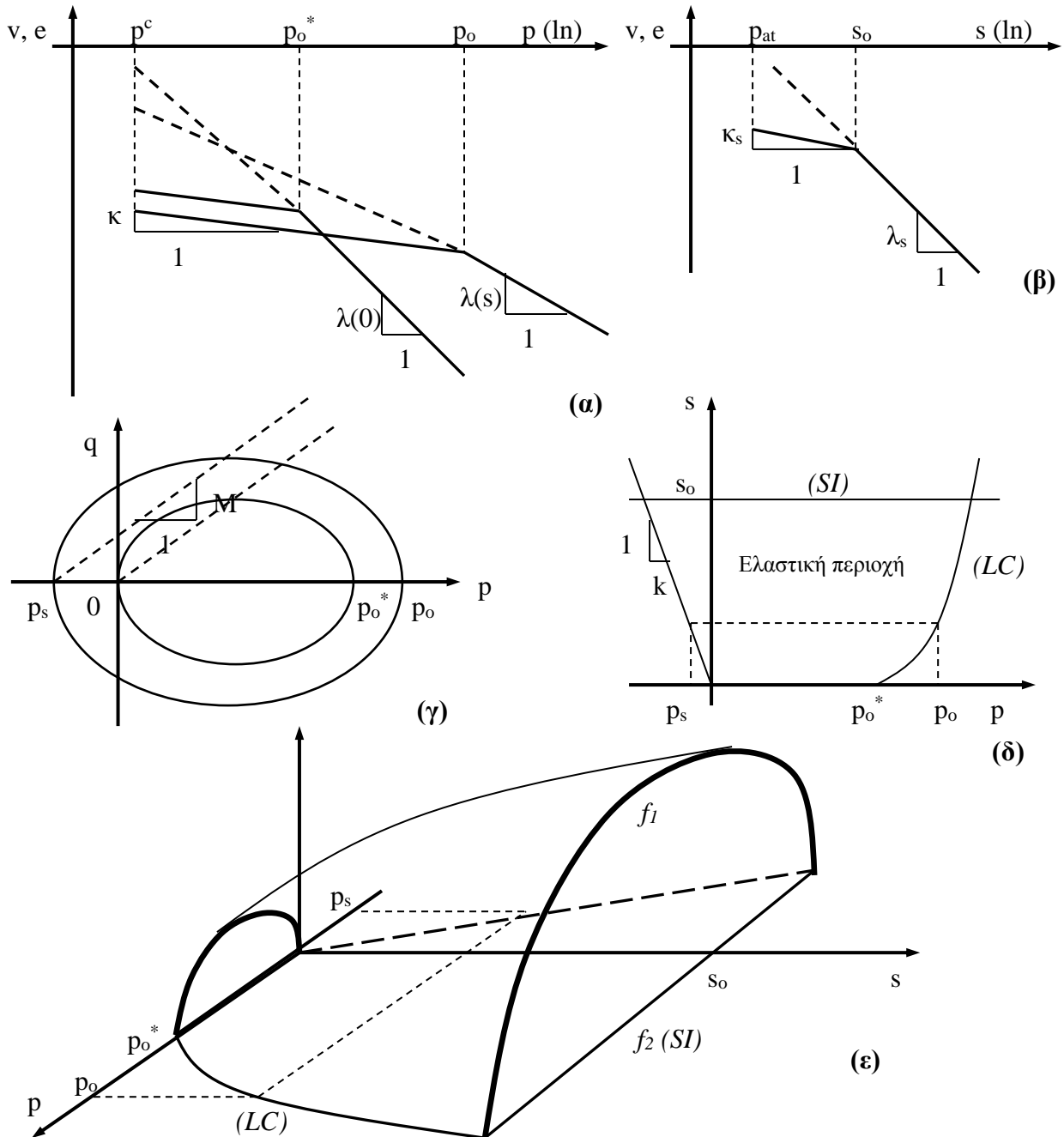
<sup>1</sup> Κρίσιμη κατάσταση των εδαφικών υλικών είναι η κατάσταση κατά την οποία περαιτέρω διάτμηση ενός εδαφικού υλικού δεν προκαλεί μεταβολή της τάσης και του ολικού όγκου του εδαφικού υλικού. Επιτυγχάνεται μέσω της διάτμησης ενός εδαφικού υλικού μέχρι μεγάλες παραμορφώσεις παρόλο που μπορεί να είναι δύσκολο να εντοπιστεί σε κοκκώδη εδαφικά υλικά ή πολύ υπερστερεοποιημένες αργίλους. Η θεωρία κρίσιμης κατάστασης προβλέπει ότι οι τελικές καταστάσεις μετά από διάτμηση μέχρι μεγάλη παραμόρφωση όλων των δοκιμίων ενός εδαφικού υλικού καταλήγουν σε μία μοναδική γραμμή, τη γραμμή κρίσιμης κατάστασης (critical state line), ανάμεσα στο λόγο κενών (ή τον ειδικό όγκο), τη μέση ενεργό τάση  $p'$  και τη διεκτροπική τάση  $q$  (Schofield & Wroth, 1968). Η γραμμή αυτή περιγράφεται από τις εξισώσεις  $q = M \cdot p'$  και  $v = \Gamma - \lambda \cdot \ln p'$ , όπου  $M$ ,  $\Gamma$  και  $\lambda$  είναι παράμετροι ξεχωριστές για κάθε εδαφικό υλικό.

Από το σχήμα αυτό φαίνεται πως μεταβάλλεται η τάση διαρροής με τη μύζηση (αυξάνεται), όπως και πως μεταβάλλεται ο δείκτης συμπίεσης με αυτήν (μειώνεται). Κατά συνέπεια το προσομοίωμα αυτό προβλέπει ότι με αύξηση της μύζησης το εδαφικό υλικό γίνεται πιο στιφρό (μικρότερος δείκτης συμπίεσης και μεγαλύτερη τάση διαρροής), χαρακτηριστικό το οποίο συνάδει με την κοινή εμπειρία από την επιρροή της αύξησης της μύζησης και της μείωσης του βαθμού κορεσμού στα εδαφικά υλικά. Ο δείκτης αποφόρτισης/επαναφόρτισης  $\kappa$  προβλέπεται σταθερός, ανεξάρτητος της μύζησης.

Στο Σχ. 18.1β παρουσιάζεται η εξέλιξη του ειδικού όγκου  $v$  με την αύξηση της μύζησης  $s$  κατά μήκος κλάδων ξήρανσης υπό τάση  $p \leq p_0$ .  $p_{at}$  είναι αυθαίρετα οριζόμενη τιμή της πίεσης της αέριας φάσης (σε αντιστοιχία με την τυχαία τάση αναφοράς  $p^c$ ). Όπως φαίνεται από το Σχ. 18.1β και έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 5 του πρώτου μέρους και στο Κεφάλαιο 14 του δεύτερου μέρους (όπου άλλωστε παρουσιάστηκαν και τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα), το προσομοίωμα αυτό δεν προβλέπει *παύση* της μείωσης του ειδικού όγκου (δηλ. του λόγου κενών και άρα το ολικού όγκου), το οποίο αντιβαίνει την κοινή εμπειρία από δοκιμές ξήρανσης εδαφικών υλικών από τις οποίες είναι γνωστό ότι ο ολικός όγκος (και άρα ο λόγος κενών και ο ειδικός όγκος) *παύει* να μειώνεται περαιτέρω μετά τη μύζηση που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας.

Στο Σχ. 18.1γ παρουσιάζεται η εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής με την αύξηση της μύζησης  $s$  με τη μορφή που παίρνει στο επίπεδο  $p$ - $q$ . Όπως παρατηρείται από το Σχ. 18.1γ, αλλά και τον ορισμό της επιφάνειας διαρροής στην Εξ. 18.1, η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης θεωρείται σταθερή και προβλέπεται μονοτονική μεγέθυνση της επιφάνειας διαρροής η οποία έχει και συνιστώσα κινηματικής και συνιστώσα ισοτροπικής κράτυνσης λόγω του διαφορετικού ρυθμού εξέλιξης της εφελκυστικής αντοχής  $p_s$  και της αύξησης της τάσης διαρροής  $p_0$  ως προς την τάση διαρροής για  $s=0$ ,  $p_0^*$ . Αυτός ο διαφορετικός ρυθμός εξέλιξης φαίνεται καλύτερα στο Σχ. 18.1δ όπου απεικονίζεται στο επίπεδο  $p$ - $s$  η τομή της τριδιάστατης επιφάνειας διαρροής με αυτό το επίπεδο και φαίνονται οι τρεις γραμμές που την ορίζουν (Εξ. 18.2, 18.3 και 18.5). Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που συμβαίνει η διαρροή κατά μήκος καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση  $s$  στο επίπεδο  $p$ - $s$  ονομάστηκε από τους Alonso, et al. (1990) καμπύλη φόρτισης-κατάρρευσης (loading-collapse LC curve) ενώ η ευθεία  $s=s_0$  καμπύλη διαρροής λόγω αύξησης της μύζησης (suction increase SI curve). Τέλος στο Σχ. 18.1ε παρουσιάζεται η μορφή της επιφάνειας διαρροής του προσομοιώματος στις τρεις διαστάσεις του χώρου  $p$ - $q$ - $s$ . Όταν γίνεται  $s=0$ , η επιφάνεια διαρροής εκφυλίζεται στην επιφάνεια διαρροής του

καταστατικού προσομοιώματος modified Cam Clay (MCC, Roscoe & Burland, 1968) για πλήρως κορεσμένα εδάφη.

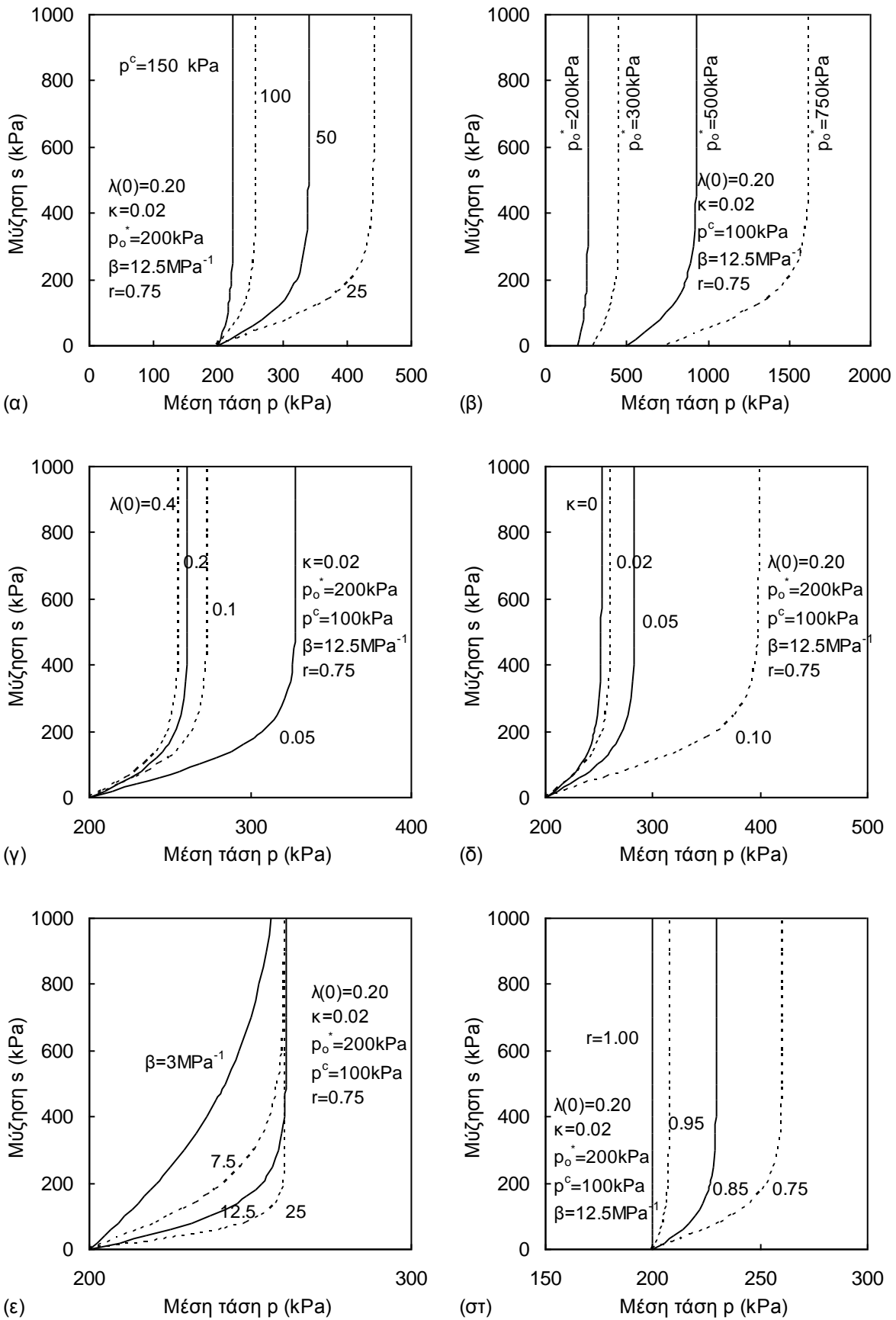


**Σχήμα 18.1.** Γραφική απεικόνιση του BBM: α) καμπύλες συμπίεσης πλήρως και μη κορεσμένου εδάφους λόγω μεταβολών της τάσης υπό σταθερή μύζηση, β) καμπύλες συμπίεσης λόγω μεταβολών της μύζησης υπό σταθερή τάση, γ) επιφάνεια διαρροής  $f_1$ , δ) επιφάνεια διαρροής  $f_2$ , και ε) τριδιάστατη απεικόνιση των επιφανειών διαρροής στο χώρο  $p$ - $q$ - $s$  (από τους Alonso et al, 1990).

Από τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν μέχρι αυτό το σημείο, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η Εξ. 18.2 από την οποία καθορίζεται η εξέλιξη της τάσης διαρροής κατά μήκος ισοτροπικών καμπυλών συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση  $s$ . Όπως προκύπτει από την Εξ. 18.2 η τάση διαρροής εξαρτάται από 6 παράγοντες: την τάση διαρροής επί της καμπύλης ισοτροπικής συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $p_o^*$ , την τάση αναφοράς  $p^c$ , το δείκτη συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $\lambda(0)$ , το δείκτη αποφόρτισης/επαναφόρτισης  $\kappa$ , καθώς και τις εμπειρικές παραμέτρους  $r$  και  $\beta$  από τις οποίες καθορίζεται η τιμή του δείκτη συμπίεσης καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση  $s$ .

Στο Σχ. 18.2 παρουσιάζεται η επιρροή καθεμιάς από τις 6 αυτές παραμέτρους επί της μορφής της καμπύλης φόρτισης-κατάρρευσης. Από τα επιμέρους σχήματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Από το Σχ. 18.2α προκύπτει ότι όσο μειώνεται η τάση αναφοράς  $p^c$  ως προς την τάση διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $p_o^*$ , τόσο πιο ραγδαία αυξάνεται αρχικά η τάση διαρροής για μύζηση  $s$ ,  $p_o$ , με την αύξηση της μύζησης.
- Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από το Σχ. 18.2β, αφού και πάλι όσο αυξάνεται η τάση διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $p_o^*$ , τόσο πιο ραγδαία αυξάνεται αρχικά η τάση διαρροής για μύζηση  $s$ ,  $p_o$ , με την αύξηση της μύζησης.
- Από το Σχ. 18.2γ προκύπτει ότι όσο μειώνεται ο δείκτης συμπίεσης  $\lambda(0)$  ως προς το δείκτη αποφόρτισης/επαναφόρτισης, τόσο πιο ραγδαία αυξάνεται αρχικά η τάση διαρροής για μύζηση  $s$ ,  $p_o$ , με την αύξηση της μύζησης.
- Αντίστοιχα από το Σχ. 18.2δ προκύπτει ότι όσο αυξάνεται ο δείκτης αποφόρτισης/επαναφόρτισης  $\kappa$  ως προς τον δείκτη συμπίεσης  $\lambda(0)$ , τόσο πιο ραγδαία αυξάνεται αρχικά η τάση διαρροής για μύζηση  $s$ ,  $p_o$ , με την αύξηση της μύζησης.
- Από το Σχ. 18.2ε προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η εμπειρική παράμετρος  $\beta$ , τόσο πιο ραγδαία αυξάνεται αρχικά η τάση διαρροής για μύζηση  $s$ ,  $p_o$ , με την αύξηση της μύζησης, παρόλο που ανεξαρτήτως τιμής της παραμέτρου οι καμπύλες τείνουν σε μία για μύζηση  $> 1000$  kPa.
- Τέλος, από το Σχ. 18.2στ προκύπτει ότι όσο μειώνεται η εμπειρική παράμετρος  $r$ , τόσο πιο ραγδαία αυξάνεται αρχικά η τάση διαρροής για μύζηση  $s$ ,  $p_o$ , με την αύξηση της μύζησης, ενώ για τιμή της ίση με 1, η καμπύλη εξέλιξης της τάσης διαρροής εκφυλίζεται σε ευθεία – όπως άλλωστε προκύπτει και από την Εξ. 18.4, αφού για  $r=1$  γίνεται  $\lambda(s)=\lambda(0)=\text{σταθερό}$  δηλ. η τάση διαρροής  $p_o$  παραμένει σταθερή ίση με  $p_o^*$ , όσο κι αν αυξάνεται η μύζηση.



**Σχήμα 18.2.** Παραμετρική ανάλυση της επιφάνειας διαρροής LC ως προς α) το  $p^c$ , β) το  $p_o^*$ , γ) το  $\lambda(0)$ , δ) το  $\kappa$ , ε) το  $\beta$ , και στ) το  $r$ .

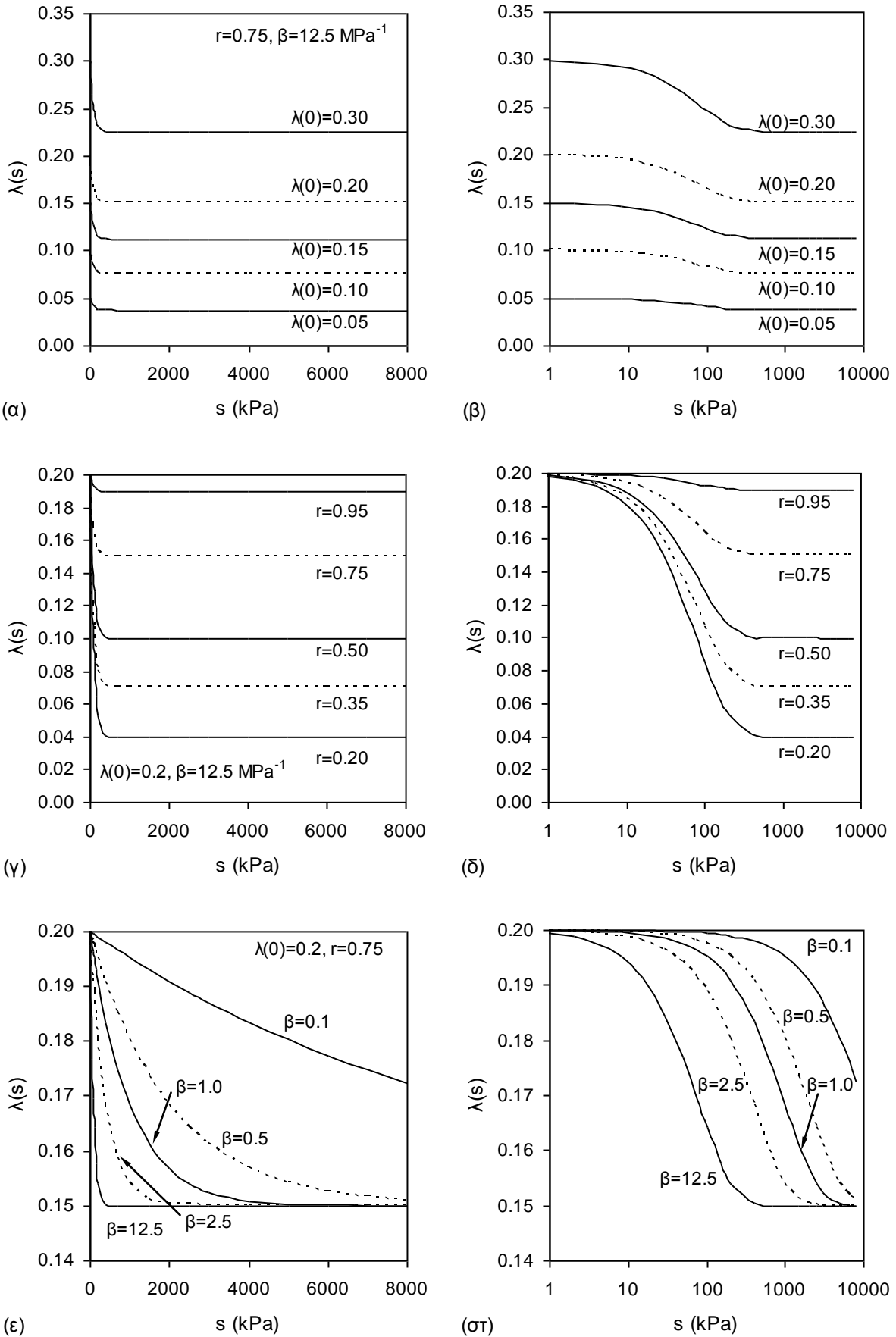
Για τις επιλεγθείσες παραμέτρους προκύπτει ότι για όλες τις παραμετρικές αναλύσεις, πλην εκείνης για την παράμετρο  $\beta$ , για μύζηση μεγαλύτερη από 400 kPa πρακτικά δεν υπάρχει περαιτέρω μεταβολή της τάσης διαρροής  $p_o$  με την αύξηση της μύζησης.

Σε ό,τι αφορά τις μεταβολές που καταγράφονται στα Σχ. 18.2α και 18.2β, όπως προκύπτει από την Εξ. 18.2, για σταθερό λόγο  $p_o^*$  προς  $p^c$  ο λόγος της τάσης διαρροής  $p_o$  προς την τάση διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $p_o^*$  παραμένει σταθερός.

Αντίστοιχα και σε ό,τι αφορά τις μεταβολές που καταγράφονται στα Σχ. 18.2γ και 18.2δ, όπως προκύπτει από την Εξ. 18.2, για σταθερό λόγο  $\lambda(0)$  προς  $\kappa$ , η τάση διαρροής  $p_o$  προβλέπεται η ίδια για σταθερές τιμές στις υπόλοιπες παραμέτρους. Πράγματι αν είναι  $\lambda(0)/\kappa = \text{σταθ.} = A$ , τότε προκύπτει εύκολα για τον λόγο  $p_o/p^c$  η Εξ. 18.6 από την οποία φαίνεται ότι ο λόγος αυτός παραμένει σταθερός εφόσον οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές.

$$\frac{p_o}{p^c} = \left( \frac{p_o^*}{p^c} \right)^{\frac{A-1}{A[(1-r)\exp(-\beta s)+r]-1}} \quad (18.6)$$

Σε ό,τι αφορά την Εξ. 18.4 που καθορίζει τη μεταβολή του δείκτη συμπίεσης για σταθερή μύζηση  $s$ , στο Σχ. 18.3 παρουσιάζεται η παραμετρική ανάλυση ως προς τις παραμέτρους από τις οποίες εξαρτάται. Στα Σχ. 18.3α και 18.3β παρουσιάζεται η εξέλιξη του  $\lambda(s)$  με τη μύζηση σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα για διάφορες τιμές του  $\lambda(0)$ . Όπως προκύπτει εύκολα από την Εξ. 18.4 ο λόγος  $\lambda(s)/\lambda(0)$  είναι σταθερός και αυτό αντικατοπτρίζεται από την παραλληλία των καμπυλών που απεικονίζονται στο Σχ. 18.3α και τη γεωμετρική ομοιότητα των καμπυλών στο Σχ. 18.3β. Στα Σχ. 18.3γ και 18.3δ παρουσιάζεται η εξέλιξη του  $\lambda(s)$  με τη μύζηση σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα για διάφορες τιμές της εμπειρικής παραμέτρου  $r$ . Όπως προκύπτει από τη μορφή της Εξ. 18.4 και τη γραφική παράστασή της για διάφορες τιμές του  $r$ , η αύξηση της μύζησης οδηγεί τον όρο  $(1-r) \cdot \exp(-\beta \cdot s)$  σε μηδενισμό με αποτέλεσμα ο δείκτης  $\lambda(s)$  να τείνει στην τιμή  $r \cdot \lambda(0)$ . Το  $r$  λοιπόν μπορεί να εκτιμηθεί από το λόγο του δείκτη συμπίεσης που θα μετρηθεί σε μια πάρα πολύ μεγάλη τιμή της μύζησης (π.χ. αυτή στην οποία θα ισορροπήσει ένα δείγμα εδαφικού υλικού που θα αφεθεί να ξεραθεί στην ατμόσφαιρα) προς τον δείκτη συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $\lambda(0)$ . Τέλος στα Σχ. 18.3ε και 18.3στ παρουσιάζεται η εξέλιξη του  $\lambda(s)$  με τη μύζηση σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα για διάφορες τιμές της εμπειρικής παραμέτρου  $\beta$ , η οποία ελέγχει το ρυθμό μείωσης του  $\lambda(s)$ .



**Σχήμα 18.3.** Παραμετρική ανάλυση του δείκτη συμπίεσης ως προς α) το  $\lambda(0)$ , β) το  $r$ , και γ) το  $\beta$ .



### 18.2.4 Μεταβολή του ειδικού όγκου συναρτήσει μεταβολών της μύζησης και της τάσης

Οι μεταβολές του ειδικού όγκου που οφείλονται σε μεταβολές της ολικής τάσης υπό σταθερή μύζηση  $s$  κατά μήκος κλάδου συμπίεσης για τιμές της τάσης μεγαλύτερες της τάσης διαρροής δίνονται από την Εξ. 18.7, όπου  $N(s)$  είναι ο ειδικός όγκος υπό τιμή της τάσης αναφοράς  $p^c$ . Κατά την αποφόρτιση και επαναφόρτιση το εδαφικό υλικό θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ελαστικά με μεταβολές του ειδικού όγκου που καθορίζονται από την Εξ. 18.8.

$$v = N(s) - \lambda(s) \cdot \ln(p/p^c) \quad (18.7)$$

$$dv = -\kappa \cdot dp/p \quad (18.8)$$

Ο δείκτης συμπίεσης  $\lambda(s)$  μεταβάλλεται με τη μύζηση κατά τις προβλέψεις της Εξ. 18.4, ενώ ο δείκτης αποφόρτιση/επαναφόρτισης  $\kappa$  διατηρήθηκε σταθερός και ανεξάρτητος της μύζησης χάριν απλότητας, παρόλο που οι συγγραφείς αναγνωρίζουν ότι η μύζηση έχει κάποια επιρροή επί αυτού (αναφορά στο ζήτημα αυτό γίνεται στο Κεφάλαιο 19).

Για μεταβολές της μύζησης  $s$  που προκαλούν πλαστικές ογκομετρικές μεταβολές, η μεταβολή του ειδικού όγκου εκφράζεται από την Εξ. 18.9, ενώ κατά την ξήρανση και ύγρανση για τιμές της μύζησης  $s$  μικρότερες της τιμής  $s_0$ , η μεταβολή του ειδικού όγκου εκφράζεται από την Εξ. 18.10. Οι δείκτες μεταβολής του ειδικού όγκου λόγω μεταβολής της μύζησης  $s$  ορίζονται στο Σχ. 18.1β. Επισημαίνεται ότι η παράμετρος  $p_{at}$  επιλέγεται αυθαίρετα, και όπως αναγνωρίζουν και οι συγγραφείς έχει προστεθεί για να μην μπορεί να μηδενιστεί ο παρανομαστής στις Εξ. 18.9 και 18.10. Αντίστοιχα η τιμή της μύζησης  $s_0$  που ορίζεται στο Σχ. 18.1β επιλέγεται στο προσομοίωμα αυτό αυθαίρετα ουσιαστικά ως προς τη φυσική σημασία που θα μπορούσε να της αποδοθεί σε σχέση με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, αποτελώντας μόνο την τιμή της μύζησης στην οποία αρχίζει η εμφάνιση πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων κατά την αύξηση της μύζησης με σημείο εκκίνησης εντατικές καταστάσεις πλήρους κορεσμού μέσα στην ελαστική περιοχή η οποία καθορίζεται ως προς τις μεταβολές της ολικής τάσης.

$$dv = -\lambda_s \cdot ds / (s + p_{at}) \quad (18.9)$$

$$dv = -\kappa_s \cdot ds / (s + p_{at}) \quad (18.10)$$

### 18.2.5 Νόμοι ροής

Σε επίπεδα  $s = \text{σταθ.} \neq 0$  το προσομοίωμα χρησιμοποιεί μη συσχετισμένο νόμο ροής (non-associated flow rule). Το διάνυσμα της πλαστικής παραμόρφωσης που σχετίζεται με την επιφάνεια διαρροής  $f_i$  είναι  $\{d\varepsilon_{vp}^p, d\varepsilon_s^p\}$ , οι συνιστώσες του οποίου ορίζονται από τις Εξ. 18.11 και 18.12, όπου τα  $n_p$  και  $n_q$  ορίζονται από τις Εξ. 18.13 και 18.14.

$$d\varepsilon_{vp}^p = \mu_1 n_p \quad (18.11)$$

$$d\varepsilon_s^p = \mu_1 n_q \quad (18.12)$$

$$n_p = 1 \quad (18.13)$$

$$n_q = \frac{2q\alpha}{M^2(2p + p_s - p_o)} \quad (18.14)$$

Η παράμετρος  $\alpha$  στην Εξ. 18.14 είναι σταθερά που προκύπτει μέσω της ικανοποίησης της απαίτησης το διάνυσμα της πλαστικής παραμόρφωσης για μηδενική πλευρική παραμόρφωση (Εξ. 18.15, όπου για λόγους απλότητας η ελαστική συνιστώσα της διεκτροπικής παραμόρφωσης  $d\varepsilon_s^e$  έχει θεωρηθεί 0) να προκύπτει ικανοποιώντας τις συνθήκες  $K_o$  (Εξ. 18.16), όπου το  $K_o$  ικανοποιεί τις τιμές του Jaky (1948) –Εξ. 18.17. Από τις Εξ. 18.10 και 18.14 έως 18.16 προκύπτει για την σταθερά  $\alpha$  η Εξ. 18.18.

$$\frac{d\varepsilon_s^p}{d\varepsilon_{vp}^p} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{1 - \kappa / \lambda(0)} \quad (18.15)$$

$$\left( \frac{q}{p} + p_s \right) = 3 \frac{1 - K_o}{1 + 2K_o} \quad (18.16)$$

$$K_o = 1 - \sin \varphi' = \frac{6 - 2 \cdot M}{6 + M} \quad (18.17)$$

$$\alpha = \frac{M(M-9)(M-3)}{9(6-M)} \frac{1}{1-\kappa/\lambda(0)} \quad (18.18)$$

Για την επιφάνεια διαρροής  $f_2$ , το διάνυσμα της πλαστικής παραμόρφωσης είναι  $\{d\varepsilon_{vs}^p, 0\}$ , η μοναδική μη μηδενική συνιστώσα του οποίου ορίζεται από την Εξ. 18.19.

$$d\varepsilon_{vs}^p = \mu_2 \quad (18.19)$$

Τα  $\mu_1$  και  $\mu_2$  προκύπτουν από συνθήκες πλαστικής συνέπειας (plastic consistency conditions).

### 18.2.6 Νόμοι κράτυνσης

Η μεταβολή των επιφανειών διαρροής ελέγχεται από τις παραμέτρους κράτυνσης  $p_o^*$  και  $s_o$ , οι οποίες εξαρτώνται από τη συνολική πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση όπως προκύπτει από τις Εξ. 18.20 και 18.21.

$$\frac{dp_o^*}{p_o^*} = \frac{\nu}{\lambda(0) - \kappa} d\varepsilon_v^p \quad (18.20)$$

$$\frac{ds_o}{s_o + p_{at}} = \frac{\nu}{\lambda_s - \kappa_s} d\varepsilon_v^p \quad (18.21)$$

### 18.2.7 Ελαστικές παραμορφώσεις

Η ογκομετρική και διεκτροπική συνιστώσα της ελαστικής παραμόρφωσης προκύπτουν αντίστοιχα από τις Εξ. 18.22 και 18.23.

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{\nu} \frac{dp}{p} + \frac{\kappa_s}{\nu} \frac{ds}{(s + p_{at})}, \quad (18.22)$$

$$d\varepsilon_s^e = \frac{1}{3G} dq \quad (18.23)$$

### 18.2.8 Συνέπειες των διατυπώσεων του προσομοιώματος

Από τις διατυπώσεις του προσομοιώματος που παρουσιάστηκαν μέχρι αυτό το σημείο, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα σε ό,τι αφορά τις προβλέψεις του προσομοιώματος:

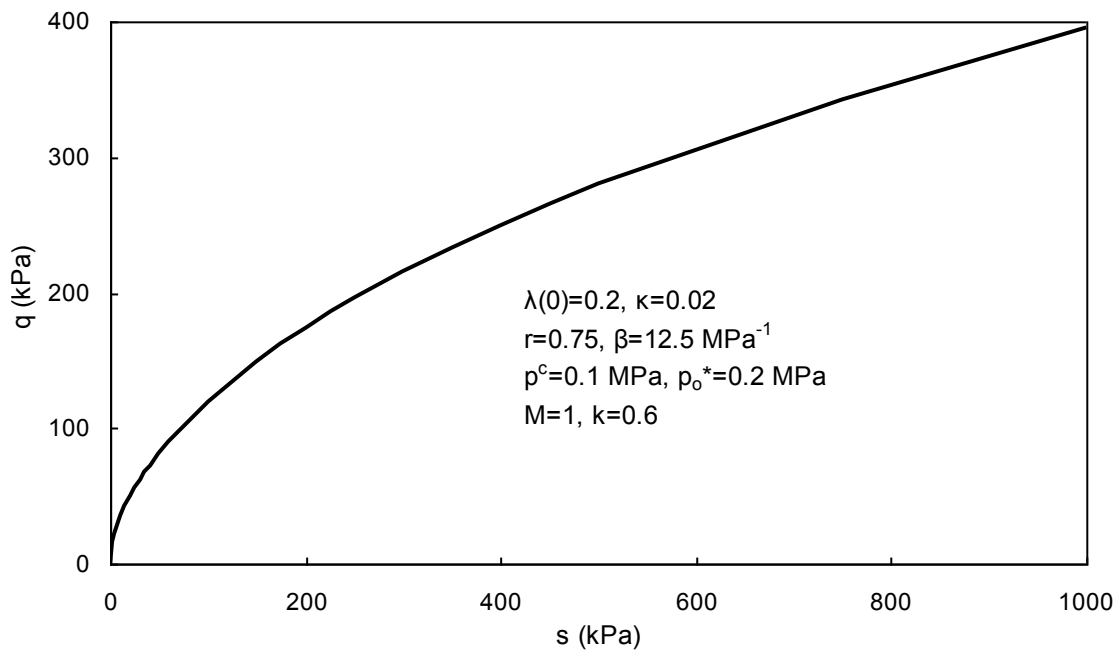
#### Μεταβολές όγκου λόγω ξήρανσης

Όπως φαίνεται από το Σχ. 18.1β και έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 5 του πρώτου μέρους και στο Κεφάλαιο 14 του δεύτερου μέρους (όπου άλλωστε παρουσιάστηκαν και τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα), το προσομοίωμα αυτό δεν προβλέπει παύση της μείωσης του ειδικού όγκου (δηλ. του λόγου κενών και άρα του ολικού όγκου), το οποίο αντιβαίνει την κοινή εμπειρία από δοκιμές ξήρανσης εδαφικών υλικών από τις οποίες είναι γνωστό ότι ο ολικός όγκος παύει να μειώνεται περαιτέρω μετά τη μύζηση που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας. Η έμμεση επιρροή αυτού και σε άλλα ζητήματα θα επιδειχθεί και στη συνέχεια.

#### Διατμητική αντοχή

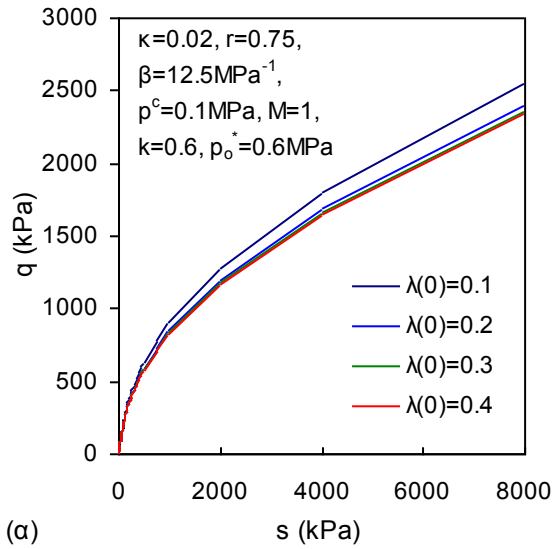
Από τη μαθηματική διατύπωση του προσομοιώματος προκύπτει ότι αυτό προβλέπει συνεχή αύξηση της εφελκυστικής αντοχής με την αύξηση της μύζησης. Σε ό,τι αφορά την αντοχή υπό μηδενική μέση τάση, θέτοντας  $p=0$  στην Εξ. 18.1, αντικαθιστώντας τα  $p_0$ ,  $p_s$  και  $\lambda(s)$  από τις Εξ. 18.2, 18.3 και 18.4 και λύνοντας ως προς  $q$ , προκύπτει η τομή της επιφάνειας διαρροής στις 3 διαστάσεις με το επίπεδο  $q-s$  (Εξ. 18.24). Από την εξίσωση αυτή και τη γραφική της παράσταση στο Σχ. 18.4 προκύπτει ότι το προσομοίωμα αυτό προβλέπει αύξηση της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση (έστω και με μειούμενο ρυθμό), παρόλο που αυτό συμβαίνει πραγματικά μόνο για αργίλους μέσης ή υψηλής πλαστικότητας και όχι για άμμους, ιλεις και ορισμένες φορές αργίλους χαμηλής πλαστικότητας (βλ. Κεφάλαια 6 & 15). Στο Σχ. 18.4 παρουσιάζεται η σχετική παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε προκειμένου να διαπιστωθεί ότι καμμία από τις παραμέτρους στην Εξ. 18.24 δεν μπορεί να προκαλέσει σταθεροποίηση ή και μείωση της διατμητικής αντοχής με την αύξηση της μύζησης. Από το Σχ. 18.5α προκύπτει ότι η επιρροή του δείκτη συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $\lambda(0)$  είναι πολύ μικρή αλλά σε κάθε περίπτωση, αύξησή του οδηγεί σε μείωση της διατμητικής αντοχής (η οποία όμως στο συγκεκριμένο παράδειγμα, για λόγο  $\lambda(0)/\kappa \geq 10$  πρακτικά σταθεροποιείται). Αντίθετα, από το Σχ.

$$q = \sqrt{k} \cdot M \cdot \sqrt{s} \cdot \sqrt{p^c} \left( \frac{p_0^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{2 \cdot \lambda(0)[(1-\tau) \cdot \exp(-\beta s) + \tau] - 2 \cdot \kappa}} \quad (18.24)$$

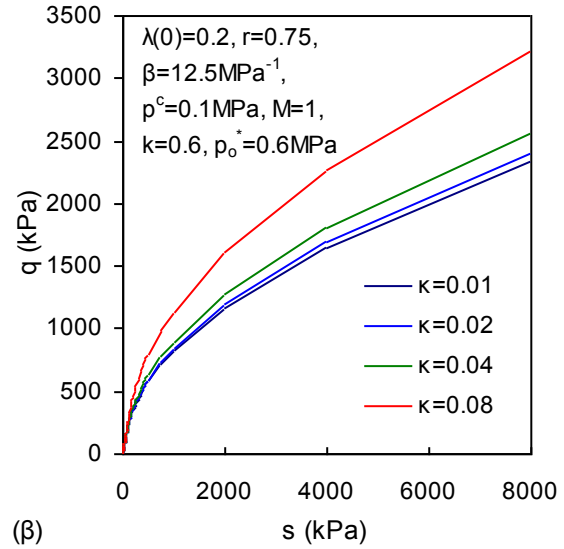


**Σχήμα 18.4.** Γραφική απεικόνιση της Εξ. 18.24.

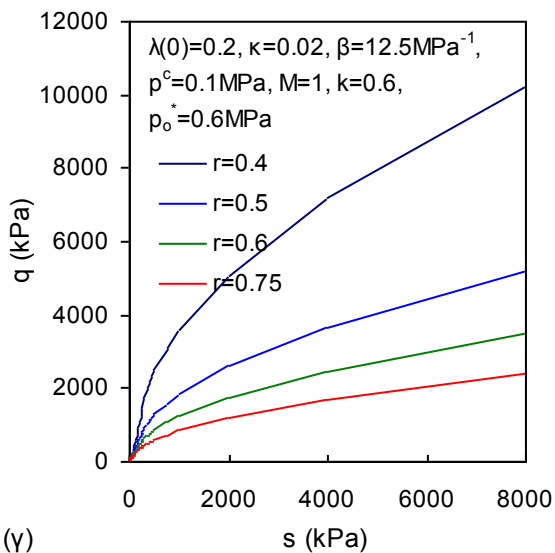
18.5β παρατηρείται μεγαλύτερη αναλογικά επιρροή του δείκτη αποφόρτισης/επαναφόρτισης  $\kappa$ , ο οποίος όσο αυξάνεται σε σχέση με το δείκτη συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους, τόσο μεγαλύτερη αύξηση της διατμητικής αντοχής με την αύξηση της μύζησης προκαλείται. Μεγάλη επίσης παρατηρείται ότι είναι και η επιρροή της εμπειρικής παραμέτρου  $r$  από το Σχ. 18.5γ. Όσο μειώνεται η τιμή της παραμέτρου αυτής τόσο περισσότερο αυξάνεται και μάλιστα ραγδαία η διατμητική αντοχή με την αύξηση της μύζησης. Στα Σχ. 18.5δ και 18.5ε παρουσιάζεται η επιρροή της εμπειρικής παραμέτρου  $\beta$ , η οποία όσο αυξάνεται προκαλεί για σχετικά μικρές τιμές της μύζησης αύξηση της διατμητικής αντοχής (Σχ. 18.5ε με τη μεγέθυνση ως προς το εύρος τιμών τάσης και διεκτροπικής τάσης), αλλά για περαιτέρω αύξηση της μύζησης η περιβάλλουσα για κάθε τιμή της παραμέτρου  $\beta$  πρακτικά ταυτίζεται σε μία καμπύλη (Σχ. 18.5δ). Από το Σχ. 18.5στ προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η τιμή της τάσης αναφοράς  $p^c$  σε σχέση με την τιμή της τάσης διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $p_o^*$ , τόσο περισσότερο μειώνεται η διατμητική αντοχή με την αύξηση της μύζησης. Από το Σχ. 18.5ζ προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης  $M$ , τόσο περισσότερο αυξάνεται η διατμητική αντοχή με την αύξηση της μύζησης. Από το Σχ. 18.5η προκύπτει ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής αύξησης της εφελκυστικής αντοχής  $k$ , τόσο περισσότερο αυξάνεται η διατμητική αντοχή με την αύξηση της



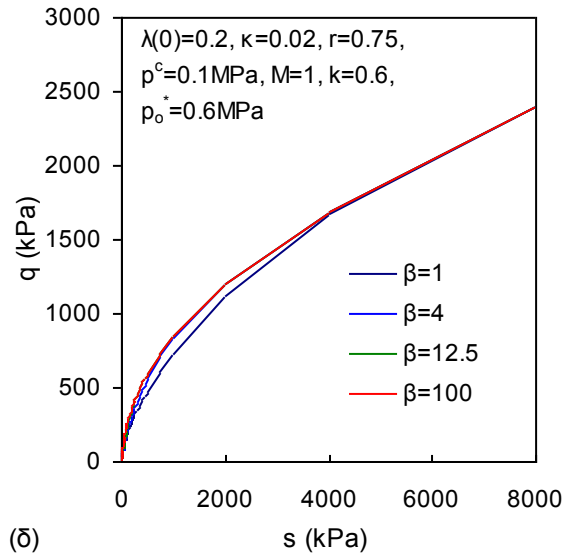
(α)



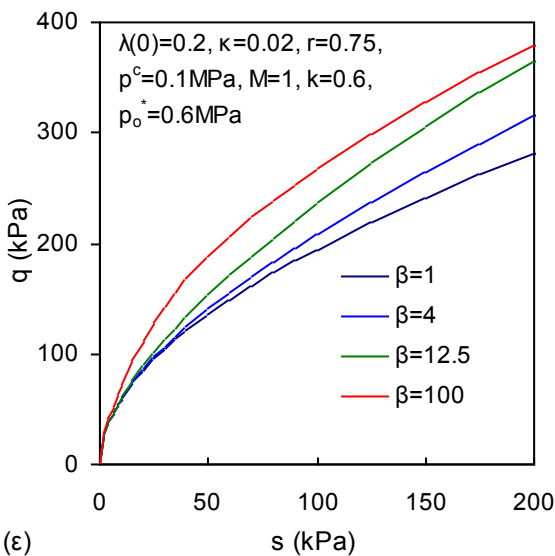
(β)



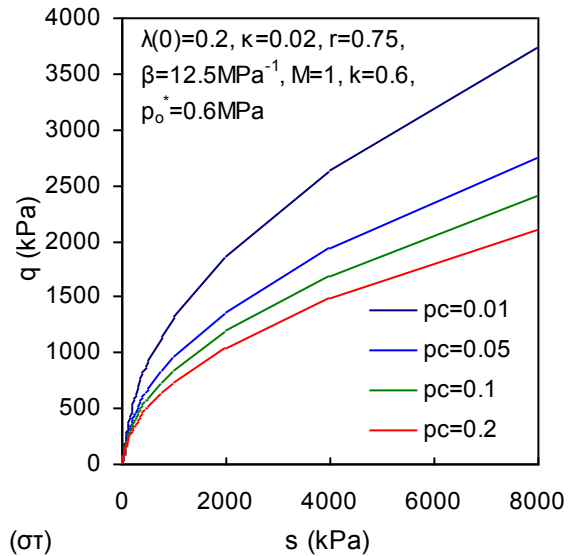
(γ)



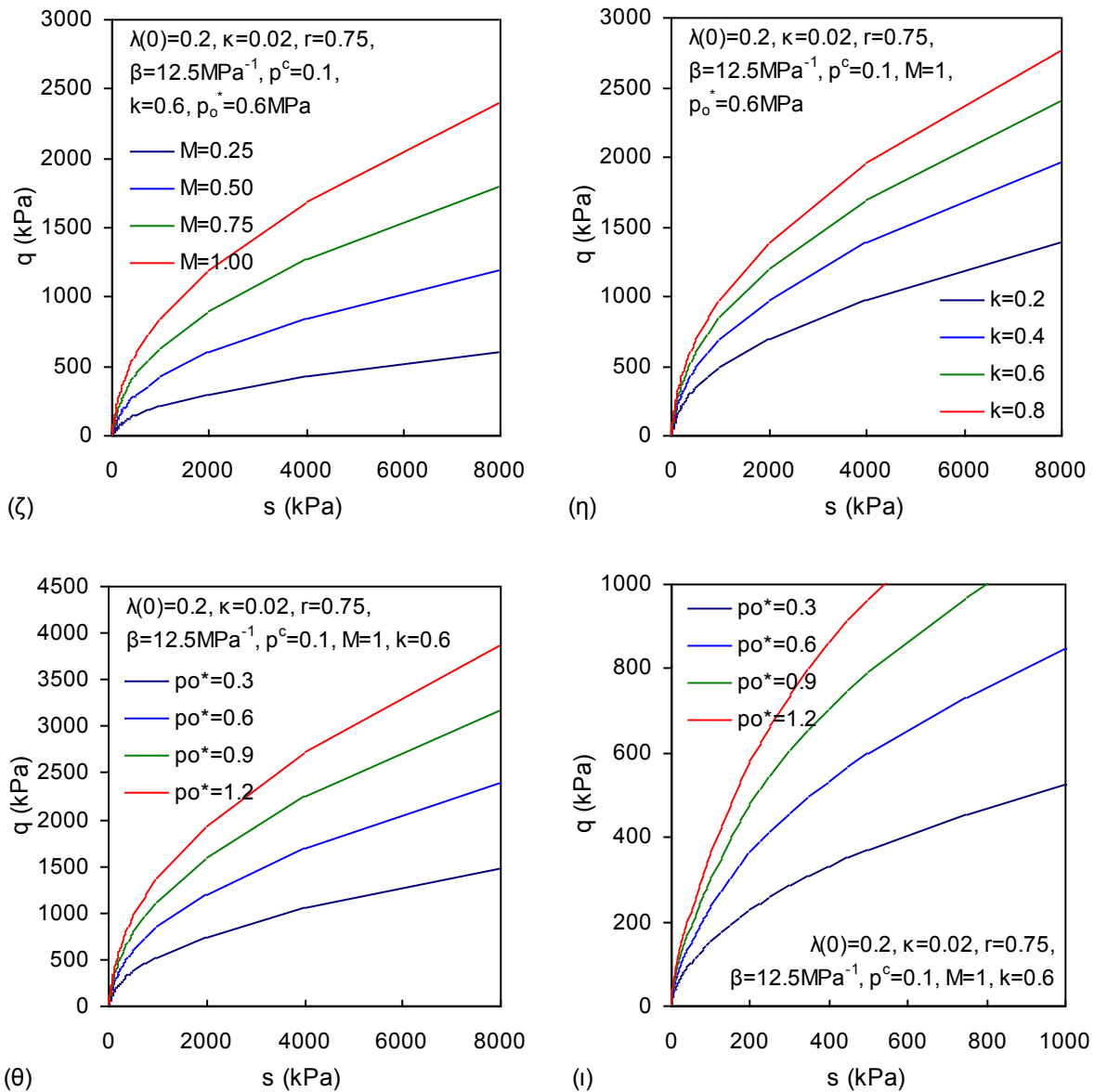
(δ)



(ε)



(στ)



**Σχήμα 18.5.** Παραμετρική ανάλυση της τομής της επιφάνειας διαρροής στις τρεις διαστάσεις  $p$ - $q$ - $s$  με το επίπεδο  $p=0$  ως προς α) το  $\lambda(0)$ , β) το  $\kappa$ , γ) το  $r$ , δ) το  $\beta$  (πλήρες εύρος τιμών του άξονα της μύζησης και του άξονα της διεκτροπικής τάσης), ε) το  $\beta$  (μεγέθυνση του άξονα της μύζησης στο εύρος 0-200 kPa και του άξονα της διεκτροπικής τάσης στο εύρος 0-400 kPa), στ) το  $p^c$ , ζ) την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης  $M$ , η) τον συντελεστή αύξησης της εφελκυστικής αντοχής λόγω μύζησης  $k$ , θ) την τάση διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $\rho_o^*$  (πλήρες εύρος τιμών του άξονα της μύζησης και του άξονα της διεκτροπικής τάσης), και ι) την τάση διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $\rho_o^*$  (μεγέθυνση του άξονα της μύζησης και του άξονα της διεκτροπικής τάσης στο εύρος 0-1000 kPa).

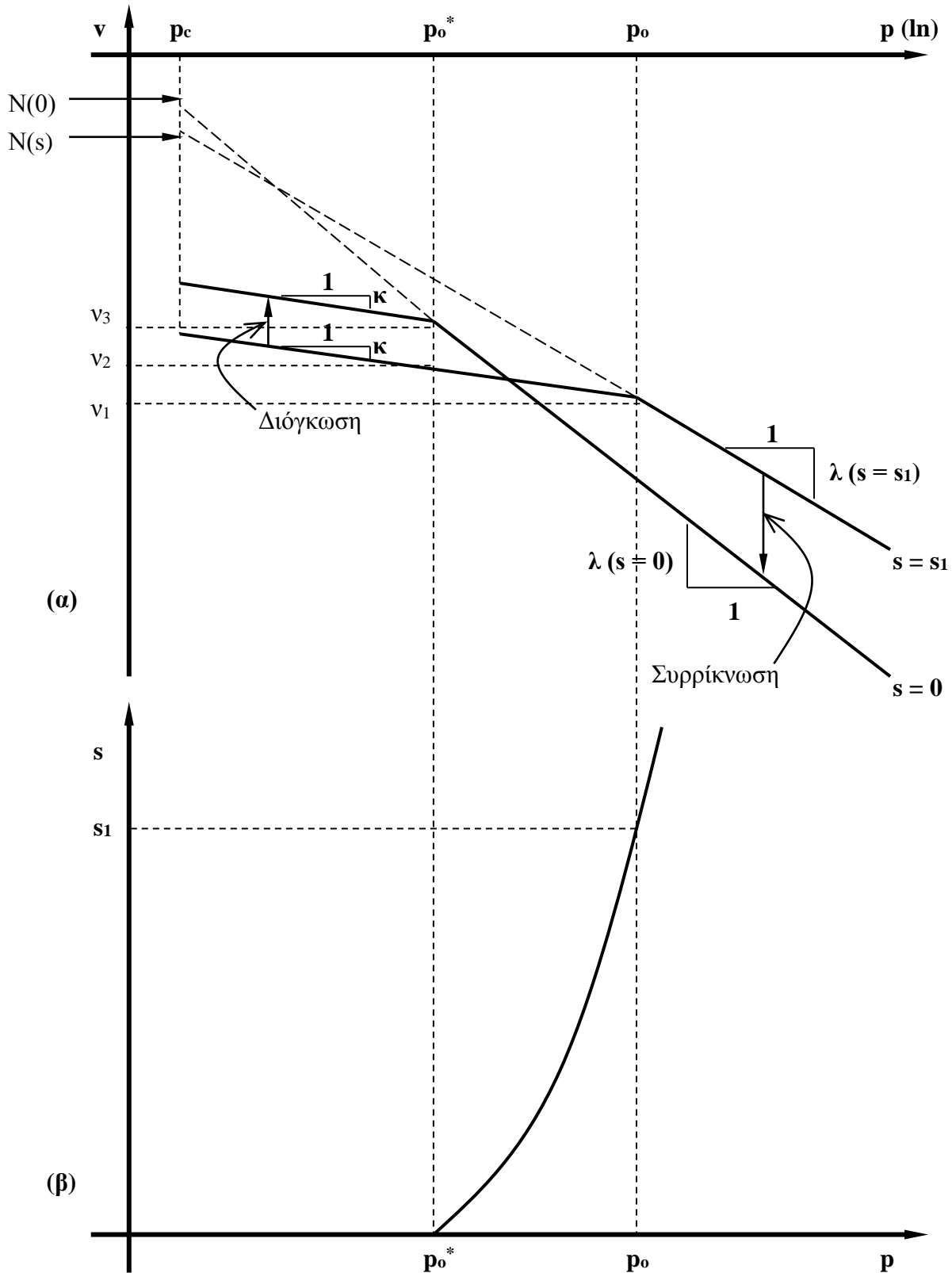
μύζησης. Τέλος από τα Σχ. 18.5θ και 18.5ι προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η τάση διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $p_o^*$ , τόσο περισσότερο αυξάνεται η διατμητική αντοχή με την αύξηση της μύζησης (Σχ. 18.5ι μεγέθυνση για μικρές τιμές της μύζησης). Η επιρροή των τριών τελευταίων παραμέτρων ( $M$ ,  $k$ ,  $p_o^*$ ) είναι μάλλον αυταπόδεικτη δεδομένου ότι αυτές είναι που καθορίζουν το μέγεθος της τομής της επιφάνειας διαρροής με επίπεδα σταθερής μύζησης. Από αυτήν την παραμετρική ανάλυση φαίνεται πως στο καταστατικό προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990) δεν υπάρχει *καμμία* παράμετρος, η μεταβολή της οποίας να μπορεί να προκαλέσει σταθεροποίηση ή μείωση της διατμητικής αντοχής με την αύξηση της μύζησης (μετά την αρχική αύξηση που αναμένεται σε όλα τα εδάφη για μύζηση μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα -βλ. σχετικά Κεφάλαια 6 & 15), ειδικά μάλιστα για μικρές τιμές της μύζησης.

Η Εξ. 18.24 έχει γραφτεί έτσι ώστε να διακρίνονται οι ξεχωριστές φύσης όροι που την αποτελούν. Ο όρος  $\sqrt{k} \cdot M$  βρίσκεται σε αντιστοιχία με την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης, ο όρος  $\sqrt{s}$  εκφράζει την άμεση επιρροή της μύζησης στην αύξηση της διατμητικής αντοχής και το υπόλοιπο σαν σύνολο την επιρροή της ιστορίας φόρτισης-αποφόρτισης του εδάφους, όπως επηρεάζεται με τη σειρά της από τη μύζηση (έμμεση επιρροή της μύζησης στην εξέλιξη της διατμητικής αντοχής).

#### Παραμορφώσεις λόγω κατάρρευσης κατά τη διαβροχή

Όπως φαίνεται από το Σχ. 18.1α και έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 5 του πρώτου μέρους και στο Κεφάλαιο 15 του δεύτερου μέρους (όπου άλλωστε παρουσιάστηκαν και τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα), το προσομοίωμα αυτό δεν προβλέπει παύση της μείωσης των μεταβολών του ειδικού όγκου λόγω συρρίκνωσης. Αυξανομένης δηλαδή της τάσης υπό την οποία γίνεται η διαβροχή (για δεδομένη τιμή της μύζησης) και το εδαφικό υλικό μεταπίπτει από μία κατάσταση μερικού κορεσμού υπό μύζηση  $s$  σε κατάσταση πλήρους κορεσμού ( $s=0$ ) η μεταβολή  $\Delta v$  αυξάνεται διαρκώς και μάλιστα μονοτονικά. Στο Σχ. 18.6 παρουσιάζεται το Σχ. 18.1α σε μεγέθυνση και με επισήμανση ορισμένων χαρακτηριστικών τιμών του ειδικού όγκου ή του λόγου κενών (πρόκειται για το Σχ. 5.15 με επισήμανση των τιμών του ειδικού όγκου ή του λόγου κενών που φαίνονται). Από το Σχ. 18.6α προκύπτει ότι για τιμή της τάσης  $p$ , τέτοια ώστε  $p \geq p_o$ , ο ειδικός όγκος επί της καμπύλης ιστροπικής συμπίεσης υπό μύζηση  $s$  και επί της καμπύλης ιστροπικής συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους δίνονται από τις Εξ. 18.25 και 18.26 αντίστοιχα.





**Σχήμα 18.6.** α) Καμπύλες ιστροπικής συμπίεσης για πλήρως κορεσμένο έδαφος και μη κορεσμένο υπό σταθερή μύζηση  $s$ , και β) καμπύλη μεταβολής της τάσης διαρροής στο επίπεδο ολικής τάσης-μύζησης με την αντιστοιχία των σημείων μεταξύ των δύο καμπυλών.

$$v(s) = N(s) - \lambda(s) \cdot \ln(p/p^c) \quad (18.25)$$

$$v(0) = N(0) - \lambda(0) \cdot \ln(p/p^c) \quad (18.26)$$

Η διαφορά τους κατά συνέπεια θα είναι με αντικατάσταση του  $\lambda(s)$  από την Εξ. 18.4:

$$\begin{aligned} \Delta v &= v(s) - v(0) \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta v &= \{N(s) - \lambda(s) \cdot \ln(p/p^c)\} - \{N(0) - \lambda(0) \cdot \ln(p/p^c)\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta v &= \{N(s) - N(0)\} - \lambda(s) \cdot \ln(p/p^c) + \lambda(0) \cdot \ln(p/p^c) \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta v &= \{N(s) - N(0)\} + \ln(p/p^c) \cdot \{\lambda(0) - \lambda(s)\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta v &= \{N(s) - N(0)\} + \ln(p/p^c) \cdot \lambda(0) \cdot (1-r) \cdot [1 - \exp(-\beta \cdot s)] \end{aligned} \quad (18.27)$$

Από την Εξ. 18.27 λοιπόν προκύπτει ότι η διαφορά στον ειδικό όγκο κατά τη συρρίκνωση λόγω διαβροχής από μύζηση  $s$  ισούται με τη διαφορά μεταξύ των ειδικών όγκων  $N(s)$  και  $N(0)$  στην τάση αναφοράς  $p^c$  συν έναν όρο που είναι συνάρτηση της τάσης αναφοράς  $p^c$ , του δείκτη συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $\lambda(0)$ , των εμπειρικών παραμέτρων  $r$  και  $\beta$  και της μύζησης  $s$ . Η διαφορά μεταξύ των ειδικών όγκων  $N(s)$  και  $N(0)$  στην τάση αναφοράς  $p^c$  εξαρτάται από το εάν η μύζηση  $s$  είναι τόση, ώστε η τασική διαδρομή να παραμένει εντός της ελαστικής περιοχής ως προς μεταβολές της μύζησης, ή έχει προκαλέσει πλαστικές παραμορφώσεις λόγω αύξησης της μύζησης. Στην πρώτη περίπτωση η διαφορά δίνεται από την Εξ. 18.28 και στη δεύτερη από την Εξ. 18.29, από τις οποίες σε συνδυασμό με την Εξ. 18.27 προκύπτουν οι Εξ. 18.30 και 18.31 αντίστοιχα για τη διαφορά του ειδικού όγκου που προκαλεί συρρίκνωση κατά τη διαβροχή από μύζηση  $s$ .

$$\{N(s) - N(0)\} = -\kappa_s \cdot \ln[(s+p_{at})/p_{at}], s < s_o \quad (18.28)$$

$$\{N(s) - N(0)\} = -\kappa_s \cdot \ln[(s_o+p_{at})/p_{at}] - \lambda_s \cdot \ln[(s+p_{at})/s_o], s > s_o \quad (18.29)$$

$$\Delta v = -\kappa_s \cdot \ln[(s+p_{at})/p_{at}] + \ln(p/p^c) \cdot \lambda(0) \cdot (1-r) \cdot [1 - \exp(-\beta \cdot s)], s < s_o \quad (18.30)$$

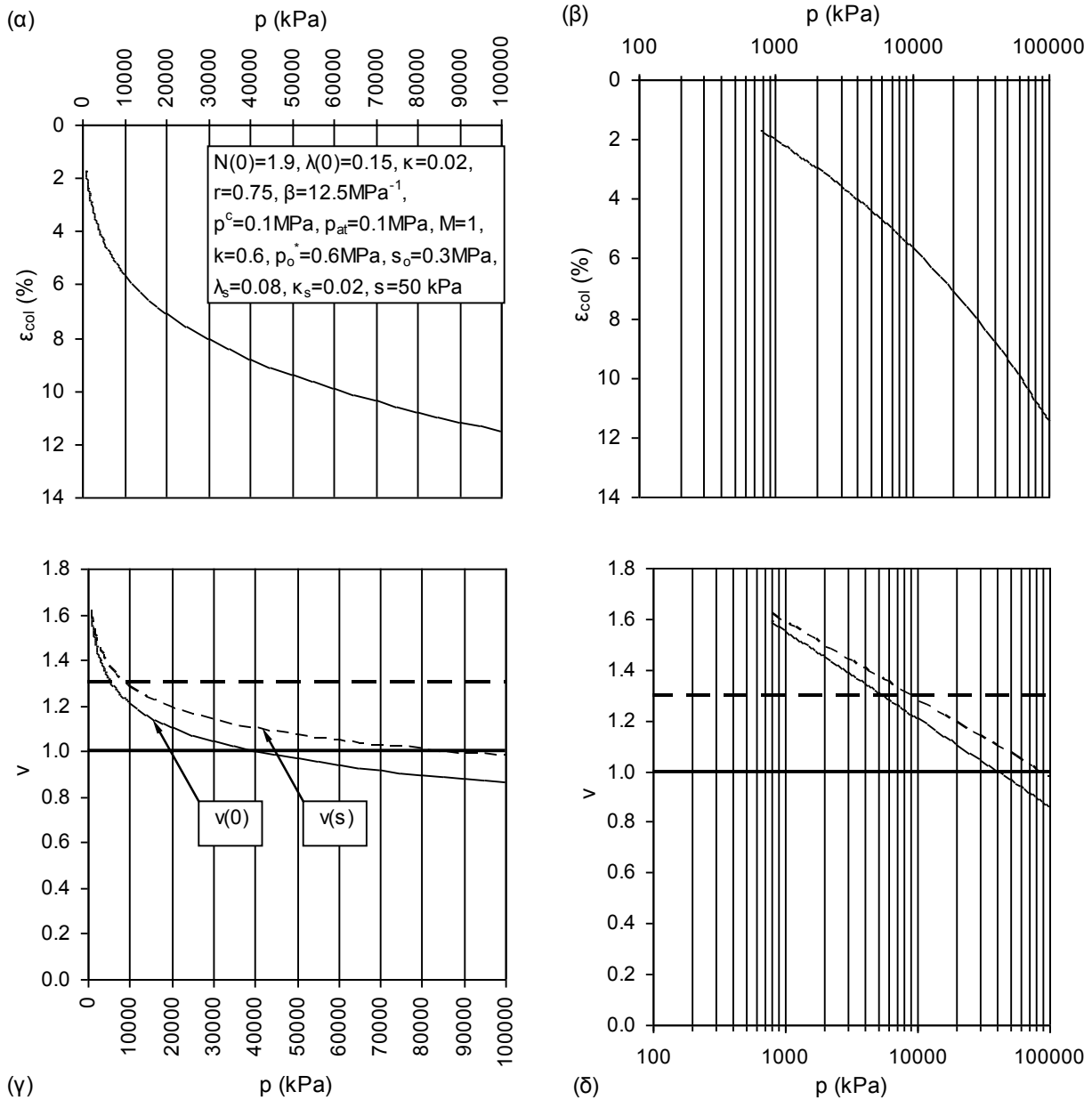
$$\Delta v = -\kappa_s \cdot \ln[(s_o+p_{at})/p_{at}] - \lambda_s \cdot \ln[(s+p_{at})/s_o] + \ln(p/p^c) \cdot \lambda(0) \cdot (1-r) \cdot [1 - \exp(-\beta \cdot s)], s > s_o \quad (18.31)$$

Η αναμενόμενη παραμόρφωση συρρίκνωσης λόγω διαβροχής λοιπόν θα είναι  $\Delta\epsilon_{col} = \Delta v/v(s)$ , οπότε συνδυάζοντας τις Εξ. 18.25, 18.4 και 18.28 έως 18.31 προκύπτουν οι Εξ. 18.32 και 18.33 για την παραμόρφωση συρρίκνωσης λόγω διαβροχής.

$$\Delta\epsilon_{col} = \Delta v/v(s) = \{ -\kappa_s \cdot \ln[(s+p_{at})/p_{at}] + \ln(p/p^c) \cdot \lambda(0) \cdot (1-r) \cdot [1 - \exp(-\beta \cdot s)] \} / \{ N(0) - \kappa_s \cdot \ln[(s+p_{at})/p_{at}] - \lambda(0) \cdot [(1-r)\exp(-\beta s) + r] \cdot \ln(p/p^c) \}, s < s_0 \quad (18.32)$$

$$\Delta\epsilon_{col} = \Delta v/v(s) = \{ -\kappa_s \cdot \ln[(s_0+p_{at})/p_{at}] - \lambda_s \cdot \ln[(s+p_{at})/s_0] + \ln(p/p^c) \cdot \lambda(0) \cdot (1-r) \cdot [1 - \exp(-\beta \cdot s)] \} \cdot \{ N(0) - \kappa_s \cdot \ln[(s_0+p_{at})/p_{at}] - \lambda_s \cdot \ln(s/s_0) - \lambda(0) \cdot [(1-r)\exp(-\beta s) + r] \cdot \ln(p/p^c) \}, s > s_0 \quad (18.33)$$

Η διατύπωση των Εξ. 18.32 και 18.33 θεωρήθηκε σκόπιμη προκειμένου να εξεταστεί απευθείας η επιρροή των διαφόρων τιμών παραμέτρων στο μέγεθος της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω διαβροχής. Στο Σχ. 18.7 μάλιστα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εξέλιξης της παραμόρφωσης με την τάση για μια συγκεκριμένη ομάδα παραμέτρων (αναφέρονται στο σχήμα). Στο Σχ. 18.7α παρουσιάζεται αυτή καθεαυτή η εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού με την τάση σε γραμμική κλίμακα, και στο Σχ. 18.7β με την τάση σε λογαριθμική κλίμακα. Στο Σχ. 18.7γ όμως παρουσιάζεται και η εξέλιξη καθεαυτών των τιμών του ειδικού όγκου υπό σταθερή μύζηση  $v(s)$  και του ειδικού όγκου υπό μηδενική μύζηση  $v(0)$  με την τάση σε γραμμική κλίμακα και στο Σχ. 18.7δ με την τάση σε λογαριθμική κλίμακα. Από την Εξ. 18.32 λοιπόν στο παράδειγμα του Σχ. 18.7 (αφού  $s < s_0$ ) αλλά με τον ίδιο τρόπο και από την Εξ. 18.33, μπορούν να προκύψουν γενικά τιμές της παραμόρφωσης λόγω κατάρρευσης για διάφορες τιμές της τάσης. *Πρέπει όμως το πεδίο τιμών των τάσεων να καθορίζεται έτσι ώστε να έχουν φυσικό νόημα οι τιμές του ειδικού όγκου.* Στο παράδειγμα του Σχ. 18.7 μειώθηκαν κάτω από 1 οι τιμές του ειδικού όγκου για μηδενική μύζηση (δηλ. έλαβε αρνητικές τιμές ο λόγος κενών) για τάση περί τα 40 MPa, *το οποίο δεν έχει κανένα φυσικό νόημα.* Ακόμα όμως και αν δεν φτάσουμε στο ακραίο παράδειγμα του μηδενισμού του λόγου κενών, όπως προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα που συγκεντρώθηκαν και αξιολογήθηκαν στην §14.6, δεν μπορούν να υποτίθενται κατά τη μεταβολή της μύζησης συνεχείς μειώσεις του λόγου κενών (όπως άλλωστε αναφέρθηκε πρώτο και σε αυτήν την παράγραφο). *Άμεση απόρροια δηλαδή της μη ενσωμάτωσης παύσης της συρρίκνωσης από μια μύζηση και μετά είναι και οι προβλέψεις τιμών παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού να είναι χωρίς φυσικό νόημα, αν και μαθηματικά μπορούν πράγματι να διατυπωθούν.*



**Σχήμα 18.7.** Εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμοτισμού με την τάση α) σε γραμμική κλίμακα και β) σε λογαριθμική, με παράλληλη παράθεση της εξέλιξης των τιμών του ειδικού όγκου υπό μηδενική μύζηση  $v(0)$  και υπό σταθερή μύζηση  $s$ ,  $v(s)$  με την τάση γ) σε γραμμική κλίμακα, και δ) σε λογαριθμική. Για καλύτερη εποπτεία παρουσιάζεται με έντονη συνεχή γραμμή στα (γ) και (δ) η ευθεία  $v=1$  (δηλ.  $e=0$ ) και  $v=1.3$  (δηλ.  $e=0.3$ ).

Τηρώντας λοιπόν πάντα αυτήν την προσοχή για το πεδίο τιμών της τάσης στο οποίο διερευνάται η παραμόρφωση συρρίκνωσης λόγω υδρεμοτισμού<sup>2</sup>, πραγματοποιήθηκε η παραμετρική

<sup>2</sup> Πρώτον, οι διερευνήσεις αυτές και οι διατυπωμένες εξισώσεις είναι για  $p > p_o$ , άρα μεταβάλλοντας τις διάφορες παραμέτρους πρέπει πάντα να παρατίθενται οι τιμές για  $p > p_o$  όντως. Δεύτερον, όπως επιδείχθηκε στο Σχ. 18.7 είναι

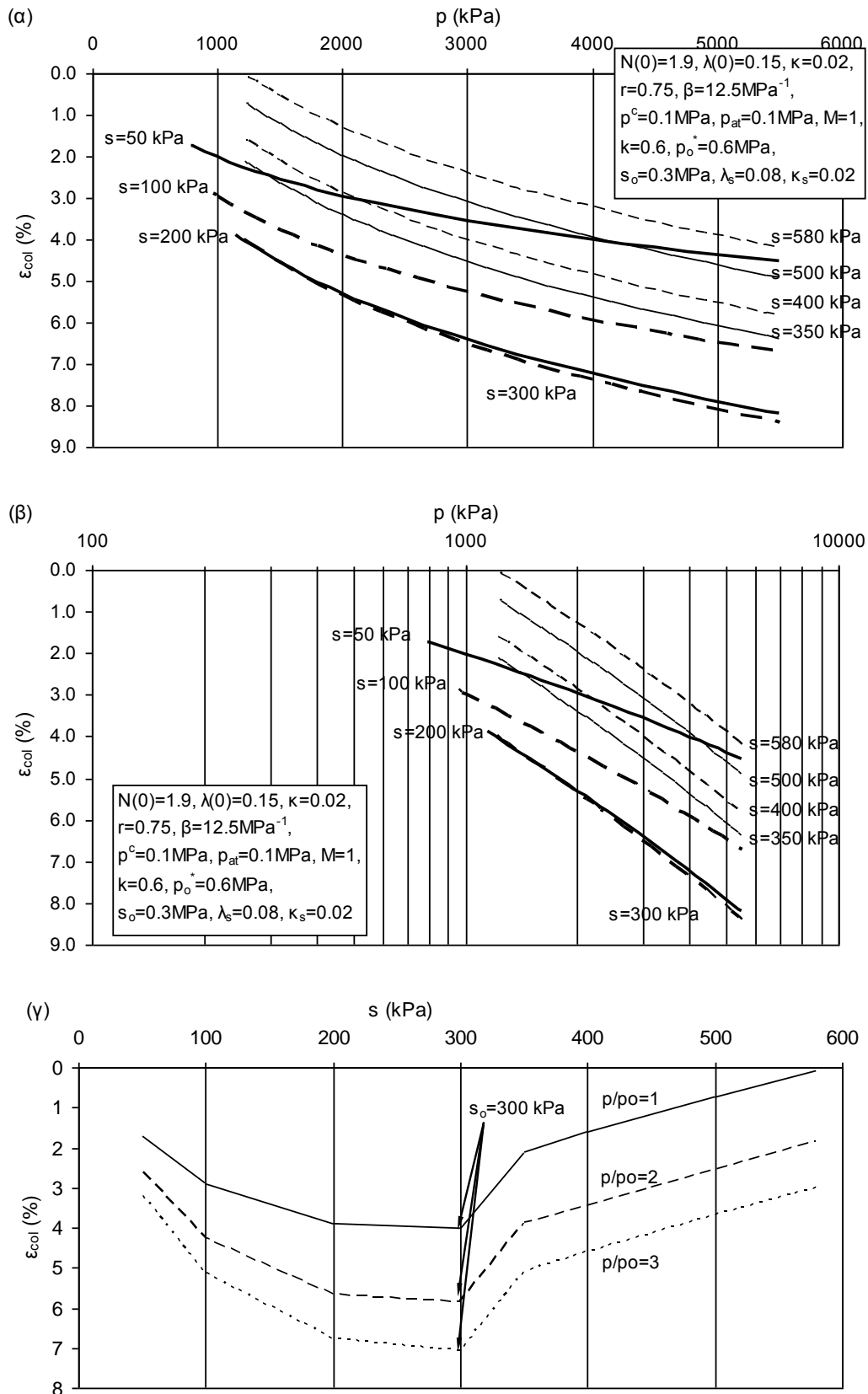
ανάλυση που παρουσιάζεται στα Σχ. 18.8 έως 18.14. Στα Σχ. 18.8α και 18.8β παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού  $\epsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_0$ , και για διάφορες τιμές της μύζησης  $s$ , μικρότερες και μεγαλύτερες της μύζησης διαρροής  $s_0$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα. Στο Σχ. 18.8γ παρουσιάζεται η εξέλιξη της  $\epsilon_{col}$  με τη μύζηση για διάφορες τάσεις σε λόγους  $p/p_0$  (1, 2 και 3). Όπως προκύπτει, η  $\epsilon_{col}$  αυξάνεται μονοσήμαντα με την αύξηση της μύζησης (πιο ραγδαία μάλιστα, για μύζηση μεγαλύτερη της  $s_0$ ) και για σταθερό λόγο  $p/p_0$  παρουσιάζει μέγιστο για μύζηση  $s=s_0$ .

Στα Σχ. 18.9α και 18.9β παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού  $\epsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_0$ , και για δύο τιμές της μύζησης  $s$ , μία μικρότερη (50 kPa) και μία μεγαλύτερη (400 kPa) της μύζησης διαρροής  $s_0$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα για διάφορες τιμές του δείκτη συμπίεσης  $\lambda(0)$ . Όπως προκύπτει, η  $\epsilon_{col}$  αυξάνεται μονοσήμαντα με την αύξηση του δείκτη συμπίεσης  $\lambda(0)$  (πιο ραγδαία μάλιστα, για μύζηση μεγαλύτερη της  $s_0$ ).

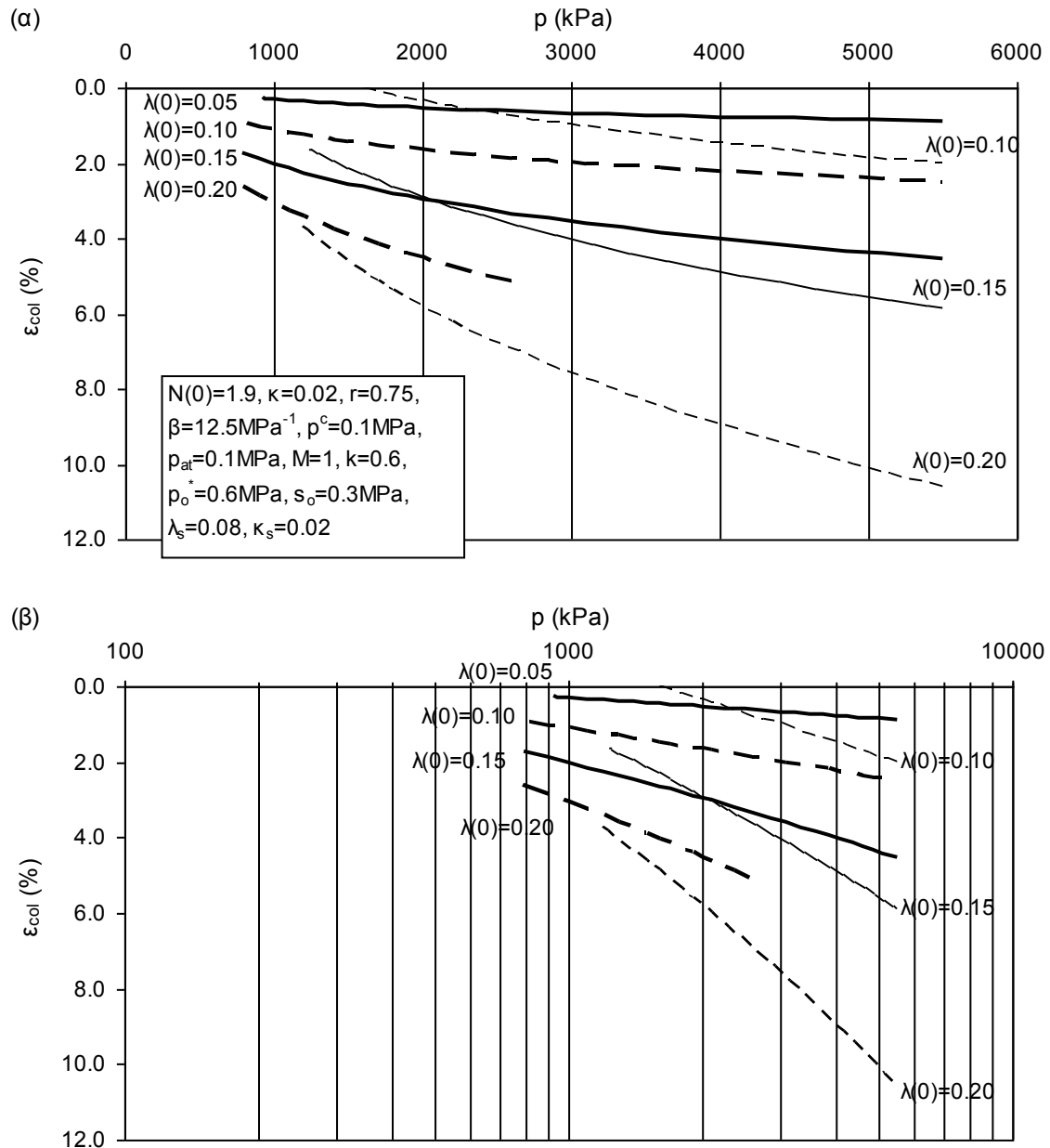
Στα Σχ. 18.10α και 18.10β παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού  $\epsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_0$ , και για δύο τιμές της μύζησης  $s$ , μία μικρότερη (50 kPa) και μία μεγαλύτερη (400 kPa) της μύζησης διαρροής  $s_0$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $r$ . Όπως προκύπτει, η  $\epsilon_{col}$  αυξάνεται μονοσήμαντα με τη μείωση της παραμέτρου  $r$  (πιο ραγδαία μάλιστα, για μύζηση μεγαλύτερη της  $s_0$ ). Επισημαίνεται ότι ειδικά για την παράμετρο  $r$ , συνδυασμοί της με την παράμετρο  $p^c$  και αντίστοιχα του ειδικού όγκου  $N(0)$  επιτρέπουν να προβλεφθεί συνεχής μείωση της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού  $\epsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_0$  (Wheeler, et al., 2002, Gens, 2010). Αυτό καθίσταται εφικτό σε μία εντελώς διαφορετική λογική της τάσης αναφοράς  $p^c$  και του δείκτη συμπίεσης  $\lambda(0)$  στα πλαίσια της οποίας υποτίθεται ότι ο δείκτης συμπίεσης υπό σταθερή μύζησης  $\lambda(s)$  δεν μειώνεται, αλλά αυξάνεται με τη μύζηση και το κοινό σημείο τάσης αναφοράς  $p^c$  – ειδικού όγκου αναφοράς  $N(0)$  παύει πλέον να αντιστοιχεί σε «λογικές», φυσικά μετρήσιμες, τιμές, και αντιστοιχεί σε «φανταστικές», μαθηματικής μόνο σημασίας, τιμές (τάση αναφοράς  $p^c$  κατά τάξη μεγέθους σε GPa και αρνητικές τιμές του ειδικού όγκου). Αν και η σημασία μια τέτοιας προσέγγισης σε επίπεδο μαθηματικής προσομοίωσης

---

εύκολο –ειδικά αν επικεντρωθεί κανείς στις τιμές του  $\epsilon_{col}$ - ο ειδικός όγκος να λάβει αφύσικα μικρές τιμές ή και τελείως παράλογες ( $< 1 = e < 0$ ). Γενικά παρατίθενται καμπύλες για πεδίο τιμών τάσης τέτοιο, ώστε  $v > 1.3$ . Αυθαίρετη τιμή γενικά, πλην όμως λογικό ελάχιστο για συνήθη εδαφικά υλικά και προβλήματα μηχανικού.

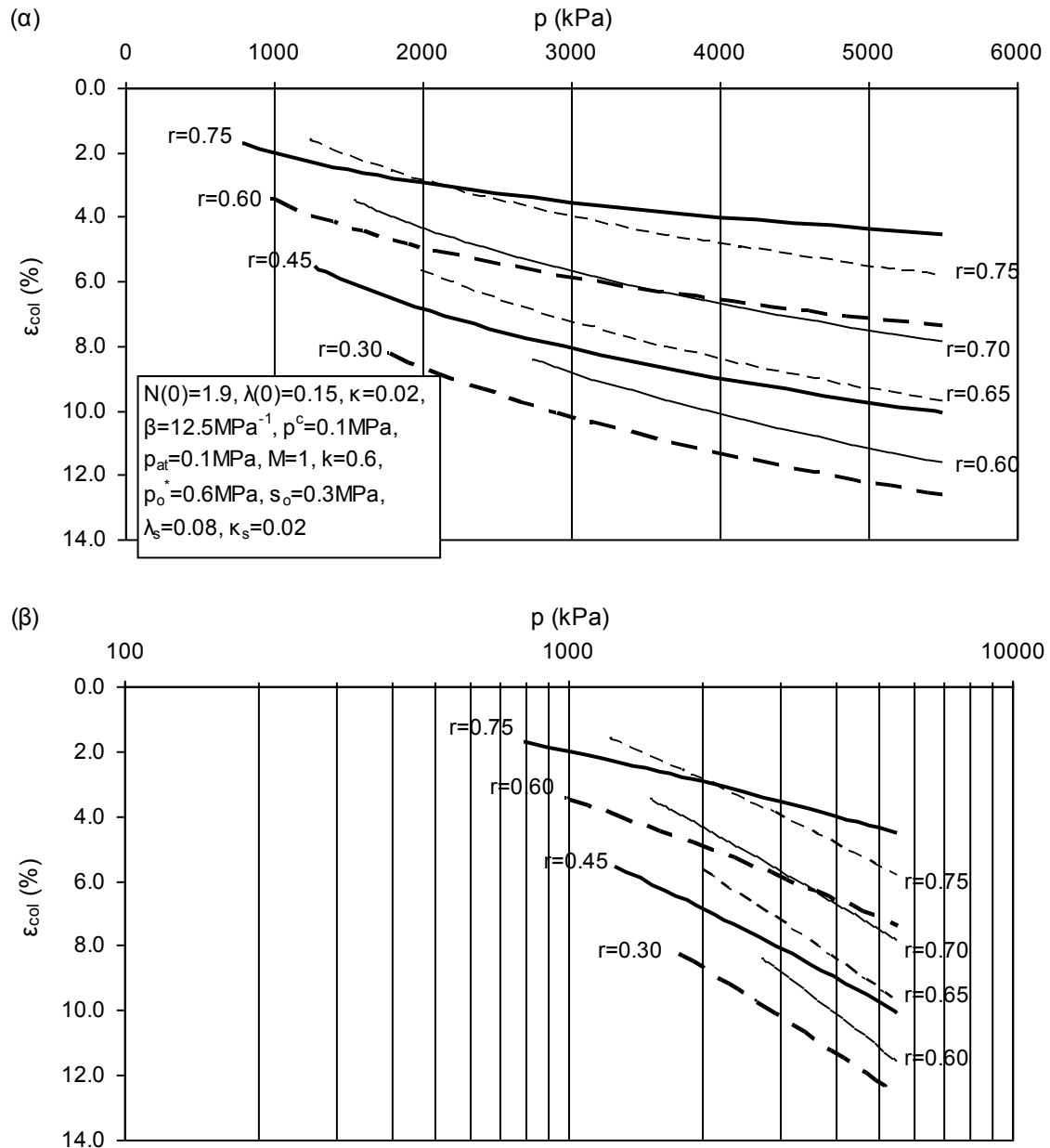


**Σχήμα 18.8.** Εξέλιξη  $\varepsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_o$ , για διάφορες τιμές της μύζησης  $s$ , μικρότερες (έντονες γραμμές) και μεγαλύτερες της μύζησης διαρροής  $s_o$  (κανονικές γραμμές) με τον άξονα της τάσης α) σε γραμμική, και β) σε λογαριθμική κλίμακα. γ) Εξέλιξη  $\varepsilon_{col}$  με τη μύζηση για διάφορες τάσεις.



**Σχήμα 18.9.** Εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμοτισμού  $\varepsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_o$ , και για δύο τιμές της μύζησης  $s$ , μία μικρότερη (50 kPa – έντονες γραμμές) και μία μεγαλύτερη (400 kPa – κανονικές γραμμές) της μύζησης διαρροής  $s_o$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική (α) και λογαριθμική (β) κλίμακα αντίστοιχα για διάφορες τιμές του δείκτη συμπίεσης  $\lambda(0)$ .

δεν μπορεί να αμφισβητηθεί, διδακτικά και σε όρους επεξήγησης φαινομένων είναι τουλάχιστον αντιπαραγωγική. Δεδομένου άλλωστε ότι η προσέγγιση αυτή, σε ό,τι αφορά την ικανότητα πρόβλεψης μη συνεχούς μεταβολής της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμοτισμού  $\varepsilon_{col}$  δεν επιλύει το πρόβλημα (απλά παρέχει τη δυνατότητα να προβλεφθεί συνεχώς μειούμενη με



**Σχήμα 18.10.** Εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού  $\varepsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_o$ , και για δύο τιμές της μύζησης  $s$ , μία μικρότερη (50 kPa – έντονες γραμμές) και μία μεγαλύτερη (400 kPa – κανονικές γραμμές) της μύζησης διαρροής  $s_o$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $r$ .

την τάση παραμόρφωση  $\varepsilon_{col}$ ), στα πλαίσια της παρούσας παραμετρικής ανάλυσης του καταστατικού προσομοιώματος των Alonso, et al. (1990) δεν επιδιώχθηκε περαιτέρω αξιοποίησή της.



Στα Σχ. 18.11α και 18.11β παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού  $\varepsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_o$ , και για δύο τιμές της μύζησης  $s$ , μία μικρότερη (50 kPa) και μία μεγαλύτερη (400 kPa) της μύζησης διαρροής  $s_o$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $\beta$ . Όπως προκύπτει, η  $\varepsilon_{col}$  αυξάνεται μονοσήμαντα με την αύξηση της παραμέτρου  $\beta$  (πιο ραγδαία μάλιστα, για μύζηση μεγαλύτερη της  $s_o$ ), αν και με σταθεροποίηση από μια τιμή της  $\beta$  και μετά.

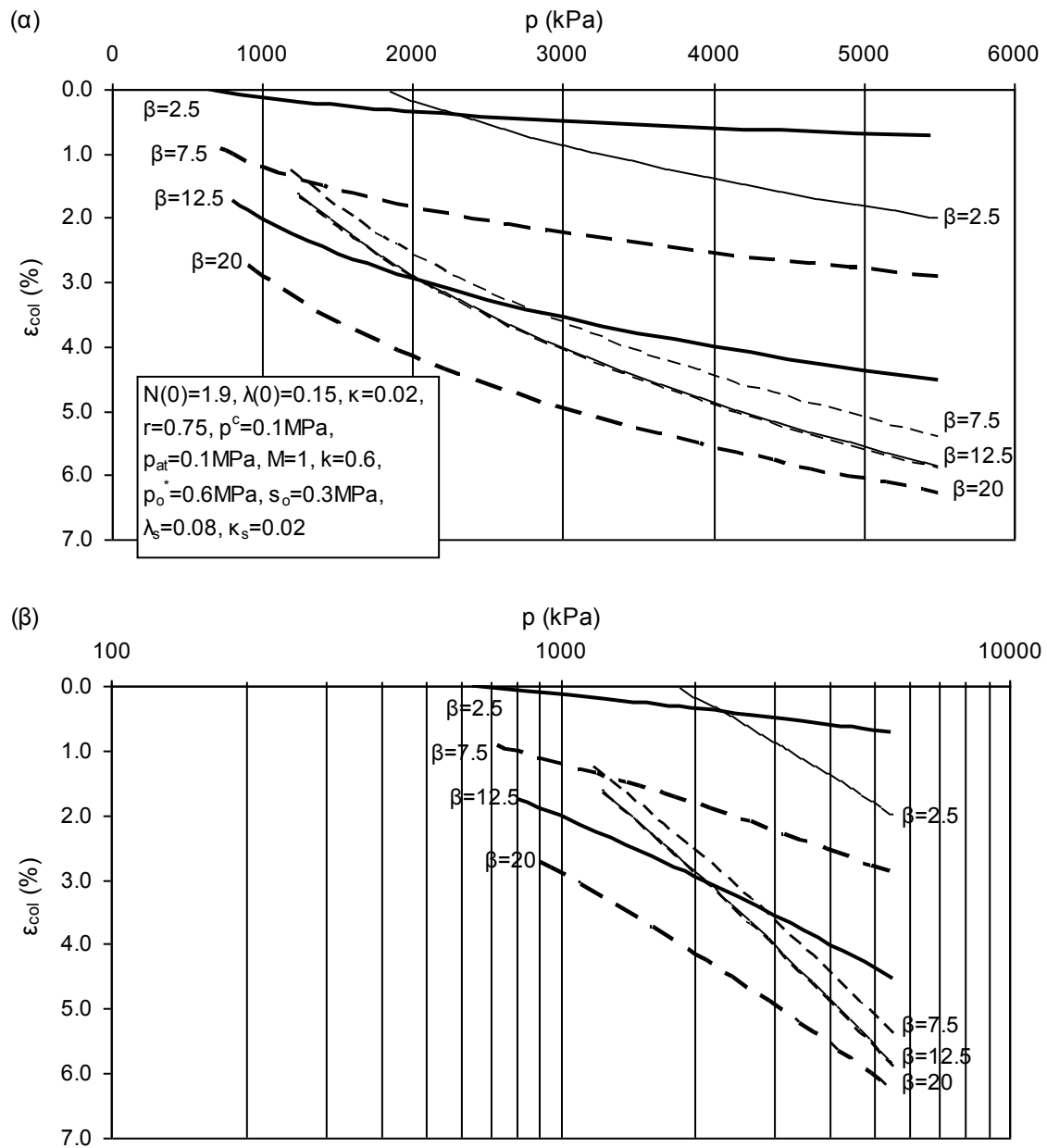
Στα Σχ. 18.12α και 18.12β παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού  $\varepsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_o$ , και για δύο τιμές της μύζησης  $s$ , μία μικρότερη (50 kPa) και μία μεγαλύτερη (400 kPa) της μύζησης διαρροής  $s_o$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα για διάφορες τιμές της τάσης αναφοράς  $p^c$ . Όπως προκύπτει, η  $\varepsilon_{col}$  αυξάνεται μονοσήμαντα με τη μείωση της τάσης αναφοράς  $p^c$  (εκπεφρασμένη σε σχέση με την τάση διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $p_o^*$ ).

Στα Σχ. 18.13α και 18.13β παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού  $\varepsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_o$ , και για δύο τιμές της μύζησης  $s$ , μία μικρότερη (50 kPa) και μία μεγαλύτερη (400 kPa) της μύζησης διαρροής  $s_o$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $\lambda_s$ . Όπως προκύπτει, η  $\varepsilon_{col}$  αυξάνεται μονοσήμαντα με τη μείωση της παραμέτρου  $\lambda_s$ , η οποία μάλιστα δεδομένου ότι εκφράζει την μεταβολή όγκου για μεταβολές της μύζησης μετά τη μύζηση διαρροής  $s_o$  προφανώς δεν διαφοροποιεί τα αποτελέσματα για τιμές της μύζησης μικρότερες της μύζησης διαρροής.

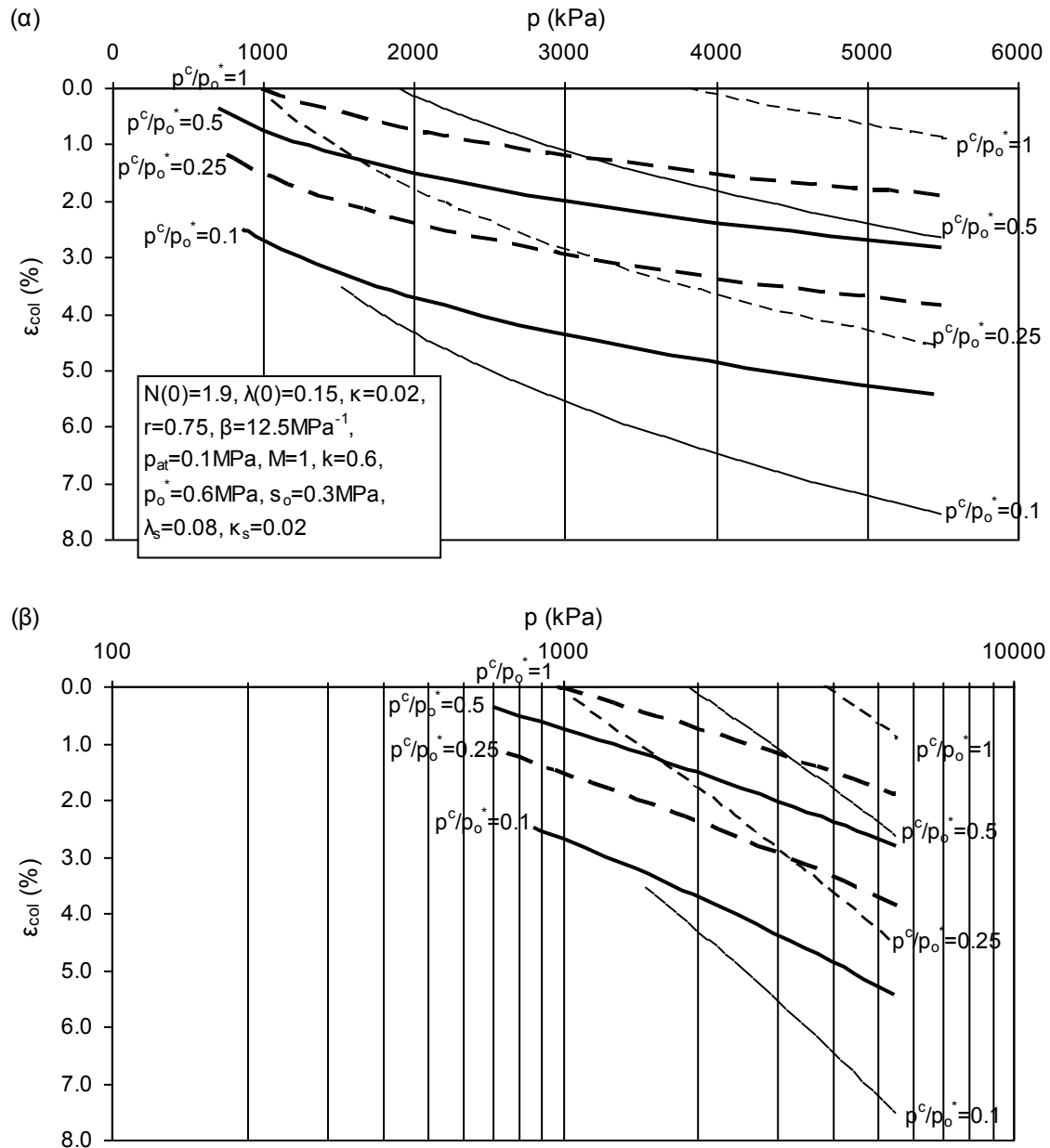
Στα Σχ. 18.14α και 18.14β παρουσιάζεται η εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού  $\varepsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_o$ , και για δύο τιμές της μύζησης  $s$ , μία μικρότερη (50 kPa) και μία μεγαλύτερη (400 kPa) της μύζησης διαρροής  $s_o$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $\kappa_s$ . Όπως προκύπτει, η  $\varepsilon_{col}$  αυξάνεται μονοσήμαντα με τη μείωση της παραμέτρου  $\kappa_s$ . Η επιρροή της παραμέτρου αυτής είναι πολύ πιο έντονη για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες της μύζησης διαρροής.

Ο δείκτης αποφόρτισης/επαναφόρτισης  $\kappa$  δεν υπεισέρχεται στις Εξ. 18.32 και 18.33, οπότε δεν έχει επιρροή, όπως άλλωστε συμβαίνει και με τις παραμέτρους  $M$ ,  $k$  και  $p_o^*$ . Κατ' αντιστοιχία με

την παράμετρο  $p_o^*$ , δεν εξετάστηκε η παράμετρος  $s_o$ . Τέλος δεν εξετάστηκε η παράμετρος  $p_{at}$  αφού συνήθως λαμβάνει την τιμή της ατμοσφαιρικής πίεσης.

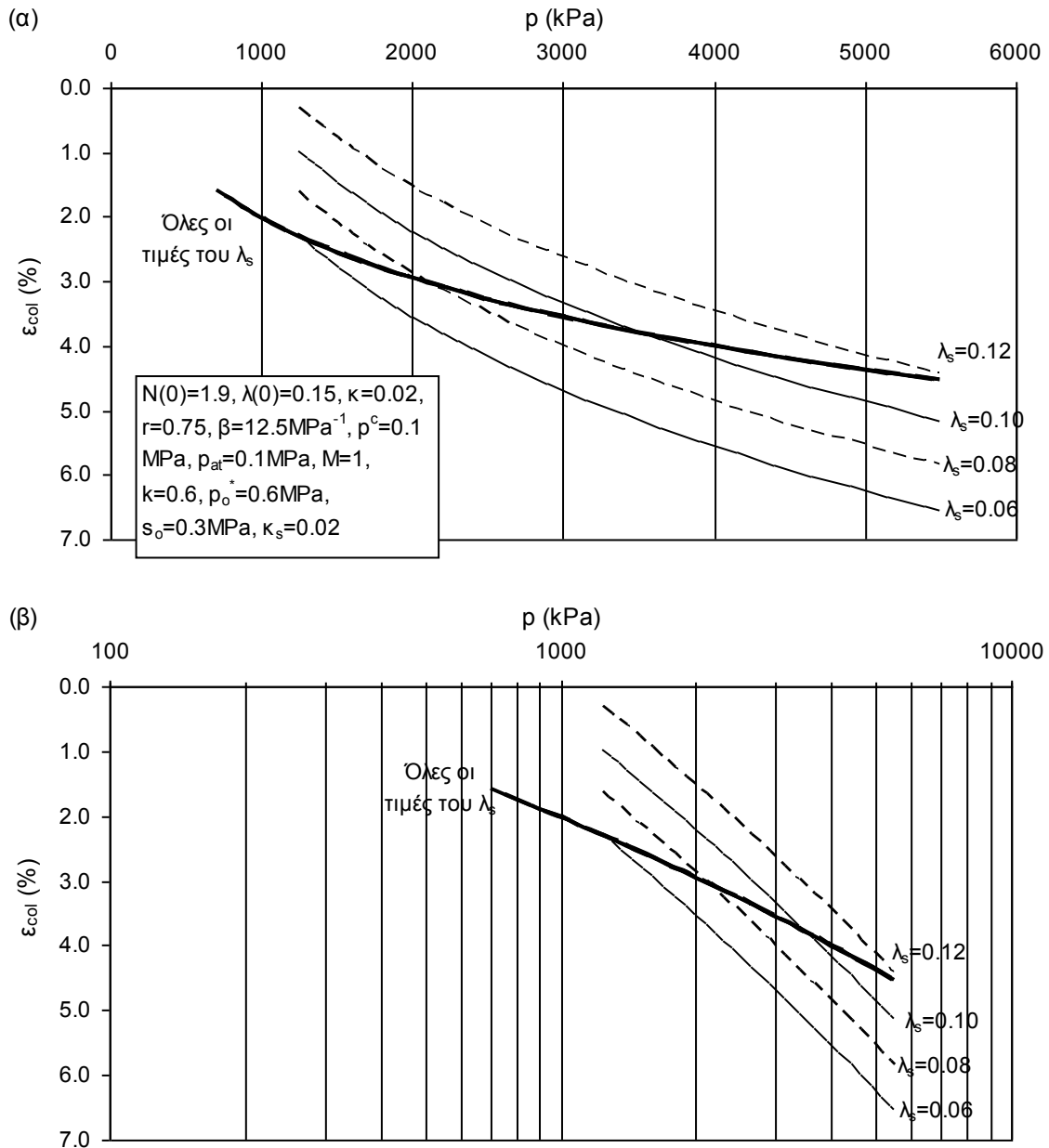


**Σχήμα 18.11.** Εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού  $\varepsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_o$ , και για δύο τιμές της μύζησης  $s$ , μία μικρότερη (50 kPa – έντονες γραμμές) και μία μεγαλύτερη (400 kPa – κανονικές γραμμές) της μύζησης διαρροής  $s_o$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $\beta$  (μονάδες  $\text{MPa}^{-1}$ ).



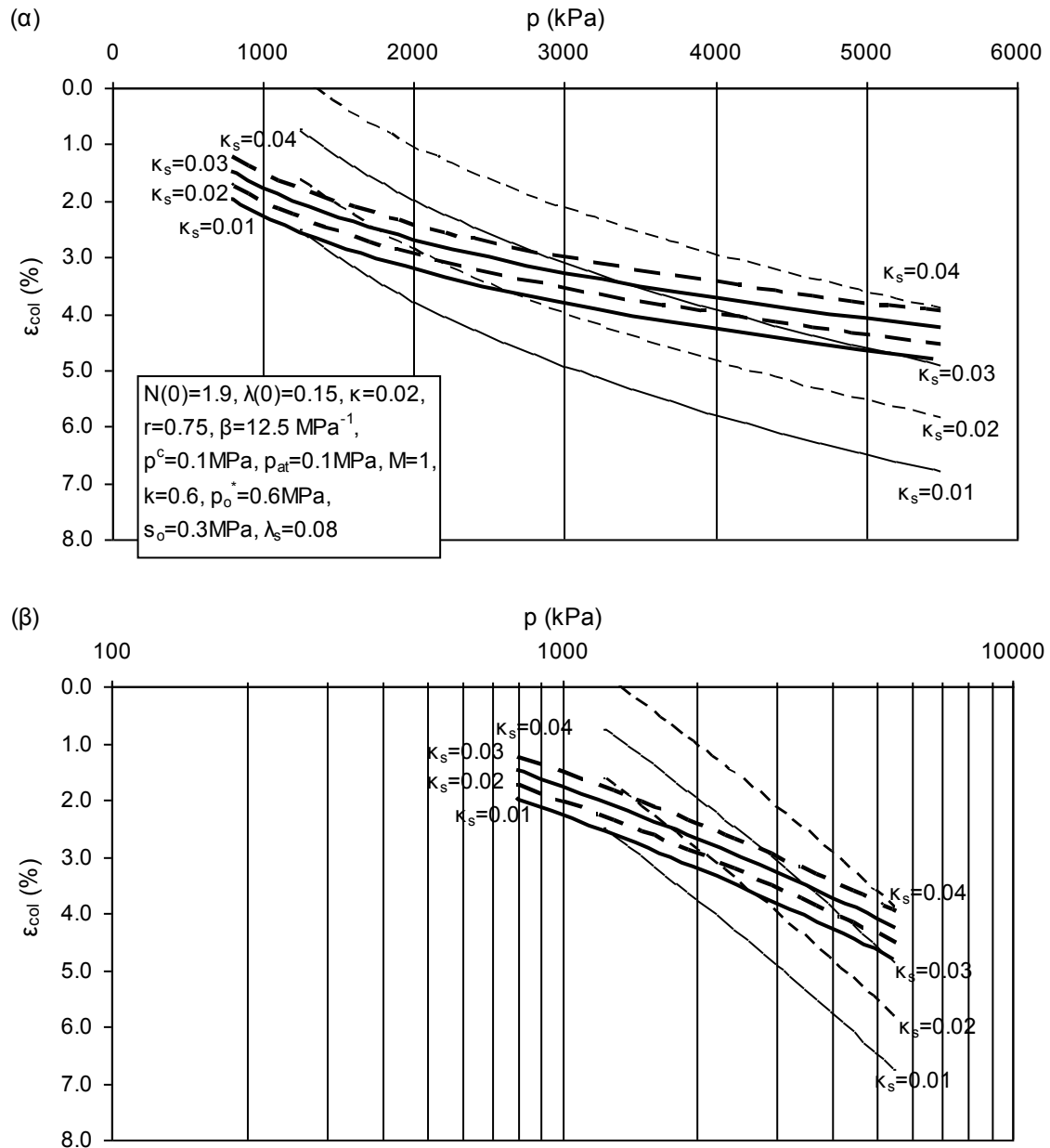
**Σχήμα 18.12.** Εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμοτισμού  $\varepsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_o$ , και για δύο τιμές της μύζησης  $s$ , μία μικρότερη (50 kPa – έντονες γραμμές) και μία μεγαλύτερη (400 kPa – κανονικές γραμμές) της μύζησης διαρροής  $s_o$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $p^c$  (τηρώντας συγκεκριμένους λόγους  $p^c/p_o^*$ ).

Το γενικό συμπέρασμα από την παραμετρική αυτή ανάλυση είναι ότι το προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990) δεν μπορεί να προβλέψει σταθεροποίηση της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμοτισμού  $\varepsilon_{col}$  με την τάση ή οποιαδήποτε μεταβολή της εξέλιξής της (π.χ. αρχική



**Σχήμα 18.13.** Εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμοτισμού  $\epsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_o$ , και για δύο τιμές της μύζησης  $s$ , μία μικρότερη (50 kPa – έντονες γραμμές) και μία μεγαλύτερη (400 kPa – κανονικές γραμμές) της μύζησης διαρροής  $s_o$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $\lambda_s$ .

αύξηση και στη συνέχεια μείωση). Τονίζεται ότι η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε σε αυτή την παραμετρική ανάλυση δεν μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας σε συμβατικές δοκιμές μέτρησης της παραμόρφωσης λόγω κατάρρευσης όπου δεν υπάρχει έλεγχος ή μέτρηση της μύζησης και απλώς διατηρείται σταθερό το ποσοστό υγρασίας, αλλά εκεί πρέπει να εισαχθεί και μία σχέση



**Σχήμα 18.14.** Εξέλιξη της παραμόρφωσης συρρίκνωσης λόγω υδρεμποτισμού  $\varepsilon_{col}$  με την τάση  $p$  για  $p > p_o$ , και για δύο τιμές της μύζησης  $s$ , μία μικρότερη (50 kPa – έντονες γραμμές) και μία μεγαλύτερη (400 kPa – κανονικές γραμμές) της μύζησης διαρροής  $s_o$  με τον άξονα της τάσης σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $\kappa_s$ .

μείωσης της μύζησης λόγω της αύξησης του βαθμού κορεσμού που συμβαίνει εξαιτίας της μείωσης του ολικού όγκου λόγω φόρτισης υπό σταθερό ποσοστό υγρασίας.

### Λοιπές επιλογές του προσομοιώματος

Στο προσομοίωμα προβλέπεται σταθερή κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης  $M$  με την αύξηση της μύζησης, διαφορετική τιμή του δείκτη ελαστικής μεταβολής του ειδικού όγκου για αύξηση της μύζησης  $\kappa_s$  και του δείκτη αποφόρτισης/επαναφόρτισης  $\kappa$ , καθώς και αυθαίρετη κατ' ουσίαν επιλογή της παραμέτρου  $s_0$ , χωρίς συσχέτισή της με τη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και κυρίως την πίεση διείσδυσης αέρα. Το σημείο αυτό κατά την εξέλιξη της καταστατικής προσομοίωσης εξηγήθηκε αναλυτικά τι είδους επιρροή έχει στην μορφή και την εξέλιξη της επιφάνειας διαρροής με την εμφάνιση πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων όπως παρουσιάζεται στην §18.3 (βλ. ενδεικτικά Delage & Graham, 1995).

Επίσης, όπως φαίνεται και από το Σχ. 18.1δ η τομή της επιφάνειας διαρροής στον χώρο  $p$ - $q$ - $s$  με το επίπεδο  $p$ - $s$  δεν είναι συνεχώς παραγωγίσιμη. Η επισήμανση αυτή έχει αξία όταν ενδιαφέρουν τασικές διαδρομές κατά τις οποίες μεταβάλλονται ταυτόχρονα και η τάση  $p$  και η μύζηση  $s$ , καθώς τέτοιου είδους ασυνέχειες στην παράγωγο ενδέχεται να οδηγήσουν σε αριθμητικά προβλήματα κατά την επίλυση προβλημάτων με κώδικες πεπερασμένων στοιχείων που έχουν ενσωματώσει ένα τέτοιο προσομοίωμα. Βέβαια, όπως εξηγήθηκε διεξοδικά στην §5.5.1, η μόνη ρεαλιστική τασική διαδρομή ταυτόχρονης μεταβολής και της μύζησης και της τάσης είναι η φόρτιση υπό σταθερό ποσοστό υγρασίας, η οποία, εφόσον το εδαφικό υλικό είναι αρκετά συμπίεστο για να συμβούν μεγάλες μεταβολές του ολικού του όγκου, οδηγεί σε σημαντική αύξηση του βαθμού κορεσμού και άρα μείωση της μύζησης. Όλες οι υπόλοιπες δυνατές καταστάσεις οδηγούν μάλλον σε βαθμιδωτή εξέλιξη των δύο μεγεθών, όπου διαδρομές μεταβολής της τάσης υπό σταθερή μύζηση διαδέχονται μεταβολές της μύζησης υπό σταθερή τάση κ.ο.κ. Ακόμα και έτσι ωστόσο δεν αναιρείται η ανάγκη για καλύτερη διερεύνηση αφενός και καλύτερη περιγραφή αφετέρου της τομής της επιφάνειας διαρροής με το επίπεδο  $p$ - $s$ .

### Συμπέρασμα

Οι παραπάνω συνέπειες των διατυπώσεων του καταστατικού προσομοιώματος των Alonso, et al. (1990) πράγματι αντίκεινται σε πειραματικά τεκμηριωμένη (τουλάχιστον για ορισμένες κατηγορίες εδαφικών υλικών) συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών. Από την άλλη πλευρά πρέπει να αναγνωριστεί ότι το προσομοίωμα αυτό προτάθηκε αρχικά ως ένα θεωρητικό πλαίσιο αναφοράς (conceptual framework) το οποίο προσομοίωνε με επιτυχία κάποια από τα χαρακτηριστικά της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών (αύξηση της διατμητικής αντοχής για κάποια εδάφη και εύρη τιμών μύζησης, εμφάνιση κράτυνσης με την αύξηση της μύζησης και

μεταβολή από εντατικές καταστάσεις στις οποίες η διαβροχή οδηγεί σε διόγκωση σε εντατικές καταστάσεις στις οποίες οδηγεί σε συρρίκνωση). Στην πορεία αποδείχτηκε αφενός επιτυχές στις προβλέψεις του για ορισμένες κατηγορίες υλικών και εύρη τιμών της ολικής τάσης και της μύζησης, και αφετέρου και κυριότερο, απετέλεσε την βάση για την εξέλιξη πολλών άλλων καταστατικών προσομοιωμάτων που παρουσιάζονται στην §18.3.

Ίσως το σημαντικότερο σημείο του προσομοιώματος είναι αυτή καθεαυτή η ικανότητα και ο τρόπος πρόβλεψης της εμφάνισης παραμορφώσεων λόγω κατάρρευσης και των *συνεπειών* της εμφάνισής τους στην μηχανική συμπεριφορά του μη κορεσμένου εδάφους. Στα Σχ. 18.15 και 18.16 παρουσιάζεται μία τασική διαδρομή επιβολής κατάρρευσης, στο επίπεδο p-s (Σχ. 18.15α), στο επίπεδο v-p (Σχ. 18.15β), στο επίπεδο v-s (Σχ. 18.15β) και στις τρεις διαστάσεις του χώρου v-p-s (Σχ. 18.16). Στα σχήματα αυτά έχει θεωρηθεί ένα εδαφικό υλικό ευρισκόμενο υπό μύζηση και μέση τάση τέτοιες ώστε να βρίσκεται εντός της ελαστικής περιοχής η οποία στην αρχική κατάσταση ορίζεται από την περιοχή  $O''-M_1-T_1-\Pi_1^3$ . Εάν αρχικά γίνει ιστροπική συμπίεση διατηρώντας σταθερή τη μύζηση του υλικού τέτοια ώστε το εδαφικό υλικό να παραμείνει εντός της ελαστικής περιοχής προκύπτει το τμήμα της διαδρομής A-B<sub>1</sub>. Εάν στη συνέχεια ακολουθήσει μείωση της μύζησης, τότε αρχικά προκύπτει η λεγόμενη *ελαστική διόγκωση* (elastic swelling) μέχρι το σημείο Γ στο οποίο η τασική διαδρομή ακουμπά για πρώτη φορά την αρχική επιφάνεια διαρροής LC<sub>1</sub> κινούμενη παράλληλα με τον άξονα της μύζησης στο επίπεδο p-s. Από το σημείο Γ και ύστερα αρχίζει αφενός η εμφάνιση πλαστικών *θλιπτικών* ογκομετρικών παραμορφώσεων (παρόλο που η μύζηση μειώνεται) και αφετέρου η διόγκωση της επιφάνειας διαρροής LC. Εάν η μείωση της μύζησης συνεχιστεί μέχρι το μηδέν, τότε η τελική επιφάνεια διαρροής καταλήγει στη θέση LC<sub>2</sub>, ενώ ταυτόχρονα και η προβολή της επιφάνειας διαρροής στο επίπεδο p-s για διαδρομές σταθερής τάσης μετατίθεται από την αρχική θέση SI<sub>1</sub> στην τελική θέση SI<sub>2</sub>. Το τμήμα της επιφάνειας διαρροής στο οποίο συμβαίνει η κατάρρευση του υλικού είναι το τμήμα Γ-Π<sub>2</sub><sup>4</sup> ενώ η ύπαρξη του τμήματος ελαστικής διόγκωσης B<sub>1</sub>-Γ εξηγεί την αρχική εμφάνιση διογκώσεων πριν τη ραγδαία κατάρρευση ακόμα και σε δοκιμές κατάρρευσης χωρίς έλεγχο της μύζησης (όπως οι δοκιμές που παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 15). Η κατάρρευση του υλικού κατά μήκος του τμήματος Γ-Π<sub>2</sub> αντιστοιχεί σε μία σημαντικού μεγέθους *μη αντιστρεπτή* μείωση του ειδικού όγκου. Έτσι εάν επιχειρηθεί στη συνέχεια αύξηση της μύζησης μέχρι την

<sup>3</sup> Χάρην απλοποίησης έχει αγνοηθεί η προέκταση του τι συμβαίνει για τιμές  $p < 0$ .

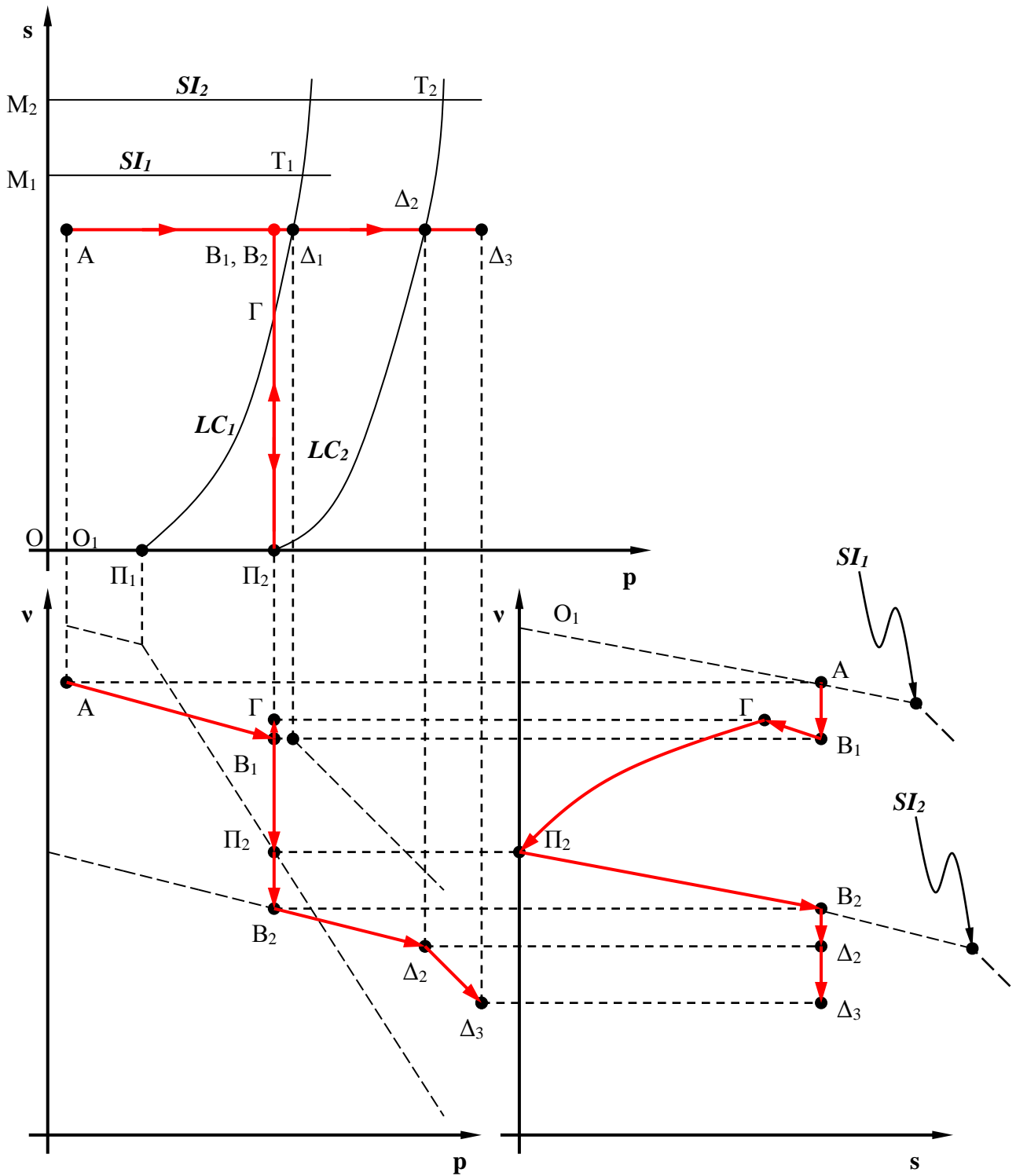
<sup>4</sup> Στο Σχ. 18.15γ η γραμμικότητα των τμημάτων O<sub>1</sub>-A και Π<sub>2</sub>-B<sub>2</sub> μαρτυρά άξονα της μύζησης σε λογαριθμική κλίμακα, οπότε κανονικά δεν θα έπρεπε να μπορεί να δειχθεί ο μηδενισμός της μύζησης. Ας θεωρηθεί προς στιγμνή χάριν απλοποίησης προς επεξήγηση του φαινομένου ότι στο διάγραμμα αυτό ο άξονας της μύζησης βρίσκεται σε γραμμική κλίμακα και έχει υποτεθεί γραμμική η μεταβολή του ειδικού όγκου με τη μύζηση.

αρχική τιμή που είχε αυτή, τότε παρατηρείται ελαστική θλίψη κατά μήκος του τμήματος  $\Pi_2$ - $B_2$ . Εάν συνεχιστεί η ισοτροπική συμπίεση διατηρώντας από αυτό το σημείο και μετά σταθερή την μύζηση τότε η διαρροή θα εμφανιστεί στο σημείο  $\Delta_2$  το οποίο αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη τάση διαρροής από εκείνη που είχε το υλικό μέχρι το σημείο  $B_1$ , παρόλο που τα σημεία  $B_1$  και  $B_2$  προβάλλονται στην ίδια ακριβώς θέση στο επίπεδο p-s (Σχ. 18.15α). Εάν η ισοτροπική συμπίεση υπό τη μύζηση αυτή συνεχιστεί και άλλο, τότε το τρέχον σημείο της τασικής διαδρομής θα συνεχίσει να παρασύρει την επιφάνεια διαρροής μαζί του (σημείο  $\Delta_3$ ). Από την περιγραφή της τασικής διαδρομής  $A \rightarrow B_1 \rightarrow \Gamma \rightarrow \Pi_2 \rightarrow B_2 \rightarrow \Delta_2 \rightarrow \Delta_3$  γίνεται αντιληπτός αφενός ο τρόπος που το προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990) προβλέπει την εμφάνιση κατάρρευσης αλλά και της κράτυνσης που προκαλεί η εμφάνισή της (μετάθεση από την  $LC_1$  στην  $LC_2$ ). Ο μηχανισμός αυτός που περιγράφηκε οδήγησε αρχικά άλλωστε τους Alonso, et al. (1990) στο να ονομάσουν την τομή της επιφάνειας διαρροής με το επίπεδο p-s, καμπύλη φόρτισης-κατάρρευσης, αφού η διαρροή μπορεί να συμβεί και λόγω αύξησης της φόρτισης και λόγω μείωσης της μύζησης. Η μηχανική αυτή συμπεριφορά είχε τεκμηριωθεί πειραματικά από τους Alonso, et al. (1987) πριν διατυπωθεί ως καταστατικό προσομοίωμα από τους Alonso, et al. (1990). Αυτό δυστυχώς δεν μπορεί να ειπωθεί και για άλλα καταστατικά προσομοιώματα που έχουν προταθεί όπως θα φανεί στην §18.3.

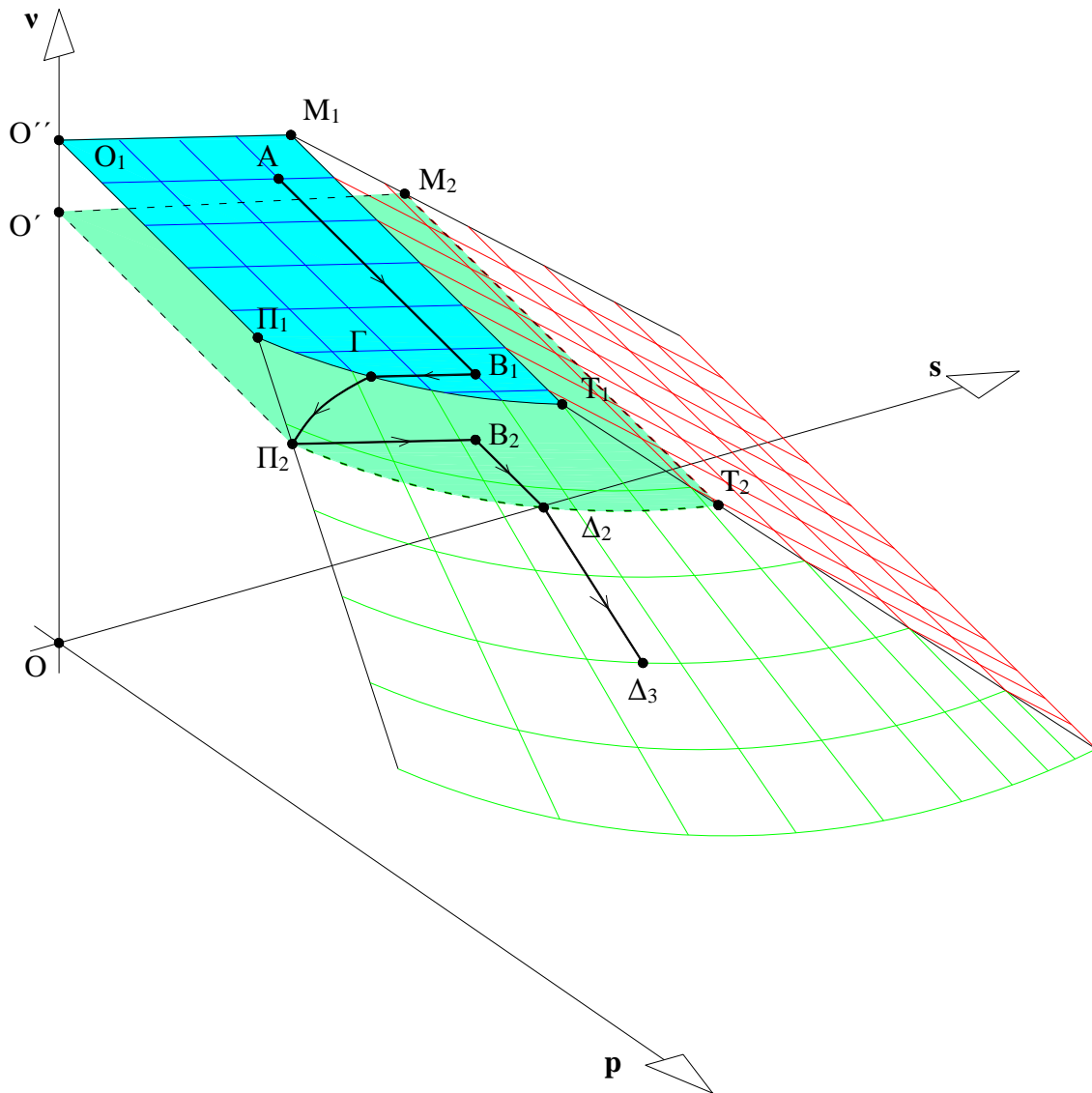
Η απεικόνιση τριών διαστάσεων της επιφάνειας διαρροής στο Σχ. 18.16 είναι πολύ σημαντική για την κατανόηση των προβλέψεων του προσομοιώματος και της εξέλιξης του μεγέθους της ελαστικής περιοχής του. Ο τρόπος της εξέλιξης της ελαστικής περιοχής έδωσε την αφορμή για τη διατύπωση και άλλων προσομοιωμάτων ή ερμηνειών με βάση την ίδια επιφάνεια διαρροής (βλ. §18.3.23, προσομοίωμα των Zhang & Lytton, 2009a & 2009b).

Τονίζεται ότι η τασική διαδρομή που περιγράφηκε στα Σχ. 18.15 και 18.16 περιγράφει τα ίδια φαινόμενα που θα παρατηρηθούν εάν κατά τη συμπίεση υπό σταθερή τάση του πρώτου σταδίου η τασική διαδρομή αγγίξει την καμπύλη LC ή ακόμα και εάν συνεχιστεί η φόρτιση οπότε επιβληθούν πλαστικές ογκομετρικές παραμορφώσεις με μετάθεση της καμπύλης. Η μόνη διαφορά είναι ότι κατά το στάδιο της ύγρανσης δεν θα παρεμβληθεί η ελαστική διόγκωση (το ευθύγραμμο τμήμα  $B_1$ - $\Gamma$ ) αλλά θα εμφανιστεί απευθείας η πλαστική κατάρρευση.





**Σχήμα 18.15.** Τασική διαδρομή επιβολής κατάρρευσης με την προβολή της α) στο επίπεδο p-s, β) στο επίπεδο v-p, και γ) στο επίπεδο v-s. Στο σχήμα παρουσιάζονται και οι μεταβολές των επιφανειών διαρροής SI και LC. Η τασική αυτή διαδρομή στον χώρο v-p-s παρουσιάζεται στο Σχ. 18.16.



**Σχήμα 18.16.** Τασική διαδρομή επιβολής κατάρρευσης στον χώρο  $v$ - $p$ - $s$ .

## 18.3 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

### 18.3.1 Εισαγωγή

Στην §18.2 παρουσιάστηκε το προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990), γνωστό πλέον σήμερα και ως BBM (Barcelona Basic Model). Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα υπόλοιπα καταστατικά προσομοιώματα που έχουν διατυπωθεί μέχρι σήμερα και βρέθηκαν στην βιβλιογραφία. Έχοντας παρουσιάσει ήδη το BBM είναι πλέον εύκολο να παρουσιαστεί κάθε άλλο προσομοίωμα μέσω της επισήμανσης των ομοιοτήτων και διαφορών του από το BBM καθώς και να διακριθούν τα προσομοιώματα που εισήγαγαν ριζικές διαφορές από εκείνα που βελτίωσαν οριακά την απόδοση της πραγματικής συμπεριφοράς σε σχέση με το BBM.

### 18.3.2 Toll (1990) - Wheeler (1991)

Ο Toll (1990) παρουσίασε ένα θεωρητικό πλαίσιο της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών στο οποίο προσπάθησε να διαχωρίσει την επιρροή της ολικής τάσης και της μύζησης στην διατμητική αντοχή και στην πρόκληση πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων. Αποφεύγεται εν προκειμένω ο όρος καταστατικό προσομοίωμα και προτιμάται ο όρος θεωρητικό πλαίσιο, καθώς ο Toll (1990) δεν όρισε επιφάνεια διαρροής και σχέσεις μεταβολής της με την μύζηση και την τάση για να μπορεί να θεωρηθεί η πρότασή του ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα. Η σημασία της πρότασής του ωστόσο έγκειται στο ότι διαχώρισε την επιρροή της τάσης και της μύζησης στην μεταβολή του ειδικού όγκου και της διατμητικής αντοχής όπως φαίνεται στις Εξ. 18.34 και 18.35 αντίστοιχα.

$$v = \Gamma_{aw} - \lambda_a \cdot \ln(p-u_a) - \lambda_w \cdot \ln(u_a-u_w) \quad (18.34)$$

$$q = M_a \cdot (p-u_a) + M_w \cdot (u_a-u_w) \quad (18.35)$$

Η Εξ. 18.34 βρίσκεται σε συμφωνία με τις προβλέψεις του BBM για την μεταβολή του ειδικού όγκου που προκαλεί πλαστικές ογκομετρικές παραμορφώσεις με την παράμετρο  $\lambda_a$  να βρίσκεται σε αντιστοιχία με την παράμετρο  $\lambda(s)$  και την παράμετρο  $\lambda_w$  να βρίσκεται σε αντιστοιχία με την παράμετρο  $\lambda_s$ , ενώ η τιμή του ειδικού όγκου  $\Gamma_{aw}$  αποτελεί μία τιμή αναφοράς του ειδικού όγκου σε ένα συνδυασμό τιμών αναφοράς της τάσης και της μύζησης, η οποία αποτελεί συνάρτηση του

βαθμού κορεσμού και του ειδικού όγκου του πλήρως κορεσμένου εδάφους κατά τις προβλέψεις της Εξ. 18.36.

$$\Gamma_{aw} = 1 + (\Gamma - 1)/S_r \quad (18.36)$$

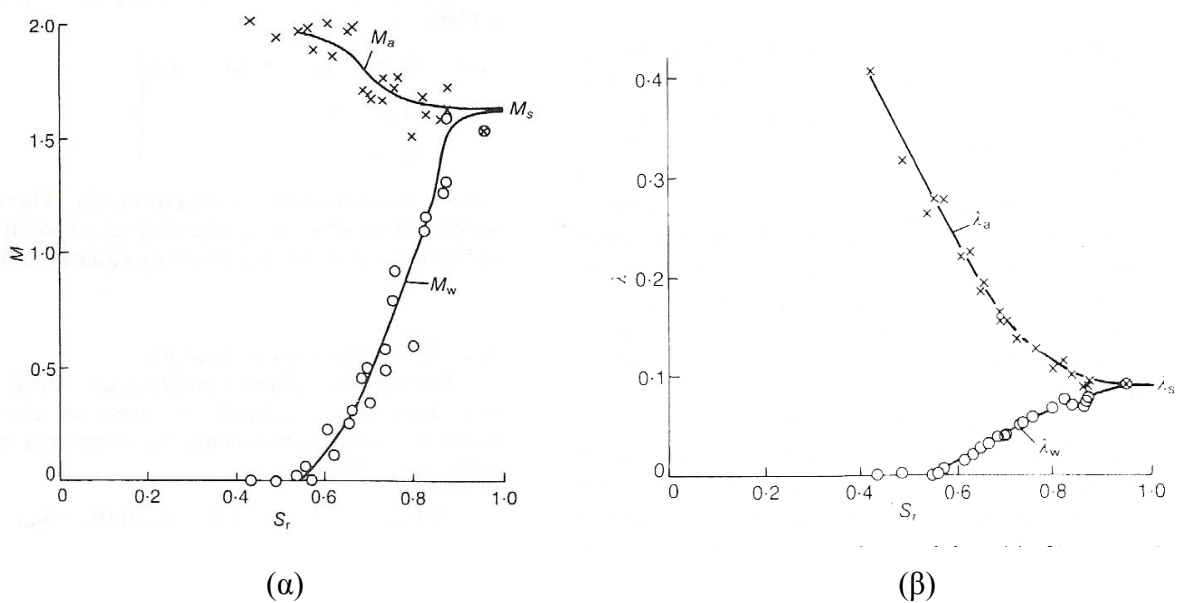
Από την άλλη πλευρά η Εξ. 18.35 διαχωρίζει πλήρως την επιρροή της τάσης και της μύζησης στην διατμητική αντοχή με την παράμετρο  $M_a$  να βρίσκεται σε αντιστοιχία με την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης στο BBM, και την παράμετρο  $M_w$  να εκφράζει την επιρροή της μύζησης με αντίστοιχο τρόπο με αυτόν που την εκφράζει για την τάση η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης.

Πέρα από την θεωρητική διάκριση της επιρροής κάθε μιας από τις παραμέτρους τάσης, ο Toll (1990) παρουσίασε και καμπύλες μεταβολής των παραμέτρων αυτών με τον βαθμό κορεσμού για μια στατικά ή δυναμικά συμπυκνωμένη λατεριτική λεπτοχαλικώδη άμμο με αργιλοϊλύ (Σχ. 18.17α για τις παραμέτρους  $M_a$  και  $M_w$  και Σχ. 18.17β για τις παραμέτρους  $\lambda_a$  και  $\lambda_w - M_s$  και  $\lambda_s$  οι αντίστοιχες παράμετροι του πλήρως κορεσμένου εδάφους). Όπως προκύπτει από το Σχ. 18.17, όσο μειώνεται ο βαθμός κορεσμού (αυξάνεται δηλαδή η μύζηση) τόσο αυξάνεται η επιρροή της τάσης στην διατμητική αντοχή και μειώνεται η επιρροή της μύζησης σε αυτήν, με τιμή του βαθμού κορεσμού για την οποία σταματάει η περαιτέρω μεταβολή μεταξύ 40-50%. Αντίστοιχα, όσο αυξάνεται ο βαθμός κορεσμού, τόσο αυξάνεται η επιρροή της τάσης στις παρατηρούμενες ογκομετρικές μεταβολές και τόσο μειώνεται η επιρροή της μύζησης σε αυτές με τιμή του βαθμού κορεσμού για την οποία σταματάει η περαιτέρω μεταβολή μεταξύ 40-50%. Η αύξηση του  $M_a$  με την μείωση του βαθμού κορεσμού (αύξηση της μύζησης) μέχρι την σταθεροποίησή του για βαθμό κορεσμού 40-50% ισοδυναμεί με την μεγέθυνση της τομής της επιφάνειας διαρροής με επίπεδα  $s = \text{σταθ.} \neq 0$  μέχρι το μέγιστο που παρατηρήθηκε στο Σχ. 18.2, υποδεικνύοντας την αντιστοιχία μεταξύ των δύο προτάσεων. Η μείωση του  $M_w$  από την άλλη πλευρά με την μείωση του βαθμού κορεσμού (αύξηση της μύζησης) μέχρι την σταθεροποίησή του για βαθμό κορεσμού 40-50% αποτελεί εξέλιξη επί του BBM αφού ουσιαστικά προβλέπει σταθεροποίηση της διατμητικής αντοχής από μία τιμή του βαθμού κορεσμού και κάτω (δηλ. από μία τιμή της μύζησης και πάνω) σε αντίθεση με το BBM που προβλέπει συνεχή αύξηση της διατμητικής αντοχής με την μύζηση. Για τις παραμέτρους  $M_a$  και  $M_w$ , οι Toll & Ong (2003) διατύπωσαν και εμπειρικές συσχετίσεις τους με τον βαθμό κορεσμού (για το εδαφικό υλικό που προαναφέρθηκε και άλλο ένα). Η εξέλιξη των παραμέτρων  $\lambda_a$  και  $\lambda_w$  από την άλλη πλευρά δεν βρίσκεται σε συμφωνία με την εξέλιξη των αντίστοιχων δεικτών  $\lambda(s)$  και  $\lambda_s$  στο BBM, και ο

ίδιος ο Toll (1990) την αποδίδει περισσότερο στην ιδιαιτερότητα του υλικού που έγιναν οι δοκιμές που παρουσίασε.

Συνοψίζοντας, η σπουδαιότερη συνεισφορά αυτού του θεωρητικού πλαισίου ήταν η αναγνώριση τουλάχιστον της δυνατότητας σταθεροποίησης της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με την αύξηση της μύζησης, σε αντίθεση με την συνεχή αύξησή της που προβλέπει το BBM.

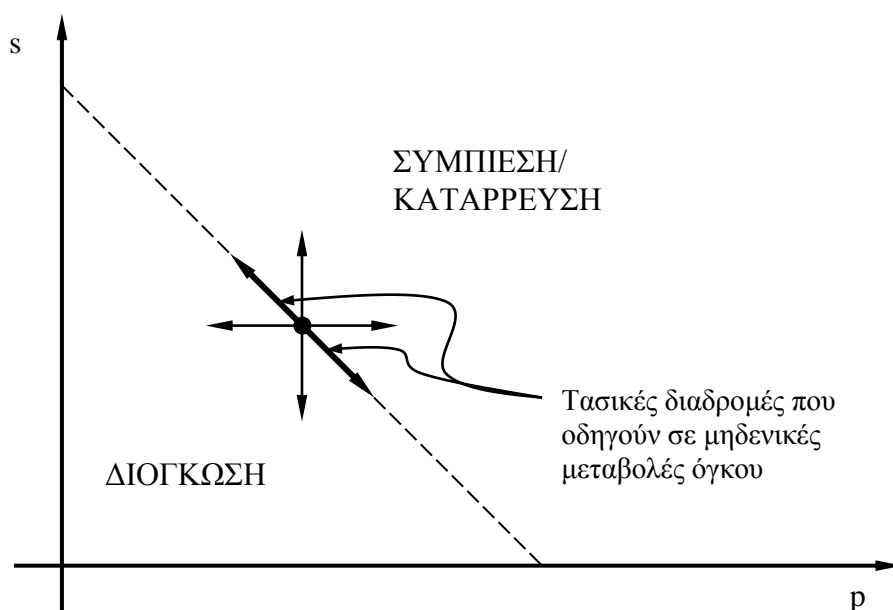
Ο Wheeler (1991) επεξεργάστηκε και πάλι τα πειραματικά δεδομένα του Toll (1990) και πρότεινε την ελαφρά αναμόρφωση των Εξ. 18.34 και 18.35. Από την δική του επεξεργασία προέκυψε ότι η παράμετρος που συνδέει την διατμητική αντοχή με την τάση είναι μάλλον η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $M$  και την διατμητική αντοχή με την μύζηση μία παράμετρος εξαρτώμενη από τον βαθμό κορεσμού κατά τρόπο μάλλον μη μονοσήμαντο, τουλάχιστον από τα πειραματικά δεδομένα που είχε στην διάθεσή του. Βασικό μειονέκτημα και των δύο προσεγγίσεων είναι ότι παρόλο που εισήγαγαν μάλλον ορθές ιδέες –κυρίως σε ό,τι αφορά την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής με την μύζηση– δεν διαμορφώθηκαν σε ολοκληρωμένα καταστατικά προσομοιώματα ικανά να προβλέψουν το σύνολο της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών.



**Σχήμα 18.17.** Εξέλιξη α) των παραμέτρων  $M_a$  και  $M_w$  με τον βαθμό κορεσμού, και β) των παραμέτρων  $\lambda_a$  και  $\lambda_w$  με τον βαθμό κορεσμού ( $M_s$ ,  $\lambda_s$  οι τιμές των παραμέτρων για το πλήρως κορεσμένο έδαφος) όπως μετρήθηκαν από τον Toll (1990) σε δοκιμές στο ίδιο υλικό (λατεριτική χαλικώδης άμμος με αργιλοίλυ).

### 18.3.3 Gens & Alonso (1992) – Alonso, et al. (1994) – Alonso, et al. (1999)

Το καταστατικό προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990) προτάθηκε για την περιγραφή πρώτα και κύρια εδαφικών υλικών χαμηλής δραστηκότητας, τα οποία δεν επιδεικνύουν μεγάλη διόγκωση σε χαμηλές τιμές της τάσης. Οι Gens & Alonso (1992) αναμόρφωσαν το BBM έτσι ώστε να μπορεί να προβλέπει την μηχανική συμπεριφορά και πιο δραστηκών αργιλικών εδαφικών υλικών που παρουσιάζουν μεγάλη διόγκωση. Η αναμόρφωση που πραγματοποίησαν βασίστηκε στην διάκριση της παρατηρούμενης συμπεριφοράς σε αυτήν που οφείλεται στην *μακροδομή* (macrostructure) των υλικών και περιγράφεται από το BBM και σε αυτήν που οφείλεται στην *μικροδομή* (microstructure) των υλικών και κυρίως την συμπεριφορά των αργιλικών ορυκτών που σχηματίζουν συσσωματώματα αργιλικών πλακιδίων. Η παρουσίασή τους σε εκείνο το στάδιο περιορίστηκε αποκλειστικά και μόνο σε μία ποιοτική περιγραφή της συμπεριφοράς χωρίς την παράθεση των μαθηματικών διατυπώσεων που την περιγράφουν. Βασική προσθήκη στο προσομοίωμα ήταν η έννοια της *γραμμής ουδέτερης φόρτισης* (neutral loading line). Η γραμμή αυτή αποτελεί τον γεωμετρικό τόπο των σημείων που διαχωρίζουν τις δυνατές καταστάσεις στο επίπεδο  $p$ - $s$  που οδηγούν σε συμπίεση/κατάρρευση από εκείνες που οδηγούν σε διόγκωση (Σχ. 18.18). Η δε διόγκωση είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερος είναι ο λόγος της τρέχουσας τάσης προς την τάση διαρροής του υλικού όπως καθορίζεται από την καμπύλη φόρτισης-κατάρρευσης του BBM.



**Σχήμα 18.18.** Η γραμμή ουδέτερης φόρτισης στο προσομοίωμα των Gens & Alonso (1992).

Οι Alonso, et al. (1999) προχώρησαν στην μαθηματική περιγραφή του προσομοιώματος των Gens & Alonso (1992) –με προτάσεις ενδιάμεσα από τους Alonso, et al. (1994). Το προσομοίωμα αυτό είναι σήμερα γνωστό ως BExM (Barcelona Expansive Model). Όπως και στην ποιοτική περιγραφή των Gens & Alonso (1992) διαχωρίζεται η επιρροή στην μηχανική συμπεριφορά της μικροδομής και της μακροδομής. Το μικροδομικό επίπεδο (microstructural level) περιορίζεται στα συσσωματώματα των αργιλικών πλακιδίων, υποτίθεται ότι επικρατεί πλήρης κορεσμός και συμβαίνει διόγκωση των δραστικών αργιλικών ορυκτών. Το μακροδομικό επίπεδο (macrostructural level) εντοπίζεται στην κλίμακα μεταξύ συσσωματωμάτων αργιλικών πλακιδίων και κόκκων και οι μεταβολές που συμβαίνουν σε αυτό καθορίζουν το μέγεθος και τις συνθήκες εμφάνισης σημαντικών δομικών μεταβολών στην διάταξη των κόκκων και των συσσωματωμάτων πλακιδίων του εδάφους. Οι υποθέσεις του προσομοιώματος συνεχίζονται θεωρώντας: α) στο μικροδομικό επίπεδο ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων, β) η μικροδομική συμπεριφορά είναι κυρίως ελαστική, γ) υπάρχει μηχανική, υδραυλική και χημική ισορροπία μεταξύ μικροδομικού και μακροδομικού επιπέδου, και δ) *η σύζευξη μεταξύ μικροδομής και μακροδομής οδηγεί σε μακροσκοπικές ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις όταν συμβαίνουν ελαστικές μικροδομικές παραμορφώσεις*. Με βάση αυτές τις υποθέσεις το βήμα (increment) της ογκομετρικής μικροδομικής παραμόρφωσης (εξ υποθέσεως μόνο ελαστικό)  $de_{vm}^e$  εξαρτάται μόνο από το βήμα της μέσης ενεργού τάσης  $dp' = d(p - u_w) = d(p - u_a + u_a - u_w) = d(p + s)$ . Η υπόθεση αυτή εξηγεί γεωμετρικά την θέση της γραμμής ουδέτερης φόρτισης που φαίνεται στο Σχ. 18.18 αφού εάν είναι  $A$  η τρέχουσα εντατική κατάσταση στο επίπεδο  $p-s$ , τότε η γραμμή ουδέτερης φόρτισης διέρχεται από το  $A$  κατά τρόπο ώστε  $p+s = \text{σταθ}$ . Οι Gens & Alonso (1992) βέβαια επεσήμαναν ότι υπάρχουν εντατικές καταστάσεις συνδυασμού τιμών μύζησης και ολικής τάσης για τις οποίες η γραμμή  $NL$  μπορεί να αποκλίνει από την γωνία κλίσης των  $45^\circ$ . Η μικροδομική διόγκωση μπορεί να προκαλέσει αναδιάταξη σε μακροδομικό επίπεδο η οποία οδηγεί σε μη αντιστρεπτή *αύξηση* του λόγου κενών. Αντίστοιχα, η μικροδομική συρρίκνωση μπορεί να προκαλέσει αναδιάταξη σε μακροδομικό επίπεδο η οποία οδηγεί σε μη αντιστρεπτή *μείωση* του λόγου κενών. Για να προβλεφθούν τέτοια φαινόμενα απαιτούνται δύο ακόμα επιφάνειες διαρροής όπως αυτές που παρουσιάζονται στο Σχ. 18.19. Η έναρξη πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων που οδηγούν σε μείωση του λόγου κενών σε μακροδομικό επίπεδο ορίζεται από μία γραμμή *αύξησης μύζησης* (suction increase, SI) και η έναρξη πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων που οδηγούν σε αύξηση του λόγου κενών σε μακροδομικό επίπεδο ορίζεται από μία γραμμή *μείωσης μύζησης* (suction decrease, SD). Και οι δύο αυτές γραμμές είναι παράλληλες με την γραμμή ουδέτερης φόρτισης, ορίζουν την ελαστική περιοχή σε μικροδομικό επίπεδο και ενεργοποιούνται όταν έρθει σε επαφή μαζί τους η γραμμή ουδέτερης φόρτισης.

Λόγω πειραματικών δεδομένων που επιδεικνύουν ότι η πλαστική μακροδομική παραμόρφωση συνδέεται όχι μόνο με την μικροδομική παραμόρφωση αλλά και το μέγεθος της τάσης, οι Alonso, et al. (1994) πρότειναν ότι το βήμα της πλαστικής ογκομετρικής μακροδομικής παραμόρφωσης δίνεται από την Εξ. 18.37 όταν ενεργοποιείται η SD και από την Εξ. 18.38 όταν ενεργοποιείται η SI.  $f_D$  και  $f_I$  είναι δύο συναρτήσεις που συνδέουν την μακροδομική πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση με την μικροδομική παραμόρφωση και εξαρτώνται από τον λόγο της τρέχουσας τάσης προς την τάση διαρροής, με αυτόν να χρησιμοποιείται ως μέτρο της απόστασης της τρέχουσας εντατικής κατάστασης σε ισοτροπικές συνθήκες από την επιφάνεια διαρροής –κατ’ ανάλογο τρόπο με τον δείκτη υπερστερεοποίησης στα πλήρως κορεσμένα εδάφη.

$$d\varepsilon_{VM}^p = f_D \cdot d\varepsilon_{vm}^e \quad (18.37)$$

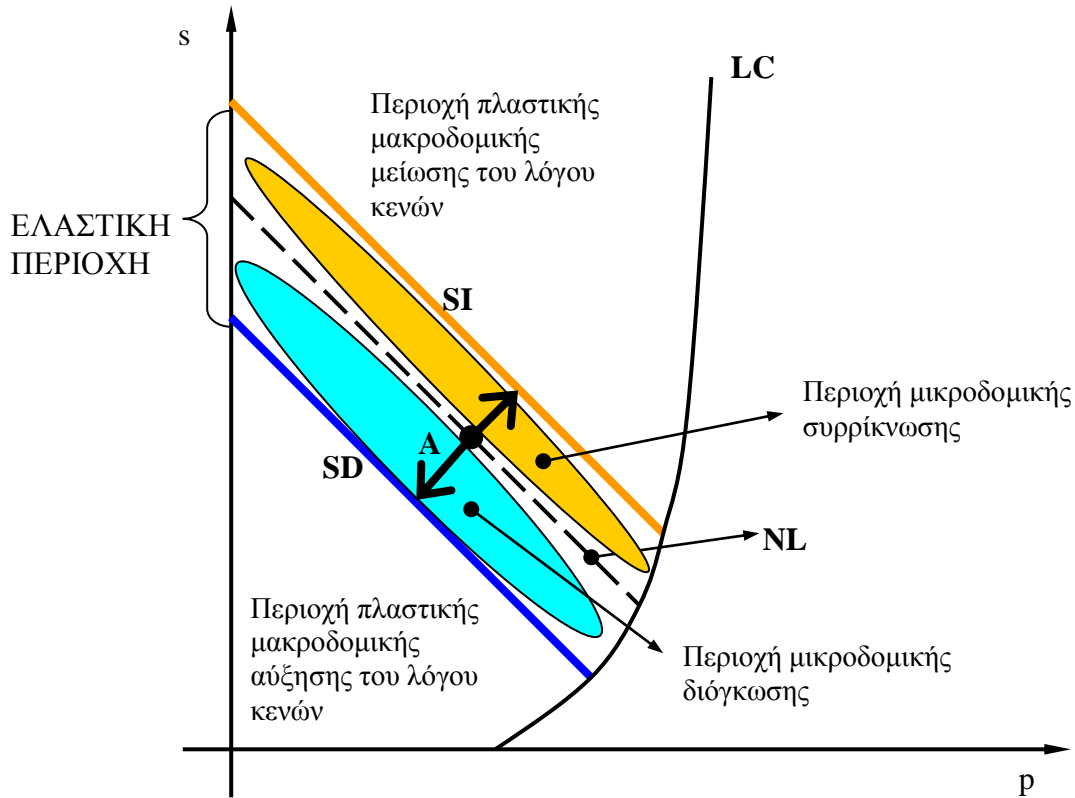
$$d\varepsilon_{VM}^p = f_I \cdot d\varepsilon_{vm}^e \quad (18.38)$$

Η συσχέτιση των συναρτήσεων  $f_D$  και  $f_I$  με τον λόγο της τρέχουσας τάσης προς την τάση διαρροής παρουσιάζεται ποιοτικά στο Σχ. 18.20. Η μικροδομική διόγκωση έχει μεγαλύτερη επιρροή σε μία πυκνή μακροδομή παρά σε μία χαλαρή και γι’ αυτό η συνάρτηση  $f_D$  μειώνεται με την αύξηση του λόγου  $p/p_0$ . Αντίστοιχα η συνάρτηση  $f_I$  αυξάνεται με την αύξηση του λόγου  $p/p_0$ , επιδεικνύοντας ότι η μικροδομική συρρίκνωση έχει μεγαλύτερη επιρροή σε μία χαλαρή μακροδομή παρά σε μία πυκνή.

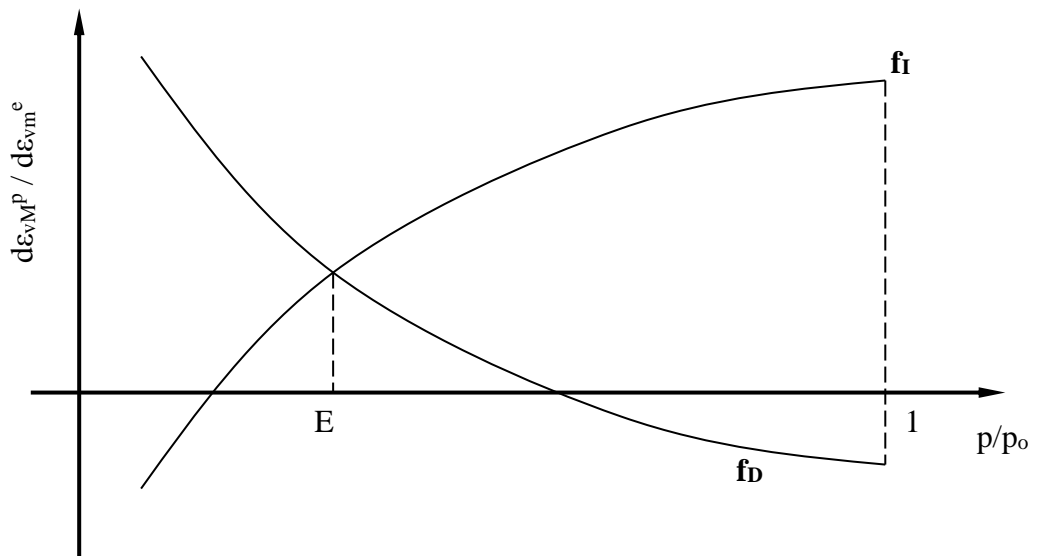
Επί αυτής της συμπεριφοράς προστίθεται η συμπεριφορά που καθορίζεται από την εμφάνιση μακροδομικών πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων ανεξάρτητα από τις μικροδομικά προκαλούμενες. Αυτή η συμπεριφορά καθορίζεται όπως και στο BBM με την παρουσία της καμπύλης LC στο επίπεδο  $p-s$ , με τις καμπύλες που περιγράφηκαν ως εδώ στο επίπεδο  $p-s$  να απεικονίζονται στο Σχ. 18.19.

Συνεχίζοντας την διάκριση χαρακτηριστικών σε μικροδομικό και μακροδομικό επίπεδο, οι Alonso, et al. (1999) αναγνώρισαν ανομοιογένεια ως προς τον λόγο κενών, θεωρώντας ότι αυτός έχει μία τιμή  $e_m$  σε μικροδομικό επίπεδο και μία τιμή  $e_M$  σε μακροδομικό επίπεδο. Όρισαν δε το βήμα της ογκομετρικής μικροδομικής και μακροδομικής παραμόρφωσης αντίστοιχα, όπως φαίνεται από τις Εξ. 18.39 και 18.40. Υπάρχουν δύο καταστάσεις διαφορετικού προσήμου των παραμορφώσεων  $d\varepsilon_{vm}$  και  $d\varepsilon_{VM}$ . Στην πρώτη το  $d\varepsilon_{VM}$  είναι αρνητικό και το  $d\varepsilon_{vm}$  θετικό και αντι-





**Σχήμα 18.19.** Η γραμμή ουδέτερης φόρτισης στο προσομοίωμα των Gens & Alonso (1992) με τις γραμμές SI και SD από το προσομοίωμα των Alonso, et al. (1999).



**Σχήμα 18.20.** Εξέλιξη των συναρτήσεων  $f_I$  και  $f_D$  με τον λόγο  $p/p_0$  από τους Alonso, et al. (1999).

στοιχεί στην κατάσταση κατά την οποία παρουσιάζει ελαστική μακροδομική διόγκωση ένα υλικό χαλαρής δομής στο οποίο συμβαίνει μικροδομική συρρίκνωση. Κατά συνέπεια η συνάρτηση  $f_D$  είναι δυνατόν να οδηγηθεί σε αρνητικές τιμές για μεγάλες τιμές του λόγου  $p/p_0$ . Αντίστροφα μπορεί το  $d\varepsilon_{vM}$  να είναι θετικό και το  $d\varepsilon_{vm}$  αρνητικό, μία κατάσταση που αντιστοιχεί σε μακροδομική κατάρρευση ή συρρίκνωση σε ένα υλικό πυκνής δομής στο οποίο συμβαίνει μικροδομική διόγκωση. Κατά συνέπεια η συνάρτηση  $f_I$  είναι δυνατόν να οδηγηθεί σε αρνητικές τιμές για μικρές τιμές του λόγου  $p/p_0$ .

$$d\varepsilon_{vM} = d\varepsilon_M / (1 + e_M) \quad (18.39)$$

$$d\varepsilon_{vm} = d\varepsilon_m / (1 + e_m) \quad (18.40)$$

Ως συνέπεια της αποδοχής πλήρους ή πρακτικά πλήρους κορεσμού σε μικροδομικό επίπεδο<sup>5</sup>, οι Alonso, et al. (1999) όρισαν μία «ενεργό»<sup>6</sup> τάση όπως αυτή που δίνεται από την Εξ. 18.41, όπου  $p$  είναι η ολική τάση,  $S_r$  ο βαθμός κορεσμού και  $a$  παράμετρος, η οποία όταν γίνεται 0 η Εξ. 18.41 εκφυλίζεται στον ορισμό της ενεργού τάσης για πλήρως κορεσμένα εδάφη και όταν γίνει 1 η Εξ. 18.41 εκφυλίζεται στον ορισμό του Bishop για την ενεργό τάση σε μη κορεσμένα εδάφη.

$$p' = p + S_r^a \cdot s \quad (18.41)$$

Για την ελαστική ογκομετρική μικροδομική παραμόρφωση οι Alonso, et al. (1999) πρότειναν την Εξ. 18.42 με δύο δυνατότητες για το μέτρο  $K_m$  ανάλογα με το είδος της διόγκωσης που επιδιώκεται να προσομοιωθεί (Εξ. 18.43 και 18.44). Για την ελαστική ογκομετρική μακροδομική παραμόρφωση διατήρησαν την ίδια μορφή με το BBM (Εξ. 18.45 έως 18.47).

$$d\varepsilon_{vm}^e = dp' / K_m \quad (18.42)$$

$$K_m = \frac{e^{-a \cdot p'}}{\beta_m} \quad (18.43)$$

$$K_m = \frac{(1 + e_m) \cdot p'}{\kappa_m} \quad (18.44)$$

<sup>5</sup> Το οποίο για εδαφικά υλικά με δραστικά αργιλικά ορυκτά μπορεί να αφορά σε ένα μέγεθος πόρων πρακτικά στο μέγεθος της διπλής στρώσης των αργιλικών πλακιδίων.

<sup>6</sup> Για την χρήση του όρου «ενεργός» βλ. εκτεταμένο σχόλιο στην §18.3.4.

$$de_{vM}^e = \frac{dp}{K_t} + \frac{ds}{K_s} \quad (18.45)$$

$$K_t = \frac{(1 + e_M) \cdot p}{\kappa} \quad (18.46)$$

$$K_s = \frac{(1 + e_M) \cdot (s + p_{at})}{\kappa_s} \quad (18.47)$$

Για τις καμπύλες διαρροής SI και SD υποτέθηκαν οι Εξ. 18.48 και 18.49 όπου  $s_i$  και  $s_o$  είναι παράμετροι κράτυνσης ενώ για την καμπύλη LC υποτέθηκε ο ίδιος ρυθμός εξέλιξης της τάσης διαρροής  $p_o$  όπως και στο BBM (Εξ. 18.2 και 18.4).

$$p' - s_i = 0 \quad (18.48)$$

$$s_o - p' = 0 \quad (18.49)$$

Για την κράτυνση των καμπυλών SI, SD και LC, χρησιμοποιήθηκαν δύο μεταβλητές, η  $da_1$  για την κράτυνση των καμπυλών SI και SD (Εξ. 18.50) και η  $da_2$  για την κράτυνση της καμπύλης LC (Εξ. 18.51).  $de_{vSI}^P$  και  $de_{vSD}^P$  είναι οι ογκομετρικές πλαστικές παραμορφώσεις λόγω ενεργοποίησης της καμπύλης SI και SD αντίστοιχα, και  $de_{vLC}^P$  είναι η ογκομετρική πλαστική παραμόρφωση λόγω ενεργοποίησης της καμπύλης LC. Οι νόμοι κράτυνσης περιγράφονται από τις Εξ. 18.52 και 18.53, όπου η συνάρτηση  $f$  αντιστοιχεί στην συνάρτηση  $f_i$  εάν είναι ενεργός η καμπύλη SI και στην συνάρτηση  $f_D$  εάν είναι ενεργός η καμπύλη SD. Η μορφή των Εξ. 18.52 και 18.53 προβλέπει κράτυνση της καμπύλης LC όταν ενεργοποιούνται οι καμπύλες SI και SD, αλλά όχι και το αντίστροφο, δηλ. η μεταβολή της καμπύλης LC δεν προκαλεί μεταβολή των καμπυλών SI και SD. Για τις συναρτήσεις  $f_i$  και  $f_D$  πρότειναν τις Εξ. 18.54 και 18.55 αντίστοιχα, αναγνωρίζοντας ωστόσο την έλλειψη πειραματικών αποτελεσμάτων κατά τον χρόνο της δημοσίευσής τους, ικανών να υποστηρίξουν καταληκτικά τις εξισώσεις για τις συναρτήσεις αυτές.

$$da_1 = de_{vSI}^P + de_{vSD}^P \quad (18.50)$$

$$da_1 = de_{vSI}^P + de_{vSD}^P + de_{vLC}^P \quad (18.51)$$

$$ds_i = K_m \cdot da_1 / f = ds_o \quad (18.52)$$

$$\frac{dp_o^*}{p_o^*} = \frac{(1 + e_M) \cdot da_2}{\lambda(0) - \kappa} \quad (18.53)$$

$$f_I = f_{I0} + f_{I1} \cdot (p/p_o)^{nI} \quad (18.54)$$

$$f_D = f_{D0} + f_{D1} \cdot (1 - p/p_o)^{nD} \quad (18.55)$$

Η μαθηματική διατύπωση που παρουσιάστηκε ως εδώ αφορά ισοτροπικές καταστάσεις. Για διεκτροπικές καταστάσεις, οι Alonso, et al. (1999) υιοθέτησαν την ίδια γεωμετρική μορφή της επιφάνειας διαρροής στον χώρο p-q-s με το BBM, θεωρώντας ότι οι καμπύλες SI, SD και NL αποτελούν τομές επιπέδων κάθετων στο επίπεδο p-s με το επίπεδο αυτό.

Η μαθηματική πολυπλοκότητα του BExM, ακόμα και σε σχέση με το BBM είναι εμφανής από την παρουσίαση που προηγήθηκε. Η δυσκολία και η πολυπλοκότητα βέβαια του φυσικού φαινομένου που επιχειρεί να προσομοιώσει είναι εξίσου μεγάλη με έντονη δυσκολία προσδιορισμού παραμέτρων. Η έρευνα στο ιδιαίτερο αντικείμενο της θέρμο-υδρό-μηχανικής συμπεριφοράς των αργιλικών διαφραγμάτων για την σφράγιση των χώρων ταφής πυρηνικών αποβλήτων, τα οποία αποτελούν συνήθως μίγματα μπεντονίτη-άμμου και αποτελούν κατ' εξοχήν παραδείγματα υλικών με έντονη αλληλεμπλοκή μικροδομής και μακροδομής, οδήγησε στην εκτεταμένη χρήση της ποροσιμετρίας με υδράργυρο (mercury intrusion porosimetry). Τα αποτελέσματα της χρήσης αυτής της μεθόδου απέδειξαν την ορθότητα των βασικών χαρακτηριστικών του BExM και επέτρεψαν τον ακριβή ποσοτικό προσδιορισμό τιμών παραμέτρων όπως ο μικροδομικός και ο μακροδομικός λόγος κενών και ο τρόπος της μεταβολής τους για διάφορες εντατικές καταστάσεις. Τέτοιες εργαστηριακές μέθοδοι ωστόσο απέχουν μακράν από την δυνατότητα να χρησιμοποιούνται σε υπολογισμούς που γίνονται ακόμα και για μεγάλης σημασίας έργα<sup>7</sup>, πόσο μάλλον μέτριας ή μικρής. Άλλωστε μόλις πολύ πρόσφατα εμφανίστηκαν οι πρώτες ποσοτικές μέθοδοι εξαγωγής τιμών παραμέτρων από τέτοια εργαστηριακά δεδομένα (π.χ. Salgueiro, et al., 2010). Τα παραπάνω δεν μειώνουν την θεωρητική αξία του BExM για την εξήγηση, περιγραφή και διδασκαλία του φαινομένου της έντονης διόγκωσης εδαφικών υλικών με πολύ δραστικά αργιλικά ορυκτά. Τοποθετούν ωστόσο την

<sup>7</sup> Για την ακρίβεια, μόνο έργα όπως η ταφή πυρηνικών αποβλήτων ή η κατασκευή ενός πυρηνικού εργοστασίου θα δικαιολογούσαν τέτοιες εργαστηριακές μεθόδους στην επιστημονική περιοχή της γεωτεχνικής μηχανικής.

σκοπιμότητα και την δυνατότητα χρήσης του σε συγκεκριμένα –επίλεκτα και σπάνια– προβλήματα μηχανικού.

#### 18.3.4 Kohgo, et al. (1993a & 1993b)

Οι Kohgo, et al. (1993a & 1993b) έκαναν την πρώτη προσπάθεια ορθολογικοποίησης των παραμέτρων του BBM και κυρίως επιχείρησαν την σύνδεση των παραμέτρων και της προβλεπόμενης από το προσομοίωμα συμπεριφοράς με την φύση και την μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών. Αυτή η κύρια συνεισφορά του προσομοιώματος ισοφαρίζεται από την προσπάθεια των συγγραφέων να εισάγουν την έννοια της «ενεργού» τάσης για μη κορεσμένα εδάφη στο προσομοίωμά τους. Το προσομοίωμά τους έχει διατυπωθεί σε όρους «ενεργού» τάσης  $\sigma'$  και «ενεργού» μύζησης  $s^*$  όπως ορίζονται στις Εξ. 18.56 έως 18.60, όπου  $u_{eq}$  είναι η ισοδύναμη πίεση πόρων,  $a_e$  παράμετρος του υλικού,  $s_c$  η κρίσιμη μύζηση, και  $s_e$  η ονομαστική πίεση διείσδυσης αέρα<sup>8</sup>. Πρέπει βέβαια να αναγνωριστεί ότι εισήγαγαν πρώτοι την διατύπωση του Bishop για μία μοναδική παράμετρο τάσης και σε κάθε περίπτωση επεσήμαναν την ανάγκη να χρησιμοποιείται ξεχωριστά και η μύζηση.

$$\sigma' = \sigma - u_{eq} \quad (18.56)$$

$$u_{eq} = u_a - s, s \leq s_e \quad (18.57)$$

$$u_{eq} = u_a - \left( s_e + \frac{s_c - s_e}{s^* + a_e} \cdot s^* \right), s > s_e \quad (18.58)$$

$$s^* = 0, s \leq s_e \quad (18.59)$$

$$s^* = s - s_e, s \leq s_e \quad (18.60)$$

<sup>8</sup> Υπενθυμίζεται η έννοια της ονομαστικής πίεσης διείσδυσης αέρα, η οποία σε αντίθεση με την πραγματική πίεση διείσδυσης αέρα (την αρνητική πίεση πόρων που συμβαίνει για πρώτη φορά  $S_r < 100\%$ ), είναι η τιμή της μύζησης που αντιστοιχεί στην τομή της προέκτασης της ευθείας που περιγράφει την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού στην Περιοχή ΙΙ με την ευθεία  $S_r = 100\%$  και είναι πάντοτε μεγαλύτερη της πραγματικής πίεσης διείσδυσης αέρα.

Οι ορισμοί από τις Εξ. 18.56 έως 18.60 φανερώνουν μάλλον την ατυχή χρήση του όρου «ενεργός» και για την τάση και για την μύζηση (όπως και στην Εξ. 18.41 στην §18.3.3). Ο όρος «ενεργός» τάση στα πλήρως κορεσμένα εδάφη δηλώνει την παρουσία μίας μοναδικής παραμέτρου τάσης που συνδέει άμεσα και χωρίς ενδιάμεσες παραμέτρους την ολική τάση με την πίεση στην υγρή φάση των πόρων για να εκφράσει το εντατικό μέγεθος που δρα πράγματι επί του εδαφικού υλικού καθορίζοντας μονοσήμαντα την μηχανική του συμπεριφορά. Αντίθετα στους Kohgo, et al. (1993a & 1993b), ο όρος «ενεργός» περιγράφει μάλλον ισοδύναμες τιμές της τάσης και της μύζησης, οι οποίες κατά τους συγγραφείς επιτρέπουν καλύτερα την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών. Όπως άλλωστε αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2 του πρώτου μέρους (§2.4.2), τελικά οι διατυπώσεις για την «ενεργό» τάση ομοιάζουν περισσότερο σε καταστατικές εξισώσεις παρά ορισμούς μίας μοναδικής ενεργού τάσης. Πράγματι αν αναζητηθεί η τιμή της μεταβολής της ενεργού τάσης των Kohgo, et al. (1993a & 1993b), τότε προκύπτει η Εξ. 18.61, όπου η παράμετρος  $\chi$  βρίσκεται σε αντιστοιχία με την παράμετρο που εισήχθη από τον Bishop (1959) στην προσπάθειά του να εισάγει την έννοια της ενεργού τάσης για μη κορεσμένα εδάφη (§2.4.2 και Εξ. 2.22) και δίνεται από τις Εξ. 18.62 & 18.63.

$$d\sigma' = d\sigma - du_a + \chi \cdot ds \quad (18.61)$$

$$\chi = 1, s \leq s_e \quad (18.62)$$

$$\chi = \alpha_e \cdot (s_c - s_e) / (s^* + \alpha_e)^2 \quad (18.63)$$

Για την εξέλιξη των καμπυλών  $e - \log p'$  υπέθεσαν γραμμικότητα και για τις καμπύλες  $s^* - e$  ότι υφίσταται υπερβολική σχέση μεταξύ τους. Επί τη βάση αυτών των συσχετίσεων κατέληξαν στις Εξ. 18.64 έως 18.68, όπου  $\lambda^*$  και  $\Gamma^*$  είναι ο δείκτης συμπίεσης και ο ειδικός όγκος υπό ενεργό μύζηση  $s^*$ ,  $\lambda$  και  $\Gamma$  ο δείκτης συμπίεσης και ο ειδικός όγκος στον πλήρη κορεσμό,  $y$ ,  $e_0$  ο λόγος κενών σε μία τάση αναφοράς υπό μηδενική ενεργό μύζηση, και  $\alpha_s$  και  $n_s$  είναι εμπειρικές παράμετροι εξαρτώμενες από την φύση του υλικού.

$$e = -\lambda^* \cdot \log p' + \Gamma^* \quad (18.64)$$

$$\lambda^* = \lambda / (1 + y) \quad (18.65)$$

$$\Gamma^* = (\Gamma + e_o^o \cdot y) / (1 + y) \quad (18.66)$$

$$y = \left( \frac{s^*}{a_s} \right)^n \quad (18.67)$$

$$p' = \sigma'_{ii} / 3 \quad (18.68)$$

Σε ό,τι αφορά την τάση διαρροής  $P_c$  αυτή καθορίζεται από την Εξ. 18.69 με τις παραμέτρους  $A^*$  και  $B^*$  να ορίζονται από τις Εξ. 18.70 και 18.71, και η τομή της επιφάνειας διαρροής με το επίπεδο  $s = \text{σταθ.} \neq 0$  να ορίζεται από την Εξ. 18.72. Το προσομοίωμα υιοθετεί συσχετισμένο νόμο ροής, δηλ. η συνάρτηση πλαστικού δυναμικού  $\psi_1$  ταυτίζεται με την συνάρτηση της επιφάνειας διαρροής ( $\psi_1 = f_1$ ).

$$P_c = \exp\{(B^* + \varepsilon_v^p) / A^*\} \quad (18.69)$$

$$A^* = (\lambda^* - \kappa) / \{2.3 \cdot (1 + e_o)\} \quad (18.70)$$

$$B^* = \frac{\lambda_o^* - \kappa}{2.3 \cdot (1 + e_o)} \cdot \ln(p'_o) - \frac{\Gamma_o^* - \Gamma^*}{1 + e_o} \quad (18.71)$$

$$f_1 = M^2 \cdot (p' - P_o)^2 + q^2 - (M \cdot P_o)^2 = 0, P_o = P_o/2 \quad (18.72)$$

Η σημασία του προσομοιώματος των Kohgo, et al. (1993a & 1993b) έγκειται στα εξής σημεία:

- Καταρχάς απλοποίησαν την ανάγκη συσχέτισης του  $\kappa$  με το  $\kappa_s$  στο BBM με τον ορισμό της «ενεργού» μύζησης, η οποία είναι μόνο η περίσσεια της μύζησης μετά την ονομαστική πίεση διεύθυνσης αέρα  $s_e$ . Η απλοποίηση αυτή ενσωματώνει την παραδοχή ότι εφόσον ισχύει  $s \leq s_e$ , τότε η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους καθορίζεται από την αρχή των ενεργών τάσεων και η πίεση πόρων είναι απλώς αρνητική.
- Η εισαγωγή της «ενεργού» μύζησης με τον τρόπο που αυτή ορίστηκε εξαλείφει και την ανάγκη ύπαρξης της επιφάνειας διαρροής  $s = s_o$  του BBM, με αποτέλεσμα σε αυτό το προσομοίωμα κάθε μεταβολή της «ενεργού» μύζησης να προκαλεί κράτυνση μέσω της μεταβολής του λόγου κενών που εισάγει πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση.
- Εισηγάγαν την έννοια της παύσης της μείωσης του λόγου κενών (και κατά συνέπεια του ειδικού όγκου) με την αύξηση της μύζησης μέχρι σταθεροποίησής του, και άρα της ύπαρξης ενός ορίου στην δυνατότητα κράτυνσης του προσομοιώματος λόγω μεταβολών της μύζησης.

### 18.3.5 Wheeler & Sivakumar (1995) - Wheeler (1996) - Wheeler & Sivakumar (2000) - Sivakumar & Doran (2000)

Οι Wheeler & Sivakumar (1995) πραγματοποίησαν δοκιμές τριαξονικής φόρτισης υπό ελεγχόμενη μύζηση σε δοκίμια καολίνη συμπυκνωμένου σε χαμηλές πυκνότητες για να είναι εμφανείς μεγάλες μεταβολές όγκου που θα επέτρεπαν την ξεκάθαρη αποτύπωση της επιρροής της μύζησης στο υλικό για τιμές της μεταξύ 0 και 500 kPa που μπορούσαν να ελεγχθούν με την μέθοδο μετατόπισης άξονα. Η κυψέλη της συσκευής τριαξονικής φόρτισης ήταν διπλού τοιχώματος και ελέγχου πίεσης κυψέλης (Wheeler, 1988) για την μέγιστη δυνατή ακρίβεια μέτρησης των ογκομετρικών μεταβολών (βλ. Κεφάλαια 5 και 6 του πρώτου μέρους).

Το προσομοίωμά τους είναι διατυπωμένο σε παραμέτρους όμοιες με εκείνες του BBM με την προσθήκη μίας ακόμα, του ειδικού όγκου νερού  $v_w$  (specific water volume), ο οποίος εκφράζει τον όγκο του νερού και των στερεών ανά μονάδα όγκου των στερεών και εκφράζεται από την Εξ. 18.73.

$$v_w = 1 + S_r \cdot e = 1 + w \cdot G_s \quad (18.73)$$

Οι Wheeler & Sivakumar (1995) αλλά και ο Wheeler (1996) επεσήμαναν την σκοπιμότητα εισαγωγής μίας τέτοιας παραμέτρου. Προσομοιώματα διατυπωμένα μόνο σε όρους p-q-s-v μπορούν να προσομοιώσουν με επιτυχία τις ογκομετρικές και διεκτροπικές παραμορφώσεις που οφείλονται σε οποιαδήποτε τασική διαδρομή και ιστορία τασικών διαδρομών όπως εκφράζεται από τις μεταβολές στα εντατικά μεγέθη p-q-s που συμβαίνουν σε μη κορεσμένα εδάφη στα οποία ασκούνται *εξωτερικά επιβαλλόμενες* μεταβολές της τάσης και της μύζησης. Τα προσομοιώματα αυτά ωστόσο είναι ελλιπή υπό την έννοια ότι δεν περιλαμβάνουν καθόλου πληροφορία για την μεταβολή του ποσοστού υγρασίας και του βαθμού κορεσμού με την μύζηση και τις ογκομετρικές μεταβολές. Έτσι δεν μπορούν να συνδυαστούν με προσομοιώματα της υπόγειας ροής σε μη κορεσμένα εδάφη και άρα να ενσωματωθούν σε κώδικες πεπερασμένων στοιχείων που θα μπορούν να επιλύσουν προβλήματα στα οποία συμβαίνουν ταυτόχρονα μεταβολές τάσεων-παραμορφώσεων και ροής (συζευγμένες μάλιστα μεταξύ τους)<sup>9</sup>. Κυρίως

<sup>9</sup> Βλ. π.χ. Thomas & He (1998) οι οποίοι ενσωμάτωσαν το BBM σε έναν κώδικα πεπερασμένων στοιχείων στον οποίο ενσωμάτωσαν και εξισώσεις για την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού προκειμένου να μπορούν να επιλυθούν προβλήματα τάσεων-παραμορφώσεων συζευγμένα με προβλήματα μεταβολής του βαθμού κορεσμού ως αποτέλεσμα ροής. Ομοίως οι Vaunat, et al. (2000) ενσωμάτωσαν ένα προσομοίωμα για την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού στο BBM και εισήγαγαν και οι ίδιοι τον ειδικό όγκο νερού.



όμως δεν μπορούν να προσομοιώσουν τις μεταβολές που συμβαίνουν στην μύζηση ως αποτέλεσμα οριακών συνθηκών, π.χ. την μεταβολή της μύζησης που συμβαίνει κατά την διάρκεια αστράγγιστων δοκιμών ως αποτέλεσμα της μεταβολής του βαθμού κορεσμού που οφείλεται στην μεταβολή του ολικού όγκου υπό σταθερό ποσοστό υγρασίας. Αυτό έχει γίνει μέσω της εισαγωγής μίας μονοσήμαντης συσχέτισης του ποσοστού υγρασίας ή του βαθμού κορεσμού με την μύζηση (λαμβάνοντας υπόψη και την επιρροή της τάσης). Η επιλογή όμως του ποσοστού υγρασίας δεν είναι δόκιμη λόγω της μεταβολής του με πρόκληση πλαστικών ογκομετρικών μεταβολών και για τα πλήρως κορεσμένα εδάφη αλλά κυρίως λόγω της εξάρτησής του από την εμφάνιση διαστολικότητας ή συστολικότητας και στα πλήρως και στα μη κορεσμένα εδάφη (αντίστοιχα προβλήματα εμφανίζονται και με τον βαθμό κορεσμού).

Ο ειδικός όγκος νερού  $v_w$  από την άλλη πλευρά παρουσιάζεται πιο χρήσιμος από το ποσοστό υγρασίας ή τον βαθμό κορεσμού. Καταρχάς με την αύξηση του βαθμού κορεσμού (μείωση της μύζησης) τείνει στον ειδικό όγκο, οπότε ένα καταστατικό προσομοίωμα διατυπωμένο στον υπερχώρο  $p-q-s-v-v_w$  περιορίζεται στον χώρο  $p-q-v$  όταν το εδαφικό υλικό γίνει πλήρως κορεσμένο. Επίσης μεταβολές του  $v_w$  συνδέονται απευθείας με την εισαγωγή ή εξαγωγή ποσότητας ύδατος σε δεδομένο όγκο εδαφικού υλικού. Αυτό αποτελεί πολύ μεγάλο πλεονέκτημα αφενός για την παρακολούθηση των μεταβολών του ειδικού όγκου νερού κατά την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών, και αφετέρου για την ενσωμάτωση ενός τέτοιου ελαστοπλαστικού προσομοιώματος σε έναν κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που θα μπορεί να επιλύει ταυτόχρονα προβλήματα τάσεων-παραμορφώσεων και ροής-στερεοποίησης σε μη κορεσμένα εδάφη.

Σε ό,τι αφορά τις διατυπώσεις του προσομοιώματος, και από τις δοκιμές των Wheeler & Sivakumar (1995) προέκυψαν καμπύλες ισοτροπικής μύζησης υπό σταθερή μύζηση  $s$  ανάλογες εκείνων των Alonso, et al. (1990), κατά μήκος των οποίων ο ειδικός όγκος μεταβαλλόταν κατά τις προβλέψεις των Εξ. 18.7 και 18.8. Οι βασικές διαφοροποιήσεις του προσομοιώματος των Wheeler & Sivakumar (1995) συνοψίζονται στο Σχ. 18.21.

Στο Σχ. 18.21α παρουσιάζεται η μορφή της επιφάνειας διαρροής στο επίπεδο  $p-q$  για σταθερή μύζηση  $s$  και στο Σχ. 18.21β η μορφή της καμπύλης ισοτροπικής συμπίεσης και η προβολή της γραμμής κρίσιμης κατάστασης για την μύζηση  $s$ . Κάθε σημείο το οποίο βρίσκεται πάνω στην επιφάνεια διαρροής A-Γ-B στο Σχ. 18.21α προβάλλεται και πάνω στην καμπύλη διόγκωσης υπό σταθερή μύζηση  $s$  A-Γ-B που φαίνεται στο επίπεδο  $v-p$  στο Σχ. 18.23β. Η επιφάνεια διαρροής

λοιπόν στο επίπεδο  $p$ - $q$  πρέπει να διέρχεται από το σημείο διαρροής επί της καμπύλης ισοτροπικής συμπίεσης  $A$  και την τομή της ελαστικής περιοχής με την γραμμή κρίσιμης κατάστασης (ΓΚΚ) για την δεδομένη μύζηση. Θεωρώντας τότε ότι ο δείκτης  $\kappa$  είναι ανεξάρτητος της μύζησης, η τιμή της τάσης διαρροής για την μύζηση  $s$ ,  $p_o$ , δίνεται από την Εξ. 18.74. Αντίστοιχα η τάση  $p_x$  στην τομή της επιφάνειας διαρροής με την ΓΚΚ δίνεται από την Εξ. 18.75. Εφόσον έχουν καθοριστεί οι δύο αυτές τιμές της τάσης, πρέπει να επιλεγθεί ένα γεωμετρικό σχήμα που να συνδέει τα σημεία  $[p = p_o, q = 0, s]$  και  $[p = p_x, q = M(s) \cdot p_x + \mu(s), s]$ . Η συνηθέστερη και μάλλον απλούστερη επιλογή είναι μία έλλειψη με τον μεγάλο άξονά της διατεταγμένο επί του άξονα της τάσης  $p$  και τον μικρό άξονά της παράλληλα με τον άξονα της διεκτροπικής τάσης  $q$ , έτσι ώστε να διέρχεται από το σημείο  $B$  (σε ακριβή αντιστοιχία με το  $BBM$  και κατά συνέπεια με το *Modified Cam Clay*). Από το Σχ. 18.21α προκύπτει ότι ο λόγος των αξόνων της υιοθετηθείσας έλλειψης  $M^*$  θα δίνεται από την Εξ. 18.76 και το τμήμα της έλλειψης που διέρχεται από τα σημεία  $A$  και  $B$  από την Εξ. 18.77. Στην κρίσιμη κατάσταση δε, η διεκτροπική τάση δίνεται από την Εξ. 18.78 και ο ειδικός όγκος από την Εξ. 18.79. Όπως παρατηρείται, η διατύπωση αυτή αναγνωρίζει την δυνατότητα μεταβολής της κλίσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης με την μύζηση.

$$\frac{p_o}{p} = \exp \left( \frac{N(s) - \lambda(s) \cdot \ln \frac{p}{p_{at}} - \nu}{\lambda(s) - \kappa} \right) \quad (18.74)$$

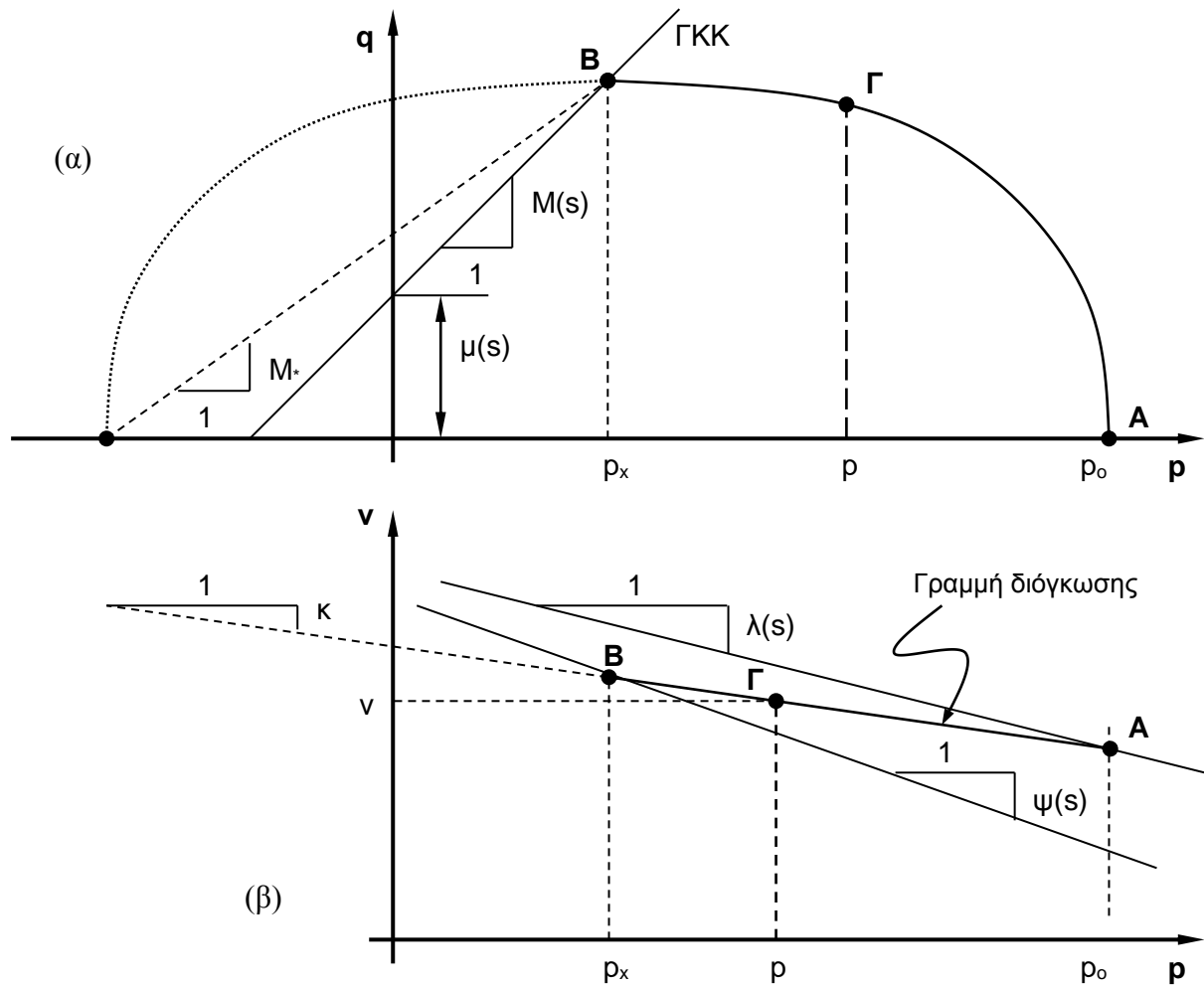
$$\frac{p_x}{p} = \exp \left( \frac{\Gamma(s) - \psi(s) \cdot \ln \frac{p}{p_{at}} - \nu}{\psi(s) - \kappa} \right) \quad (18.75)$$

$$M_* = \frac{M(s) \cdot p_x + \mu(s)}{p_o - p_x} \quad (18.76)$$

$$q^2 = M_*^2 \cdot (p_o - p) \cdot (p + p_o - 2 \cdot p_x) \quad (18.77)$$

$$q = M(s) \cdot p_x + \mu(s) \quad (18.78)$$

$$\nu = \Gamma(s) - \psi(s) \cdot \ln(p_x/p_{at}) \quad (18.79)$$



**Σχήμα 18.21.** α) Η τομή της επιφάνειας διαρροής με επίπεδο σταθερής μύζησης  $s$  (τάση  $p$  σε γραμμική κλίμακα), και β) η καμπύλη ιστροπικής συμπίεσης και η προβολή της γραμμής κρίσιμης κατάστασης για την ίδια μύζηση  $s$  στο επίπεδο  $v$ - $p$  (τάση  $p$  σε λογαριθμική κλίμακα) –σχήμα από τους Wheeler & Sivakumar (1995). Η γραμμή διόγκωσης  $A$ - $B$  έχει προεκταθεί εκτός σχήματος απλώς για να μπορεί να δειχθεί η κλίση της  $\kappa$ .

Σε ό,τι αφορά τον ειδικό όγκο νερού, όρισαν αρχικά τον λόγο κενών ως προς τον αέρα  $e_a$  (air void ratio) ως τον λόγο του όγκου του αέρα ανά μονάδα όγκου των στερεών. Ο λόγος κενών ως προς τον αέρα προτάθηκε ότι είναι συνάρτηση της μύζησης και της τάσης διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους κατά τις προβλέψεις της Εξ. 18.80, όπου  $A(s)$  και  $a(s)$  είναι παράμετροι εξαρτώμενες από την μύζηση. Δεδομένου ότι εξ ορισμού ο ειδικός όγκος νερού είναι  $v - e_a$ , τότε προκύπτει εύκολα η Εξ. 18.81 από την οποία προκύπτει ότι και ο ειδικός όγκος νερού είναι

συνάρτηση της μύζησης και της τάσης διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους. Στον Wheeler (1996) μπορεί να βρεθεί η πλήρης ανάπτυξη των καταστατικών εξισώσεων της μεταβολής του ειδικού όγκου νερού κατ' αναλογία με τον ειδικό όγκο. Η πλήρης παρουσίασή τους ξεφεύγει από τον σκοπό που εξυπηρετεί η παρουσίαση στο κεφάλαιο αυτό. Επισημαίνεται μόνο η πρόβλεψη της μεταβολής της μύζησης κατά την διάρκεια δοκιμών σταθερού ποσοστού υγρασίας, γενικά (Εξ. 18.82) και στο τμήμα τασικών διαδρομών που παραμένουν εντός της ελαστικής περιοχής.

$$e_a = A(s) - \alpha(s) \cdot \ln[p_o(0)/p_{at}] \quad (18.80)$$

$$v_w = v - A(s) + \alpha(s) \cdot \ln[p_o(0)/p_{at}] \quad (18.81)$$

$$ds = \frac{- \left\{ \kappa \cdot \frac{dp}{p} + [\lambda(0) - \kappa - \alpha(s)] \cdot \frac{dp_o(0)}{p_o(0)} \right\}}{\left\{ \frac{\kappa_s}{s + p_{at}} + \frac{d(A(s))}{ds} - \frac{d(a(s))}{ds} \cdot \ln \left[ \frac{p_o(0)}{p_{at}} \right] \right\}} \quad (18.82)$$

$$ds = \frac{- \kappa \cdot dp}{p \cdot \left\{ \frac{\kappa_s}{s + p_{at}} + \frac{d(A(s))}{ds} - \frac{d(a(s))}{ds} \cdot \ln \left[ \frac{p_o(0)}{p_{at}} \right] \right\}} \quad (18.83)$$

Οι Sivakumar & Doran (2000) χρησιμοποίησαν τις διατυπώσεις των Wheeler & Sivakumar (1995) και του Wheeler (1996) προσπαθώντας να επιδείξουν μία ενοποιημένη, συνεχώς παραγωγίσιμη τομή της τριδιάστατης επιφάνειας διαρροής στον χώρο p-q-s με το επίπεδο p-s, για την οποία επέδειξαν και τα πειραματικά αποτελέσματα που ενισχύουν την ύπαρξή της.

Οι Wheeler & Sivakumar (2000) χρησιμοποίησαν τις διατυπώσεις των Wheeler & Sivakumar (1995) και του Wheeler (1996) καθώς και τα νεότερα πειραματικά αποτελέσματα των Sivakumar & Wheeler (2000) για να προσπαθήσουν να δημιουργήσουν ένα περιγραφικό προσομοίωμα με τομή της τριδιάστατης επιφάνειας διαρροής στον χώρο p-q-s με επίπεδα  $s = \text{σταθ.}$  που είχε μορφή έλλειψης με τον μεγάλο της άξονα στραμμένο ως προς τον άξονα της τάσης p κατά τις προβλέψεις του καταστατικού προσομοιώματος για πλήρως κορεσμένα εδάφη του Wheeler (1997).

Τα πειραματικά αποτελέσματα και οι αναλυτικές διατυπώσεις και επεξεργασίες των Wheeler & Sivakumar (1995), Wheeler (1996), Wheeler & Sivakumar (2000) και Sivakumar & Doran (2000) συνέβαλαν στην εμπέδωση τεσσάρων βασικών χαρακτηριστικών:

- Την εξάρτηση της κλίσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο  $p$ - $q$  και στο επίπεδο  $v$ - $p$  από την μύζηση.
- Την αναγκαιότητα της εισαγωγής μίας παραμέτρου όπως ο ειδικός όγκος νερού όταν πρέπει να προσομοιωθούν μεταβολές υπό σταθερό ποσοστό υγρασίας («αστράγγιστες») ή/και να ενσωματωθεί το ελαστοπλαστικό καταστατικό προσομοίωμα σε έναν κώδικα πεπερασμένων στοιχείων που θα μπορεί να επιλύει ταυτόχρονα και προβλήματα τάσεων-παραμορφώσεων και προβλήματα ροής/στερεοποίησης.
- Την ύπαρξη μίας, ενοποιημένης, συνεχώς παραγωγίσιμης τομής της τριδιάστατης επιφάνειας διαρροής στον χώρο  $p$ - $q$ - $s$  με το επίπεδο  $p$ - $s$ , η οποία ενώνει τις καμπύλες  $LC$  και  $SI$ .
- Την δυνατότητα ενσωμάτωσης ελλειπτικών επιφανειών διαρροής σε επίπεδα σταθερής μύζησης στον χώρο  $p$ - $q$ - $s$ , των οποίων ο μεγάλος άξονας είναι στραμμένος ως προς τον άξονα της τάσης  $p$ .

### 18.3.6 Maâtouk, et al. (1995)

Οι Maâtouk, et al. (1995) προχώρησαν ακόμα περισσότερο από τους Toll (1990) και Wheeler (1991) τον διαχωρισμό της επιρροής της ολικής τάσης και της μύζησης στην εξέλιξη της διατμητικής αντοχής και μάλιστα κατέληξαν ότι οι δύο συντελεστές επιρροής είναι μάλλον συζευγμένοι μεταξύ τους, τουλάχιστον σε συγκεκριμένα εύρη τιμών της μύζησης και της ολικής τάσης. Από την άλλη πλευρά τα πειραματικά τους αποτελέσματα από δοκιμές σε μία αργιλώδη ιλύ τους οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι από μία τιμή της μύζησης και πάνω η μύζηση δεν έχει πλέον επιρροή στην διατμητική αντοχή του υλικού, ενώ από μία τιμή της μύζησης και πάνω επίσης (διαφορετική όμως από την προηγούμενη) καμπύλες ισοτροπικής συμπίεσης υπό την ίδια σταθερή μύζηση αλλά διαφορετικό αρχικό λόγο κενών τείνουν στην ίδια, μοναδική -για την συγκεκριμένη μύζηση- καμπύλη. Τέλος η μορφή της επιφάνειας διαρροής με επίπεδα  $s$ =σταθ.≠0 είναι μάλλον διαφορετική της έλλειψης του Modified Cam Clay (και άρα του BBM στο οποίο έχει υιοθετηθεί) και αποτελεί έλλειψη, με τον μεγάλο της άξονα στραμμένο ως προς τον άξονα της τάσης  $p$  (όπως αργότερα υιοθέτησαν και οι Wheeler & Sivakumar, 2000).

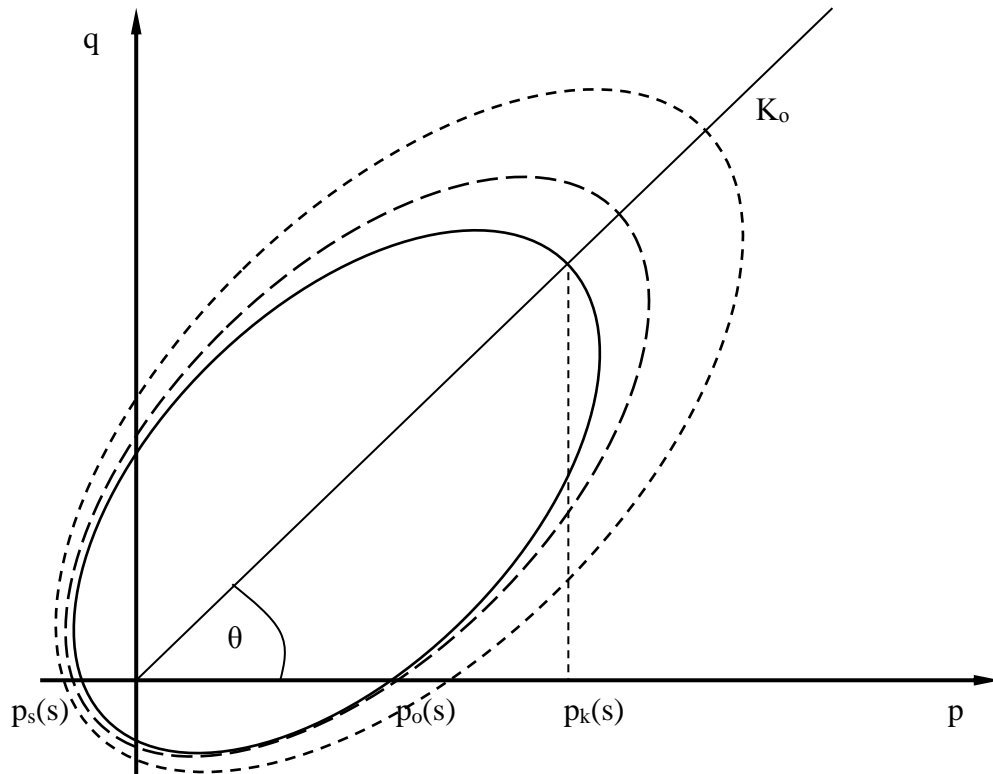
Η παύση της επιρροής της μύζησης επί της διατμητικής αντοχής ήταν μάλλον αναμενόμενη για την φύση του υλικού στο οποίο πραγματοποίησαν τις εργαστηριακές τους δοκιμές, και υποδεικνύει την ανάγκη για βελτίωση του BBM σε ό,τι αφορά αυτό το σημείο. Η τάση των καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση αλλά διαφορετικό αρχικό λόγο κενών να συγκλίνουν σε μία μοναδική καμπύλη μοιάζει να βρίσκεται περισσότερο σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης σε πλήρως κορεσμένα και μη αναζυμωμένα εδάφη που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 13. Το τρίτο και τελευταίο σημείο βρίσκεται μάλλον σε συμφωνία με τα περισσότερα νεότερα πειραματικά αποτελέσματα για πλήρως κορεσμένα εδάφη με δομή αλλά και μη κορεσμένα, όπως επιδείχθηκε και από τους Cui & Delage (1996).

### 18.3.7 Cui & Delage (1996)

Οι Cui & Delage (1996) πραγματοποίησαν δοκιμές τριαξονικής φόρτισης υπό ελεγχόμενη μύζηση εφαρμόζοντας την μέθοδο οσμωτικού ελέγχου της μύζησης (§4.3.3), η οποία τους επέτρεψε να ξεπεράσουν ορισμένα από τα προβλήματα της μεθόδου μετατόπισης άξονα (ειδικά όταν υιοθετείται στην δοκιμή τριαξονικής φόρτισης –βλ. Κεφάλαια 5 και 6) και να πραγματοποιήσουν δοκιμές υπό σταθερή μύζηση μέχρι και 1500 kPa. Από τις δοκιμές που πραγματοποίησαν σε στατικώς συμπτυκνωμένα δοκίμια μίας ιλύος προέκυψε από την μία πλευρά εξέλιξη του  $p_0(s)$  και του  $\lambda(s)$  με την μύζηση κατά τις προβλέψεις των Alonso, et al. (1990) –Εξ. 18.2 και 18.4 αντίστοιχα- αλλά μορφή της επιφάνειας διαρροής σε επίπεδα σταθερής μύζησης σαφώς στραμμένη ως προς τον άξονα της τάσης  $p$ .

Προκειμένου να προσομοιώσουν αυτήν την επιφάνεια διαρροής, οι Cui & Delage (1996) υιοθέτησαν την μέθοδο που είχαν αναπτύξει οι Leroueil, et al. (1985) για φυσικά μαλακά εδαφικά υλικά. Η γενική μορφή της εξίσωσης που περιγράφει στο επίπεδο  $p$ - $q$  μία έλλειψη στραμμένη κατά γωνία  $\theta$  ως προς τον άξονα της τάσης  $p$ , δίνεται από την Εξ. 18.84. Η εξίσωση αυτή απαιτεί 4 παραμέτρους, τις  $a$  και  $b$ , οι οποίες δίνουν αντίστοιχα το μήκος του μεγάλου και του μικρού άξονα της έλλειψης, και τις  $c$  και  $\theta$ , οι οποίες καθορίζουν αντίστοιχα την θέση και την στροφή της έλλειψης.

$$f = b^2 \cdot (p \cdot \cos\theta + q \cdot \sin\theta - c)^2 + a^2 \cdot (-p \cdot \sin\theta + q \cdot \cos\theta)^2 - a^2 \cdot b^2 = 0 \quad (18.84)$$



**Σχήμα 18.22.** Η τομή της επιφάνειας διαρροής με επίπεδο σταθερής μύζησης  $s$  (τάση  $p$  σε γραμμική κλίμακα) στο προσομοίωμα των Cui & Delage (1996).

Για να ενσωματώσουν και εξειδικεύσουν στο δικό τους προσομοίωμα την γενική μορφή της Εξ. 18.84 οι Cui & Delage (1996) επέλεξαν τις παραμέτρους  $p_o(s)$ ,  $p_k(s)$ ,  $p_s(s)$  και  $\theta$  όπως αυτές ορίζονται στο Σχ. 18.22. Οι παράμετροι αυτές ορίζονται ως εξής:

- $p_k(s)$  είναι η προβολή επί του άξονα της τάσης  $p$  του σημείου τομής της έλλειψης με την γραμμή  $q/p = K_0$ . Τα πειραματικά αποτελέσματα των Cui & Delage (1996) υποδεικνύουν ότι ο λόγος  $p_k(s)/p_o(s)$  είναι πρακτικά ανεξάρτητος της μύζησης  $s$ , οπότε η παράμετρος  $p_k(s)$  είναι συνάρτηση της τάσης διαρροής υπό μύζηση  $s$ ,  $p_o(s)$ , η οποία δίνεται από την Εξ. 18.2, και συνδέεται με την  $p_o(s)$  μέσω της Εξ. 18.85, όπου  $M_k$ :  $1.8 < M_k < 2.1$ .

$$p_k(s) = M_k \cdot p_o(s) \quad (18.85)$$

- $p_o(s)$  είναι η τάση διαρροής κατά μήκος καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση  $s$ , και εν προκειμένω ταυτίζεται με την τομή των στραμμένων ελλείψεων με τον άξονα της τάσης  $p$  (στις θετικές τιμές της τάσης).

- $p_s(s)$  είναι η άλλη τομή της έλλειψης με τον άξονα της τάσης  $p$  (στις αρνητικές τιμές της τάσης). Για την παράμετρο αυτή οι Cui & Delage (1996) δεν πρότειναν ούτε διερεύνησαν πειραματικά κάποια άλλη συσχέτιση από αυτή των Alonso, et al. (1990) –Εξ. 18.3.
- $\theta$  είναι η γωνία κλίσης της έλλειψης με τον άξονα της τάσης  $p$ .

Οι παράμετροι  $a$ ,  $b$  και  $c$  συνδέονται με τις παραμέτρους  $p_o(s)$ ,  $p_k(s)$  και  $p_s(s)$  μέσω των Εξ. 18.86 έως 18.88. Οι παράμετροι  $p_o(s)$ ,  $p_k(s)$  και  $p_s(s)$  μεταβάλλονται με την μύζηση όπως προαναφέρθηκε και η γωνία  $\theta$  συνδέεται εύκολα με τον συντελεστή  $K_o$  μέσω της Εξ. 18.89.

$$a = \frac{2 \cdot p_o(s) \cdot p_k(s) \cdot \cos^2 \theta + [(p_o(s) / p_s(s) - 1) \cdot p_k^2(s)]}{2 \cdot p_o(s) \cdot \cos^3 \theta + 2 \cdot [(p_o(s) / p_s(s) - 1) \cdot p_k(s) \cdot \cos \theta]} \quad (18.86)$$

$$c = \frac{[(p_o(s) / p_s(s) - 1) \cdot p_k^2(s)]}{2 \cdot p_o(s) \cdot \cos^3 \theta + 2 \cdot [(p_o(s) / p_s(s) - 1) \cdot p_k(s) \cdot \cos \theta]} \quad (18.87)$$

$$b^2 = \frac{\cot \theta \cdot \{p_o(s) \cdot p_s(s) \cdot \sin(2 \cdot \theta) + c \cdot \sin \theta \cdot [p_o(s) - p_s(s)]\}}{2 \cdot c - [p_o(s) - p_s(s)] \cdot \cos \theta} \quad (18.88)$$

$$\tan \theta = \frac{3 \cdot (1 - K_o)}{1 + 2 \cdot K_o} \quad (18.89)$$

Η συνεισφορά των Cui & Delage (1996) έγκειται αφενός στα υψηλής ποιότητας πειραματικά τους αποτελέσματα και αφετέρου στην επίδειξη του τρόπου ενσωμάτωσης σε προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη όπως το BBM, μίας επιφάνειας διαρροής η τομή της οποίας με επίπεδα σταθερής μύζησης περιγράφεται από μία στραμμένη έλλειψη. Οι συγγραφείς ενσωμάτωσαν την μεθοδολογία των Leroueil, et al. (1985) αλλά με τον ίδιο τρόπο θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλες μεθοδολογίες περιγραφής στραμμένων ελλείψεων που έχουν προταθεί έκτοτε, υπό την προϋπόθεση ότι υπακούουν στις προβλέψεις των Εξ. 18.2 έως 18.4, ή αντίστοιχων που περιγράφουν όμως τα ίδια βασικά φαινόμενα που παρατηρούνται σε μη κορεσμένα εδάφη (ειδικά για την Εξ. 18.3 βλ. Κεφάλαιο 19). Αυτό έγινε και από τους Stropelit, et al. (2008) και τους D' Onza, et al. (2010) οι οποίοι ενσωμάτωσαν την μέθοδο του καταστατικού προσομοιώματος των Wheeler, et al. (2003) για την εισαγωγή της στραμμένης έλλειψης.



### 18.3.8 Bolzon, et al. (1996)

Οι Bolzon, et al. (1996) επέκτειναν το καταστατικό προσομοίωμα των Pastor, et al. (1990) για μη κορεσμένα εδάφη. Οι κύριες διαφοροποιήσεις εστιάζονται:

- Στην υιοθέτηση της «ενεργού» τάσης  $p'$  κατά Bishop (1959) αλλά και της μύζησης για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς. Όπως και στην περίπτωση των Kohgo, et al. (1993a & 1993b), η χρήση του όρου «ενεργός» είναι μάλλον ατυχής αφού δεν περιγράφει μονοσήμαντα την μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών, καθώς ούτεως ή άλλως απαιτείται και η μύζηση προκειμένου να περιγραφούν τα χαρακτηριστικά κράτυνσης που αυτή εισάγει αλλά και τασικές διαδρομές που προκαλούν μεταβολές όγκου υπό σταθερή τάση λόγω μεταβολών της μύζησης.
- Στην υιοθέτηση μίας παραβολοειδούς επιφάνειας διαρροής σε επίπεδα σταθερής μύζησης στον χώρο  $p'$ - $q$ - $s$ , προερχόμενης από την διατύπωση του καταστατικού προσομοιώματος των Pastor, et al. (1990) για πλήρως κορεσμένα εδάφη.
- Στην εισαγωγή απευθείας και του βαθμού κορεσμού στα χαρακτηριστικά κράτυνσης του προσομοιώματος εκτός από την μύζηση.

### 18.3.9 Rampino, et al. (2000)

Οι Rampino, et al. (2000) υιοθέτησαν ουσιαστικά το προσομοίωμα των Wheeler & Sivakumar (1995) εισάγοντας τον νόμο ροής του καταστατικού προσομοιώματος του Jefferies (1993, 1997) για κοκκώδη εδαφικά υλικά (Εξ. 18.90) επεκτεταμένο για μη κορεσμένα εδάφη όπως προβλέπει η Εξ. 18.91, όπου  $M$  η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης,  $\eta$  ο λόγος  $q/(p-u_a)$ ,  $\mu(s)$  η τομή της προβολής της γραμμής κρίσιμης κατάστασης με τον άξονα της διεκτροπικής τάσης για μύζηση  $s$  (Wheeler & Sivakumar, 1995),  $N^*$  πρόσθετη παράμετρος του εδάφους ανεξάρτητη της πυκνότητάς του και εξαρτώμενη από τις ογκομετρικές παραμορφώσεις και  $D$  συνάρτηση της διαστολικότητας.

$$D = \frac{M - \eta}{1 - N^*} \quad (18.90)$$

$$D = \frac{M + \frac{\mu(s)}{p - u_a} - \eta}{1 - N^*} \quad (18.91)$$

### 18.3.10 Karube & Kawai (2001)

Οι Karube & Kawai (2001) προχώρησαν αρχικά σε μία ανασκόπηση της καταστατικής προσομοίωσης των μη κορεσμένων εδαφών μέχρι τον χρόνο της δημοσίευσής τους ξεχωρίζοντας την πρόταση του Bishop (1959) για μία ενεργό τάση για μη κορεσμένα εδάφη, το καταστατικό προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990) και το καταστατικό προσομοίωμα των Kohgo, et al. (1993a & 1993b). Μετά από αυτή την ανασκόπηση προχώρησαν στην διατύπωση του δικού τους προσομοιώματος επί τη βάσει της διάκρισης της υγρής φάσης των πόρων των εδαφικών υλικών και της ξεχωριστής συνεισφοράς της στην μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών. Υπενθυμίζεται –παρά το γεγονός ότι συχνά αποσιωπάται- ότι τα περισσότερα ελαστοπλαστικά καταστατικά προσομοιώματα –παρά την επιτυχία των προβλέψεών τους- είναι *φαινομενολογικά*. Προσομοιώνουν δηλ. μακροσκοπικά παρατηρούμενα φαινόμενα που ανάγονται σε μεταβολές μακροσκοπικών μέσων μεγεθών όπως η συνολική παραμόρφωση και τάση του εδάφους. Οι Gens & Alonso (1992) προσπάθησαν να προσομοιώσουν ξεχωριστά την επιρροή του νερού των πόρων μεταξύ συσσωματωμάτων αργιλικών πλακιδίων και του νερού εντός των συσσωματωμάτων. Οι Karube & Kawai (2001) προχώρησαν ένα βήμα πιο πέρα διακρίνοντας το νερό των μη κορεσμένων εδαφών σε τρία μέρη: α) νερό των πόρων (bulk water), β) νερό των μηνίσκων (meniscus water), και γ) προσροφημένο νερό (adsorbed water). Ο διαχωρισμός αυτός τους επέτρεψε να ορίσουν αρχικά τον βαθμό κορεσμού που αφορά σε κάθε μέρος του νερού και στην συνέχεια την συνεισφορά κάθε μέρους στην μύζηση του μη κορεσμένου εδάφους, καταλήγοντας στην πρόταση για ένα νέο εντατικό μέγεθος, την *ένταση μύζησης* (suction stress), η οποία *απαρτίζεται* από το μέγεθος που συνεισφέρει το νερό των πόρων και το νερό των μηνίσκων. Επεκτείνοντας ακόμα περισσότερο τον διαχωρισμό της επιρροής κάθε μέρους του νερού των μη κορεσμένων εδαφών διατύπωσαν το σύνολο των καταστατικών εξισώσεών τους ανάλογα με την επιρροή που εκτιμούσαν ότι έχει το κάθε μέρος σε κάθε παράμετρο, εισάγοντας τελικά και την μεταβολή του βαθμού κορεσμού με την μύζηση μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (προσομοιούμενης από την εξίσωση των Brooks & Corey, 1966, και για τον κλάδο παρθένας ξήρανσης και για κλάδους επανύγρυνσης ή ξήρανσης μετά από προηγούμενη ύγρυνση). Η επεξεργασία των Karube & Kawai (2001) δεν

αποτελεί κατ' ανάγκην μείζονα συνεισφορά στην καταστατική προσομοίωση των μή κορεσμένων εδαφών. Συνεισέφερε ωστόσο σημαντικά στην προσπάθεια κατανόησης του τρόπου που συμμετέχει στα παρατηρούμενα φαινόμενα κάθε μέρος του νερού των μή κορεσμένων εδαφών, επί τη βάσει του διαχωρισμού του οποίου κατέληξαν ότι μία πρόταση ενεργού τάσης όπως αυτή του Bishop (1959) δεν μπορεί να περιγράψει μονοσήμαντα τα παρατηρούμενα φαινόμενα χωρίς την χρήση και ενός μεγέθους όπως η μύζηση ή η ένταση μύζησης την οποία πρότειναν.

### 18.3.11 Loret & Khalili (2002)

Στον αντίποδα της κατάληξης των Karube & Kawai (2001), οι Loret & Khalili (2002) προχώρησαν στην διατύπωση ενός προσομοιώματος για μή κορεσμένα εδάφη σε όρους «ενεργού» τάσης της μορφής της «ενεργού» τάσης που πρότεινε ο Bishop (1959). Η διατύπωσή τους σε ό,τι αφορά την εκδήλωση κράτυνσης με την αύξηση της μύζησης δεν διαφέρει πρακτικά από αυτή του BBM, ενώ και εδώ, παρά την απόπειρα διατύπωσης μόνο σε όρους μίας «ενεργού» τάσης, η εισαγωγή της μύζησης αποδεικνύεται τελικά απαραίτητη για να προσομοιωθούν ογκομετρικές μεταβολές λόγω της μεταβολής της μύζησης υπό σταθερή τάση. Παρόλα αυτά η συνεισφορά των Loret & Khalili (2002) έγκειται σε μία πολύ χρήσιμη επισήμανση. Όπως αναφέρθηκε στην §18.2, στο BBM δεν έχει αποδοθεί φυσικό νόημα στην μύζηση διαρροής  $s_0$ , παρόλο που έκτοτε αυτή είτε συσχετίστηκε, είτε ταυτίστηκε με την πίεση διείσδυσης αέρα. Σε αυτήν την περίπτωση, οι Loret & Khalili (2002) επισημαίνουν σωστά ότι αύξηση της μύζησης μέχρι την μύζηση διαρροής, τέτοια ώστε το μέγεθός της να μην υπερβαίνει την διαφορά τάσης διαρροής και τρέχουσας τάσης δεν είναι δυνατόν να προκαλεί μεταβολές στην τάση διαρροής  $p_0(s)$ , αφού κατά τις προβλέψεις της αρχής των ενεργών τάσεων (η οποία ισχύει αν η μύζηση διαρροής είναι η πίεση διείσδυσης αέρα) η μεταβολή που προκαλεί είναι ελαστική μεταβολή της ενεργού τάσης, η οποία δεν δικαιολογεί την μεταβολή της τάσης διαρροής λόγω μύζησης.

### 18.3.12 Tang & Graham (2002)

Οι Tang & Graham (2002) εισήγαγαν πρακτικά την μεγαλύτερη καινοτομία στην καταστατική προσομοίωση των μή κορεσμένων εδαφών από την διατύπωση του πρώτου ολοκληρωμένου καταστατικού προσομοιώματος, του BBM. Η προσπάθειά τους εστιάστηκε στην ενοποίηση των

επιφανειών διαρροής LC και SI μέσω μίας συνεχώς παραγωγίσιμης καμπύλης. Οι Delage & Graham (1995) είχαν ήδη προτείνει ποιοτικά ότι η ασυνέχεια στην παράγωγο της τομής της επιφάνειας διαρροής στον χώρο p-q-s με το επίπεδο p-s στο BBM ήταν μάλλον αναμενόμενο να μην υπάρχει στην πραγματικότητα, αλλά η συνολική επιφάνεια διαρροής να είναι μία ενιαία, συνεχώς παραγωγίσιμη καμπύλη (LSY: Loading-Suction Yield). Επίσης οι Sivakumar & Doran (2000) παρουσίασαν πειραματικά αποτελέσματα που ενίσχυαν την πρόταση των Delage & Graham (1995), αλλά οι Tang & Graham (2002) προχώρησαν στην πρόταση της σχετικής μαθηματικής διατύπωσης, προσφέροντας μάλιστα και άλλα πειραματικά αποτελέσματα που να την ενισχύουν.

Αρχικά θεώρησαν την τομή της επιφάνειας διαρροής με το επίπεδο p-s σε μία αρχική κατάσταση (LSY<sub>1</sub>) και σε μία μεγεθυμένη λόγω πλαστικών ογκομετρικών μεταβολών (LSY<sub>2</sub>) όπως φαίνεται στο Σχ. 18.23. Η βασική παραδοχή των Tang & Graham (2002) έγκειται στο ότι ίδιου μεγέθους πλαστική ογκομετρική μεταβολή οδηγεί σε ίδιου μεγέθους μεγέθυνση της επιφάνειας διαρροής LSY<sub>1</sub> προς την επιφάνεια διαρροής LSY<sub>2</sub> ανεξαρτήτως της κλίσης της τασικής διαδρομής η<sub>s</sub> στο επίπεδο p-s (όπου η<sub>s</sub>=s/p). Δηλαδή, είτε η πλαστική ογκομετρική μεταβολή ε<sup>p</sup> συμβαίνει λόγω μίας μεταβολής της τάσης p υπό μηδενική μύζηση s κατά μήκος της διαδρομής a<sub>1</sub>-a<sub>2</sub>, είτε συμβαίνει λόγω μίας μεταβολής της μύζησης s υπό μηδενική τάση p κατά μήκος της διαδρομής c<sub>1</sub>-c<sub>2</sub>, είτε συμβαίνει λόγω μίας ταυτόχρονης μεταβολής της μύζησης s και της τάσης p κατά μήκος ακτινικής διαδρομής σταθερής κλίσης στο επίπεδο p-s, εφόσον η προκαλούμενη πλαστική ογκομετρική μεταβολή είναι η ίδια, ίδια θα είναι και η μεγέθυνση της επιφάνειας διαρροής. Επεκτείνοντας το προσομοίωμά τους στον χώρο p-q-s, όρισαν την έννοια της κλίσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης επί επιπέδων κάθετων στο επίπεδο p-s κατά μήκος ευθειών της μορφής s = η<sub>s</sub>·p. Προκειμένου για συνθήκες s=0 (πλήρως κορεσμένα εδάφη στην κρίσιμη κατάσταση) ισχύει η Εξ. 18.92, για συνθήκες p=0 η Εξ. 18.93 και γενικεύοντας για συνθήκες p≠0, s≠0 τέτοιες ώστε η<sub>s</sub> = s/p η Εξ. 18.94, όπου το εντατικό μέγεθος στον παρανομαστή ορίζεται από την Εξ. 18.95, και ονομάστηκε από τους Tang & Graham (2002) ισοδύναμη τάση p<sub>e</sub>. Οι κλίσεις M<sub>p</sub>, M<sub>s</sub> και M<sub>ps</sub> επιδεικνύονται στα Σχ. 18.24α, 18.24β και 18.24γ αντίστοιχα, ενώ στο Σχ. 18.25 επιδεικνύεται η μορφή της τριδιάστατης επιφάνειας διαρροής στον χώρο p-q-s. Όπως προκύπτει από το Σχ. 18.24α, η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης για πλήρως κορεσμένα εδάφη είναι σταθερή. Στο Σχ. 18.24β φαίνεται ότι ξεκινά από μία σταθερή τιμή πρακτικά ίση με την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης για πλήρως κορεσμένα εδάφη και μειώνεται με την μύζηση s τείνοντας προς μία σταθερή τιμή –σε συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα θα μπορούσε ακόμα και να μειώνεται. Τέλος στο Σχ. 18.24γ φαίνεται ότι η κλίση

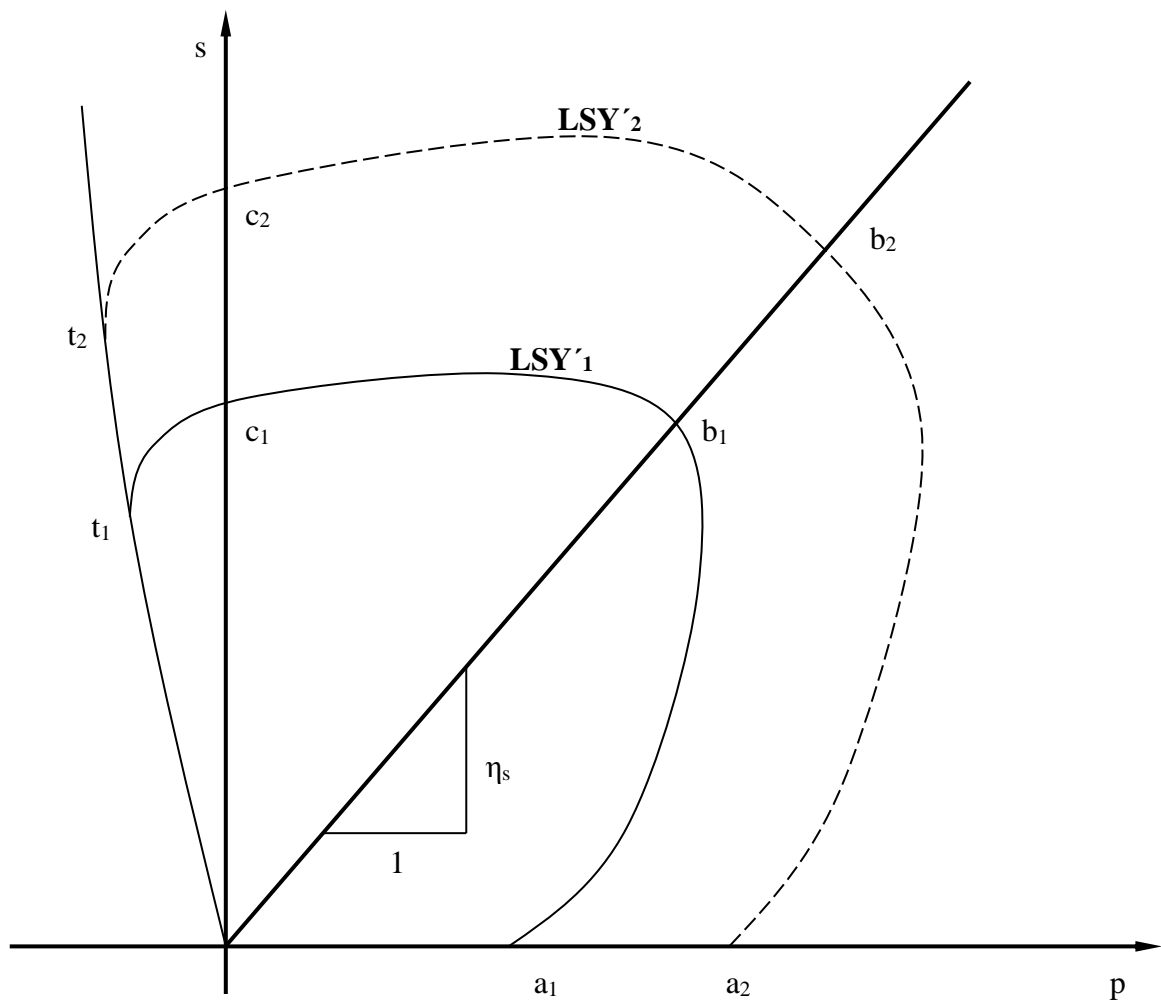
της γραμμής κρίσιμης κατάστασης σε επίπεδα κάθετα στο επίπεδο  $p$ - $s$  και διερχόμενα από την γραμμή  $s = \eta_s \cdot p$  μειώνεται και εκείνη με την αύξηση της ισοδύναμης τάσης  $p_e$  (αλλά λιγότερο από όσο η κλίση  $M_s$ ) προκειμένου να ικανοποιήσει τις δύο οριακές συνθήκες για  $s=0$  και  $p=0$ .

$$M_p = q / p, s = 0 \quad (18.92)$$

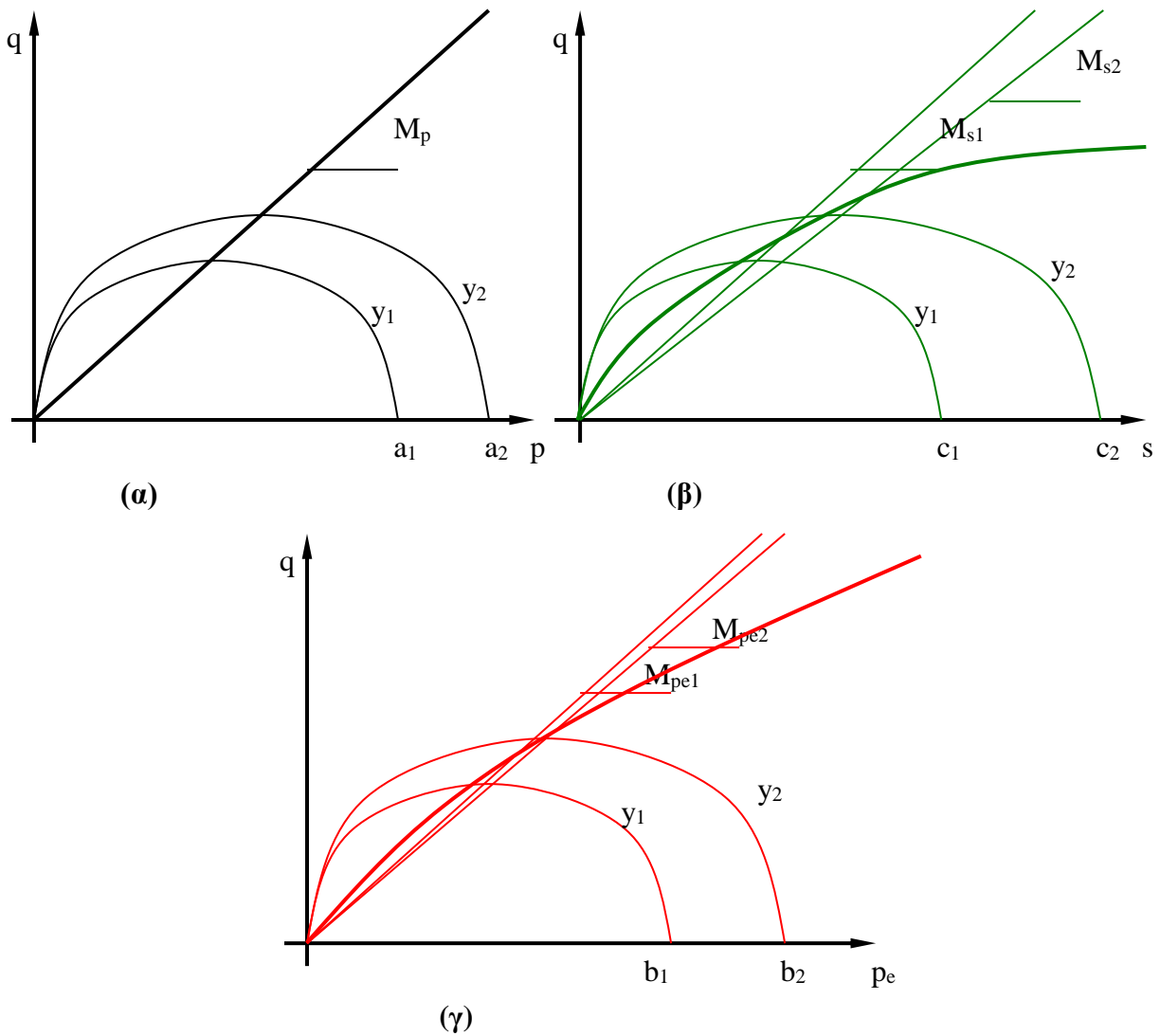
$$M_s = q / s, p = 0 \quad (18.93)$$

$$M_{ps} = \frac{q}{\sqrt{s^2 + p^2}} \quad (18.94)$$

$$p_e = \sqrt{s^2 + p^2} \quad (18.95)$$



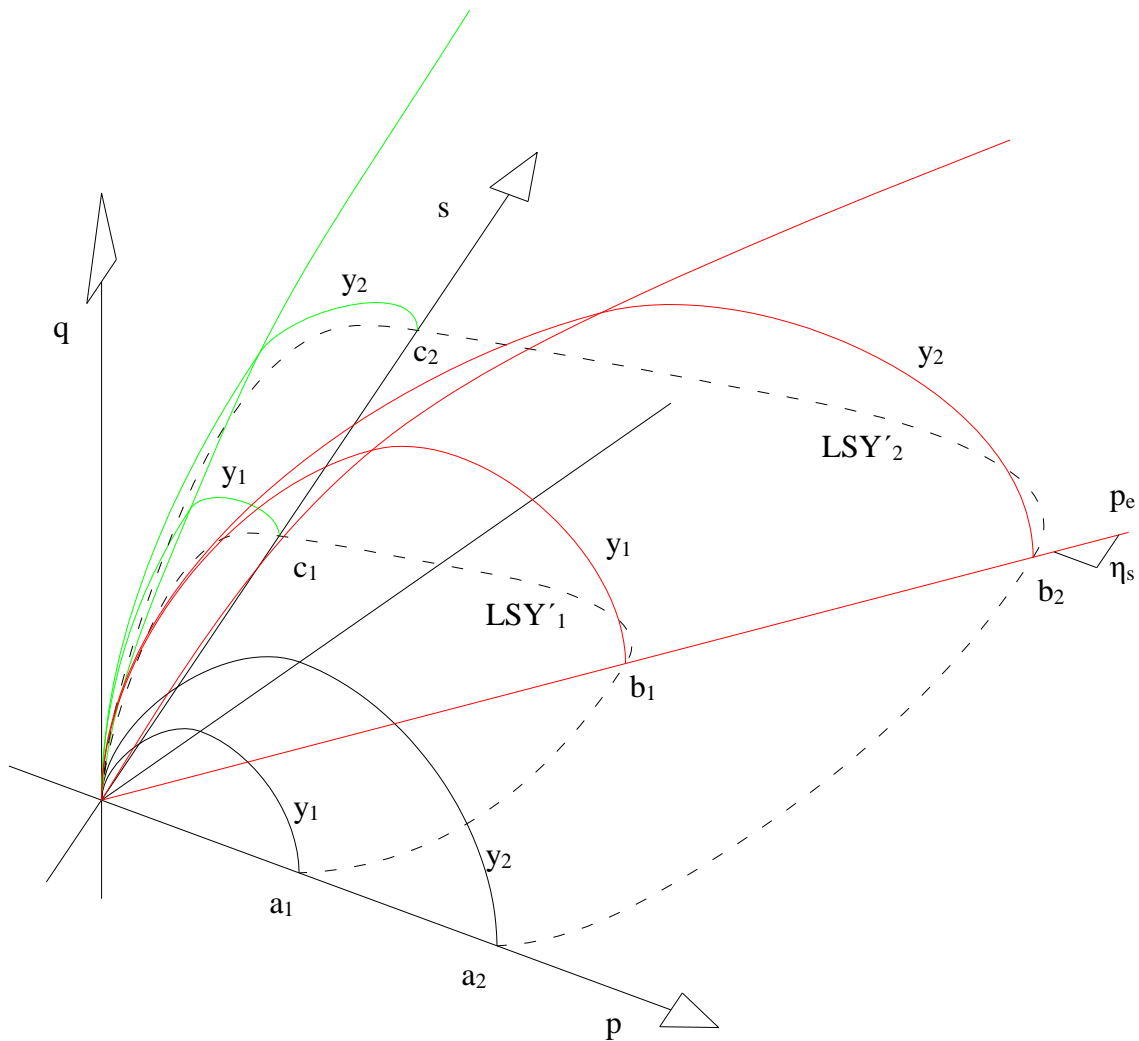
**Σχήμα 18.23.** Η τομή της επιφάνειας διαρροής με το επίπεδο  $p$ - $s$  στο προσομοίωμα των Tang & Graham (2002).



**Σχήμα 18.24.** Τομές της επιφάνειας διαρροής του προσομοιώματος των Tang & Graham (2002) α) με το επίπεδο  $s = 0$ , β) με το επίπεδο  $p = 0$ , και γ) με το επίπεδο  $s = \eta_s \cdot p$ .

Η ισοδύναμη τάση  $p_e$  παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Κατά την γνώμη του γράφοντος αποτελεί την καλύτερη μέχρι σήμερα πρόταση για μία πραγματικά «ενεργό» τάση για μη κορεσμένα εδάφη (παρόλο που οι Tang & Graham, 2002, δεν την πρότειναν ως τέτοια).

- Καταρχάς συνδέει χωρίς την παρεμβολή κατασταστικών παραμέτρων τις συνιστώσες της  $p$  και  $s$  με την ενεργό τάση.
- Αποτελεί διανυσματικό μέγεθος με μέτρο  $|p_e|$  και κλίση στο επίπεδο  $p$ - $s$ ,  $\eta_s$ ,  $\{|p_e|, \eta_s\}$ .
- Όπως επέδειξαν οι Tang & Graham (2002) σε όρους αυτού του μεγέθους μπορεί να οριστεί μονοσήμαντα μία επιφάνεια διαρροής, η οποία εξαρτάται και κατά το μέγεθος και κατά την



**Σχήμα 18.25.** Η επιφάνεια διαρροής του προσομοιώματος των Tang & Graham (2002) στον χώρο p-q-s.

μεταβολή της λόγω ογκομετρικών πλαστικών παραμορφώσεων μονοσήμαντα από την εξέλιξη της ισοδύναμης αυτής τάσης.

- Διαφορετικές τιμές των επιμέρους πιέσεων  $u_a$  και  $u_w$ , δεν επηρεάζουν την τιμή της εφόσον καταλήγουν στο ίδιο αποτέλεσμα για την μύζηση  $s$ .
- Διαφορετικές τιμές των επιμέρους πιέσεων  $p$ ,  $u_a$  και  $u_w$ , δεν επηρεάζουν την τιμή της εφόσον καταλήγουν στο ίδιο αποτέλεσμα για την μύζηση  $s$  και την ίδια κλίση του διανύσματος  $p_e$  (γι' αυτό τονίστηκε η διανυσματική φύση του μεγέθους αυτού).
- Προκειμένου να αναλογιστεί κανείς την παράμετρο αυτή ως ενεργό τάση, πρέπει να προσθέσει επιπλέον όρους. Για παράδειγμα στα πλήρως κορεσμένα εδάφη η ενεργός τάση

είναι ενεργός παρόλο που σε όρους καταστατικής προσομοίωσης διαχωρίζουμε τις συνιστώσες της σε ισοτροπική  $p'$  και διεκτροπική  $q$ , αναγνωρίζοντας ταυτόχρονα και την παρουσία μιας τρίτης μεταβλητής (του ειδικού όγκου) η μεταβολή της οποίας όταν οδηγεί σε πλαστικές παραμορφώσεις προκαλεί μεταβολή της επιφάνειας διαρροής που ορίζεται στο επίπεδο  $p'-q$  και στον χώρο  $p'-q-v$ . Αντίστοιχα λοιπόν η τάση  $p_e$  αποτελεί την ενεργό ισοτροπική συνιστώσα του τανυστή των τάσεων με την διεκτροπική συνιστώσα να εκφράζεται πάντα από το  $q$  και να διαχωρίζεται η ίδια σε δύο επιμέρους συνιστώσες αν είναι επιθυμητό, την μέση τάση  $p$  και την μύζηση  $s$ , ενώ εδώ υπάρχουν δύο ακόμα μεταβλητές, ο ειδικός όγκος  $v$  και μία ακόμα που μπορεί να εκφράσει τις μεταβολές όγκου μόνο της υγρής φάσης όπως ο ειδικός όγκος νερού  $v_w$  των Wheeler & Sivakumar (1995) –ή εναλλακτικά το ίδιο το ποσοστό υγρασίας ή ο βαθμός κορεσμού. Κατά προέκταση της αποδοχής ενός γεωμετρικού σχήματος που περιγράφει την επιφάνεια διαρροής στο επίπεδο  $p'-q$  και στον χώρο  $p'-q-v$  στα πλήρως κορεσμένα εδάφη, στην περίπτωση των μη κορεσμένων εδαφών πρέπει να επιλεγθεί ένα γεωμετρικό σχήμα στα επίπεδα  $p_e-q$  και στον χώρο  $p_e-q-v-v_w$ , με την πρόσθετη απαίτηση αποδοχής ενός γεωμετρικού σχήματος για την τομή της επιφάνειας διαρροής με το επίπεδο  $p-s$ .

Σε κάθε περίπτωση το καταστατικό προσομοίωμα των Tang & Graham (2002) αποτελεί μία πραγματική καινοτομία στον χώρο της καταστατικής προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και η ισοδύναμη τάση που προτάθηκε στα πλαίσιά του παρέχει την ευκαιρία να χρησιμοποιηθεί ως πραγματική ενεργός τάση στα μη κορεσμένα εδάφη, όταν περαιτέρω εργαστηριακά αποτελέσματα επιτρέψουν την καλύτερη επιβεβαίωση των ιδεών των Tang & Graham (2002).

### 18.3.13 Georgiadis, et al. (2003)

Οι Georgiadis, et al. (2003) παρουσίασαν ένα καταστατικό προσομοίωμα το οποίο χρησιμοποίησαν για να μελετήσουν την επιρροή του μερικού κορεσμού στην συμπεριφορά των πασσάλων. Το προσομοίωμά τους είναι διατυπωμένο στον χώρο  $J-p-\theta-s_{eq}$ , όπου  $p$  η μέση ολική τάση,  $\theta$  η γωνία του Lode,  $s_{eq}$  η ισοδύναμη μύζηση που ισούται με την διαφορά της μύζησης από την πίεση διείδυσης αέρα, και  $J$  η γενικευμένη διεκτροπική τάση όπως ορίζεται στην Εξ. 18.96, αλλά κατά τα άλλα υιοθετεί τις βασικές διατυπώσεις του BBM. Οι βασικές διαφοροποιήσεις του προσομοιώματος έγκεινται στην ικανότητα προσομοίωσης διαφορετικών γεωμετρικών



σχημάτων για την περιγραφή της τομής της επιφάνειας διαρροής με επίπεδα σταθερής ισοδύναμης μύζησης και της επιφάνειας πλαστικού δυναμικού, καθώς και την τροποποίηση της Εξ. 18.2 για την εξέλιξη της τάσης διαρροής  $p_o(s)$  και την τροποποίηση της τιμής της παραμέτρου αύξησης της εφελκυστικής αντοχής  $k$ . Για την εξέλιξη της τάσης διαρροής  $p_o(s)$  υιοθετήθηκε η Εξ. 18.2 του BBM για χαμηλές τιμές της τάσης και τροποποιήθηκε για τις υψηλές. Οι Georgiadis, et al. (2003) υιοθέτησαν εναλλακτικά της Εξ. 18.2 για υψηλές τιμές της τάσης σταθερό λόγο της τάσης διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους  $p_o^*$  προς την τάση αναφοράς  $p^c$ , μετατρέποντας την Εξ. 18.2 στην Εξ. 18.97, καθώς και δυνατότητα σταθεροποίησης του δείκτη συμπίεσης με την μύζηση, έτσι ώστε οι καμπύλες ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μη μηδενική μύζηση να μπορούν να παραμένουν παράλληλες της καμπύλης ισοτροπικής συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους<sup>10</sup>. Τέλος, προκειμένου να μπορούν να προβλέψουν σταθεροποίηση ή και ελαφρά μείωση της διατμητικής αντοχής έθεσαν την τιμή της παραμέτρου  $k$  για την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής ίση με τον βαθμό κορεσμού του εδαφικού υλικού. Οι επιλογές του προσομοιώματος των Georgiadis, et al. (2003) συζητώνται περαιτέρω και στο Κεφάλαιο 19.

$$J = \sqrt{\frac{(\sigma_x - p)^2 + (\sigma_y - p)^2 + (\sigma_z - p)^2 + 2 \cdot \tau_{xy}^2 + 2 \cdot \tau_{yz}^2 + 2 \cdot \tau_{zx}^2}{2}} \quad (18.96)$$

$$p_o = p_o^* \cdot \left( \frac{p_o^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0) - \lambda(s_w)}{\lambda(s_w) - \kappa}} \quad (18.97)$$

### 18.3.14 Wheeler, et al. (2003)

Οι Wheeler, et al. (2003) προσπάθησαν να βελτιώσουν τις προβλέψεις των καταστατικών προσομοιωμάτων σε ό,τι αφορά κυρίως τασικές διαδρομές μεταβολής της μύζησης υπό σταθερή τάση. Προκειμένου να το επιτύχουν αυτό χρησιμοποίησαν καταρχάς διαφορετικές παραμέτρους τάσης. Η πρώτη από αυτές ήταν η ενεργός τάση του Bishop για μή κορεσμένα εδάφη,  $\sigma_{ij}^*$ , όπως ορίστηκε από τους Bolzon, et al., 1996 (Εξ. 18.98, όπου  $\delta_{ij}$  το δέλτα του Cronecker) και η δεύτερη η τροποποιημένη μύζηση (modified suction),  $s^*$  (Εξ. 18.99), όπου  $n$  είναι το πορώδες.

<sup>10</sup> Υπενθυμίζεται η τροποποίηση των Josa, et al. (1992) στο BBM με μία εξίσωση για το  $\lambda(s)$  η οποία αρχικά επέτρεπε την απομάκρυνση των καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση από την καμπύλη ισοτροπικής συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου υλικού και στην συνέχεια την σύγκλιση των δύο προς αυτήν.

$$\sigma_{ij}^* = \sigma_{ij} - [S_r \cdot u_w + (1 - S_r) \cdot u_a] \cdot \delta_{ij} \quad (18.98)$$

$$s^* = n \cdot s = n \cdot (u_a - u_w) \quad (18.99)$$

Η αφορμή για την χρησιμοποίηση αυτών των παραμέτρων τάσης από τους Wheeler, et al. (2003) ήταν η διαπίστωση του Houlsby (1997) ότι η βηματική αύξηση του έργου που εισάγεται σε ένα μή κορεσμένο έδαφος δίδεται από την Εξ. 18.100, όπου  $d\epsilon_{ij}$  είναι ο τανυστής του βήματος της παραμόρφωσης και  $dS_r$  το βήμα μεταβολής του βαθμού κορεσμού. Από την μορφή της Εξ. 18.100 λοιπόν προκύπτει ότι αν είναι να χρησιμοποιηθεί η ενεργός τάση του Bishop ως η μία καταστατική παράμετρος, τότε είναι καταλληλότερη η απευθείας χρήση της τροποποιημένης μύζησης. Για την απλοποιημένη περίπτωση της εντατικής κατάστασης κατά την τριαξονική φόρτιση, η Εξ. 18.100 απλοποιείται στην Εξ. 18.101, όπου  $p^*$  είναι η μέση τάση Bishop (Εξ. 18.102),  $q$  η διεκτροπική τάση,  $d\epsilon_v$  το βήμα της ογκομετρικής παραμόρφωσης και  $d\epsilon_s$  το βήμα της διατμητικής παραμόρφωσης.

$$dW = \sigma_{ij}^* \cdot d\epsilon_{ij} - n \cdot (u_a - u_w) \cdot dS_r \quad (18.100)$$

$$dW = p^* \cdot d\epsilon_v + q \cdot d\epsilon_s - s^* \cdot dS_r \quad (18.101)$$

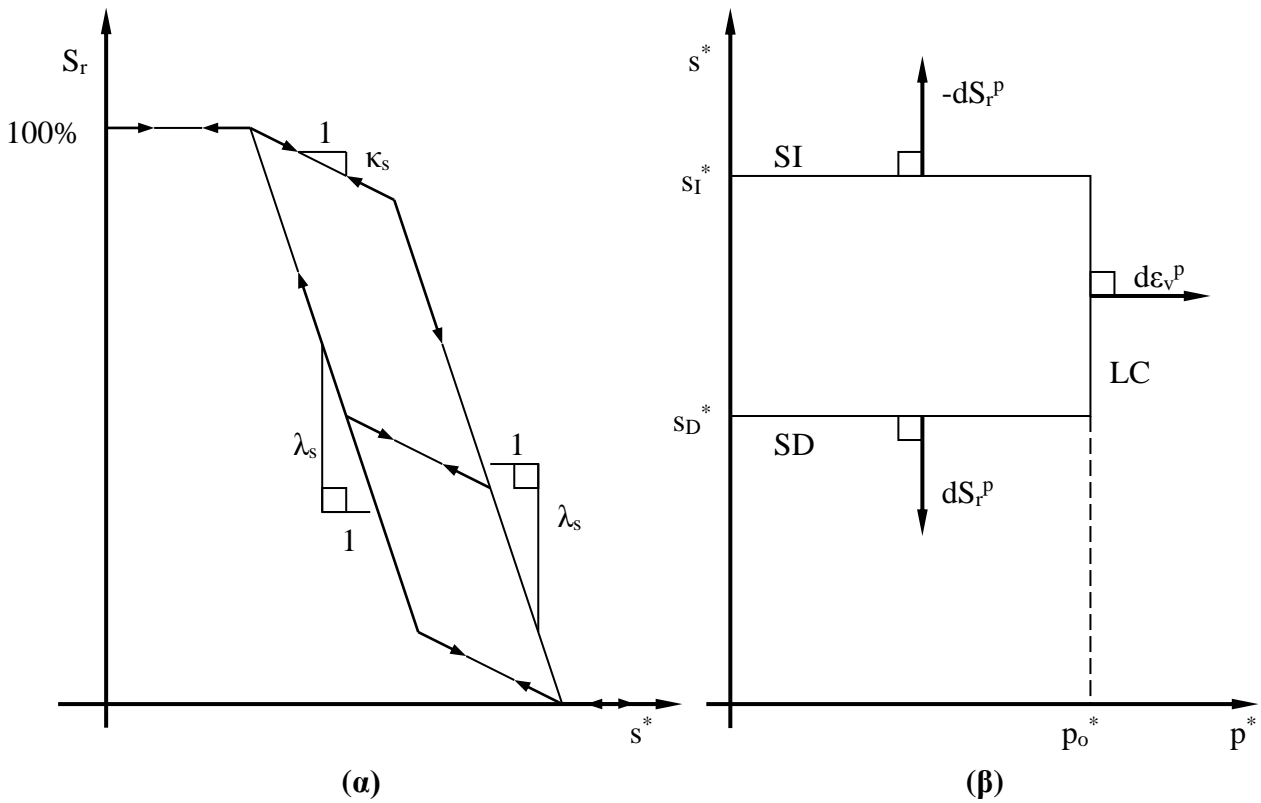
$$p^* = p - S_r \cdot u_w - (1 - S_r) \cdot u_a \quad (18.102)$$

Το πιο ενδιαφέρον σημείο στο προσομοίωμα των Wheeler, et al. (2003) εντοπίζεται στην προσπάθειά τους να ορίσουν ελαστικές και πλαστικές μεταβολές του βαθμού κορεσμού. Στο Σχ. 18.26α παρουσιάζεται η απεικόνιση της υστέρησης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (εκπεφρασμένης σε όρους τροποποιημένης μύζησης-βαθμού κορεσμού) όπως εισάγεται στο προσομοίωμα και στο Σχ. 18.26β η απεικόνιση της ελαστικής περιοχής στο επίπεδο μέσης τάσης Bishop-τροποποιημένης μύζησης,  $p^* - s^*$ . Στο Σχ. 18.26β οι τομές της επιφάνειας διαρροής με το επίπεδο  $p^* - s^*$  ορίζονται από τις Εξ. 18.103 έως 18.105, όπου  $s_I^*$  είναι η μύζηση διαρροής κατά την μείωση του βαθμού κορεσμού (αύξηση της μύζησης) και  $s_D^*$  είναι η μύζηση διαρροής κατά την αύξηση του βαθμού κορεσμού (μείωση της μύζησης), ενώ  $p_o^*$  είναι η τάση διαρροής.

$$p^* = p_o^* \quad (18.103)$$

$$s^* = s_I^* \quad (18.104)$$

$$s^* = s_D^* \quad (18.105)$$



**Σχήμα 18.26.** α) Το προσομοίωμα των Wheeler, et al. (2003) για την προσομοίωση της υστέρησης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, και β) η τομή της επιφάνειας διαρροής του προσομοιώματος των Wheeler, et al. (2003) με το επίπεδο  $p^*-s^*$ .

Η μεταβολή των ελαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων λόγω μεταβολών της τάσης  $p^*$  δίνεται από την Εξ. 18.106, όπου  $\kappa$  είναι ο δείκτης αποφόρτισης/επαναφόρτισης του πλήρως κορεσμένου εδάφους και  $\nu$  ο ειδικός όγκος, ενώ η μεταβολή των πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων από την Εξ. 18.107, όπου  $\lambda$  είναι ο δείκτης συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδάφους. Τέλος ο νόμος ροής για την καμπύλη LC δίνεται από την Εξ. 18.108.

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa \cdot dp^*}{\nu \cdot p^*} \tag{18.106}$$

$$d\varepsilon_v^p = \frac{(\lambda - \kappa) \cdot dp_o^*}{\nu \cdot p_o^*} \tag{18.107}$$

$$\frac{dS_r^p}{d\varepsilon_v^p} = 0 \tag{18.108}$$

Η ελαστική μεταβολή του βαθμού κορεσμού λόγω μεταβολών της τροποποιημένης μύζησης  $s^*$  δίνεται από την Εξ. 18.109, όπου  $\kappa_s$  είναι ο δείκτης ξήρανσης/ύγρυνσης επί ενδιάμεσου κλάδου (scanning curve) της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (όπως προσομοιώνεται στο Σχ. 18.26α), ενώ η πλαστική μεταβολή του βαθμού κορεσμού λόγω μεταβολών της τροποποιημένης μύζησης  $s^*$  από την Εξ. 18.110, όπου  $\lambda_s$  είναι ο δείκτης ξήρανσης/ύγρυνσης επί του κλάδου παρθένας ξήρανσης (virgin drying) του πλήρως κορεσμένου εδάφους και του κλάδου επανύγρυνσης από την πλήρη ξήρανση. Τέλος ο νόμος ροής για τις καμπύλες SI και SD δίνεται από την Εξ. 18.111.

$$dS_r^e = \frac{\kappa_s \cdot ds^*}{s^*} \quad (18.109)$$

$$dS_r^p = \frac{-(\lambda_s - \kappa_s) \cdot ds_I^*}{s_I^*} = \frac{-(\lambda_s - \kappa_s) \cdot ds_D^*}{s_D^*} \quad (18.110)$$

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{dS_r^p} = 0 \quad (18.111)$$

Όταν συμβαίνει διαρροή μόνο επί των καμπυλών SI και SD, η καμπύλη LC μεταβάλλεται κατά τις προβλέψεις της Εξ. 18.112 για την τάση διαρροής  $p_o^*$ . Αντίστοιχα, όταν συμβαίνει διαρροή επί της καμπύλης LC, οι καμπύλες SI και SD μεταβάλλονται κατά τις προβλέψεις της Εξ. 18.113 για τις τιμές της μύζησης διαρροής κατά την ξήρανση και την ύγρυνση,  $s_I^*$  και  $s_D^*$  αντίστοιχα. Οι παράμετροι  $k_1$  και  $k_2$  είναι παράμετροι σύζευξης των φαινομένων ξήρανσης-ύγρυνσης και φόρτισης-αποφόρτισης (για τις απαιτήσεις που πρέπει να πληρούν οι τιμές τους προκειμένου να έχει φυσικό νόημα η εξέλιξη των καμπυλών διαρροής λόγω μεταβολών που προκαλούν επιρροή της μίας στην άλλη βλ. Wheeler, et al., 2003).

$$\frac{dp_o^*}{p_o^*} = k_1 \cdot \frac{ds_I^*}{s_I^*} = k_1 \cdot \frac{ds_D^*}{s_D^*} \quad (18.112)$$

$$\frac{ds_I^*}{s_I^*} = \frac{ds_D^*}{s_D^*} = k_2 \cdot \frac{dp_o^*}{p_o^*} \quad (18.113)$$

Το προσομοίωμα των Wheeler, et al. (2003) επιχείρησε την επίτευξη καλύτερης προσομοίωσης των ογκομετρικών μεταβολών λόγω μεταβολών της μύζησης, εισάγοντας την υστέρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Η ίδια η εισαγωγή της υστέρησης με έναν απλό και

εύληπτο τρόπο αποτελεί σημαντική συνεισφορά στην εξέλιξη της καταστατικής προσομοίωσης αλλά από τους συγγραφείς διέφυγε μάλλον η απλούστευση των παραμέτρων τάσης. Η αφετηρία επιλογής τους από την βηματική αύξηση του έργου που εισάγεται στον στοιχειώδη αντιπροσωπευτικό όγκο ενός μη κορεσμένου εδάφους ήταν ορθή αλλά η επιλογή του συνδυασμού του πορώδους  $n$  με την μύζηση για τον ορισμό του νέου μεγέθους «τροποποιημένη μύζηση» ήταν μάλλον ατυχής (παρόλο που αργότερα χρησιμοποιήθηκε και από τους Sheng, et al., 2004, και τον Li, 2007a & 2007b), κύρια ως προς την πολυπλοκότητα του μεγέθους αυτού. Από τον ορισμό του προκύπτει εύκολα η τεράστια δυσκολία διατήρησής του σταθερού, αφού μεταβολές της μύζησης προκαλούν μεταβολές και του πορώδους, άρα δεν είναι δυνατός ο μονοσήμαντος έλεγχος αυτού του μεγέθους σε μία εργαστηριακή διάταξη, ενώ μεταβολές της τάσης υπό σταθερή μύζηση επίσης προκαλούν μεταβολές και του πορώδους, με αποτέλεσμα πάλι να μην μπορεί να διατηρηθεί σταθερή η τροποποιημένη μύζηση σε μία εργαστηριακή διάταξη. Αυτό το πρακτικό πρόβλημα θέτει εν αμφιβόλω την δυνατότητα υπολογισμού παραμέτρων και αφήνει ανοικτό το ενδεχόμενο εκτιμήσεων και παραδοχών που περισσότερο δυσκολεύουν παρά απλοποιούν την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών.

Από την άλλη πλευρά, όπως προκύπτει από την Εξ. 18.100 το πορώδες μπορεί να συνδυαστεί εύκολα με τον βαθμό κορεσμού (το γινόμενο των δύο μεγεθών δίνει το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας,  $\theta$ ) και να αφηθεί η μύζηση ως παράμετρος τάσης (επιλογή στην οποία οδηγήθηκαν οι Sheng, et al., 2008). Αυτή η μεταβολή αφενός απλοποιεί τουλάχιστον την μία από τις δύο παραμέτρους τάσης (διευκολύνοντας την εκτέλεση δοκιμών και τον προσδιορισμό παραμέτρων) και αφετέρου εισάγει και πλεονεκτήματα προσομοίωσης σε ό,τι αφορά την άλλη χρησιμοποιούμενη παράμετρο. Όπως προαναφέρθηκε, το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας αποτελεί ένα από τα φυσικά μεγέθη (μαζί με τον ειδικό όγκο νερού) που παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα σε όρους αριθμητικής προσομοίωσης αφού επιτρέπουν κατά την εισαγωγή του καταστατικού προσομοιώματος σε έναν κώδικα πεπερασμένων στοιχείων την ταυτόχρονη προσομοίωση και προβλημάτων τάσεων-παραμορφώσεων και προβλημάτων ροής. Η χρήση του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας θα επέλυε επίσης και το πρόβλημα στο προσομοίωμα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στο Σχ. 18.26α. Όπως προκύπτει εύκολα –και αναγνωρίζουν και οι Wheeler, et al. (2003)– η μη μηδενική τιμή του  $k_s$ , ειδικά όσο ο βαθμός κορεσμού τείνει στο 100%, αποτελεί μάλλον μειονέκτημα της προσομοίωσης. Αντίθετα εάν η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού εισαγόταν σε όρους ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης, ο αντίστοιχος δείκτης  $k_s$  θα ήταν μάλλον λογικό να μην έχει μηδενική τιμή

οδηγώντας σε μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού με τον ίδιο αριθμό παραμέτρων.

Τονίζεται επίσης η διαφορά των καμπυλών SI και SD στο προσομοίωμα αυτό από τις καμπύλες με την ίδια ονομασία στο προσομοίωμα των Alonso, et al. (1999). Οι καμπύλες με τον ίδιο συμβολισμό στα δύο προσομοιώματα έχουν οριστεί σε διαφορετικούς χώρους και κυρίως περιγράφουν διαφορετικά φαινόμενα.

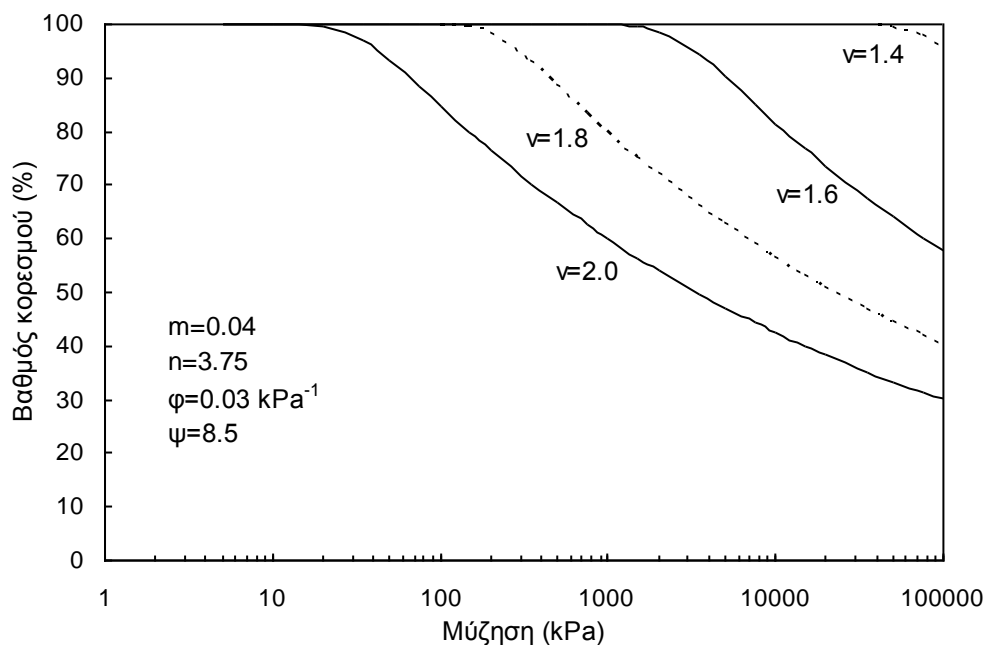
### 18.3.15 Gallipoli, et al. (2003a & 2003b)

Οι Gallipoli, et al. (2003a) κατέληξαν σε μια εξίσωση για την μεταβολή του βαθμού κορεσμού με την μύζηση, η οποία όμως λαμβάνει υπόψη της και την επιρροή του ειδικού όγκου  $v$  (Εξ. 18.114), όπου  $m$ ,  $n$ ,  $\phi$  και  $\psi$  αποτελούν παραμέτρους της εξίσωσης. Η Εξ. 18.114 τείνει σε μία απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης του van Genuchten (1980) όταν ο ειδικός όγκος γίνεται σταθερός. Στο Σχ. 18.27 παρουσιάζονται καμπύλες  $S_r$ -s για διάφορες τιμές του ειδικού όγκου θεωρούμενου σταθερού. Η εξίσωση προβλέπει με επιτυχία την αναμενόμενη αύξηση της πίεσης διεύδυσης αέρα με την μείωση του ειδικού όγκου (βλ. Κεφ. 4 του πρώτου μέρους). Στα Σχ. 18.28α, β, γ και δ παρουσιάζεται παραμετρική ανάλυση για τις παραμέτρους  $m$ ,  $n$ ,  $\phi$  και  $\psi$  της Εξ. 18.114 αντίστοιχα. Η παράμετρος  $m$  ελέγχει την καμπυλότητα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, η παράμετρος  $n$  την καμπυλότητα αλλά και την θέση ενός σημείου μετά την πίεση διεύδυσης αέρα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, η παράμετρος  $\phi$  την πίεση διεύδυσης αέρα (αποτελώντας πρακτικά το αντίστροφό της) και η παράμετρος  $\psi$  επίσης αλλά σε μικρότερο βαθμό.

$$S_r = \left\{ \frac{1}{1 + [\phi \cdot (v - 1)^{\psi} \cdot s]^n} \right\}^m \quad (18.114)$$

Όπως προκύπτει από τα Σχ. 18.27 και 18.28, η Εξ. 18.114 αποτελεί ένα αρκετά ισχυρό εργαλείο προσομοίωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού παραμορφώσιμων εδαφών στα οποία οι μεταβολές του ειδικού όγκου αναμένεται να έχουν σημαντική επιρροή σε μεγέθη όπως η πίεση διεύδυσης αέρα, ο ρυθμός απώλειας ύδατος και το παραμένον ποσοστό υγρασίας (ή ο παραμένον βαθμός κορεσμού). Έτσι η εξίσωση αυτή χρησιμοποιήθηκε από τους Gallipoli, et al.

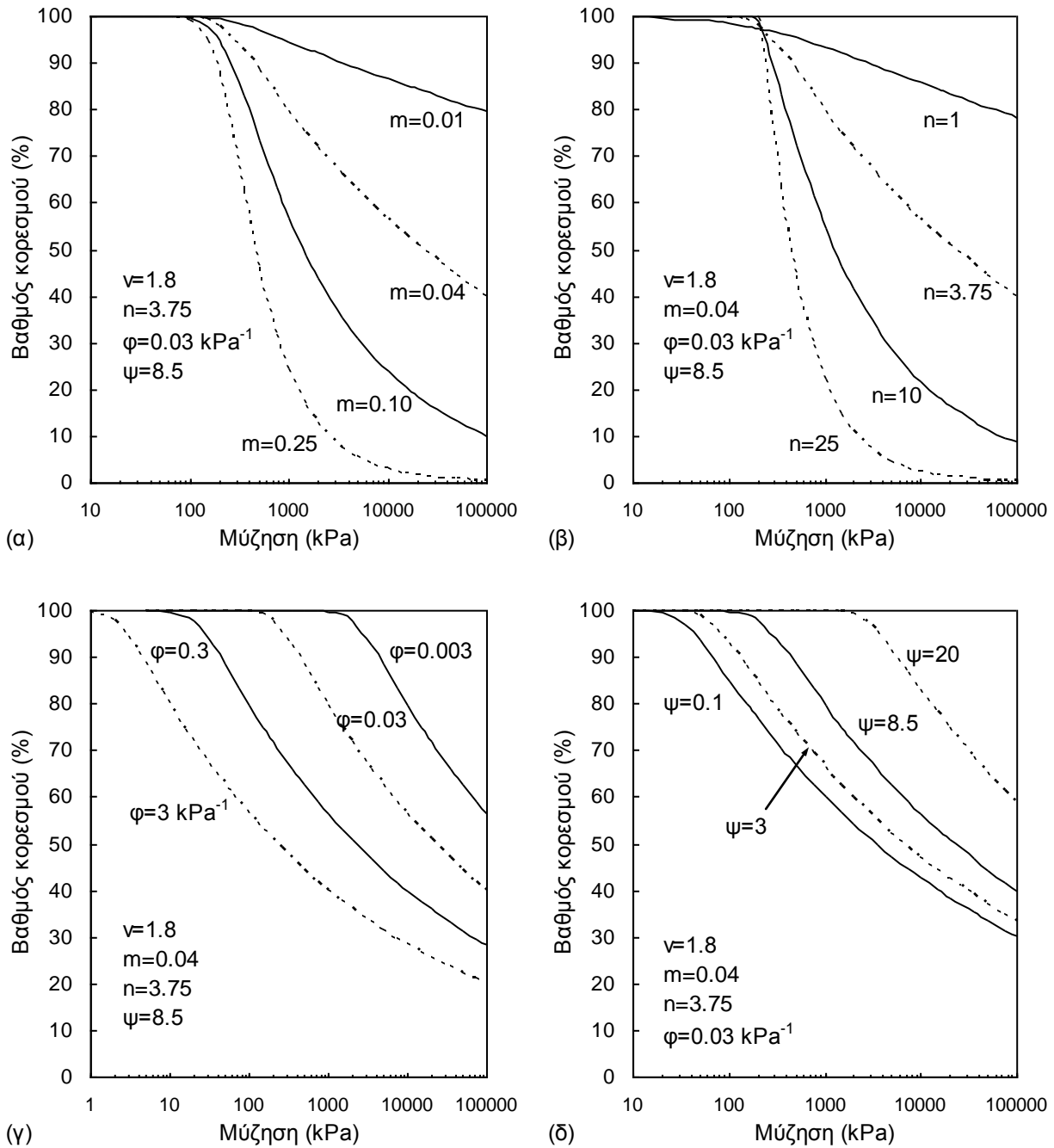
(2003b) κατά την μόρφωση ενός καταστατικού προσομοιώματος για μή κορεσμένα εδάφη σε ιστροπικές καταστάσεις στο οποίο εισήγαγαν μία παράμετρο,  $\xi$ , η οποία ρυθμίζει την επιρροή της δομής που εισάγουν στα μή κορεσμένα εδάφη κύκλοι ξήρανσης-ύγρανσης και από αυτήν εξαρτάται ο λόγος του λόγου κενών του ίδιου εδάφους όταν είναι μή κορεσμένο προς τον λόγο κενών του όταν είναι πλήρως κορεσμένο υπό την ίδια «ενεργό» τάση (τάση Bishop) στην οποία είναι διατυπωμένο το προσομοίωμα. Αυτού του τύπου η μεταβολή στην καταστατική προσομοίωση μεταβάλλει αρκετά την μορφή της εξέλιξης της τάσης διαρροής με την μύζηση σε σχέση με την Εξ. 18.2 του BBM.



**Σχήμα 18.27.** Προβλέψεις του βαθμού κορεσμού για διάφορες τιμές του ειδικού όγκου από την Εξ. 18.114 για σταθερές τιμές των παραμέτρων  $m$ ,  $n$ ,  $\phi$  και  $\psi$ .

### 18.3.16 Chiu & Ng (2003)

Οι Chiu & Ng (2003) διατύπωσαν ένα καταστατικό προσομοίωμα στις ίδιες παραμέτρους τάσης με το BBM στο οποίο προσπάθησαν να ενσωματώσουν την επιρροή της διαστολικότητας. Οι διαφορές του εντοπίζονται στην εισαγωγή μίας διαφορετικής επιφάνειας διαρροής στα επίπεδα  $p$ - $q$  και στην εισαγωγή ενός διορθωτικού παράγοντα επί της επιρροής της μύζησης στην



**Σχήμα 18.28.** Προβλέψεις του βαθμού κορεσμού υπό σταθερό ειδικό όγκο ( $\nu=1.8$ ) από την Εξ. 18.114 για διάφορες τιμές: α) της παραμέτρου  $m$ , β)  $n$ , γ)  $\phi$ , και δ)  $\psi$ .

μηχανική συμπεριφορά. Ο διορθωτικός παράγοντας έχει την μορφή της Εξ. 18.115, όπου  $S_{r0}$  είναι ο παραμένον βαθμός κορεσμού (διγραμμική μορφή). Ο παράγοντας αυτός δηλαδή εισάγει επιρροή της μύζησης μόνο όσο το μή κορεσμένο έδαφος βρίσκεται στις Περιοχές I και II της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (βλ. Κεφάλαιο 4 πρώτου μέρους) και δεν έχει



περιέλθει ακόμα σε κατάσταση που αντιστοιχεί στην Περιοχή ΙΙΙ μετά το παραμένον ποσοστό υγρασίας.

$$h(S_r) = 0, \text{ όταν } 0 \leq S_r \leq S_{r0}, h(S_r) = (S_r - S_{r0}) / (1 - S_{r0}), \text{ όταν } S_r > S_{r0} \quad (18.115)$$

Η εξίσωση που περιγράφει την επιφάνεια διαρροής στο επίπεδο p-q δίνεται από τις Εξ. 18.116 και 18.117. Η πρώτη αφορά στην διαρροή που συμβαίνει όταν επιβάλλεται διεκτροπική τάση (επιφάνεια  $f_s$ ) και η δεύτερη όταν επιβάλλεται ισοτροπική τάση κατά την ισοτροπική συμπίεση (επιφάνεια  $f_c$ ).

$$f_s = q - \eta_y \cdot \left[ p + \frac{\mu(s)}{M(s)} \right] \quad (18.116)$$

$$f_c = p - p_0(s) \quad (18.117)$$

Σε ό,τι αφορά την διαστολικότητα, οι Chiu & Ng (2003) χρησιμοποίησαν την εξίσωση για την διαστολικότητα που προτάθηκε από τους Li & Dafalias (2000) –Εξ. 18.118- και την τροποποίησαν για μή κορεσμένα εδάφη –Εξ. 18.119.

$$\frac{d\varepsilon_v^p}{d\varepsilon_q^p} = d_1 \cdot \left( e^{m \cdot \Psi} - \frac{\eta'}{M} \right) \quad (18.118)$$

$$d(s) = \frac{d\varepsilon_{v(s)}^p}{d\varepsilon_{q(s)}^p} = d_1(s) \cdot \left[ e^{m(s) \cdot \Psi(s)} - \frac{\eta}{M(s)} \right] \quad (18.119)$$

Στην Εξ. 18.118  $\Psi$  είναι η παράμετρος κατάστασης,  $M$  η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης, στο επίπεδο  $p'$ - $q$  των πλήρως κορεσμένων εδαφών,  $\eta'$  είναι ο τρέχων λόγος ενεργών τάσεων  $q/p'$  και  $d_1$  και  $m$  είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το υλικό. Η παράμετρος κατάστασης  $\Psi$  ορίζεται ως η διαφορά του τρέχοντος λόγου κενών από τον λόγο κενών στην κρίσιμη κατάσταση και είναι θετική όταν η τρέχουσα κατάσταση βρίσκεται πάνω από την προβολή της γραμμής κρίσιμης κατάστασης στο επίπεδο  $e$ -  $p'$  ( $\ln$ ) και αρνητική όταν βρίσκεται από κάτω. Επεκτείνοντας την Εξ. 18.118 για μή κορεσμένα εδάφη και καταλήγοντας στην Εξ. 18.119 όλες οι προηγούμενες παράμετροι αποτελούν πλέον συναρτήσεις της μύζησης και η παράμετρος κατάστασης  $\Psi(s)$  ορίζεται ως η διαφορά του λόγου κενών στην μύζηση  $s$  από τον λόγο κενών στην κρίσιμη κατάσταση για τον τρέχοντα συνδυασμό  $p$  και  $s$ .

Τέλος για την πρόβλεψη των μεταβολών της μύζησης υπό συνθήκες φόρτισης σταθερού ποσοστού υγρασίας, οι Chiu & Ng (2003) υιοθέτησαν την μέθοδο που πρότεινε ο Wheeler (1996) καταλήγοντας στην μεταβολή που προκαλείται στην μύζηση λαμβάνοντας υπόψη και τον διορθωτικό παράγοντα που εισήγαγαν οι ίδιοι.

### **18.3.17 Sheng, et al. (2004)**

Οι Sheng, et al. (2004) εισήγαγαν την επιρροή της υστέρησης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού επί κύκλων ξήρανσης-ύγρυνσης κατά τρόπο ανάλογο με αυτόν των Wheeler, et al. (2003) και εισήγαγαν την θερμοδυναμική θεωρία στις διατυπώσεις τους αναμορφώνοντάς τις ώστε να ικανοποιούν τα θερμοδυναμικά αξιώματα καταλήγοντας τελικά σε μία διατύπωση έτοιμη για εισαγωγή σε κώδικες πεπερασμένων στοιχείων.

### **18.3.18 Tamagnini (2004)**

Ο Tamagnini (2004) παρουσίασε ένα καταστατικό προσομοίωμα διατυπωμένο σε όρους «ενεργού» τάσης (γενικής μορφής Bishop) και μύζησης στο οποίο εισήγαγε την επιρροή της μεταβολής του βαθμού κορεσμού στην εξέλιξη της τάσης διαρροής κατά μήκος ισοτροπικών καμπυλών συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση. Η εισαγωγή της επιρροής του βαθμού κορεσμού στην εξέλιξη της τάσης διαρροής επετεύχθη μέσω της διάκρισης της κράτυνσης σε εκείνη που οφείλεται στην εμφάνιση πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων ανεξάρτητα με το από πού προέρχονται και εκείνη που οφείλεται στην μεταβολή του βαθμού κορεσμού. Στην συνέχεια χρησιμοποίησε τις εξισώσεις των Romero & Vaunat (2000) για την περιγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης, εισάγοντας και την υστέρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού όπως οι Wheeler, et al. (2003) αλλά με πιο ρεαλιστική μη γραμμικότητα της καμπύλης αυτής χάρη στην χρησιμοποιηθείσα εξίσωση. Υπενθυμίζεται ότι στους Wheeler, et al. (2003) η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού προσομοιώνεται ως μία τεθλασμένη γραμμή αποτελούμενη από ευθύγραμμα τμήματα που περιγράφουν κάθε περιοχή της καμπύλης αυτής (βλ. Κεφάλαιο 4 πρώτου μέρους διατριβής).

**18.3.19 Tarantino & Tombolato (2005)**

Οι Tarantino & Tombolato (2005) διατύπωσαν μία εξίσωση για την πρόβλεψη της διεκτροπικής τάσης μή κορεσμένων εδαφών στην κρίσιμη κατάσταση εναλλακτική αυτών των Alonso, et al. (1990) –Εξ. 18.1-, Toll (1990) –Εξ. 18.35- και Wheeler & Sivakumar (1995) –Εξ. 18.78. Η εξίσωση αυτή είναι η Εξ. 18.120, όπου  $M$  η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης,  $e_w$  ο λόγος νερού των κενών και  $e_{wm}$  είναι ο μικροδομικός λόγος νερού των κενών που διαχωρίζει την περιοχή κυριαρχίας στην συμπεριφορά του πορώδους μεταξύ συσσωματωμάτων και την περιοχή κυριαρχίας του πορώδους εντός των συσσωματωμάτων.

$$q = M \cdot \left( p + s \cdot \frac{e_w - e_{wm}}{e - e_{wm}} \right) \quad (18.120)$$

**18.3.20 Li (2007a & 2007b)**

Οι Sheng, et al. (2004) εισήγαγαν την απαίτηση τήρησης των θερμοδυναμικών αξιωμάτων. Ο Li (2007a) διατύπωσε ένα πλήρες καταστατικό προσομοίωμα για τον πλήρη τανυστή των τάσεων και των παραμορφώσεων ξεκινώντας από τις βασικές απαιτήσεις της θερμοδυναμικής, το οποίο στη συνέχεια εξειδίκευσε για την βασική εντατική κατάσταση που απαντάται σε συνθήκες τριαξονικής φόρτισης –Li, 2007b. Η θεωρητική πληρότητα και συνέπεια του συγκεκριμένου προσομοιώματος είναι πιθανόν οι κορυφαίες που μπορούν να αναζητηθούν στην βιβλιογραφία αλλά η δυνατότητα πρακτικής εφαρμογής του –και κυρίως πρακτικού προσδιορισμού των ζητούμενων παραμέτρων- ακόμα και στην απλοποιημένη διατύπωση για την εντατική κατάσταση κατά την τριαξονική φόρτιση είναι δύσκολη, στα όρια σχεδόν της εφαρμοσιμότητας.

**18.3.21 Thu, et al. (2007)**

Οι Thu, et al. (2007) διατύπωσαν ένα καταστατικό προσομοίωμα η γενική διατύπωση του οποίου μοιάζει με αυτήν του BBM αλλά η εξέλιξη των επιφανειών διαρροής καθορίζεται από την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού του υλικού.

Η εξέλιξη των καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση με την μύζηση (Σχ. 18.1α) και η περιγραφή των καμπυλών ξήρανσης (Σχ. 18.1β) έχουν υποτεθεί όμοιες με αυτές στο BBM περιγραφόμενες από τους ίδιους δείκτες  $\kappa$ ,  $\lambda(s)$ ,  $\kappa_s$  και  $\lambda_s$  με μόνη διαφορά ότι ο δείκτης αποφόρτισης/επαναφόρτισης  $\kappa$  κατά μήκος των καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης έχει υποτεθεί και αυτός εξαρτώμενος από την μύζηση  $\kappa(s)$ . Η μεταβολή αυτή οδηγεί στην διατύπωση της καμπύλης LC όπως φαίνεται στην Εξ. 18.121 όπου  $p_{at}$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση (υποκαθιστά την πίεση αναφοράς  $p^c$  στο BBM),  $p_c^*$  είναι η τάση διαρροής του πλήρως κορεσμένου εδάφους (όμοια με την  $p_o^*$  στο BBM) και  $p_c$  η τάση διαρροής επί καμπύλης ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση  $s$ .

$$[\lambda(s) - \kappa(s)] \cdot \ln\left(\frac{p_c}{p_{at}}\right) = [\lambda(0) - \kappa(0)] \cdot \ln\left(\frac{p_c^*}{p_{at}}\right) + \kappa_s \cdot \ln\left(\frac{s + p_{at}}{p_{at}}\right) + N(s) - N(0) \quad (18.121)$$

Για την μορφή της επιφάνειας διαρροής στο επίπεδο p-q διατήρησαν την ίδια γεωμετρική μορφή της έλλειψης με τον μεγάλο της άξονα κείμενο επί του άξονα της τάσης p όπως εκφράζεται από την Εξ. 18.1 με την εφελκυστική αντοχή  $p_s$  να δίνεται από την ίδια σχέση (Εξ. 18.3) και ο συντελεστής αύξησής της  $k$  να θεωρείται σταθερός όπως και στο BBM.

Σε ό,τι αφορά την εξέλιξη του δείκτη συμπίεσης με την μύζηση  $\lambda(s)$ , οι Thu, et al. (2007) πρότειναν την αντικατάσταση της Εξ. 18.4 από την Εξ. 18.122 η οποία ενσωματώνει απευθείας την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού στο προσομοίωμα. Στην Εξ. 18.122  $\Theta$  είναι το κανονικοποιημένο ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας  $-\Theta = (\theta_w - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ , όπου  $\theta_w$  το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας σε δεδομένη μύζηση,  $\theta_s$  είναι το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας κατά τον πλήρη κορεσμό και  $\theta_r$  το παραμένον ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας— και  $m_\lambda$  είναι παράμετρος του υλικού αντίστοιχη της παραμέτρου  $r$  στην Εξ. 18.4 και ελέγχει και αυτή τον λόγο της ελάχιστης τιμής του δείκτη συμπίεσης  $\lambda(s)$  προς την τιμή του για το πλήρως κορεσμένο έδαφος  $\lambda(0)$ . Αντίστοιχα με την Εξ. 18.122 για τον δείκτη συμπίεσης  $\lambda(s)$ , οι Thu, et al. (2007) πρότειναν τις Εξ. 18.123 και 18.124 για τον δείκτη αποφόρτισης/επαναφόρτισης και τον ειδικό όγκο στην τάση αναφοράς για μύζηση  $s$   $N(s)$ , όπου  $m_\kappa$  και  $m_N$  είναι παράμετροι αντίστοιχες της παραμέτρου  $m_\lambda$ .

$$\lambda(s) = \lambda(0) - \frac{1 - \Theta}{m_\lambda} \quad (18.122)$$

$$\kappa(s) = \kappa(0) - \frac{1 - \Theta}{m_{\kappa}} \quad (18.123)$$

$$N(s) = N(0) - \frac{1 - \Theta}{m_N} \quad (18.124)$$

Το προσομοίωμα των Thu, et al. (2007) αποτελεί μία μικρή μόνο τροποποίηση του BBM η οποία όμως επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη εισαγωγή της επιρροής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και γενικά επιτρέπει την καλύτερη προσέγγιση των καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση (χάρη στην μεταβολή και του δείκτη αποφόρτισης/επαναφόρτισης με την μύζηση) και την καλύτερη προσέγγιση της εξέλιξης του δείκτη συμπίεσης με την μύζηση  $\lambda(s)$  για ορισμένα εδαφικά υλικά χάρη στην υιοθέτηση της Εξ. 18.122 αντί για την Εξ. 18.4.

### 18.3.22 Sheng, et al. (2008)

Οι Sheng, et al. (2008) επιχείρησαν την ριζική αναμόρφωση της προσέγγισης της καταστατικής προσομοίωσης των μή κορεσμένων εδαφών αρχίζοντας την διατύπωση του προσομοιώματός τους από την προσπάθεια πρόβλεψης της συμπεριφοράς ενός αναζυμωμένου εδαφικού υλικού.

Εφόσον ένα υλικό είναι αναζυμωμένο<sup>11</sup>, ευρισκόμενο σε μηδενική τάση και μύζηση, τότε έχει μία αρχική πίεση διείσδυσης αέρα η οποία αντιστοιχεί σε αυτήν την κατάστασή του. Για τιμές της μύζησης μικρότερες από την πίεση διείσδυσης αέρα, ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων και κατά συνέπεια η ξήρανση υπό μηδενική τάση ισοδυναμεί πλήρως με ισόποση φόρτιση υπό μηδενική μύζηση. Ταυτόχρονα εφόσον πληρείται η συνθήκη ότι η μύζηση είναι μικρότερη της πίεσης διείσδυσης αέρα, τότε για να ικανοποιείται η αρχή των ενεργών τάσεων πρέπει μετά από κάθε φόρτιση και αποφόρτιση ή ξήρανση και ύγρανση η τάση ή η μύζηση διαρροής να ικανοποιεί τον συνδυασμό ολικής τάσης και μύζησης για να είναι μία και μοναδική η ενεργός τάση διαρροής. Αυτό εξηγείται στο Σχ. 18.29. Εάν το υλικό φορτιστεί μέχρι την τάση  $p_{y0}$ , τέτοια ώστε να είναι μικρότερη της πίεσης διείσδυσης αέρα  $s_{ae}$ , τότε μετά από αποφόρτισή του και ξήρανση από την τάση που θα βρεθεί, η διαρροή θα συμβεί κατά μήκος μίας γραμμής με κλίση  $45^\circ$  όπως φαίνεται στο Σχ. 18.29, αφού υποχρεωτικά για μύζηση  $s = p_{y0}$  θα συμβεί η διαρροή

<sup>11</sup> Πραγματικά αναζυμωμένο υλικό σε μορφή πολτού όπως τα υλικά που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 10 και παρουσιάστηκαν εργαστηριακές δοκιμές σε αυτά στο Κεφάλαιο 13.

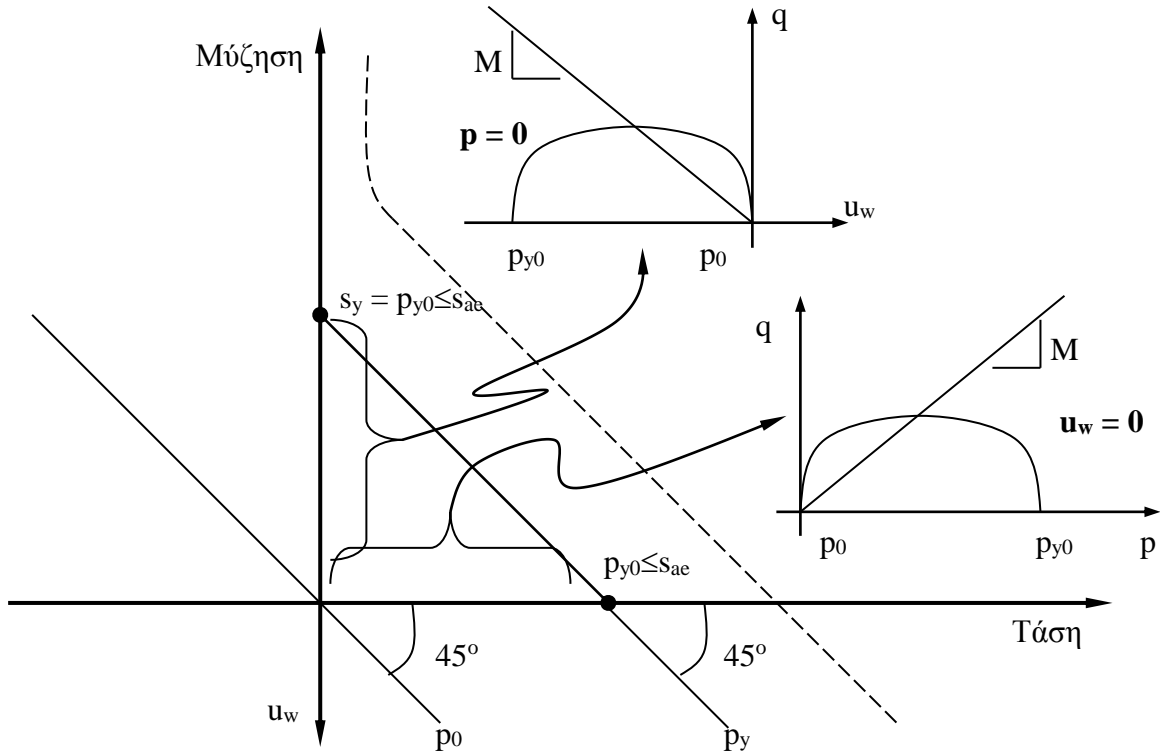
όταν  $p = 0$ , ενώ ενδιάμεσα πρέπει να ικανοποιείται πάντοτε η αρχή των ενεργών τάσεων ( $p+s=p_{y0}$ ). Εάν η μύζηση αυξηθεί ξεπερνώντας την πίεση διείσδυσης αέρα, τότε θα μειωθεί μεν ο ρυθμός των πλαστικών παραμορφώσεων αλλά δεν θα ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων και εάν ακολουθήσουν φορτίσεις υπό σταθερή μύζηση θα εμφανιστεί μία τάση διαρροής όπως αυτή που φαίνεται στο Σχ. 18.29. Στο Σχ.18.30 παρουσιάζεται η μορφή της εξέλιξης της μεταβολής του λόγου κενών με την αύξηση της μύζησης υπό μηδενική τάση που θεώρησαν οι Sheng, et al. (2008) –η οποία είναι όμοια με αυτή των Kohgo, et al. (1993a & 1993b) και προβλέπει πάνω από όλα σταθεροποίηση του λόγου κενών από μία τιμή της μύζησης και μετά. Για την περιγραφή της καμπύλης μεταβολής του λόγου κενών που παρουσιάζεται στο Σχ. 18.30 οι Sheng, et al. (2008) θεώρησαν ότι μέχρι την μύζηση που το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο  $s_{sa}$  ο δείκτης συμπίεσης που περιγράφει την καμπύλη ταυτίζεται με αυτόν κατά την μεταβολή του λόγου κενών του πλήρως κορεσμένου εδάφους λόγω φόρτισης  $\lambda_{vp}$  και μετά από αυτήν την μύζηση θεώρησαν τον συνεχώς μεταβαλλόμενο δείκτη συμπίεσης λόγω μύζησης  $\lambda_{vs}$ , για τον οποίο υπέθεσαν ότι δίνεται από την Εξ. 18.125. Αντίστοιχα για τον δείκτη αποφόρτισης/επαναφόρτισης λόγω μύζησης  $\kappa_{vs}$  υπέθεσαν ότι δίνεται από την Εξ. 18.126.

$$\lambda_{vs} = \begin{cases} \lambda_{vp} & s < s_{sa} \\ \lambda_{vp} \cdot \frac{s_{sa} + 1}{s + 1} & s \geq s_{sa} \end{cases} \quad (18.125)$$

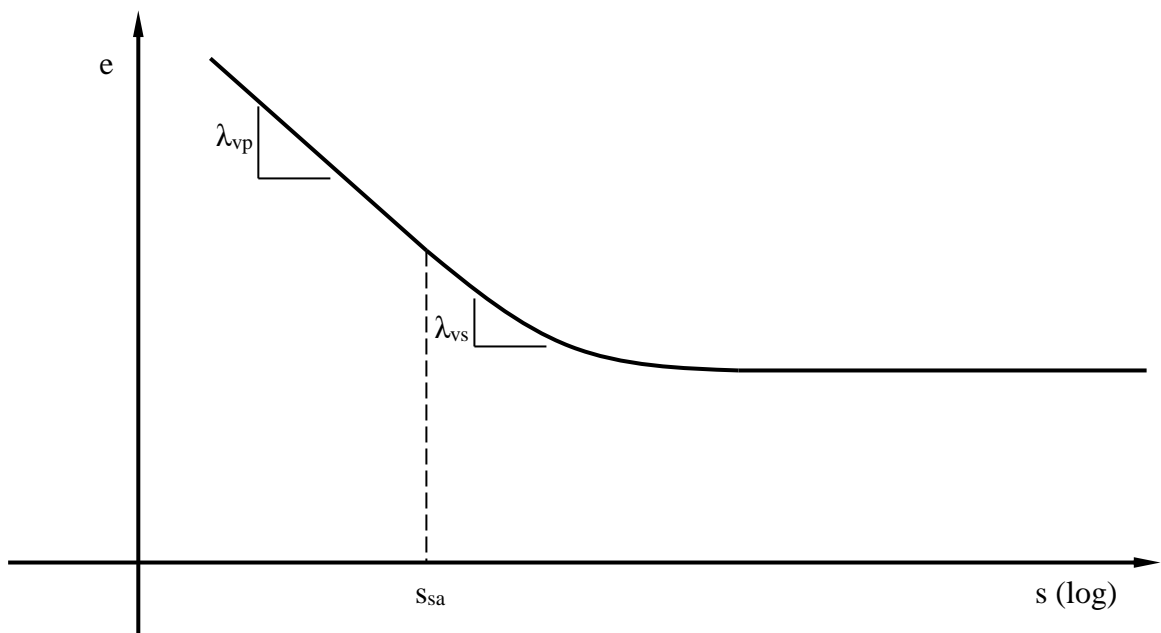
$$\kappa_{vs} = \begin{cases} \kappa_{vp} & s < s_{sa} \\ \kappa_{vp} \cdot \frac{s_{sa} + 1}{s + 1} & s \geq s_{sa} \end{cases} \quad (18.126)$$

Έτσι για την εξέλιξη του ειδικού όγκου κατέληξαν στην Εξ. 18.127 όπου  $N$  είναι ο ειδικός όγκος σε ένα ζεύγος τιμών τάσης και μύζησης  $p_0$  και  $s_0$ .

$$\left. \begin{aligned} \ln v &= \ln N - \lambda_{vp} \cdot \ln \left( \frac{p + s_0}{p_0 + s_0} \right), ds = 0 \\ \ln v &= \ln N - \lambda_{vp} \cdot \ln \left( \frac{p_0 + s}{p_0 + s_0} \right), dp = 0, s < s_{sa} \\ \ln v &= \ln N - \lambda_{vp} \cdot \ln \left( \frac{p + s_{sa}}{p_0 + s_0} \right) - \lambda_{vp} \cdot \frac{s_{sa} + 1}{p_0 - 1} \cdot \ln \left( \frac{s + 1}{p_0 + s} \cdot \frac{p_0 + s_{sa}}{s_{sa} + 1} \right), dp = 0, p_0 \neq 1, s \geq s_{sa} \\ \ln v &= \ln N - \lambda_{vp} \cdot \ln \left( \frac{p + s_0}{p_0 + s_0} \right) - \lambda_{vp} \cdot \left( 1 - \frac{s_{sa} + 1}{s + 1} \right), dp = 0, p_0 = 1, s \geq s_{sa} \end{aligned} \right\} \quad (18.127)$$



**Σχήμα 18.29.** Επεξήγηση της μορφής της επιφάνειας διαρροής για ένα αναζυμωμένο εδαφικό υλικό το οποίο έχει φορτιστεί μέχρι τάση  $p_{y0}$  μικρότερη της πίεσης διείδυσης αέρα του εδαφικού υλικού που αντιστοιχεί στην αρχική κατάσταση του αναζυμωμένου εδαφικού υλικού.



**Σχήμα 18.30.** Εξέλιξη της μεταβολής του λόγου κενών ενός αναζυμωμένου εδαφικού υλικού με την αύξηση της μύζησης όπως χρησιμοποιήθηκε από τους Sheng, et al. (2008).

Σε ό,τι αφορά την τομή της επιφάνειας διαρροής με επίπεδα σταθερής μύζησης οι Sheng, et al. (2008) διατύπωσαν την Εξ. 18.128 για τιμές της μύζησης  $s$  μικρότερες της μύζησης αποκορεσμού  $s_{sa}$  (όπου  $p_y = p_{y0} + u_w$  είναι η τάση διαρροής και  $p_0 = u_w$  είναι η γραμμή κλίσης  $45^\circ$  του Σχ. 18.29) και την Εξ. 18.129 για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες.

$$f = q^2 - M^2 \cdot (p - p_0) \cdot (p_y - p) \quad (18.128)$$

$$f = q^2 - M^2 \cdot [p - p_0(s)] \cdot [p_y(s) - p] \quad (18.129)$$

Με αυτές τις παραδοχές και υποθέσεις οι Sheng, et al. (2008) κατέληξαν στις Εξ. 18.130 έως 18.139 για την εξέλιξη των μεγεθών  $p_y$  (τάση διαρροής υπό  $s$ =σταθ.),  $p_0$  (έτερο σημείο τομής της έλλειψης που ορίζει την επιφάνεια διαρροής σε επίπεδα  $s$ =σταθ. με τον άξονα της τάσης  $p$ ),  $c_{app}$  (φαινόμενη συνοχή λόγω μερικού κορεσμού),  $p_{yn}$  (εξελισσόμενη τάση διαρροής λόγω αύξησης της μύζησης),  $s_y$  (μύζηση διαρροής),  $s_{yn}$  (εξελισσόμενη μύζηση διαρροής λόγω αύξησης της τάσης) για ένα αναζυμωμένο εδαφικό υλικό που έχει φορτιστεί υπό μηδενική μύζηση μέχρι τάση  $p_{y0}$  και αποφορτιστεί. Η Εξ. 18.136 δεν ισχύει όταν  $p=1$  οπότε τότε ισχύει η Εξ. 18.139.

$$p_y = \begin{cases} p_{y0} - s, s < s_{sa} \\ p_{y0} - s_{sa} - (s_{sa} + 1) \cdot \ln \frac{s+1}{s_{sa}+1}, s \geq s_{sa} \end{cases} \quad (18.130)$$

$$p_0 = \begin{cases} -s, s < s_{sa} \\ -s_{sa} - (s_{sa} + 1) \cdot \ln \frac{s+1}{s_{sa}+1}, s \geq s_{sa} \end{cases} \quad (18.131)$$

$$c_{app} = -p_0 \cdot \tan \phi \quad (18.132)$$

$$-p_0 \cdot \tan \phi = \begin{cases} s \cdot \tan \phi, s < s_{sa} \\ \tan \phi \cdot \left[ s_{sa} + (s_{sa} + 1) \cdot \ln \frac{s+1}{s_{sa}+1} \right], s \geq s_{sa} \end{cases} \quad (18.133)$$

$$p_{yn} = \begin{cases} p_{yn0} - s, s < s_{sa} \\ \frac{p_{yn0}}{p_{y0}} \cdot \left[ p_{y0} + s - s_{sa} - (s_{sa} + 1) \cdot \ln \frac{s+1}{s_{sa}+1} \right], s \geq s_{sa} \end{cases} \quad (18.134)$$



$$s_y = \begin{cases} p_{y_0} - p, p > p_{y_0} - s_{sa} \\ (s_{sa} + 1) \cdot \exp\left(\frac{p_{y_0} - s_{sa} - p}{s_{sa} + 1}\right), p \leq p_{y_0} - s_{sa} \end{cases} \quad (18.135)$$

$$s_{yn} = \begin{cases} \frac{A \cdot p - 1}{1 - A}, p \leq p_{y_0} - s_{sa} \\ \frac{B \cdot p - 1}{1 - B}, p_{yn0} - s_{sa} \geq p > p_{y_0} - s_{sa} \\ p_{yn0} - p, p > p_{yn0} - s_{sa} \end{cases} \quad (18.136)$$

$$A = \frac{s_y + 1}{s_y + p} \cdot \left(\frac{p_{yn0}}{p_{y_0}}\right)^{\frac{p-1}{s_{sa}+1}} \quad (18.137)$$

$$B = \frac{s_{sa} + 1}{s_{sa} + p} \cdot \left(\frac{p_{yn0}}{p + s_{sa}}\right)^{\frac{p-1}{s_{sa}+1}} \quad (18.138)$$

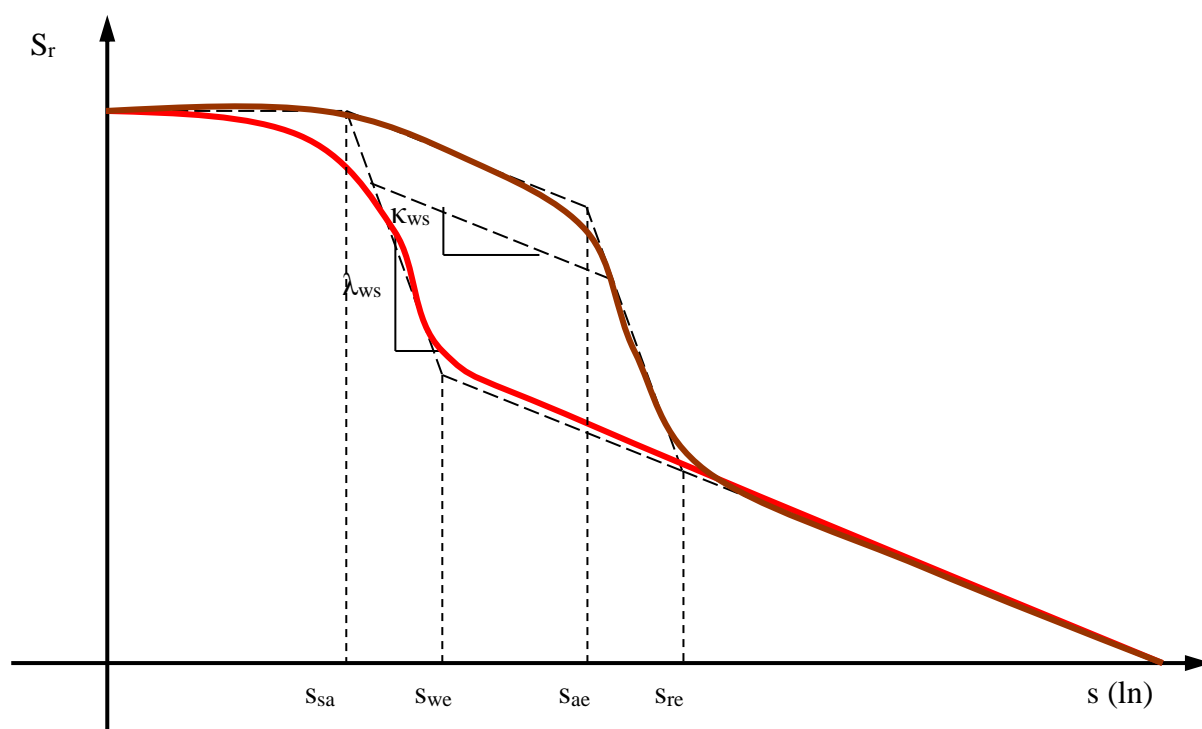
$$s_{yn} = \begin{cases} \frac{1}{\frac{1}{s_y + 1} - \frac{1}{s_{sa} + 1} \cdot \ln \frac{p_{yn0}}{p_{y_0}}}, p \leq p_{y_0} - s_{sa} \\ \frac{s_{sa} + 1}{1 - \ln \frac{p_{yn0}}{p + s_{sa}}}, p_{yn0} - s_{sa} \geq p > p_{y_0} - s_{sa} \\ p_{yn0} - p, p > p_{yn0} - s_{sa} \end{cases} \quad (18.139)$$

Σε ό,τι αφορά την μεταβολή του βαθμού κορεσμού θεώρησαν ότι ισχύει η Εξ. 18.140, όπου ο δείκτης  $\lambda_{ws}$  δίνεται από την Εξ. 18.141 για την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού που περιγράφεται στο Σχ. 18.33.

$$dS_r = -\lambda_{ws} \cdot \frac{ds}{s} \quad (18.140)$$

$$\lambda_{ws} = \begin{cases} 0, s < s_{sa} \\ \kappa_{ws}, s_{sa} \leq s < s_{ae} \\ \lambda_{ws}, s_{ae} \leq s < s_{re} \\ \kappa_{ws}, s \geq s_{re} \end{cases} \quad (18.141)$$

Όπως φαίνεται από το Σχ. 18.31, οι Sheng, et al. (2008) διέκριναν τρία σημεία καμπής στην χαρακτηριστικά καμπύλη εδάφους νερού, την μύζηση αποκορεσμού, την ονομαστική πίεση διείσδυσης αέρα πίεση (και την αντίστοιχη τιμή της μύζησης διείσδυσης νερού κατά μήκος της οριακής καμπύλης ύγρανσης από κατάσταση παραμένουτος βαθμού κορεσμού) και την μύζηση επίτευξης παραμένουτος βαθμού κορεσμού. Για κάθε δε ενδιαμέση καμπύλη θεώρησαν κλίση  $\kappa_{ws}$ . Η προσομοίωση αυτή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού αποτελεί βελτίωση σε σχέση με την μέθοδο προσομοίωσης των Wheeler, et al. (2003) που περιγράφεται στην §18.3.14, κυρίως σε ό,τι αφορά την περιοχή κοντά στον παραμένουτα βαθμό κορεσμού.



**Σχήμα 18.31.** Προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης από τους Sheng, et al. (2008).

Το καταστατικό προσομοίωμα των Sheng, et al. (1990) αποτελεί μία σημαντική εξέλιξη στην καταστατική προσομοίωση των μη κορεσμένων εδαφών. Η κύρια συνεισφορά του έγκειται στην προσπάθεια εξορθολογισμού των προβλέψεων του BBM, κυρίως σε ό,τι αφορά την περιοχή σύνδεσης μη κορεσμένης/πλήρως κορεσμένης περιοχής όπου διατυπώθηκε με γνώμονα την ισχύ της αρχής των ενεργών τάσεων. Η απόπειρα προσομοίωσης δε της μηχανικής συμπεριφοράς ενός αναζυμωμένου υλικού τοποθέτησε στην σωστή βάση την αναμενόμενη συμπεριφορά ενός προσομοιώματος. Από την άλλη πλευρά βέβαια, αφενός σχέσεις οι οποίες προτάθηκαν (Εξ.

18.125, 18.126, 18.134 και 18.136) πρέπει να υποστηριχθούν και πειραματικά, και αφετέρου – τουλάχιστον στην δημοσίευση του 2008- δεν επιδείχθηκε η πραγματική συμπεριφορά ενός αναζυμωμένου εδάφους χωρίς προηγούμενη φόρτιση και αποφόρτιση αλλά μόνο ξήρανση από την αρχική του κατάσταση. Σε ό,τι αφορά δε τις προταθείσες σχέσεις που πρέπει να αποδειχτούν, ειδικά για την Εξ. 18.134 ασκήθηκε πρόσφατα σημαντική κριτική<sup>12</sup>, κυρίως ως προς το ότι η προκύπτουσα καμπύλη LC από το προσομοίωμα αυτό έχει αποδειχτεί ότι αποτελεί καμπύλη εμφάνισης διαρροής λόγω φόρτισης αλλά όχι λόγω ύγρανσης, ενώπιον της οποίας ο ίδιος ο Sheng (2010) απάντησε ότι πράγματι δεν υπάρχουν μέχρι σήμερα πειραματικά δεδομένα που να αποδεικνύουν την εμφάνιση διαρροής κατά την ύγρανση υπό σταθερή τάση.

### 18.3.23 Zhang & Lytton (2009a & 2009b)

Οι Zhang & Lytton (2009a & 2009b) παρουσίασαν ένα καταστατικό προσομοίωμα για ισοτροπικές καταστάσεις σε μή κορεσμένα εδάφη το οποίο δεν βασίζεται σε κάποια υπόθεση για το σχήμα των καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης και των καμπυλών ξήρανσης. Το προσομοίωμα αυτό υποθέτει ότι υπάρχουν δύο επιφάνειες στον χώρο  $v$ - $p$ - $s$  και ότι η ελαστική περιοχή αποτελεί ένα κινούμενο επίπεδο με κλίση κατά μήκος διαδρομών σταθερής μύζησης  $\kappa$  και κατά μήκος διαδρομών σταθερής τάσης  $\kappa_s$ . Το επίπεδο αυτό μετακινείται παράλληλα κατά μήκος του άξονα του ειδικού όγκου ανάλογα με το μέγεθος των επιβαλλόμενων πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων μεταθέτοντας την τομή του με την επιφάνεια πλαστικών παραμορφώσεων. Η επιφάνεια πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων ορίζεται κατά τρόπο ανάλογο με αυτόν των Fredlund & Rahardjo (1993) σε βηματική μορφή (incremental form) από την οποία είναι δυνατή η ολοκλήρωση κατά μήκος πεπερασμένων διαδρομών. Η μορφή του προσομοιώματος όπως παρουσιάζεται στους Zhang & Lytton (2009a & 2009b) αποτελεί περισσότερο μία επίδειξη περιγραφής μιας ενοποιημένης επιφάνειας πλαστικών παραμορφώσεων στον χώρο  $v$ - $p$ - $s$  σε βηματική μορφή, αφού κατά τον χρόνο της δημοσίευσής τους ανήγγειλαν την μελλοντική επέκταση και στον χώρο  $p$ - $q$ - $s$ , ενώ δεν προχώρησαν και σε μία καταληκτική γεωμετρική μορφή για την επιφάνεια πλαστικών παραμορφώσεων. Επ' αυτού του σημείου, στο στάδιο αυτό της έρευνάς τους τόνιζαν την υπεροχή της προσέγγισης αυτής για την προσομοίωση εναλλακτικών τέτοιων επιφανειών ανάλογα με την φύση του εδάφους.

<sup>12</sup> Στο 5<sup>ο</sup> Παγκόσμιο Συνέδριο Μή Κορεσμένων Εδαφών, Σεπτέμβριος 2010.

### 18.3.24 Tarantino (2009)

Στην §18.3.15 παρουσιάστηκε η εξίσωση που διατύπωσαν οι Gallipoli, et al. (2003a) για την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Λόγω της χρησιμότητας μιας τέτοιας εμπειρικής συσχέτισης σε καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη παρατίθεται και η εξίσωση που πρότεινε ο Tarantino (2009). Αυτή έχει την γενική μορφή της Εξ. 18.142 η οποία συνδέει τον βαθμό κορεσμού με τον λόγο κενών και την μύζηση μέσω τριών εμπειρικών παραμέτρων  $\alpha$ ,  $b$  και  $n$ .

$$S_r = \frac{e_w}{e} = \left\{ 1 + \left[ s \cdot \left( \frac{e}{a} \right)^{1/b} \right]^n \right\}^{-b/n} \quad (18.142)$$

### 18.3.25 Σύνοψη

Στον Πιν. 18.1 συνοψίζονται τα καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη που συγκεντρώθηκαν και παρουσιάστηκαν. Στον πίνακα αυτό επισημαίνονται τρία βασικά χαρακτηριστικά: οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι τάσης, η πληρότητα και η περιγραφή της μαθηματικής διατύπωσης του προσομοιώματος, και τέλος επιγραφικά η βασική συνεισφορά κάθε προσομοιώματος στην εξέλιξη της καταστατικής προσομοίωσης των μη κορεσμένων εδαφών.

## 18.4 Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΛΙΘΟΡΡΙΠΗΣ

Τα καταστατικά προσομοιώματα που παρουσιάστηκαν μέχρι αυτό το σημείο αφορούν στην περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς εδαφών όπως άργιλοι, ιλύς και άμμοι. Οι προσπάθειες καταστατικής προσομοίωσης μη κορεσμένων εδαφών ωστόσο έχουν επεκταθεί και σε πιο χονδρόκοκκα υλικά με εκείνο που έχει το μεγαλύτερο τεχνικό ενδιαφέρον να αποτελεί η λιθορριπή, κυρίως για εντατικές καταστάσεις που ομοιάζουν σε αυτές που απαντώνται σε τέτοια υλικά όταν χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φραγμάτων. Το πρώτο καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένη λιθορριπή παρουσιάστηκε από τους Oldecop & Alonso (2001) και συμπληρώθηκε από τους Oldecop & Alonso (2003) και τους Alonso, et al. (2005).

**Πίνακας 18.1.** Καταστατικά προσομοιώματα που συγκεντρώθηκαν με συνόψιση των κύριων χαρακτηριστικών τους και των καινοτομιών που εισήγαγαν.

Καταστατικά προσομοιώματα	Παράμετροι τάσης διατύπωσης	Βαθμός ολοκλήρωσης	Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά
Alonso, et al. (1990)	Τάση & μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Πρώτο ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα για μη κορεσμένα εδάφη: Εισαγωγή εννοιών όπως επιφάνειες διαρροής LC & SI, νόμων κράτυνσης μέσω μείωσης $\lambda$ και αύξησης $\rho_0$
Toll (1990)	Τάση & μύζηση	Ελλιπές	Διαχωρισμός επιρροής $p$ και $s$ στην διατμητική αντοχή
Wheeler (1991)	Τάση & μύζηση	Ελλιπές	
Gens & Alonso (1992)	Τάση & μύζηση	Πλήρες-Θεωρητικό/ Περιγραφικό	Για δραστικά αργιλικά υλικά μεγάλης διόγκωσης: Εισαγωγή έννοιας γραμμής ουδέτερης φόρτισης και διάκρισης μικροδομικών και μακροδομικών παραμορφώσεων και της αλληλεμπλοκής τους
Alonso, et al. (1999)	Τάση για την μακροδομή, «ενεργός» τάση για την μικροδομή & μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	
Kohgo, et al. (1993a & 1993b)	«Ενεργός» τάση και «ενεργός» μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Παύση μείωσης $v$ από μία μύζηση και μετά, πρόβλεψη σταθεροποίησης διατμητικής αντοχής
Wheeler & Sivakumar (1995)	Τάση & μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Εξάρτηση της κλίσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης από την μύζηση - Εισαγωγή του ειδικού όγκου νερού $v_w$ (ποιοτικά)
Wheeler (1996)	Τάση & μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Εισαγωγή του ειδικού όγκου νερού $v_w$ (μέσω πλήρων καταστατικών εξισώσεων για αυτόν)
Wheeler & Sivakumar (2000)	Τάση & μύζηση	Πλήρες-Θεωρητικό/ Περιγραφικό	Επιφάνεια διαρροής στο επίπεδο $p$ - $q$ με μορφή στραμμένης έλλειψης
Sivakumar & Doran (2000)	Τάση & μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Απόπειρα ενοποίησης επιφανειών διαρροής LC & SI στο επίπεδο $p$ - $s$
Maâtouk, et al. (1995)	Τάση & μύζηση	Ελλιπές	Επιφάνεια διαρροής στο επίπεδο $p$ - $q$ με μορφή στραμμένης έλλειψης
Cui & Delage (1996)	Τάση & μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Επιφάνεια διαρροής στο επίπεδο $p$ - $q$ με μορφή στραμμένης έλλειψης
Bolzon, et al. (1996)	«Ενεργός» τάση και μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Παραβολοειδής επιφάνεια διαρροής στο επίπεδο $p'$ - $q$ προερχόμενη από το προσομοίωμα των Pastor, et al. (1990)
Rampino, et al. (2000)	Τάση & μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Νόμος ροής για κοκκώδη εδάφη από τον Jefferies (1993, 1997) τροποποιημένος για μη κορεσμένα εδάφη
Karube & Kawai (2001)	«Ενεργός» τάση και ένταση μύζησης	Πλήρες-Καταστατικό	Προσπάθεια διαχωρισμού της επιρροής κάθε μέρους του νερού των μη κορεσμένων εδαφών στα παρατηρούμενα φαινόμενα
Loret & Khalili (2002)	«Ενεργός» τάση και μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Επισημανση της λαθασμένης αύξησης της τάσης διαρροής με την αύξηση της μύζησης για τιμές της μέχρι την μύζηση διαρροής, αν η μύζηση αυτή είναι ή σχετίζεται με την πίεση διείσδυσης αέρα
Tang & Graham (2002)	Ισοδύναμη τάση	Πλήρες-Καταστατικό	Ενιαία, συνεχώς παραγωγίσιμη τομή της επιφάνειας διαρροής με το επίπεδο $p$ - $s$ . Η ισοδύναμη τάση θα μπορούσε να αποτελέσει πράγματι ενεργό τάση για μη κορεσμένα εδάφη.

**Πίνακας 18.1** (συνέχεια). Καταστατικά προσομοιώματα που συγκεντρώθηκαν με συνοψιση των κύριων χαρακτηριστικών τους και των καινοτομιών που εισήγαγαν.

Καταστατικά προσομοιώματα	Παράμετροι τάσης διατύπωσης	Βαθμός ολοκλήρωσης	Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά
Georgiadis, et al. (2003)	Τάση & ισοδύναμη μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Εναλλακτικές εξισώσεις για την μορφή της επιφάνειας διαρροής στο επίπεδο p-q, την εξέλιξη της τάσης διαρροής με την μύζηση και τον συντελεστή αύξησης της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση.
Wheeler, et al. (2003)	«Ενεργός» τάση & «τροποποιημένη» μύζηση	Ισοτροπικές εντατικές καταστάσεις - Καταστατικό	Εισήγαγε την υστέρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-τροποποιημένης μύζησης και την σύζευξή της με την καμπύλη διαρροής λόγω φόρτισης (η XKEN περιγράφεται από <u>ευθύγραμμα</u> τμήματα).
Gallipoli, et al. (2003a & 2003b)	«Ενεργός» τάση & μύζηση	Ισοτροπικές εντατικές καταστάσεις - Καταστατικό	Εισήγαγε την επιρροή της δομής που αποκτούν τα μη κορεσμένα εδάφη λόγω κύκλων ξήρανσης-ύγρυνσης.
Chiu & Ng (2003)	Τάση & μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Εισαγωγή της διαστολικότητας με βάση την πρόταση των Li & Dafalias (2000). Τροποποίηση της μορφής της επιφάνειας διαρροής σε επίπεδα p-q και εισαγωγή ενός διορθωτικού παράγοντα περιορισμού της επιρροής της μύζησης ανάλογα με την απόστασή της από την μύζηση που αντιστοιχεί στον παραμένοντα βαθμό κορεσμού.
Sheng, et al. (2004)	«Ενεργός» τάση & τροποποιημένη μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Τροποποίηση των βασικών διατυπώσεων ώστε να ικανοποιούνται τα αξιώματα της θερμοδυναμικής. Εισαγωγή της υστέρησης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε κλάδους ξήρανσης-ύγρυνσης.
Tamagnini (2004)	«Ενεργός» τάση & μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Εισήγαγε την υστέρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-τροποποιημένης μύζησης και την σύζευξή της με την καμπύλη διαρροής λόγω φόρτισης (η XKEN περιγράφεται από την εξίσωση των Romero & Vaunat, 2000, και είναι πολύ πιο ρεαλιστική η προσομοίωσή της).
Tarantino & Tombolato (2005)	«Ενεργός» τάση & μύζηση	Ελλιπές	Εναλλακτική εξίσωση για την πρόβλεψη της διεκτροπικής τάσης στην κρίσιμη κατάσταση των μη κορεσμένων εδαφών.
Li (2007a & 2007b)	«Ενεργός» τάση & τροποποιημένη μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Μόρφωση του προσομοιώματος σε τανυστικούς όρους και εξειδίκευση στην εντατική κατάσταση της τριαξονικής φόρτισης ξεκινώντας ευθύς-εξαρχής από την ανάγκη ικανοποίησης των θερμοδυναμικών αξιωμάτων.
Thu, et al. (2007)	Τάση & μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Εισαγωγή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και για την πρόβλεψη της εξέλιξης των επιφανειών διαρροής μέσω της μεταβολής της εξίσωσης για την μεταβολή του δείκτη συμπίεσης με την μύζηση.

**Πίνακας 18.1** (συνέχεια). Καταστατικά προσομοιώματα που συγκεντρώθηκαν με συνόμιση των κύριων χαρακτηριστικών τους και των καινοτομιών που εισήγαγαν.

Καταστατικά προσομοιώματα	Παράμετροι τάσης διατύπωσης	Βαθμός ολοκλήρωσης	Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά
Sheng, et al. (2008)	Τάση & μύζηση	Πλήρες-Καταστατικό	Εξορθολογισμός των προβλέψεων ογκομετρικών μεταβολών και εμφάνισης διαρροής για αναζυμωμένα εδάφη που προηγουμένως έχουν φορτιστεί και αποφορτιστεί.
Zhang & Lytton (2009a & 2009b)	Τάση & μύζηση	Ισοτροπικές εντατικές καταστάσεις-Καταστατικό	Γενική διατύπωση χωρίς κάποια εκ των προτέρων υπόθεση για την μορφή των καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης και των καμπυλών ξήρανσης.

Παρακάτω συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά του προσομοιώματος αυτού όπως τροποποιήθηκε από τους Alonso, et al. (2005).

Η βασική διαπίστωση από τα πειραματικά αποτελέσματα των Oldecop & Alonso (2001) σε δοκίμια λιθορριπής –δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης μέχρι κατακόρυφη τάση 1 MPa- ήταν ότι υπάρχει μία τιμή της τάσης  $p_y$ , μετά από την οποία αρχίζει η συσσώρευση παραμορφώσεων λόγω θραύσης των τεμαχίων που αποτελούν την λιθορριπή. Η συμπίεστικότητα της λιθορριπής λοιπόν περιγράφεται από την Εξ. 18.143, όπου  $d\varepsilon_v$  είναι η ογκομετρική παραμόρφωση και  $\lambda^i$  και  $\lambda^d(s)$  δείκτες συμπίεσης, με τον δεύτερο να εξαρτάται από την μύζηση όπως προβλέπεται από την Εξ. 18.144.

$$d\varepsilon_v = \begin{cases} d\varepsilon_v^i = \lambda^i \cdot dp, p \leq p_y \\ d\varepsilon_v^i + d\varepsilon_v^d = [\lambda^i + \lambda^d(s)] \cdot dp, p > p_y \end{cases} \quad (18.143)$$

$$\lambda^d(s) = \lambda_0^d - a_s \cdot \left( \frac{s + p_{atm}}{p_{atm}} \right) \quad (18.144)$$

Ο νόμος κράτνσης περιγράφεται από την Εξ. 18.145, όπου  $\kappa$  ο δείκτης αποφόρτισης, και η μορφή της καμπύλης LC του προσομοιώματος από την Εξ. 18.146.

$$dp_o^* = \frac{d\varepsilon_v^p}{\lambda^i - \kappa} \quad (18.145)$$

$$p_o(s) = \begin{cases} p_o^*, p_o^* \leq p_y \\ p_y + \frac{(\lambda^i - \kappa) \cdot (p_o^* - p_y)}{\lambda^i + \lambda^d(s) - \kappa}, p_o^* > p_y \end{cases} \quad (18.146)$$

Σε ό,τι αφορά την τομή της επιφάνειας διαρροής με επίπεδα σταθερής μύζησης χρησιμοποιείται η ίδια ακριβώς διατύπωση όπως και για το BBM με τον ίδιο μη συσχετισμένο νόμο ροής (βλ. §18.2.5) και την ίδια εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση (Εξ. 18.3) με την διαφορά ότι η κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης μεταβάλλεται με την μύζηση όπως προβλέπει η Εξ. 18.147, όπου  $M_{dry}$  και  $M_{sat}$  οι τιμές της κλίσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης για την ξηρή και την πλήρως κορεσμένη λιθορριπή.

$$M(s) = M_{dry} - (M_{dry} - M_{sat}) \cdot \left( \frac{M_{sat}}{M_{dry}} \right)^{\frac{s}{10 p_{atm}}} \quad (18.147)$$

Τέλος, οι Alonso, et al. (2005) εισήγαγαν και μέρος της αναμενόμενης συμπεριφοράς της λιθορριπής λόγω ερπυσμού. Σχετικά οι Oldecop & Alonso (2007) διερεύνησαν πειραματικά και αναλυτικά ακόμα περισσότερο την ερπυστική συμπεριφορά της λιθορριπής στο εύρος μάλιστα τιμών της κατακόρυφης τάσης μέχρι σχεδόν 3 MPa.

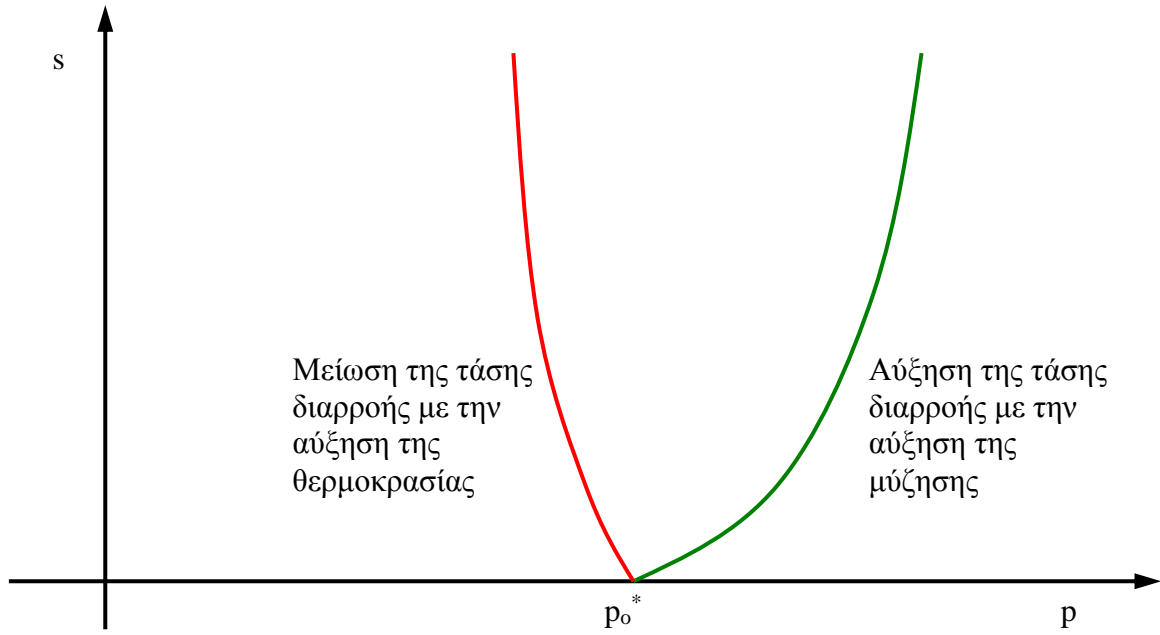
Στους Alonso, et al. (2005) μπορεί να βρεθεί μία εφαρμογή της χρήσης του προσομοιώματός τους για την μηχανική συμπεριφορά της λιθορριπής και της χρήσης του BBM για την περιγραφή της παρατηρηθείσας συμπεριφοράς σε ένα λιθόρριπτο φράγμα με αργιλικό πυρήνα, όπου τα δύο προσομοιώματα χρησιμοποιήθηκαν για την λιθορριπή και τον πυρήνα αντίστοιχα.



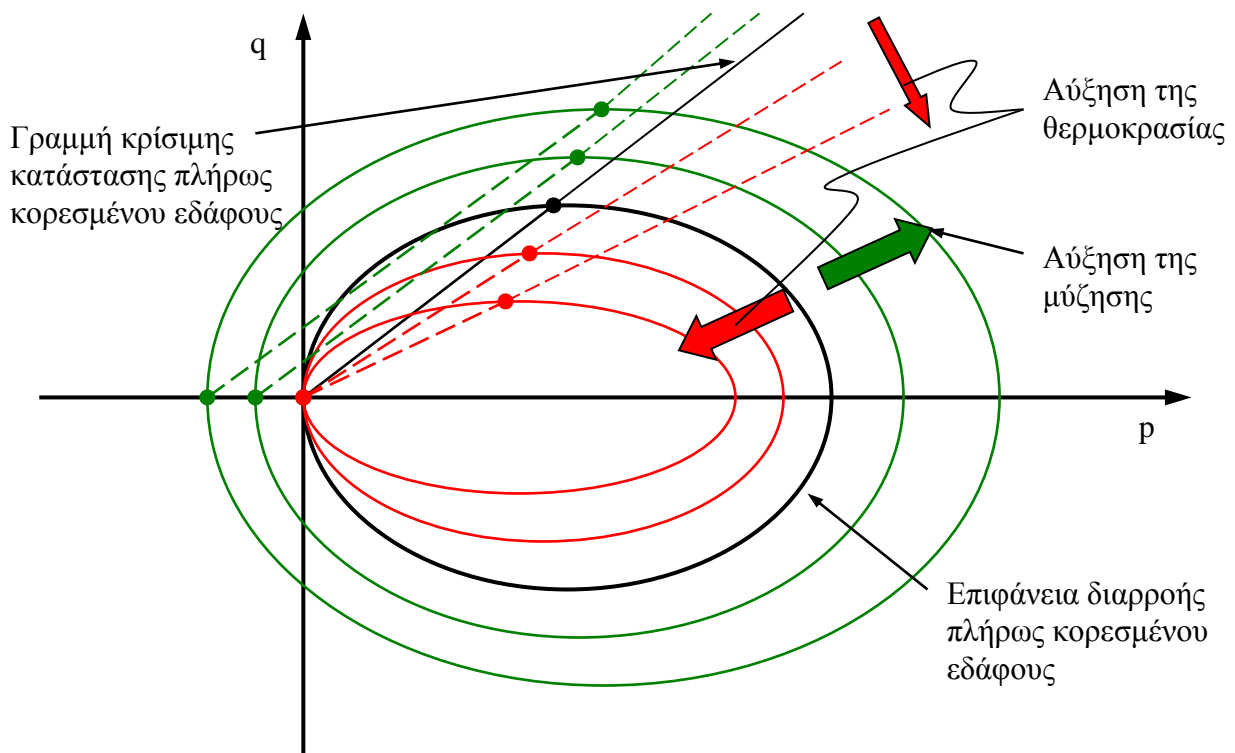
## 18.5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΙ Η ΣΥΖΕΥΞΗ ΤΗΣ ΜΕ ΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ (FULL THERMO-HYDRO-MECHANICAL MODELING)

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1 του πρώτου μέρους, η «κινητήριος» δύναμη της ερευνητικής προσπάθειας στο αντικείμενο της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών είναι το ενδιαφέρον για την συμπεριφορά αργλικών διαφραγμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την σφράγιση χώρων ταφής πυρηνικών αποβλήτων. Η συγκεκριμένη εφαρμογή πέραν της απαίτησης για εισαγωγή στην καταστατική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφικών υλικών της επιρροής του μερικού κορεσμού, πρέπει να συμπεριλάβει και την επιρροή της θερμοκρασίας, τόσο απευθείας, αλλά και μέσω της επιρροής της στις δύο άλλες συνιστώσες της μηχανικής συμπεριφοράς, την αμιγώς μηχανική και την υδραυλική (χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού). Στην παράγραφο αυτή γίνεται σύντομη αναφορά στις απόπειρες προσομοίωσης της πλήρους θερμο-υδρο-μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών (full thermo-hydro-mechanical behaviour). Η σχετική αναφορά δεν είναι διεξοδική αλλά πολύ σύντομη και παρατίθεται χάριν πληρότητας.

Κύριο χαρακτηριστικό της επιρροής της μύζησης είναι ότι η αύξησή της οδηγεί στην αύξηση της τάσης διαρροής κατά μήκος καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση και στην μείωση του δείκτη συμπίεσης κατά μήκος των ίδιων καμπυλών. Η μαθηματική διατύπωση αυτών των φαινομένων έγινε στο BBM και ήταν επιτυχής ως προς την ικανότητα του προσομοιώματος να προβλέπει με επιτυχία την κατάρρευση που συμβαίνει κατά την διαβροχή του υλικού υπό μεγάλες τιμές της τάσης διατηρούμενες σταθερές κατά την διαβροχή. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί το ακριβώς αντίθετο αποτέλεσμα, δηλαδή μείωση της τάσης διαρροής ενός εδαφικού υλικού κατά μήκος καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης και αύξηση του δείκτη συμπίεσής του, ενώ τα λιγοστά πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν και μείωση της κλίσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνοψίζονται στα Σχ. 18.32 και 18.33. Σε αυτό το σημείο δεν θα γίνει περαιτέρω αναφορά σε αυτό το αντικείμενο, αλλά ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης παραπέμπεται ενδεικτικά στους Laloui, et al. (2008) και Francois & Laloui (2008) για περαιτέρω πληροφορίες για την επιρροή της θερμοκρασίας στην μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών (είτε πλήρως, είτε μη κορεσμένων).



**Σχήμα 18.32.** Εξέλιξη της τάσης διαρροής κατά μήκος καμπυλών ιστροπικής συμπίεσης με την αύξηση της μύζησης και την αύξηση της θερμοκρασίας από τους Laloui, et al. (2008).



**Σχήμα 18.33.** Εξέλιξη της τομής της επιφάνειας διαρροής με επίπεδα σταθερής μύζησης ή σταθερής θερμοκρασίας με την αύξηση της μύζησης και την αύξηση της θερμοκρασίας από τους Laloui, et al. (2008).

## 18.6 ΣΥΝΟΨΙΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν τα περισσότερα από τα διατυπωμένα καταστατικά προσομοιώματα για μή κορεσμένα εδάφη, καθώς και μία διεξοδικότερη παραμετρική ανάλυση του BBM και κυρίως των συνεπειών του σε ό,τι αφορά την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής και της παραμόρφωσης λόγω κατάρρευσης κατά την διαβροχή υπό υψηλές τιμές της τάσης. Τα προσομοιώματα που διακρίνονται για τις καινοτόμες συνεισφορές τους στην προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών είναι:

- Το καταστατικό προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990), γνωστό και ως BBM. Υπήρξε το πρώτο ολοκληρωμένο μαθηματικά, και όχι περιγραφικά, διατυπωμένο καταστατικό προσομοίωμα, ικανό να περιγράψει τα βασικά χαρακτηριστικά της μηχανικής συμπεριφοράς μή κορεσμένων εδαφών χωρίς μεγάλη διόγκωση υπό χαμηλές τιμές της τάσης.
- Το καταστατικό προσομοίωμα των Tang & Graham (2002). Υπήρξε το πρώτο προσομοίωμα στο οποίο επιχειρήθηκε μία σοβαρή, μαθηματικά και όχι περιγραφικά διατυπωμένη προσέγγιση μίας ενιαίας, συνεχώς παραγωγίσιμης επιφάνειας διαρροής στον χώρο  $p$ - $q$ - $s$ . Δευτερευόντως –και κατά την γνώμη του γράφοντος– η ισοδύναμη τάση των Tang & Graham (2002) είναι η πιο σοβαρή προσέγγιση στην εισαγωγή μιας ενεργού τάσης για μή κορεσμένα εδάφη μέχρι σήμερα, σε πραγματική αντιστοιχία και αναλογία με την ενεργό τάση όπως χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των πλήρως κορεσμένων εδαφικών υλικών.
- Το καταστατικό προσομοίωμα των Sheng, et al. (2008). Υπήρξε το πρώτο προσομοίωμα που προσπάθησε να περιγράψει την μηχανική συμπεριφορά των μή κορεσμένων εδαφών με αφετηρία όχι κάποιο αυθαίρετα επιλεγμένο σημείο στον χώρο  $p$ - $q$ - $s$ - $v$  αλλά την κατάσταση που αντιστοιχεί σε ένα αναζυμωμένο εδαφικό υλικό (παρόλο που και πάλι περιορίστηκε σε εδαφικά υλικά που ξεκίνησαν μεν από κατάσταση πολλού αλλά στην συνέχεια φορτίστηκαν υπό μηδενική μύζηση μέχρι μία τιμή της τάσης και στη συνέχεια αποφορτίστηκαν).

Η σταχυολόγηση αυτή δεν μειώνει την συνεισφορά των υπολοίπων καταστατικών προσομοιωμάτων που παρουσιάστηκαν. Επισημαίνει ωστόσο τις καίριες συνεισφορές στην καταστατική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφικών υλικών.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 19

## ΤΟ ΝΕΟ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΓΙΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

### 19.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το νέο θεωρητικό πλαίσιο για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά που διατυπώθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής. Προηγήθηκε το Κεφάλαιο 18 στο οποίο παρουσιάστηκαν τα ήδη διατυπωμένα θεωρητικά πλαίσια και καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά.

Το θεωρητικό πλαίσιο που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό έχει παρουσιαστεί σε πρώτη μορφή από τους Bardanis & Kavvadas (2008b). Έχει διατυπωθεί με βάση το βασικό προσομοίωμα της Βαρκελώνης (BBM, Alonso, et al., 1990) επεμβαίνοντας στα εξής σημεία:

1. Στην πρόβλεψη παύσης της περαιτέρω μείωσης του λόγου κενών των εδαφικών υλικών από τη μύζηση που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών και μετά και μάλιστα βαθμιαία εισάγοντας σταδιακή μείωση του δείκτη συμπίεσης λόγω αύξησης της μύζησης από την προηγούμενη τιμή του μέχρι μηδενισμού.
2. Στην πρόβλεψη των δυνατών περιοχών εμφάνισης πλαστικών ογκομετρικών μεταβολών λόγω μεταβολής της μύζησης.
3. Στην αναμόρφωση της εξέλιξης της εφελκυστικής αντοχής με τη μύζηση έτσι ώστε να είναι δυνατόν να προβλεφθεί οποιαδήποτε δυνατή εξέλιξη της διατμητικής αντοχής μετά την πίεση διείσδυσης αέρα (περαιτέρω αύξηση της αντοχής, σταθεροποίηση ή μείωση).
4. Η νέα μορφή του νόμου εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση επέβαλε την εισαγωγή και της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του εδαφικού υλικού.

Το θεωρητικό αυτό πλαίσιο διατηρεί την απλότητα του BBM σε μεγάλο βαθμό, επεμβαίνοντας μόνο σε σημεία που αποδεδειγμένα μέχρι σήμερα οι προβλέψεις του BBM υστερούσαν. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παραμετρική ανάλυση του προσομοιώματος (όπως και για το BBM στο Κεφ. 18) και χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στα Κεφ. 14 και 15 για τον προσδιορισμό τιμών παραμέτρων, ειδικά μάλιστα τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα συνδυασμένα μεταξύ τους.

## 19.2 ΤΟ ΝΕΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ (MBBM)

### 19.2.1 Εισαγωγή

Λόγω της χρησιμοποίησης του BBM ως βάσης εκκίνησης για την διατύπωση του θεωρητικού πλαισίου που παρουσιάζεται σε αυτήν την παράγραφο, το θεωρητικό αυτό πλαίσιο θα καλείται εφεξής Τροποποιημένο Βασικό Προσομοίωμα της Βαρκελώνης (Modified Barcelona Basic Model, MBBM). Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο με την εξής διάρθρωση:

- Αρχικά παρουσιάζονται οι παράμετροι τάσης στις οποίες έχει διατυπωθεί και οι εντατικές καταστάσεις για τις οποίες έχει διατυπωθεί.
- Στη συνέχεια διευκρινίζονται ευθύς εξαρχής τα εδαφικά υλικά και το εύρος των εντατικών μεγεθών στα οποία είναι διατυπωμένο για τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει την μηχανική συμπεριφορά ενός μη κορεσμένου εδάφους.
- Ακολουθεί η μαθηματική διατύπωση του προσομοιώματος συνοδευόμενη από την παραμετρική ανάλυσή του.
- Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο προσδιορισμός τιμών παραμέτρων του προσομοιώματος με βάση τις εργαστηριακές δοκιμές που παρουσιάστηκαν στο δεύτερο μέρος της διατριβής, ειδικά μάλιστα τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα συνδυασμένες μεταξύ τους.

### 19.2.2 Παράμετροι τάσης – Εντατικές καταστάσεις

Το MBBM είναι διατυπωμένο σε όρους ολικής μέσης τάσης  $p$ , αφαιρούμενης της πίεσης της αέριας φάσης, και μύζησης  $s$  προκειμένου να μπορεί να περιγράψει ισοτροπικές καταστάσεις, και διεκτροπικής τάσης  $q$  προκειμένου να μπορεί να περιγράψει το σύνολο των εντατικών καταστάσεων που μπορούν να αναπτυχθούν υπό συνθήκες τριαξονικής φόρτισης. Αυτές οι παράμετροι τάσης ορίζονται ως εξής:

- $$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - u_a$$
- $q = \sigma_1 - \sigma_3$
- $s = u_a - u_w$

όπου  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  οι κύριες ολικές τάσεις, και  $u_a$  και  $u_w$  η πίεση στην αέρια και στην υγρή φάση αντίστοιχα.

Για την περιγραφή των μεταβολών όγκου χρησιμοποιείται ο ειδικός όγκος  $v$ ,  $v = 1 + e$ , και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού εισάγεται σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης.

Οι παράμετροι αυτές για τη διατύπωση του θεωρητικού πλαισίου χρησιμοποιήθηκαν με γνώμονα την απλότητα στην κατανόησή τους και την απλότητα στην επιβολή και μέτρησή τους ώστε να μπορούν να καταστρωθούν και να χρησιμοποιηθούν εργαστηριακές δοκιμές ελεγχόμενης μύζησης για τη διατύπωση του προσομοιώματος.

### 19.2.3 Εδαφικά υλικά και εύρος εντατικών μεγεθών για τα οποία ισχύει το προσομοίωμα

Το MBBM δεν ισχύει για τα εξής εδαφικά υλικά και εντατικές καταστάσεις:

- Διογκούμενα εδαφικά υλικά λόγω παρουσίας δραστικών αργιλικών ορυκτών.
- Γενικότερα για εδαφικά υλικά με δύο κυρίαρχα μεγέθη πόρων, ένα μικροδομικό, και ένα μακροδομικό (για εδαφικά υλικά δηλαδή με έντονη ανομοιογένεια ως προς τον βαθμό κορεσμού τους ανάλογα με το μέγεθος των πόρων που απαντώνται).



- Χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά όπως π.χ. η λιθορριπή.
- Χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά οποιασδήποτε κοκκομετρικής διαβάθμισης για επίπεδο ολικών τάσεων τέτοιο που προκαλούνται θραύσεις των ίδιων των κόκκων ή των ακμών των κόκκων τους.
- Εδαφικά υλικά με δομή άλλης φύσης από εκείνη που προκαλείται από απλές διαδρομές φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρυνσης.
- Εντατικές καταστάσεις εξαρτώμενες από το ρυθμό επιβολής της φόρτισης.

Το MBBM *ισχύει* για τα εξής εδαφικά υλικά και εντατικές καταστάσεις:

- Εδαφικά υλικά με ένα κυρίαρχο μέγεθος πόρων, πρακτικά ομοιογενή ως προς τον βαθμό κορεσμού τους (ή με μικρές μόνο διαφορές), τα οποία παρουσιάζουν μόνο ελαστική διόγκωση κατά τη μείωση της μύζησης.
- Λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα εδάφη τα οποία επιδεικνύουν είτε αύξηση, είτε σταθεροποίηση, είτε και μείωση ακόμα της διατμητικής τους αντοχής με την αύξηση της μύζησης.
- Παραμορφώσιμα εδάφη η ξήρανση των οποίων έχει φτάσει ή ακόμα και υπερβεί τη μύζηση επίτευξης παραμένουτος λόγου κενών.
- Για λόγους συνέπειας με το πρώτο σημείο, εδαφικά υλικά με χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού δύο μόνο σημείων καμπής (δηλαδή ενός κυρίαρχου μεγέθους πόρων). Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού εισάγεται ουσιαστικά για τη δυνατότητα πρόβλεψης της διατμητικής αντοχής και όχι της συμπιεστότητας του προσομοιούμενου εδαφικού υλικού, οπότε θα μπορούσε να εισαχθεί καμπύλη οποιασδήποτε γεωμετρικής μορφής. Αυτό όμως δεν θα βρισκόταν σε συνέπεια με τη δυνατότητα προσομοίωσης μεταβολών όγκου και μεταβολών της επιφάνειας διαρροής του προσομοιώματος.
- Εδαφικά υλικά με απλή ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρυνσης που περιορίζεται σε απλές, ανεξάρτητες του ρυθμού φόρτισης, φορτίσεις και αποφορτίσεις και ξηράνσεις και υγράνσεις.

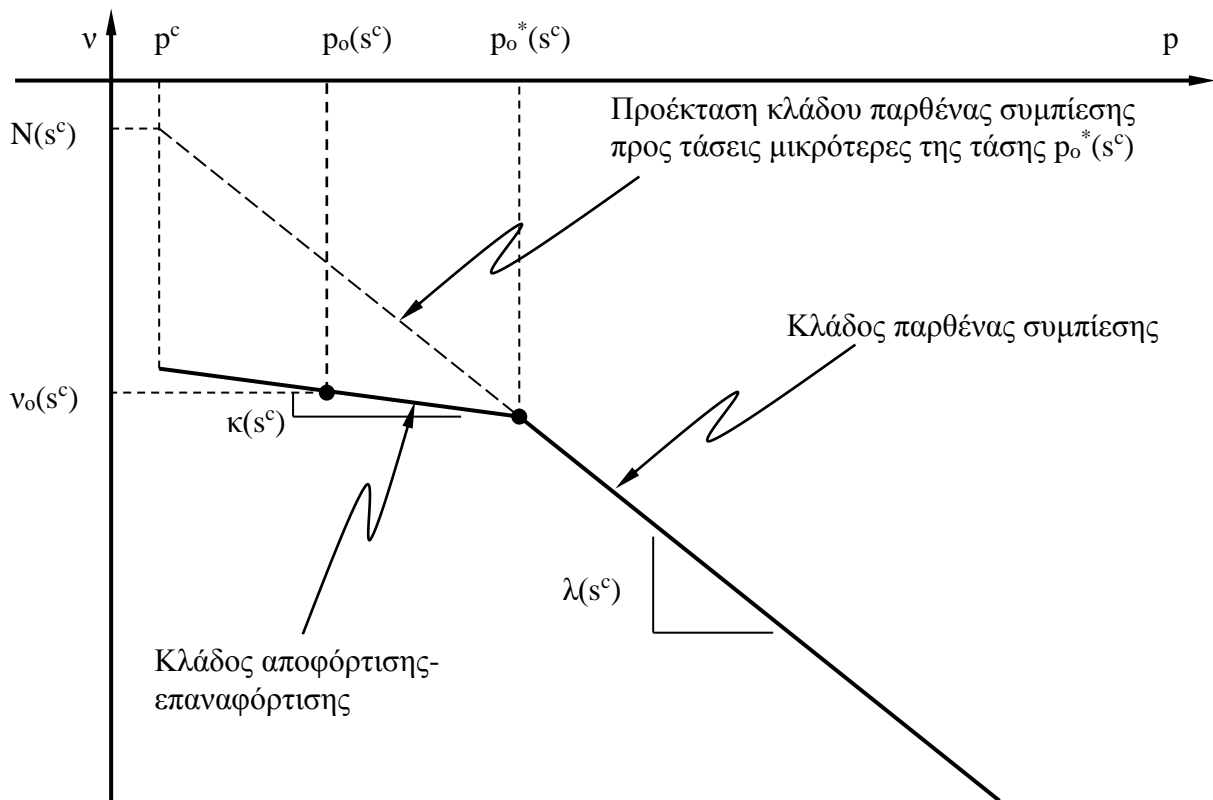
## 19.2.4 Μαθηματική διατύπωση του προτεινόμενου θεωρητικού πλαισίου

### 19.2.4.1 Ογκομετρικές μεταβολές λόγω μεταβολών της τάσης υπό «μηδενική» μύζηση

Οι ογκομετρικές μεταβολές υπό «μηδενική» μύζηση (δηλ. του πλήρως κορεσμένου εδάφους) περιγράφονται όπως και στο BBM (δηλ. όπως στο MCC), αλλά αντί να υιοθετείται πραγματικά μηδενική μύζηση για τις τιμές αναφοράς, υιοθετείται μία τιμή αναφοράς της μύζησης  $s^c$ ,  $s^c \neq 0$ . Αυτή η τιμή αναφοράς της μύζησης εισάγεται για να μη δημιουργούνται προβλήματα με τη μηδενική τιμή της μύζησης στην περιγραφή των ογκομετρικών μεταβολών λόγω μύζησης –βλ. §19.2.4.2– και αντιστοιχεί σε τιμές της μύζησης μικρότερες της μύζησης αποκορεσμού έτσι ώστε στην πράξη και για λόγους δυνατότητας υπολογισμού, οι τιμές των παραμέτρων περιγραφής των ογκομετρικών μεταβολών λόγω μεταβολών της τάσης υπό σταθερή μύζηση  $s^c$  να ταυτίζονται με τις τιμές παραμέτρων του πλήρως κορεσμένου εδάφους.

Έτσι οι ογκομετρικές μεταβολές λόγω μεταβολών της τάσης υπό σταθερή μύζηση  $s^c$  περιγράφονται από δύο δείκτες συμπίεσης  $\kappa(s^c)$  και  $\lambda(s^c)$ , που ταυτίζονται με τις παραμέτρους  $\kappa$  και  $\lambda(0)$  του BBM, με τον πρώτο να αποτελεί την κλίση των κλάδων αποφόρτισης-επαναφόρτισης κατά μήκος καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης με τον άξονα της τάσης σε λογαριθμική κλίμακα (με βάση τον φυσικό λογάριθμο) και τον δεύτερο την κλίση του κλάδου παρθένας συμπίεσης (virgin compression), και μία τάση διαρροής  $p_o^*(s^c)$ , που ταυτίζεται με την τάση διαρροής  $p_o^*(0)$  του BBM που ορίζει τη μετάβαση από κλάδους αποφόρτισης-επαναφόρτισης σε κλάδους παρθένας συμπίεσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 19.1. Η δυνατότητα πλήρους περιγραφής της εντατικής κατάστασης συμπληρώνεται από μία τάση αναφοράς  $p^c$ . Στο σημείο  $(p^c, s^c)$  στο επίπεδο τάσης-μύζησης το εδαφικό υλικό έχει μία τιμή του ειδικού όγκου  $N(p^c, s^c)$  και ένα ζεύγος τιμών τάσης-μύζησης-ειδικού όγκου  $p_o-s_o-v_o$ .

Στον Πίν. 19.1 συνοψίζονται οι απαιτούμενες παράμετροι του προσομοιώματος για την πρόβλεψη των ογκομετρικών μεταβολών λόγω αύξησης της μύζησης υπό μηδενική τάση (σε κάθε πίνακα παράθεσης παραμέτρων, με κανονικό σύμβολο αναφέρονται οι παράμετροι που απαιτούνται και στο BBM, και με έντονο σύμβολο οι παράμετροι που εισήχθησαν στο MBBM). Οι παράμετροι  $\kappa(s^c)$ ,  $\lambda(s^c)$ ,  $N(p^c, s^c)$  και  $p_o^*(s^c)$  στην προκειμένη περίπτωση δεν είναι με έντονο σύμβολο λόγω του ότι βρίσκονται σε ακριβή αντιστοιχία με τις παραμέτρους  $\kappa$ ,  $\lambda(0)$ ,  $N(0)$  και  $p_o^*(0)$  του BBM.



**Σχήμα 19.1.** Μεταβολές του ειδικού όγκου υπό μύζηση αναφοράς  $s^c$ , όπως περιγράφονται από το MBBM, και οι παράμετροι που υπεισέρχονται.

**Πίνακας 19.1.** Παράμετροι του προσομοιώματος για την περιγραφή των ογκομετρικών μεταβολών υπό μηδενική μύζηση.

Είδος παραμέτρων	Συμβολισμός παραμέτρων	Αριθμός παραμέτρων ανά είδος/συνολικός
Παράμετροι του εδαφικού υλικού	$\kappa(s^c), \lambda(s^c), N(p^c, s^c)$	3
Παράμετροι κράτυνσης	$p_0^*(s^c)$	1
Παράμετροι προσέγγισης	$p^c, s^c$	2
Παράμετροι έκφρασης τρέχουσας εντατικής κατάστασης	$v_0, p_0$	2
	<b>Σύνολο:</b>	<b>8</b>

Οι παράμετροι  $\kappa(s^c)$ ,  $\lambda(s^c)$  και  $N(p^c, s^c)$  ονομάστηκαν παράμετροι του εδαφικού υλικού επειδή εξαρτώνται από τη φύση του εδαφικού υλικού, δηλαδή τηρουμένων όλων των υπολοίπων παραμέτρων ίδιων, οι παράμετροι αυτές λαμβάνουν διαφορετική τιμή εξαρτώμενη μόνο από τη

φύση του εδαφικού υλικού. Η παράμετρος  $p_o^*(s^c)$  ονομάστηκε παράμετρος κράτυνσης γιατί εξαρτάται από την ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρανσης του υλικού κατά την έναρξη της προσομοιούμενης τασικής διαδρομής και μεταβάλλεται κατά την κράτυνση που θα επιφέρει η νέα τασική διαδρομή, με την ίδια την κράτυνση να εξαρτάται από την παράμετρο αυτή. Η τάση αναφοράς  $p^c$  και η μύζηση αναφοράς  $s^c$  ονομάστηκαν παράμετροι προσέγγισης (χωρίς να ονομαστεί αντίστοιχα ο ειδικός όγκος  $N(p^c, s^c)$  σε αυτήν, αφού για δεδομένη τάση αναφοράς και μύζηση αναφοράς, η φύση του υλικού θα καθορίσει την τιμή αυτή του ειδικού όγκου) επειδή η επιλογή τους επηρεάζει την εξέλιξη της κράτυνσης και υπάρχει ελευθερία επιλογής σε αυτές, τηρουμένης της απαίτησης η μύζηση αναφοράς να είναι μικρότερη της μύζησης αποκορεσμού.

#### 19.2.4.2 Ογκομετρικές μεταβολές λόγω μεταβολών της μύζησης υπό «μηδενική» τάση

Για να επεξηγηθεί η λογική της περιγραφής των ογκομετρικών μεταβολών υπό μηδενική τάση όπως περιγράφονται από το MBBM, πρέπει πρώτα να επεξηγηθεί η συσχέτιση μεταξύ της μύζησης αποκορεσμού υπό «μηδενική» τάση και της τάσης διαρροής υπό «μηδενική» μύζηση. Όπως και στην περίπτωση των ογκομετρικών μεταβολών λόγω μεταβολών της τάσης υπό «μηδενική» μύζηση, που σημαίνει υπό μύζηση αναφοράς  $s^c$ , έτσι και στην περίπτωση αυτή, υπό «μηδενική» τάση θα πει υπό την τάση αναφοράς  $p^c$  (με όλες τις παραμέτρους που υπεισέρχονται να αφορούν σε αυτήν την τάση). Στο Σχ. 19.2 παρουσιάζεται η εξέλιξη του ειδικού όγκου με την μύζηση για δύο περιπτώσεις: α) την περίπτωση που η μύζηση αποκορεσμού είναι μεγαλύτερη της τάσης διαρροής  $p_o^*(s^c)$ , και β) την περίπτωση που είναι μικρότερη<sup>1</sup>. Στην πρώτη περίπτωση, όσο αυξάνεται η μύζηση μέχρι την τιμή  $p_o^*(s^c)$ , η εξέλιξη του ειδικού όγκου ακολουθεί μία γραμμική κλίσης  $\kappa(s^c)$ , και από τη στιγμή που υπερβεί την τιμή αυτή, ακολουθεί μία γραμμική κλίσης  $\lambda(s^c)$  μέχρι την τιμή της μύζησης αποκορεσμού  $s_{sa}$ . Στη δεύτερη περίπτωση όσο αυξάνεται η μύζηση μέχρι την τιμή της μύζησης αποκορεσμού  $s_{sa}$  η εξέλιξη του ειδικού όγκου ακολουθεί μία γραμμική κλίσης  $\kappa(s^c)$ . Και στις δύο περιπτώσεις η αναμενόμενη εξέλιξη της συμπίεσής του υλικού είναι ότι για μεταβολές της μύζησης μετά τη μύζηση αποκορεσμού  $s_{sa}$  πρέπει να είναι σφιχτότερο από όσο ήταν για τιμές της μύζησης μικρότερες. Κατά συνέπεια στην πρώτη περίπτωση θα πρέπει ο νέος δείκτης συμπίεσης  $\lambda_s$  να είναι μικρότερος του  $\lambda(s^c)$  και στη δεύτερη ο δείκτης  $\kappa_s$

<sup>1</sup> Η σύγκριση αναφέρεται εν προκειμένω με την τιμή  $p_o^*(s^c)$  χάριν απλότητας. Η σκέψη σε επόμενο στάδιο είναι να γίνεται με το  $p_o(s)$ . Σε αυτό το στάδιο κρίνεται ότι απαιτείται σημαντική επιπλέον πειραματική υποστήριξη για να τεκμηριωθεί ή να απορριφθεί κάτι τέτοιο.

μικρότερος του δείκτη  $\kappa(s^c)$ . Σε αυτήν την περίπτωση βέβαια θα πρέπει να αναμένεται ότι όταν η μύζηση φτάσει τιμές ίσες με  $p_o^*(s^c)$  θα πρέπει η τιμή του δείκτη συμπίεσης λόγω μεταβολών της μύζησης  $\lambda_s$  να γίνει μεγαλύτερη της τιμής  $\kappa_s$  αλλά και πάλι μικρότερη της τιμής  $\lambda(s^c)$ . Επειδή οι τιμές του δείκτη αποφόρτισης/επαναφόρτισης  $\kappa(s^c)$  είναι γενικά μικρές -και σίγουρα μικρότερες του δείκτη συμπίεσης  $\lambda(s^c)$ - γίνεται προς απλοποίηση του θεωρητικού πλαισίου η υπόθεση ότι  $\kappa_s = \kappa(s^c)$  και μάλιστα σταθερό, ακόμα και όταν η μύζηση αποκορεσμού είναι μικρότερη από την τάση διαρροής  $p_o^*(s^c)$ .

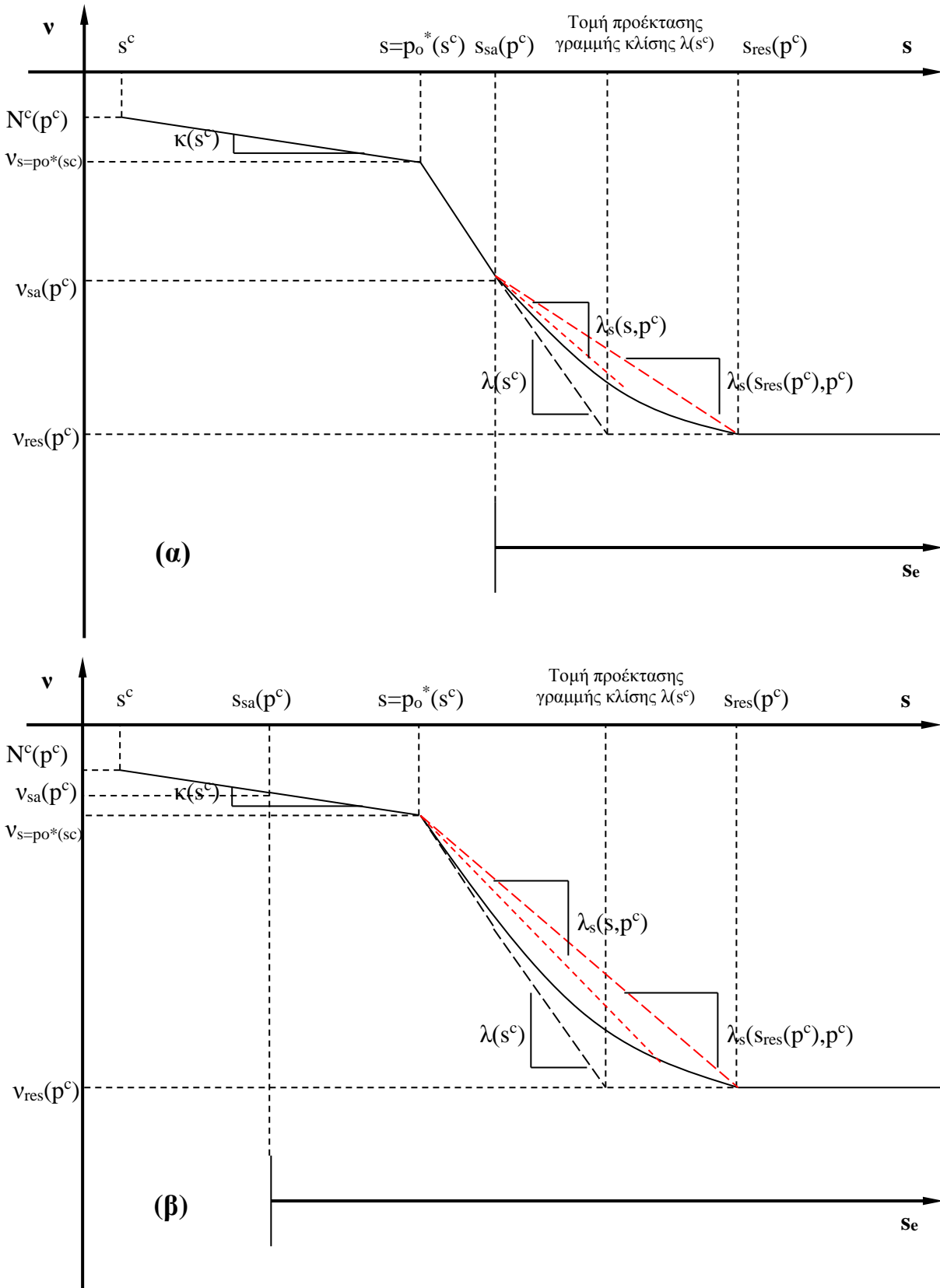
Η συλλογιστική μέχρι αυτό το σημείο είναι ακριβώς ανάλογη αυτής των Sheng, et al. (2008) οι οποίοι προχώρησαν και στον ορισμό των νέων τιμών των δεικτών  $\lambda_s$  και  $\kappa_s$  μέσω των Εξ. 18.125 και 18.126 αντίστοιχα στο Κεφ. 18 (οι οποίες επαναλαμβάνονται εδώ με αρίθμηση 19.1 και 19.2 αντίστοιχα, όπου  $\kappa$  και  $\lambda(0)$  οι παράμετροι του BBM).

$$\lambda_s = \begin{cases} \lambda & s < s_{sa} \\ \lambda(0) \cdot \frac{s_{sa} + 1}{s + 1} & s \geq s_{sa} \end{cases} \quad (19.1)$$

$$\kappa_s = \begin{cases} \kappa & s < s_{sa} \\ \kappa \cdot \frac{s_{sa} + 1}{s + 1} & s \geq s_{sa} \end{cases} \quad (19.2)$$

Οι ίδιοι οι Sheng, et al. (2008) παραδέχονται ότι αυτή η μορφή εξέλιξης των δεικτών  $\lambda_s$  και  $\kappa_s$  αποτελεί απλώς μία πρότασή τους χωρίς τεκμηρίωση από πειραματικά δεδομένα και αφήνουν το ενδεχόμενο να μπορούν να υιοθετηθούν και άλλες εξισώσεις για την εξέλιξη των  $\lambda_s$  και  $\kappa_s$ .

Στο σημείο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν ορισμένα από τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο δεύτερο μέρος της διατριβής. Επιλέχθηκε γενικά να χρησιμοποιηθούν τα εδαφικά υλικά για τα οποία υπήρχαν πιο ολοκληρωμένα δεδομένα και συγκεκριμένα τα πειραματικά αποτελέσματα για τον αποσαθρωμένο Φυλλίτη Σκύρου, την Μάργα Κορίνθου, τον αργιλοποιημένο Ιλύλιθο Πάρνηθας, την Άργιλο Αμαρουσίου και την Μάργα Χαλκουτσίου. Για τα εδαφικά αυτά υλικά υπάρχουν χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού (για διαφορετικούς αρχικούς λόγους κενών μάλιστα και καταστάσεις των υλικών –για τις δύο μάρκες), καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης, δοκιμές άμεσης διάτμησης σε κάθε υλικό αναζυμωμένο σε μορφή πολτού και δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε κάθε υλικό αναζυμωμένο σε μορφή πολτού μετά από εφαρμογή διαφόρων τιμών



**Σχήμα 19.2.** Ογκομετρικές μεταβολές υπό τάση αναφοράς  $p^c$ , όπως περιγράφονται από το MBBM, και οι παράμετροι που υπεισέρχονται, α) στην περίπτωση που η μύζηση αποκορεσμού είναι μεγαλύτερη της τάσης διαρροής υπό την μύζηση αναφοράς  $p_o^*(s^c)$ , και β) στην περίπτωση που είναι μικρότερη.

**Πίνακας 19.2.** Βασικές τιμές παραμέτρων για τον αποσαθρωμένο Φυλλίτη Σκύρου, την Μάργα Κορίνθου, τον αργιλοποιημένο Ιλύλιθο Πάρνηθας, την Άργιλο Αμαρουσίου και την Μάργα Χαλκουτσίου, αναζυμωμένα σε μορφή πολτού.

Παράμετρος	Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου	Μάργα Κορίνθου	Αργιλοποιημένος Ιλύλιθος Πάρνηθας	Άργιλος Αμαρουσίου	Μάργα Χαλκουτσίου
$\phi^*$	35.3	27.5	24.7	19.2	25.0
$M^*$ [ $M = 6\sin\phi' /$ ( $3-\sin\phi'$ ) ]	1.431	1.091	0.971	0.739	0.984
$K_0^*$ ( $=1-\sin\phi'$ )	0.422	0.538	0.582	0.671	0.577
$C_c^* / C_{c,nat}$	0.147 / -	0.184 / 0.234	0.189 / 0.091	0.410 / -	0.252 / 0.221
$C_r$	0.015	0.018	0.038	0.075	0.035
$\lambda^*$ ( $=C_c^*/\ln 10$ ) / $\lambda_{nat}$ ( $=C_{c,nat}/\ln 10$ )	0.064 / -	0.080 / 0.102	0.082 / 0.040	0.178 / -	0.109 / 0.096
$\kappa^2$	0.010	0.012	0.024	0.046	0.022
$\sigma_{v,prec}$	-	3200	1000	-	1000

της μύζησης. Στον Πίν. 19.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι βασικές τιμές παραμέτρων για αυτά τα πέντε εδαφικά υλικά. Ειδικά για τις μεταβολές όγκου κατά την ξήρανση επιλέχθηκαν αρχικά τα πειραματικά αποτελέσματα για την Άργιλο Αμαρουσίου και τη Μάργα Χαλκουτσίου για τις 4 χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού που υπολογίστηκαν για τα δύο αυτά υλικά σε μορφή πολτού και μετά από φόρτιση μέχρι τα 62.5 kPa, τα 500 kPa και τα 4000 kPa και αποφόρτιση μέχρι μηδενική τάση πριν την ξήρανση. Τα επιμέρους χαρακτηριστικά περιγραφής κάθε μίας από τις καμπύλες αυτές παρουσιάζονται στους Πιν. 19.3 και 19.4 για την Άργιλο Αμαρουσίου και Μάργα Χαλκουτσίου αντίστοιχα μαζί με τις τιμές κάποιων παραμέτρων που επιλέχθηκαν για επιτυχέστερη προσομοίωση. Σε κάθε ένα από τα επιμέρους διαγράμματα λοιπόν στα Σχ. 19.3 και 19.4 παρατίθενται τα πειραματικά δεδομένα, η προσομοίωση με βάση τις Εξ. 19.1 και 19.2 (Sheng, et al., 2008) με συνεχή γραμμή, η προσομοίωση με βάση το BBM αν τεθεί  $\lambda_s = \lambda(0)$ ,  $\kappa_s = \kappa$  και  $s_o = s_{sa}$  (καμπύλες BBM-Δεδ σε κάθε διάγραμμα) και η καλύτερη δυνατή

<sup>2</sup> Επί του κλάδου που υπολογίστηκε ο δείκτης αποφόρτισης και στο τμήμα αυτού που έγινε ο υπολογισμός, στο μεν σημείο επί του κλάδου συμπίεσης θεωρήθηκε το  $K_0$  του κανονικά στερεοποιημένου υλικού για τον υπολογισμό του  $p$ , στο δε σημείο επί του κλάδου αποφόρτισης το  $K_0$  του υλικού υπερστερεοποιημένου,  $K_0 = (1 - \sin \phi') * OCR^{\sin \phi'}$ .

**Πίνακας 19.3.** Χαρακτηριστικά περιγραφής καμπυλών ξήρανσης για την Άργιλο Αμαρουσίου.

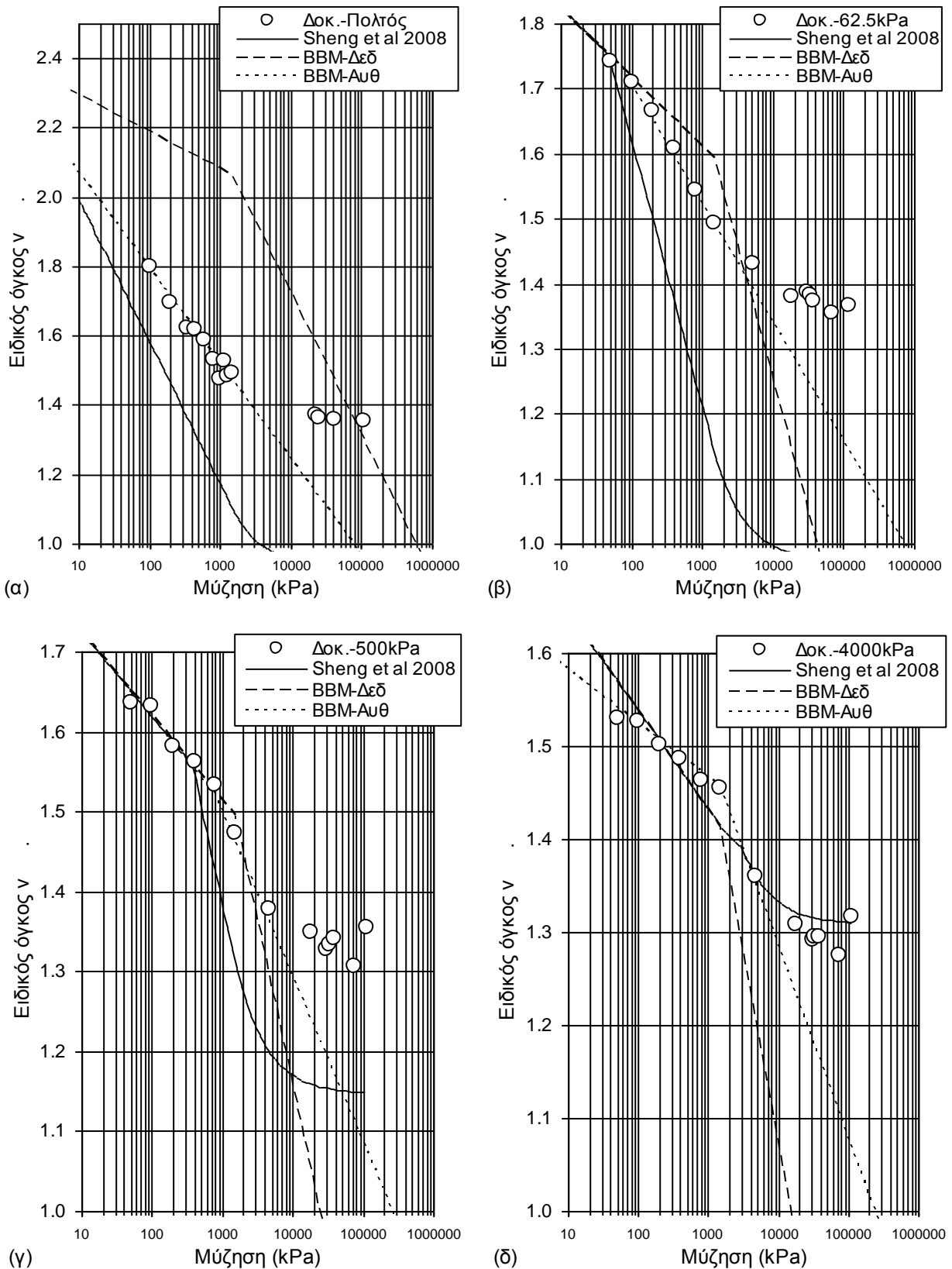
Κατάσταση	$N(p^c=1 \text{ kPa})$	$s_{sa} \text{ (kPa)}$	$\kappa_s$	$\lambda_s$	$s_{res} \text{ (kPa)}$	$N_{res}$
Πολτός	2.400 (2.350)	1500 (1)	0.046	0.178 (0.120)	5800	1.353
Φόρτιση ως 62.5 kPa	1.930	1500 (75)	0.046	0.178 (0.080)	30000	1.360
Φόρτιση ως 500 kPa	1.830	1500 (800)	0.046	0.178 (0.090)	30000	1.330
Φόρτιση ως 4000 kPa	1.750 (1.640)	1500	0.046 (0.025)	0.178 (0.090)	30000	1.290

**Πίνακας 19.4.** Χαρακτηριστικά περιγραφής καμπυλών ξήρανσης για τη Μάργα Χαλκουτσίου.

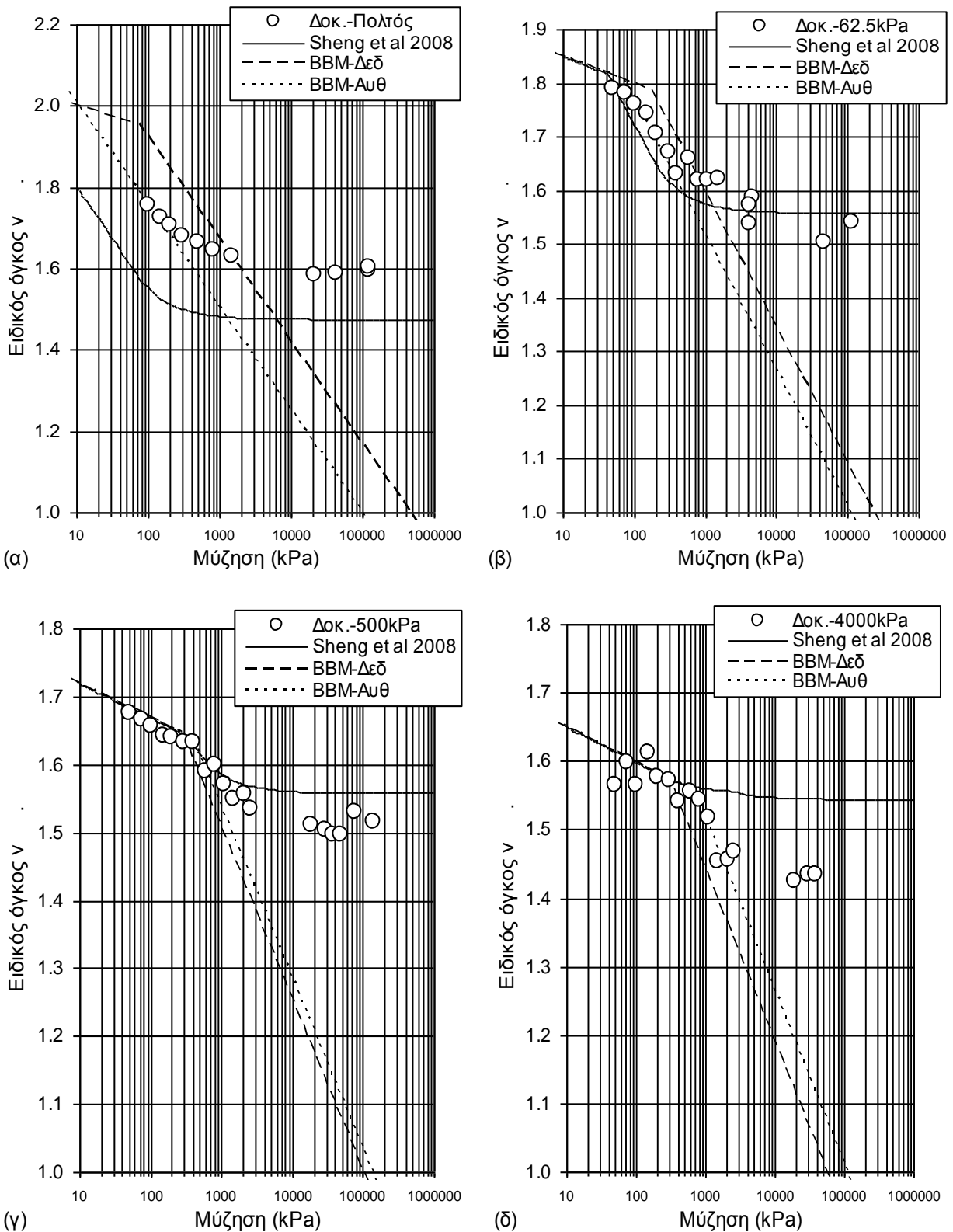
Κατάσταση	$N(p^c=1 \text{ kPa})$	$s_{sa} \text{ (kPa)}$	$s_{res} \text{ (kPa)}$	$N_{res}$
Πολτός	2.05 (2.26)	75 (1)	4000	1.600
Φόρτιση ως 62.5 kPa	1.900	175 (70)	4000	1.540
Φόρτιση ως 500 kPa	1.770	275 (400)	6000	1.515
Φόρτιση ως 4000 kPa	1.700	300 (700)	15000	1.434

προσομοίωση που μπορούσε να επιτευχθεί με το BBM μεταβάλλοντας τις τιμές παραμέτρων αυθαίρετα (καμπύλες BBM-Αυθ σε κάθε διάγραμμα -οι αυθαίρετα επιλεγθείσες τιμές είναι αυτές που αναφέρονται εντός παρενθέσεων στους Πιν. 19.3 και 19.4). Όπως προκύπτει από τα Σχ. 19.3 και 19.4 καμία από αυτές τις επιλογές προσομοίωσης δεν είναι επιτυχής. Το πρόβλημα των προσομοιώσεων με το BBM (σε όποια από τις δύο επιλογές τιμών παραμέτρων) γίνεται εμφανέστατο επιδεικνύοντας την αδυναμία του να προβλέψει τον παραμένοντα λόγο κενών λόγω ξήρανσης. Η προσπάθεια εξορθολογισμού τιμών παραμέτρων (καμπύλες BBM-Δεδ) οδηγεί σε προβλέψεις εντυπωσιακά μακριά από τις πραγματικές τιμές (ειδικά στην περίπτωση των αναζυμωμένων εδαφικών υλικών που ξηραίνονται από μορφή πολτού), ενώ η απόδοση αυθαίρετων τιμών παραμέτρων, στην μεν Μάργα Χαλκουτσίου περιορίζεται στην μύζηση διαρροής  $s_o$  (το οποίο μάλλον πρέπει να θεωρηθεί επιτυχία, αφού στο αρχικό BBM το  $s_o$  δεν έχει ταυτιστεί με το  $s_{sa}$  αλλά πιο πολύ με την διαρροή), στη δε Άργιλο Αμαρουσίου και στην  $s_o$ , και στο  $\lambda_s$ , και στο  $N(p^c=1 \text{ kPa})$ , ακόμα και στο  $\kappa_s$ . Η προσομοίωση με βάση τις Εξ. 19.1 και 19.2 (Sheng, et al., 2008) επιδεικνύει την ικανότητα σταθεροποίησης του λόγου κενών λόγω ξήρανσης, αλλά πρακτικά σε τυχαία τιμή του λόγου κενών, η οποία για να συγκεκριμενοποιηθεί





**Σχήμα 19.3.** Ογκομετρικές μεταβολές λόγω ξήρανσης της Αργίλου Αμαρουσίου με τις προβλέψεις του Sheng, et al (2008) και του BBM με τιμές παραμέτρων από τα εργαστηριακά δεδομένα (BBM-Δεδ) και αυθαίρετα επιλεγμένες (BBM-Αυθ) για το υλικό α) σε μορφή πολτού, και μετά από συμπίεση μέχρι β) 62.5 kPa, γ) 500 kPa, και δ) 4000 kPa και ακόλουθη πλήρη αποφόρτιση πριν την ξήρανση.



**Σχήμα 19.4.** Ογκομετρικές μεταβολές λόγω ξήρανσης της Μάργας Χαλκουτσιού με τις προβλέψεις του Sheng, et al (2008) και του BBM με τιμές παραμέτρων από τα εργαστηριακά δεδομένα (BBM-Δεδ) και αυθαίρετα επιλεγμένες (BBM-Αυθ) για το υλικό α) σε μορφή πολτού, και μετά από συμπίεση μέχρι β) 62.5 kPa, γ) 500 kPa, και δ) 4000 kPa και ακόλουθη πλήρη αποφόρτιση πριν την ξήρανση.

πρέπει στην πραγματικότητα να μεταβληθεί η τιμή του  $s_{sa}$  σε τιμές διάφορες (αισθητά) από τις αντιστοιχούσες στις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού.

Οι πρώτες αυτές απόπειρες προσομοίωσης καταλήγουν στα εξής:

- Το BBM μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιλέγοντας τιμές του  $s_0$  κοντά στη μύζηση διαρροής (οι αυθαίρετα επιλεγθείσες τιμές του  $s_0$  στις καμπύλες BBM-Αυθ βρίσκονται κοντά στις γνωστές για τις συγκεκριμένες καμπύλες τιμές της μύζησης διαρροής αλλά δεν ταυτίζονται με αυτές) αν και μπορεί να απαιτηθούν εντελώς αυθαίρετες τιμές του  $\lambda_s$ , ή ακόμα και του  $\kappa_s$ . Η αδυναμία πρόβλεψης σταθεροποίησης του λόγου κενών λόγω ξήρανσης μπορεί να διορθωθεί εισάγοντας μια οριζόντια γραμμή που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών και να αναζητηθεί η τιμή της μύζησης  $s_{res}$ , στην οποία τέμνει την καμπύλη κλίσης  $\lambda_s$ . Το μειονέκτημα της λύσης αυτής είναι η αδυναμία πρόβλεψης του κοίλου τμήματος της καμπύλης ξήρανσης καθώς πλησιάζει στην σταθεροποίηση στον παραμένοντα λόγο κενών, το οποίο αναμένεται να οδηγεί σε εκείνη την περιοχή της μύζησης σε υπερεκτίμηση των μεταβολών του λόγου κενών λόγω ξήρανσης και άρα των αντίστοιχων παραμορφώσεων.
- Η μεθοδολογία προσομοίωσης με βάση την πρόταση των Sheng, et al. (2008) έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς προσομοιώνει την σταδιακή προσέγγιση της καμπύλης ξήρανσης προς την ευθεία που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών, αλλά στην πράξη για να καταλήξει και στην ορθή τιμή του παραμένοντα λόγου κενών απαιτεί ουσιαστικά αυθαίρετη επιλογή της τιμής του  $s_{sa}$ .

Σε μία προσπάθεια να διορθωθεί το πρόβλημα με την προσομοίωση του BBM (ακόμα και όταν εισάγεται οριζόντια γραμμή που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών) διατυπώθηκαν οι Εξ. 19.3 και 19.4. Ο δείκτης  $\kappa_s$  θεωρείται χάριν απλότητας πάντα ίσος με  $\kappa$  και σταθερός ακόμα και σε υλικά με πίεση διείσδυσης αέρα  $s_{sa}$  μικρότερη της τάσης διαρροής  $p_0(s)$  στο εύρος μύζησης μεταξύ  $s_{sa}$  και  $p_0(s)$ . Για τον δείκτη  $\lambda_s$  όμως διακρίθηκαν οι περιπτώσεις η τάση διαρροής να είναι μικρότερη από την πίεση διείσδυσης αέρα και μεγαλύτερη. Στην πρώτη περίπτωση η τιμή του  $\lambda_s$  δίνεται από την Εξ. 19.3 για τις διάφορες πιθανές τιμές της μύζησης ( $s_{res}$  η μύζηση επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών) και στη δεύτερη από την Εξ. 19.4. Η λογική των Εξ. 19.3 και 19.4 είναι ότι ο δείκτης συμπίεσης λόγω αύξησης της μύζησης  $\lambda_s$  γίνεται μικρότερος (δηλαδή το έδαφος στιφρότερο) όταν η μύζηση υπερβεί την πίεση διείσδυσης αέρα (στην περίπτωση που η πίεση διείσδυσης αέρα υπερβαίνει την τάση διαρροής που αντιστοιχεί

στη μύζηση –Εξ. 19.3) ή όταν η μύζηση υπερβεί την τάση διαρροής που αντιστοιχεί στη μύζηση (στην περίπτωση που η τάση διαρροής υπερβαίνει την πίεση διείσδυσης αέρα –Εξ. 19.4). Ο δε μαθηματικός τρόπος με τον οποίο εισήχθη η μείωση προβλέπει ουσιαστικά μια βαθμιαία μετάβαση από την τιμή  $\lambda(0)$  όταν η μύζηση ισούται με την  $s_{sa}$  (Εξ. 19.3) ή την  $p_o(s)$  (Εξ. 19.4) στο 0 όταν γίνεται και στις δύο περιπτώσεις  $s=s_{res}$ . Για μεγαλύτερη ευελιξία, στις Εξ. 19.3 και 19.4 εισήχθησαν τρεις διορθωτικοί όροι χρησιμοποιούμενοι ως παράμετροι προσέγγισης, οι  $\mu_s$ ,  $\mu_\lambda$  και  $\mu_p$ , οι οποίοι πολλαπλασιάζουν αντίστοιχα την πίεση διείσδυσης αέρα  $s_{sa}$ , τον δείκτη συμπίεσης του πλήρως κορεσμένου εδαφικού υλικού  $\lambda(0)$  και την τάση διαρροής υπό μύζηση  $s$ . Έτσι ο δείκτης συμπίεσης λόγω αύξησης της μύζησης  $\lambda_s$  δίνεται από τις Εξ. 19.5 και 19.6 για την περίπτωση που η τάση διαρροής είναι μικρότερη από την πίεση διείσδυσης αέρα και την περίπτωση που είναι μεγαλύτερη αντίστοιχα.

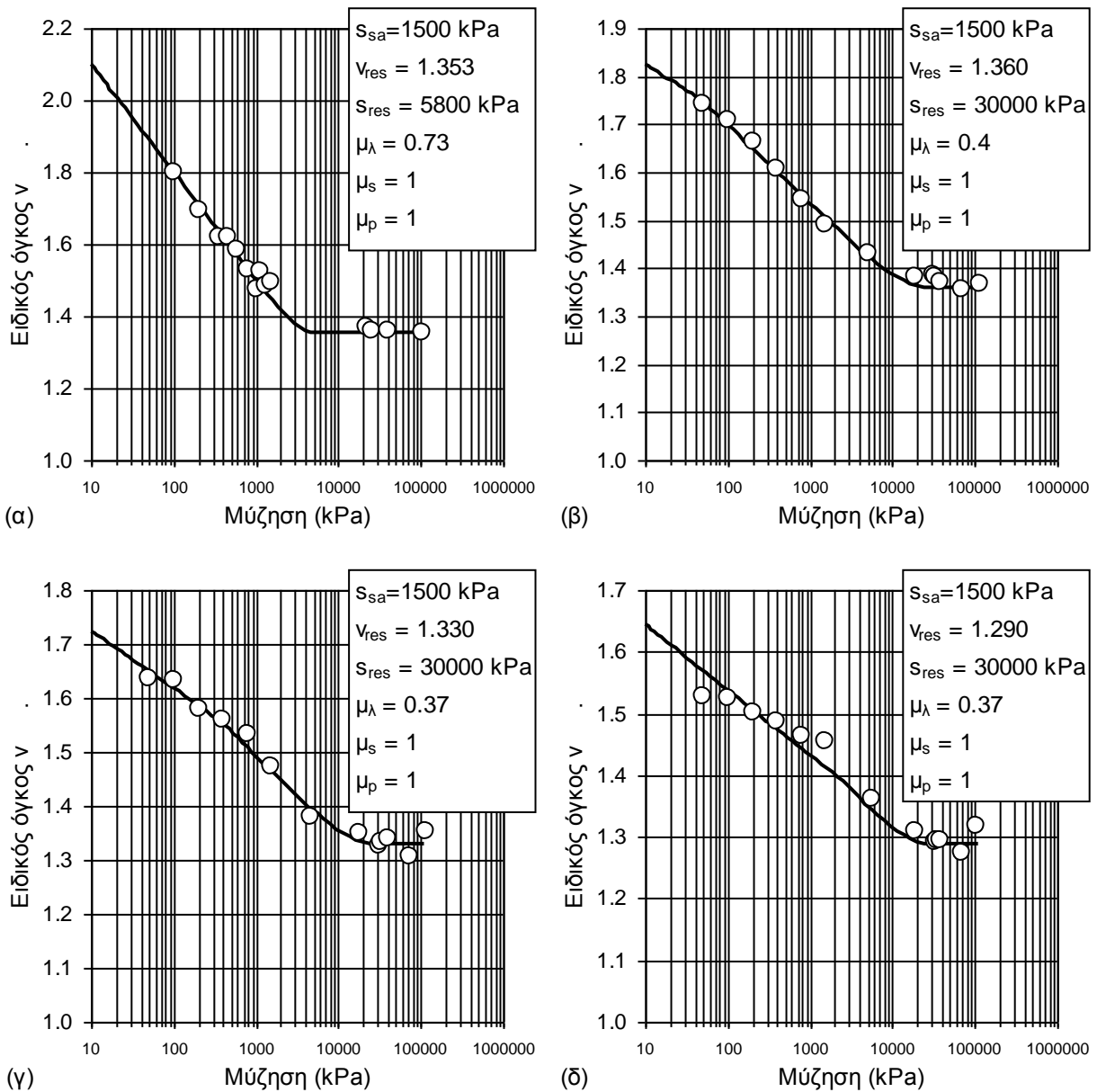
$$\lambda_s = \begin{cases} \lambda(0) & s < s_{sa} \\ \lambda(0) \cdot \frac{s - s_{res}}{s_{sa} - s_{res}} & s_{res} > s \geq s_{sa} \\ 0 & s_{res} < s \end{cases} \quad (19.3)$$

$$\lambda_s = \begin{cases} \lambda(0) \cdot \frac{s - s_{res}}{p_o(s) - s_{res}} & s_{res} > s \geq p_o(s) \\ 0 & s_{res} < s \end{cases} \quad (19.4)$$

$$\lambda_s = \begin{cases} \lambda(0) & s < \mu_s \cdot s_{sa} \\ \mu_\lambda \cdot \lambda(0) \cdot \frac{s - s_{res}}{\mu_s \cdot s_{sa} - s_{res}} & s_{res} > s \geq \mu_s \cdot s_{sa} \\ 0 & s_{res} < s \end{cases} \quad (19.5)$$

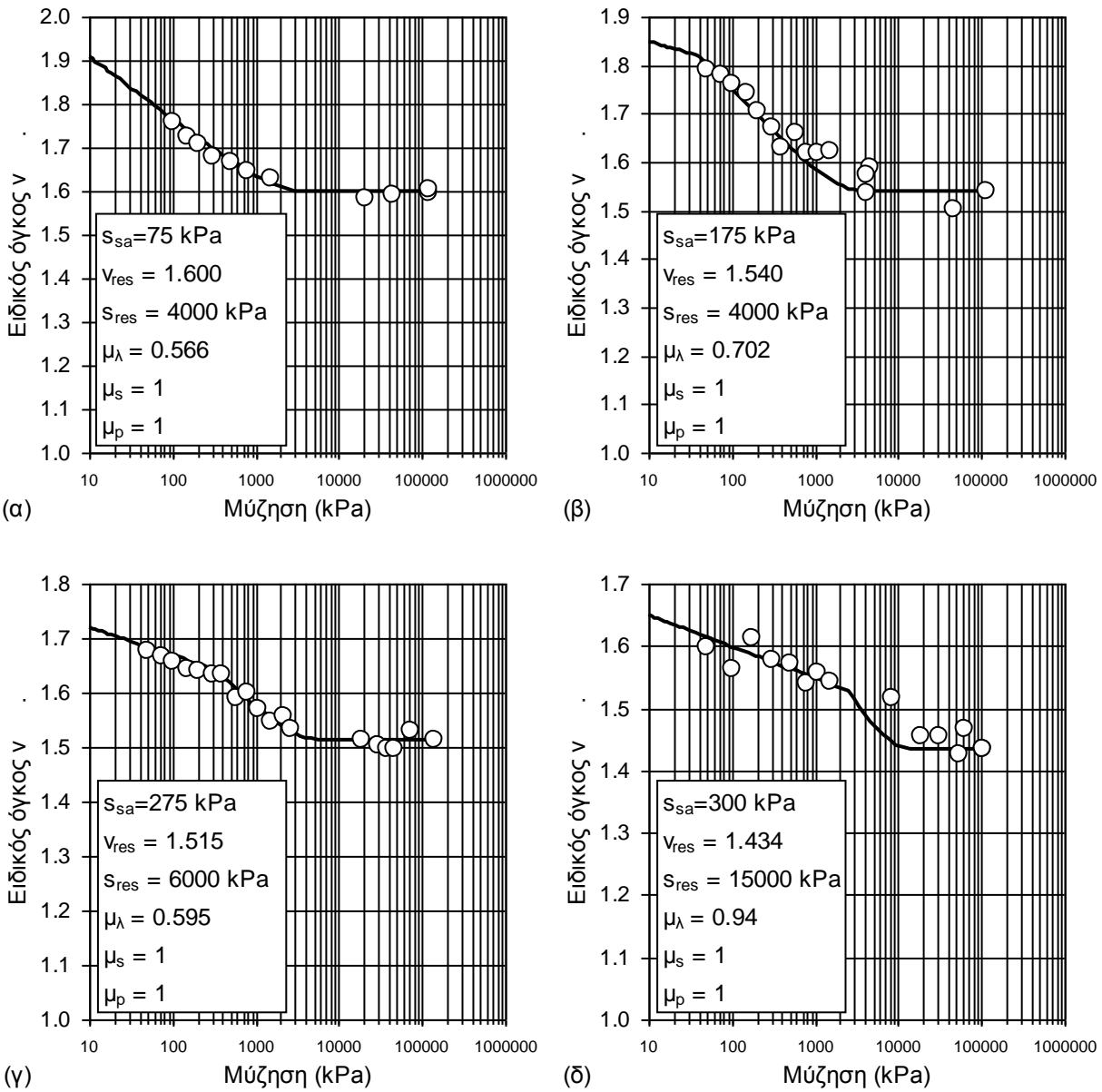
$$\lambda_s = \begin{cases} \mu_\lambda \cdot \lambda(0) \cdot \frac{s - s_{res}}{\mu_p \cdot p_o(s) - s_{res}} & s_{res} > s \geq \mu_p \cdot p_o(s) \\ 0 & s_{res} < s \end{cases} \quad (19.6)$$

Στα Σχ. 19.5 και 19.6 παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης της Αργίλου Αμαρουσίου και της Μάργας Χαλκουτσίου που παρουσιάστηκαν και στα Σχ. 19.3 και 19.4 με τις βέλτιστες προβλέψεις τους με βάση τις Εξ. 19.5 και 19.6. Στο Σχ. 19.7 παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης της φυσικής και της αναζυμωμένης/επανασυμπίεσμένης Μάργας Χαλκουτσίου μέχρι τα 500 kPa κατακόρυφης τάσης με τις βέλτιστες προβλέψεις τους με βάση τις Εξ. 19.5 και 19.6. Στα Σχ. 19.8, 19.9 και 19.10 παρουσιάζονται οι καμπύλες ξήρανσης του Αργιλοποιημένου Ιλυόλιθου Πάρνηθας, της Μάργας Κορίνθου και του Αποσαθρωμένου Φυλλίτη Σκύρου



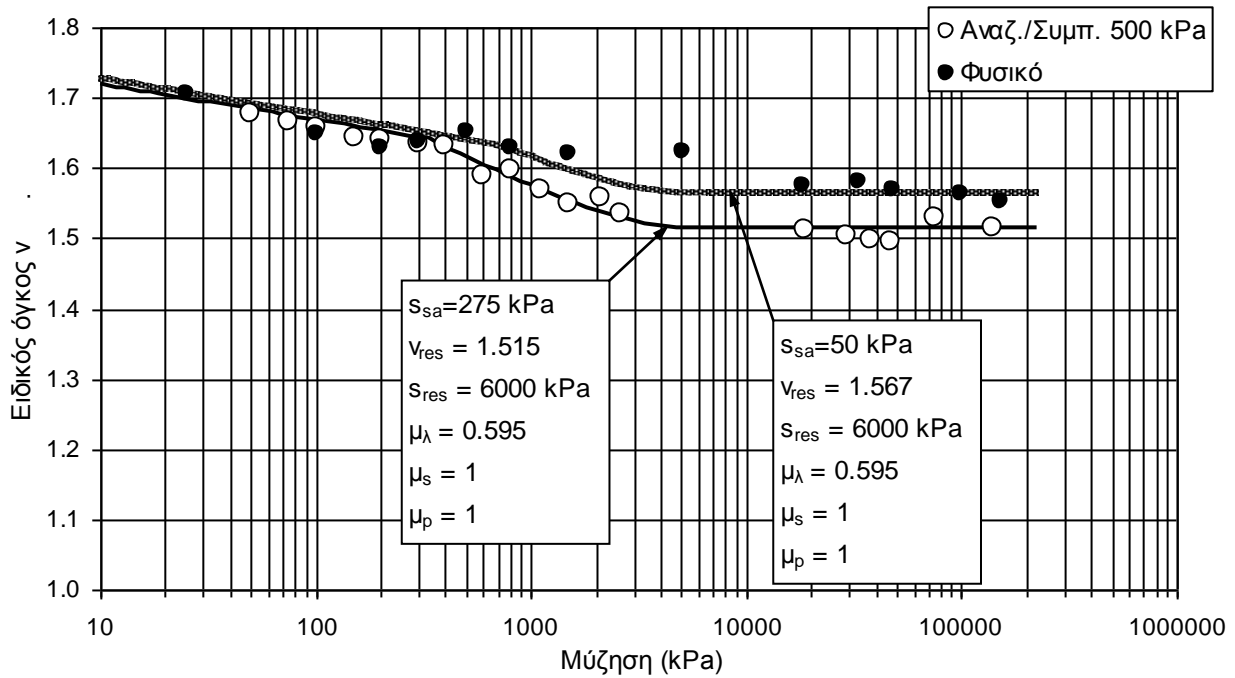
**Σχήμα 19.5.** Καμπύλες ξήρανσης της Αργίλου Αμαρουσίου με τη βέλτιστη προσέγγιση με βάση τις Εξ. 19.5 και 19.6 και τις τιμές παραμέτρων για τις οποίες προέκυψαν.

αντίστοιχα για τα υλικά σε μορφή πολτού και αναζυμωμέν/επανασυμπιεσμένα μέχρι 4000 kPa, 800 kPa και 500 kPa κατακόρυφης τάσης αντίστοιχα. Παρά την ύπαρξη δεδομένων για τη φυσική Μάργα Κορίνθου και τον φυσικό Αργιλοποιημένου Ιλυόλιθο Πάρνηθας δεν επιδιώχθηκε η προσομοίωση των σχετικών καμπυλών αφού αφενός και για τα δύο υλικά είναι πολύ μεγάλη η διασπορά των αποτελεσμάτων, για δε τη Μάργα Κορίνθου η μέγιστη εφαρμοσθείσα μύζηση είναι μόνο 1500 kPa.

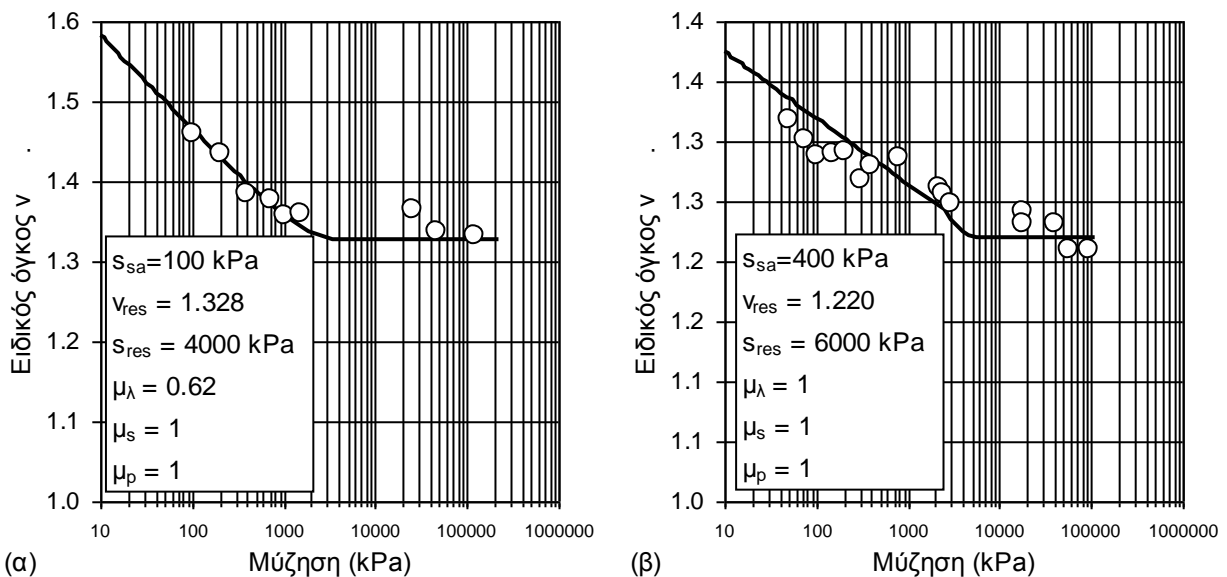


**Σχήμα 19.6.** Καμπύλες ξήρανσης της Μάργας Χαλκουτσίου με τη βέλτιστη προσέγγιση με βάση τις Εξ. 19.5 και 19.6 και τις τιμές παραμέτρων για τις οποίες προέκυψαν.

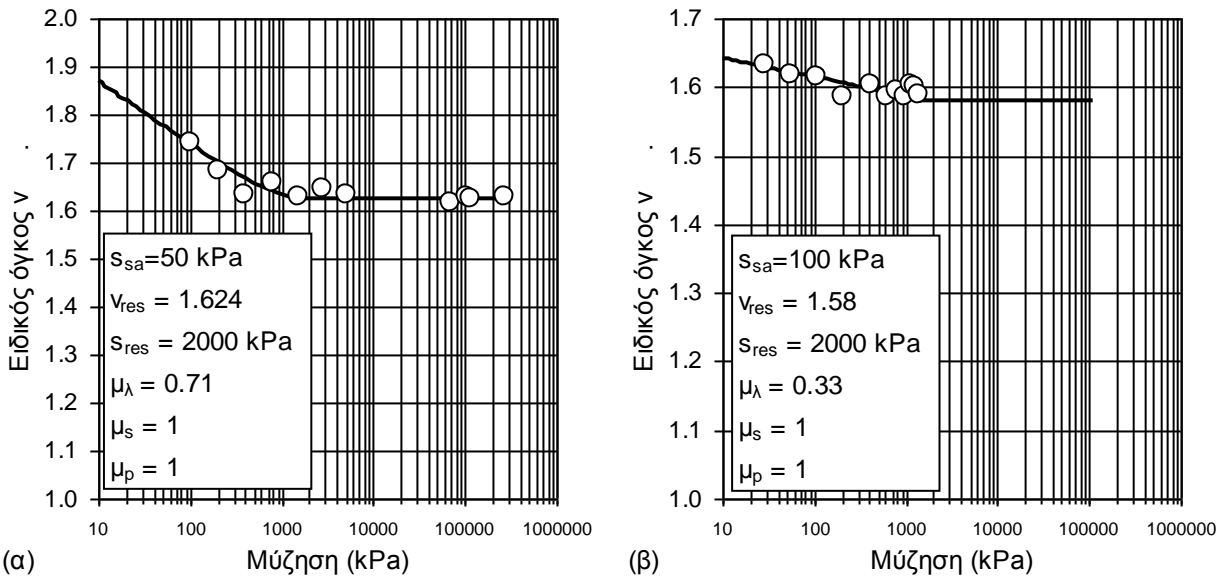
Από τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων προκύπτει ότι οι Εξ. 19.5 και 19.6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία για την πρόβλεψη των καμπυλών ξήρανσης επιτρέποντας και τη σταδιακή μεταβολή της κλίσης των καμπυλών μέχρι μηδενισμού της κλίσης τους αλλά και την κατάληξή τους στην τιμή του παραμένοντος λόγου κενών/ειδικού όγκου μέσω κατάλληλης επιλογής της τιμής της μύζησης επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών και του διορθωτικού συντελεστή  $\mu_{\lambda}$ . Ο διορθωτικός συντελεστής  $\mu_{\lambda}$  είναι τελικά ο μόνος διορθωτικός συντελεστής



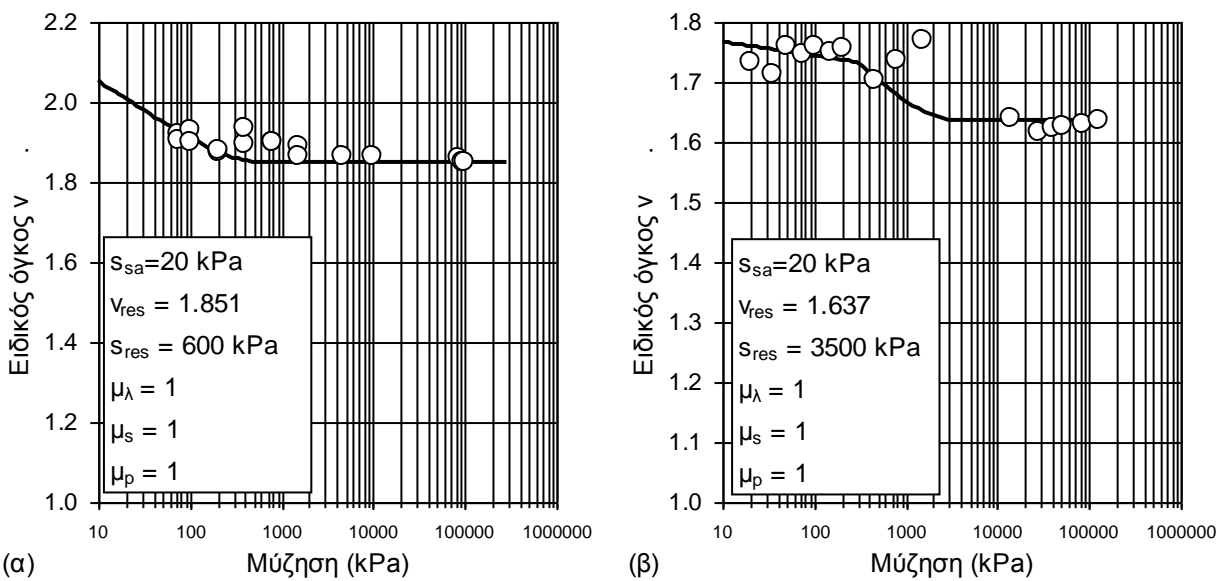
**Σχήμα 19.7.** Καμπύλες ξήρανσης της φυσικής και της αναζυμωμένης/επανασυμπιεσμένης μέχρι τα 500 kPa Μάργας Χαλκουντίου με τη βέλτιστη προσέγγιση με βάση τις Εξ. 19.5 και 19.6 και τις τιμές παραμέτρων για τις οποίες προέκυψαν.



**Σχήμα 19.8.** Καμπύλες ξήρανσης του Αργιλοποιημένου Ιλυολίθου Πάρνηθας με τη βέλτιστη προσέγγιση με βάση τις Εξ. 19.5 και 19.6 και τις τιμές παραμέτρων για τις οποίες προέκυψαν, α) για το υλικό αναζυμωμένο σε μορφή πολτού, και β) για το υλικό αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο μέχρι και τα 4000 kPa κατακόρυφης τάσης.



**Σχήμα 19.9.** Καμπύλες ξήρανσης της Μάργας Κορίνθου με τη βέλτιστη προσέγγιση με βάση τις Εξ. 19.5 και 19.6 και τις τιμές παραμέτρων για τις οποίες προέκυψαν, α) για το υλικό αναζυμωμένο σε μορφή πολτού, και β) για το υλικό αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο μέχρι και τα 800 kPa κατακόρυφης τάσης.



**Σχήμα 19.10.** Καμπύλες ξήρανσης του αποσαθρωμένου Φυλλίτη Σκύρου με τη βέλτιστη προσέγγιση με βάση τις Εξ. 19.5 και 19.6 και τις τιμές παραμέτρων για τις οποίες προέκυψαν, α) για το υλικό αναζυμωμένο σε μορφή πολτού, και β) για το υλικό αναζυμωμένο/επανασυμπιεσμένο μέχρι και τα 500 kPa κατακόρυφης τάσης.



που χρησιμοποιήθηκε, αλλά η ανάγκη για την ενεργοποίησή του στην πραγματικότητα δηλώνει ότι ο δείκτης συμπίεσης  $\lambda(0)$  στον χώρο ειδικού όγκου-μύζησης, ακόμα και όταν τα εδαφικά υλικά είναι πλήρως κορεσμένα, δεν μπορεί να περιγράψει τη μεταβολή του ειδικού όγκου με τη μύζηση. Επίσης η μύζηση επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών, ενώ στην πραγματικότητα αποτελεί παράμετρο του εδαφικού υλικού τελικά καταλήγει να εκτιμάται κατά την προσομοίωση ελλείψει μίας εργαστηριακής μεθόδου ελέγχου της μύζησης η οποία να καλύπτει το μεγάλο κενό μεταξύ της μέγιστης τιμής της μύζησης που μπορεί να εφαρμοστεί με τη μέθοδο μετατόπισης άξονα (1500 kPa) και των ελαχίστων τιμών της μύζησης που μπορούν να εφαρμοστούν αξιόπιστα με τη μέθοδο των υδατικών διαλυμάτων αλάτων (περί τα 10 MPa). Η παρατήρηση αυτή ενισχύει την ανάγκη για μια μέθοδο ελέγχου της μύζησης σε αυτό το εύρος τιμών της μύζησης, αλλά επιδεικνύει και τη σημασία των εμπειρικών συσχετίσεων που αναπτύχθηκαν με βάση την πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής (βλ. §14.6.4, Εξ. 14.11 έως 14.16 στον Πιν. 14.7). Χρησιμοποιώντας τις εμπειρικές αυτές συσχετίσεις ως εργαλείο πρόβλεψης του παραμένοντος λόγου κενών (και άρα του παραμένοντος ειδικού όγκου) ακόμα και με μεγάλα κενά στο εύρος τιμών της μύζησης μεταξύ των δύο προαναφερθεισών μεθόδων ελέγχου, μπορεί να εκτιμηθεί μία τιμή της μύζησης επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών ώστε οι προσομοιώσεις να καταλήγουν στην επιθυμητή τιμή του ειδικού όγκου. Αυτό άλλωστε επιδεικνύεται και στο Σχ. 19.9β για τη Μάργα Κορίνθου αναζυμωμένη/επανασυμπιεσμένη μέχρι 800 kPa κατακόρυφης τάσης για την οποία δεν υπήρχε διαθέσιμη η μέθοδος υδατικών διαλυμάτων κατά τον χρόνο προσδιορισμού της, ενώ αντίθετα υπήρχε η δυνατότητα προσδιορισμού του παραμένοντος λόγου κενών με την άφεση δοκιμίων για ξήρανση στην ατμόσφαιρα και μέτρηση του ολικού όγκου τους. Έτσι παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχουν στοιχεία για τιμές της μύζησης μεγαλύτερες από 1500 kPa επιλέχθηκε μία τιμή της μύζησης επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών έτσι ώστε η καμπύλη προσομοίωσης να καταλήγει στην τιμή του μετρηθέντος παραμένοντος ειδικού όγκου. Ατυχώς το συγκεκριμένο εδαφικό υλικό σε αυτήν την κατάσταση δεν επιδεικνύει μεγάλες μεταβολές λόγω ξήρανσης για να επιδειχθεί καθαρότερα η σημασία των εμπειρικών συσχετίσεων για τον παραμένοντα λόγο κενών, αλλά η δυνατότητα παραμένει.

Με βάση αυτά, στον Πιν. 19.5 συνοψίζονται οι απαιτούμενες παράμετροι του προσομοιώματος για την πρόβλεψη των ογκομετρικών μεταβολών λόγω αύξησης της μύζησης υπό μηδενική τάση. Στον Πιν. 19.5 οι παράμετροι  $s_{sa}$ ,  $s_{res}$ ,  $v_{res}$  και  $\kappa_s$  έχουν θεωρηθεί ταυτόχρονα παράμετροι και του εδαφικού υλικού και παράμετροι κράτυνσης. Αυτό γιατί αφενός η φύση των εδαφικών υλικών καθορίζει την τιμή αυτών των παραμέτρων για δεδομένη κοινή ιστορία φόρτισης-

αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρανσης και αφετέρου γιατί μεταβάλλονται (ως τιμές ή ως πεδίο τιμών μύζησης στο οποίο εφαρμόζονται όπως το  $\kappa_s$ ) στο ίδιο εδαφικό υλικό για διαφορετική ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρανσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα η περίπτωση του παραμένοντος λόγου κενών (και άρα του παραμένοντος ειδικού όγκου), για τον οποίο στο Κεφ. 14 επιδείχθηκε η εξάρτησή του τόσο από την φύση του εδαφικού υλικού όσο και από την κατάσταση του εδαφικού υλικού όταν άρχισε η ξήρασή του μέχρι παραμένοντος ποσοστού υγρασίας, όπως η κατάσταση αυτή καθορίζεται από την ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης.

**Πίνακας 19.5** Παράμετροι του προσομοιώματος για την περιγραφή των ογκομετρικών μεταβολών λόγω μεταβολής της μύζησης υπό μηδενική τάση.

Είδος παραμέτρων	Συμβολισμός παραμέτρων	Αριθμός παραμέτρων ανά είδος/συνολικός
Παράμετροι του εδαφικού υλικού	$s_{sa}(p^c), s_{res}(p^c),$	4
Παράμετροι κράτυνσης	$v_{res}(p^c), \kappa_s (= \kappa)$	
Παράμετροι προσέγγισης	$\mu_\lambda, \mu_s, \mu_p$	3
Παράμετροι έκφρασης τρέχουσας εντατικής κατάστασης	s	1
	<b>Σύνολο:</b>	<b>8</b>

#### 19.2.4.3 Εξέλιξη του δείκτη συμπίεσης και της τάσης διαρροής με την μύζηση

Για την εξέλιξη του δείκτη συμπίεσης και της τάσης διαρροής κατά μήκος καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μη μηδενική μύζηση υιοθετήθηκαν οι ίδιες εξισώσεις που προτάθηκαν και στο BBM αλλά για τιμή της μύζησης ίση με την ισοδύναμη μύζηση  $s_e = s - s_{sa}(p^c)$ , η οποία εν προκειμένω χρησιμοποιείται ως ενδιάμεση παράμετρος (Εξ. 18.2 και 18.4 στο Κεφ. 18 οι οποίες επαναλαμβάνονται εδώ με αρίθμηση 19.7 και 19.8 αντίστοιχα). Για τιμές της μύζησης μικρότερες της μύζησης αποκορεσμού  $s_{sa}(p^c)$  ισχύουν οι Εξ. 19.9 και 19.10 όπως και στο προσομοίωμα των Sheng, et al. (2008), όπου  $p'$  η ενεργός τάση.

$$\frac{p_o(s_e)}{p^c} = \left( \frac{p_o^*(s^c)}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(s^c) - \kappa}{\lambda(s_e) - \kappa}} \quad (19.7)$$

$$\lambda(s_e) = \lambda(s^c) \cdot [(1-r) \cdot \exp(-\beta \cdot s_e) + r] \quad (19.8)$$

$$p' = p - s \quad (19.9)$$

$$\lambda(s) = \lambda(s^c) \quad (19.10)$$

Στην §18.2.3 έχει γίνει πλήρης επεξήγηση των παραμέτρων που υπεισέρχονται στις Εξ. 19.7 και 19.8 και πλήρης παραμετρική ανάλυση ως προς αυτές. Η διαφορά που υπάρχει στο MBBM σε σχέση με το BBM και αφορά τις Εξ. 19.7 και 19.8 είναι ότι επειδή στο MBBM υπάρχει η πρόβλεψη σταθεροποίησης του ειδικού όγκου από την μύζηση επίτευξης παραμένουτος ειδικού όγκου και μετά, οι τιμές της τάσης διαρροής  $p_o^*(s_e)$  και του δείκτη συμπίεσης για μεταβολές της τάσης υπό σταθερή μύζηση  $\lambda(s_e)$ , έχουν οριακές τιμές για  $s_e = s_{res}(p^c) - s_{sa}(p^c)$ , τις  $p_o^*(s_{res}(p^c) - s_{sa}(p^c))$  και  $\lambda(s_{res}(p^c) - s_{sa}(p^c))$  αντίστοιχα. Στο BBM υπάρχει μεν η ίδια λογική, από την οποία προκύπτει άλλωστε η παράμετρος  $r$  ως ο λόγος του δείκτη συμπίεσης  $\lambda(s)$  προς τον δείκτη συμπίεσης  $\lambda(0)$  για μια τόσο μεγάλη τιμή της μύζησης  $s$  που ο δείκτης  $\lambda(s)$  πρακτικά δεν μειώνεται άλλο για μεγαλύτερες τιμές της μύζησης, αλλά δεν έχει προχωρήσει μέχρι την ενσωμάτωση χαρακτηριστικών πρόβλεψης παραμένουτος ειδικού όγκου όπως το MBBM. Έτσι στο MBBM η παράμετρος  $r$  είναι εξ ορισμού ίση  $\lambda(s_{res}(p^c) - s_{sa}(p^c)) / \lambda(s_{sa}(p^c))$  – με τον παρανομαστή να ισούται με το  $\lambda(s^c)$ . Η ιδιότητα αυτή δεν την καθιστά εξαρτημένη μεταβλητή, δηλαδή αφού είναι παράμετρος του προσομοιώματος η μύζηση  $s_{res}(p^c)$ , να μειωθούν μέσω της εξάρτησης αυτής κατά μία οι απαιτούμενες παράμετροι του MBBM. Απλώς στο MBBM είναι σαφώς καθορισμένη η τιμή που πρέπει να λάβει η παράμετρος  $r$  και για ποιες τιμές της μύζησης υπολογίζεται αυτή πειραματικά ( $s_e=0$  και  $s_e = s_{res}(p^c) - s_{sa}(p^c)$ ). Στον Πιν. 19.6 προστίθενται οι παράμετροι που χρειάζονται για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών ως προς την εξέλιξη της τάσης διαρροής κατά μήκος καμπυλών ιστροπικής συμπίεσης σταθερής μύζησης και του δείκτη συμπίεσης των καμπυλών αυτών με την μύζηση.

**Πίνακας 19.6** Παράμετροι του προσομοιώματος για την περιγραφή της εξέλιξης του δείκτη συμπίεσης και της τάσης διαρροής με την μύζηση.

Είδος παραμέτρων	Συμβολισμός παραμέτρων	Αριθμός παραμέτρων ανά είδος/συνολικός
Παράμετροι προσέγγισης	$r, \beta$	2
	<b>Σύνολο:</b>	<b>2</b>

*19.2.4.4 Εξέλιξη της μύζησης αποκορεσμού, της μύζησης επίτευξης παραμένουτος ειδικού όγκου και του παραμένουτος ειδικού όγκου με την τάση - Περιοχές στο επίπεδο p-s όπου είναι δυνατή η εμφάνιση πλαστικών ογκομετρικών μεταβολών λόγω μεταβολών της μύζησης*

Όπως ακριβώς στο BBM έχει προβλεφθεί η μεταβολή του δείκτη συμπίεσης και της τάσης διαρροής με την μύζηση, έτσι και στην περίπτωση του MBBM πρέπει να προβλεφθεί η μεταβολή των χαρακτηριστικών συμπεστότητας λόγω μεταβολών της μύζησης, δηλ. της μύζησης αποκορεσμού  $s_{sa}(p^c)$ , της μύζησης επίτευξης παραμένουτος ειδικού όγκου  $s_{res}(p^c)$  και του παραμένουτος ειδικού όγκου  $v_{res}(p^c)$ , με την τάση.

Δεδομένου ότι η μύζηση αποκορεσμού βρίσκεται εν μέρει σε αντιστοιχία με την αυθαίρετα επιλεγόμενη μύζηση διαρροής  $s_o$  του BBM θα μπορούσε να υιοθετηθεί μία ανάλογη συσχέτιση με αυτή που περιγράφει την κράτυνση του μεγέθους  $s_o$  του BBM με την εμφάνιση πλαστικών ογκομετρικών παραμορφώσεων (Εξ. 18.21). Πράγματι, όταν είναι  $s_{sa}(p^c) < p_o^*(s^c)$ , τότε η ανάλογη με την Εξ. 18.21 εξίσωση που περιγράφει την εξέλιξη της μύζησης αποκορεσμού στην τάση αναφοράς απλοποιείται και παίρνει την μορφή της Εξ. 19.11, όπου  $d\varepsilon_v^p$  οι πλαστικές ογκομετρικές παραμορφώσεις.

$$\frac{ds_{sa}(p)}{s_{sa}(p^c) + s^c} = \frac{v(p)}{\lambda_s(s) - \kappa(s^c)} d\varepsilon_v^p \quad (19.11)$$

Αντίθετα, όταν είναι  $s_{sa}(p^c) > p_o^*(s^c)$ , τότε η ανάλογη με την Εξ. 18.21 εξίσωση που περιγράφει την εξέλιξη της μύζησης αποκορεσμού στην τάση αναφοράς παίρνει την μορφή της Εξ. 19.12, με συνεχή όμως έλεγχο της σχέσης μεταξύ  $s_{sa}(p)$  και  $p_o^*(s_e)$ . Όταν γίνει  $s_{sa}(p) < p_o^*(s^c)$  τότε ισχύει και πάλι η Εξ. 19.11.

$$\frac{ds_{sa}(p)}{s_{sa}(p^c) + s^c} = \frac{v(p)}{\lambda(s^c) - \kappa(s^c)} d\varepsilon_v^p \quad (19.12)$$

Σε ό,τι αφορά την εξέλιξη του παραμένουτος ειδικού όγκου, στο Κεφ. 14 παρουσιάστηκε η οικογένεια εμπειρικών συσχετίσεων του παραμένουτος λόγου κενών με την αρχική κατάσταση των εδαφικών υλικών πριν από την έναρξη της ξήρανσης, όπως αυτή εκφράζεται από τον λόγο

κενών  $e_0$  προ ξηράνσεως, και την φύση τους όπως αυτή εκφράζεται από το όριο υδαρότητας ή το όριο πλαστικότητας και το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεάς φάσης  $G_s$  (Εξ. 14.11 έως 14.16 στο Κεφ. 14).

Στα πλαίσια της βιβλιογραφικής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε για την παρούσα διδακτορική διατριβή, δεν βρέθηκαν πειραματικά αποτελέσματα που να δείχνουν την εξέλιξη της μύζησης επίτευξης παραμένουτος ειδικού όγκου με την μεταβολή του αρχικού ειδικού όγκου προ ξηράνσεως, την τάση ή την πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση. Επίσης από τις προσομοιώσεις των καμπυλών ξήρανσης (§19.2.4.2) δεν προκύπτει κάποια σαφής συσχέτιση πέραν του ότι η μύζηση επίτευξης παραμένουτος ειδικού όγκου αυξάνεται με την αύξηση της τάσης  $p$ . Με βάση αυτά και μέχρι την δυνατότητα διατύπωσης μίας ακριβέστερης συσχέτισης, η τιμή αυτή της μύζησης θα θεωρηθεί στο MBBM γραμμική συνάρτηση του φυσικού λογάριθμου της τάσης  $p$ .

$$s_{res}(p) = k_{res} \cdot \ln(p) \quad (19.13)$$

Προφανώς μελλοντικά πειραματικά αποτελέσματα που θα επιδείξουν την μεταβολή της τιμής αυτής της μύζησης με κάποιο φυσικό μέγεθος ή την τάση με ακριβέστερο τρόπο θα απαιτήσουν την μεταβολή της Εξ. 19.13.

Η εισαγωγή στο MBBM της πρόβλεψης για σταθεροποίηση του ειδικού όγκου από μία τιμή της μύζησης και μετά κατά μήκος κλάδων ξήρανσης υπό σταθερή ολική τάση δημιουργεί το επιπλέον χαρακτηριστικό που δεν υπάρχει στο BBM της ύπαρξης περιοχών στο επίπεδο  $p$ - $s$  που πλαστικές ογκομετρικές μεταβολές είναι δυνατόν να προκύψουν μόνο για μεταβολές της τάσης και όχι πλέον για μεταβολές της μύζησης.

Στον Πιν. 19.7 παρατίθενται οι παράμετροι που χρειάζονται για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών ως προς την εξέλιξη της μύζησης αποκορεσμού, της μύζησης επίτευξης παραμένουτος ειδικού όγκου και του παραμένουτος ειδικού όγκου με την αύξηση της τάσης.

**Πίνακας 19.7.** Παράμετροι του προσομοιώματος για την περιγραφή της εξέλιξης της μύζησης αποκορεσμού, της μύζησης επίτευξης παραμένουτος ειδικού όγκου και του παραμένουτος ειδικού όγκου με την τάση.

Είδος παραμέτρων	Συμβολισμός παραμέτρων	Αριθμός παραμέτρων ανά είδος/συνολικός
Παράμετροι του υλικού	$k_{res}$	1
	<b>Σύνολο:</b>	<b>1</b>

19.2.4.5 Διεκτροπικές εντατικές καταστάσεις – Εξέλιξη της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση

Όπως προκύπτει από την §19.2.4.3, μέχρι στιγμής είναι γνωστό μόνο ένα σημείο της τομής της επιφάνειας διαρροής με επίπεδα σταθερής μύζησης, η τάση διαρροής κατά μήκος καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης σταθερής μύζησης. Στο BBM από το σημείο αυτό και ύστερα γίνονται δύο υποθέσεις. Η πρώτη είναι ότι η τομή της επιφάνειας διαρροής με επίπεδα σταθερής μύζησης έχει σχήμα έλλειψης με τον μεγάλο της άξονα να κείται επί του άξονα της μέσης τάσης  $p$  και το μήκος του μικρού της άξονα να καθορίζεται από την –σταθερή με την μύζηση- κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης  $M$ . Η δεύτερη υπόθεση στο BBM είναι ότι αν το ένα σημείο τομής της έλλειψης αυτής με τον άξονα της τάσης  $p$  είναι η τιμή  $p_0^*(s)$ , τότε το άλλο σημείο τομής της έλλειψης είναι η τιμή της εφελκυστικής αντοχής  $p_s$  που αναπτύσσεται με την αύξηση της μύζησης και στο BBM δίνεται απλά ως πολλαπλάσιο της μύζησης  $s$  κατά τις προβλέψεις της Εξ. 19.14 (Εξ. 18.3 στο Κεφάλαιο 18), δηλ. προβλέπεται μονοτονική αύξηση της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση.

$$p_s = k \cdot s \quad (19.14)$$

Στην §18.2.8 στο Κεφάλαιο 18 παρουσιάστηκε η Εξ. 18.24 (η οποία επαναλαμβάνεται εδώ με αρίθμηση 19.15). Για την Εξ. 19.15 έγινε πλήρης παραμετρική ανάλυση (βλ. §18.2.8 και Σχ. 18.5) από την οποία προέκυψε ότι για καμμία από τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στην Εξ. 19.15 δεν είναι δυνατόν να προκύψει σταθεροποίηση της μέγιστης διεκτροπικής τάσης, πόσο μάλλον μείωση της, με την αύξηση της μύζησης.

$$q = \sqrt{k} \cdot M \cdot \sqrt{s} \cdot \sqrt{p^c} \left( \frac{p_o^*}{p^c} \right)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{2 \cdot \lambda(0)[(1-r) \cdot \exp(-\beta s) + r] - 2 \cdot \kappa}} \quad (19.15)$$

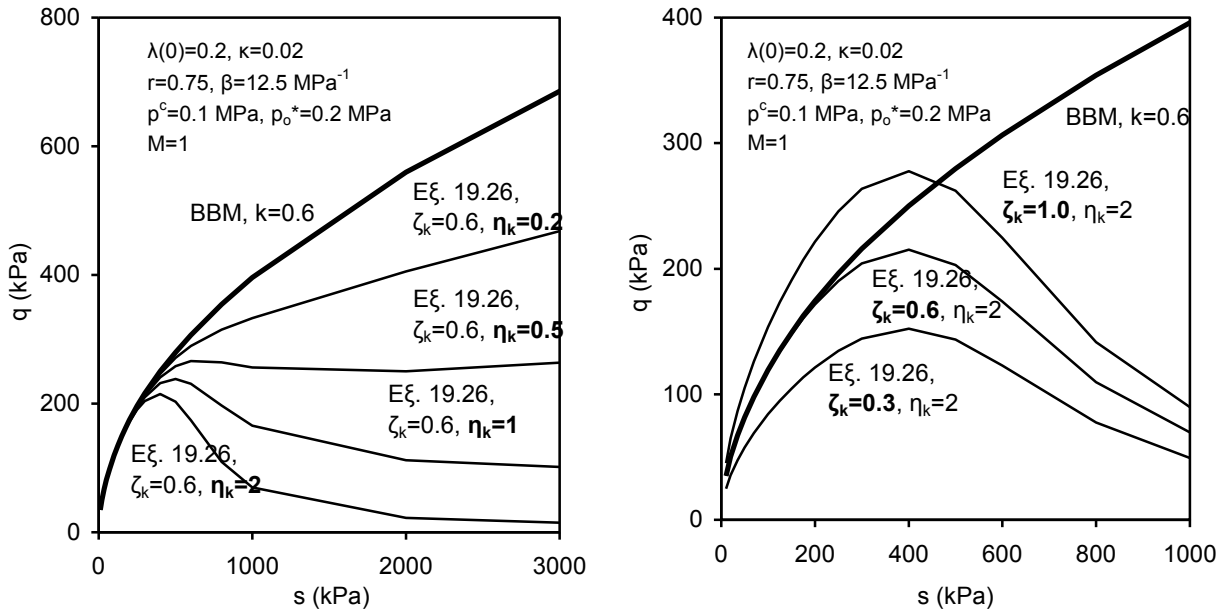
Από την μορφή της Εξ. 19.15 προκύπτει ότι η παράμετρος που προσφέρεται για την εισαγωγή της δυνατότητας σταθεροποίησης ή και μείωσης της μέγιστης διεκτροπικής τάσης με την αύξηση της μύζησης είναι η παράμετρος  $k$ . Πράγματι οι Georgiadis, et al. (2003) εξίσωσαν την παράμετρο  $k$  με τον βαθμό κορεσμού. Στο MBBM το  $k$  δίνεται από την Εξ. 19.16:

$$k = \zeta_k \cdot S_r^{\eta_k} \quad (19.16)$$

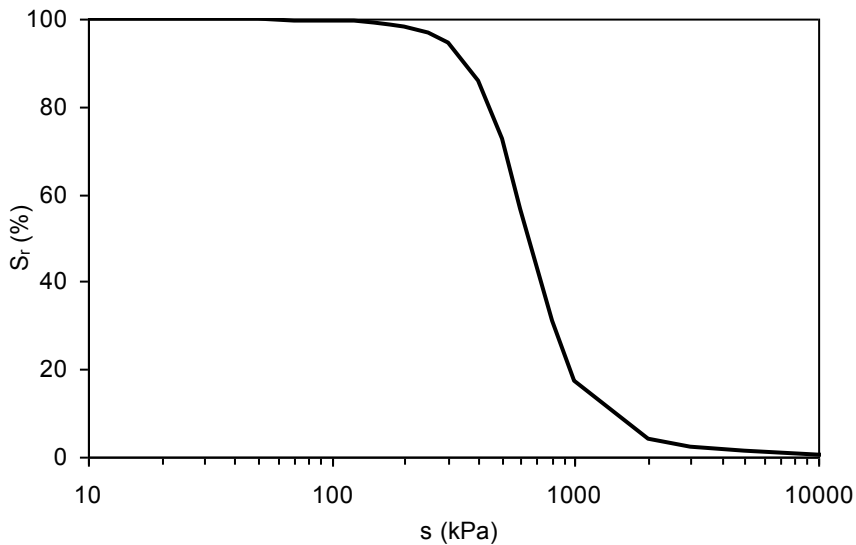
όπου  $k$  ο συντελεστής που δίνει την εφελκυστική αντοχή στην Εξ. 19.14,  $S_r$  ο βαθμός κορεσμού,  $\zeta_k$  και  $\eta_k$  εμπειρικές παράμετροι. Η Εξ. 19.16 βασίζεται στη γενική μαθηματική μορφή της εμπειρικής συσχέτισης της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού που διατυπώθηκε από τους Fredlund, et al. (1995).

Για  $\eta_k=0$  και αυθαίρετη επιλογή του  $\zeta_k$ , η πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής γίνεται όπως και στο BBM. Για  $\zeta_k=1$  και  $\eta_k=1$ , η Εξ. 19.16 εκφυλίζεται στην εξίσωση του  $k$  με τον βαθμό κορεσμού όπως υιοθετήθηκε από τους Georgiadis et al. (2003). Για ελεύθερες τιμές των  $\zeta_k$  και  $\eta_k$ , τότε είναι δυνατή η πρόβλεψη όλων των σεναρίων εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση, όπως επιδεικνύεται στο Σχ. 19.11α λόγω της επιρροής της παραμέτρου  $\eta_k$  και στο Σχ. 19.11β λόγω της επιρροής της παραμέτρου  $\zeta_k$  (στο Σχ. 19.12 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού που υιοθετήθηκε για να γίνουν οι προβλέψεις της αντοχής στο Σχ. 19.11). Για τις τιμές παραμέτρων που επιλέχθηκαν για τη σχεδίαση του διαγράμματος του Σχ. 19.11α, προκύπτει συνεχής μεν αύξηση της διατμητικής αντοχής αλλά μικρότερη σε σχέση με το BBM για  $\eta_k=0.2$ . Για  $\eta_k=0.5$  προκύπτει πρακτικά σταθεροποίηση της διατμητικής αντοχής για μύζηση μεγαλύτερη της πίεσης διείδυσης αέρα, για  $\eta_k=1$  προκύπτει μείωση της διατμητικής αντοχής μετά από την αρχική αύξηση και για  $\eta_k=2$  προκύπτει ακόμα πιο ραγδαία μείωση μετά την αρχική αύξηση. Η παράμετρος  $\eta_k$  λοιπόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη ρύθμιση της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής μετά την αρχική αύξηση ως την μύζηση αποκορεσμού του εδαφικού υλικού, είτε αυτό είναι αργιλικό (οπότε αναμένεται συνεχής αύξηση με τη μύζηση), είτε αυτό είναι κοκκώδες (οπότε αναμένεται μείωση μετά την αρχική αύξηση).

Σε ό,τι αφορά την παράμετρο  $\zeta_k$ , δεδομένου ότι αυτή ρυθμίζει την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση ως την μύζηση αποκορεσμού, που το υλικό είναι ακόμα πλήρως κορεσμένο, λογικά και σε αντιστοιχία με την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής με την αύξηση της μέσης τάσης  $p$ , θα πρέπει να λαμβάνει τιμές, τέτοιες ώστε η κλίση της καμπύλης  $q$ - $s$  να γίνεται



**Σχήμα 19.11.** Εξέλιξη της διατμητικής αντοχής, α) για  $\zeta_k = 0.6$  και διάφορες τιμές του  $\eta_k$ , και β) για  $\eta_k = 2$  και διάφορες τιμές του  $\zeta_k$ .



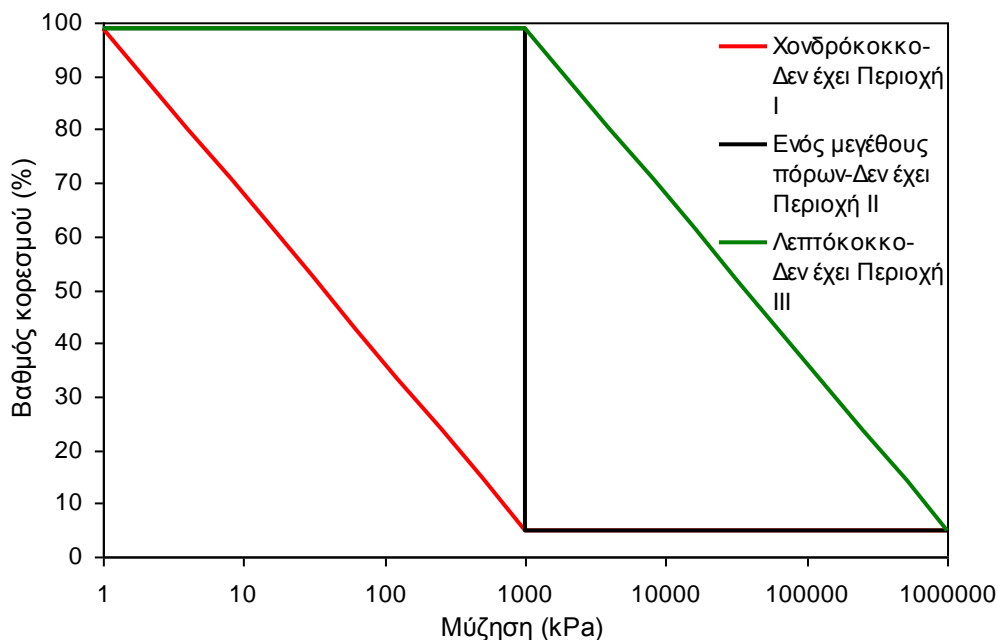
**Σχήμα 19.12.** Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού που υιοθετήθηκε για την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής στο Σχ. 19.11.



ίση με την κλίση της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης M. Για μεγαλύτερες τιμές της μύζησης από την πίεση διείσδυσης αέρα, η κλίση αυτή θα πρέπει σίγουρα να μειώνεται μέσω του κατάλληλου συνδυασμού τιμών των παραμέτρων  $\zeta_k$  και  $\eta_k$ .

Στα πλαίσια της διερεύνησης των προβλέψεων της Εξ. 19.16 υποτέθηκαν τρεις θεωρητικές μορφές της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Οι θεωρητικές αυτές μορφές φαίνονται στο Σχ. 19.13. Η πρώτη από αυτές αντιστοιχεί στην απλοποιημένη καμπύλη ενός χονδρόκοκκου εδάφους, στο οποίο ουσιαστικά δεν εντοπίζεται πίεση διείσδυσης αέρα. Έτσι πρακτικά δεν υπάρχει Περιοχή I επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, ακολουθεί τμήμα σταθερής κλίσης μέχρι μία σταθερή τιμή του βαθμού κορεσμού και στη συνέχεια οριζόντιο τμήμα που αντιστοιχεί στην Περιοχή III. Η δεύτερη από τις θεωρητικές μορφές αντιστοιχεί σε ένα θεωρητικό υλικό με ένα μόνο μέγεθος πόρων. Η συνέπεια αυτής της υπόθεσης είναι οριζόντιος κλάδος της Περιοχής I, κατακόρυφος κλάδος που περιγράφει την Περιοχή II και αντιστοιχεί στον ραγδαίο αποκορεσμό και τέλος οριζόντιος κλάδος που περιγράφει την Περιοχή III. Τέλος η τρίτη και τελευταία από τις θεωρητικές μορφές της χαρακτηριστικής καμπύλης στερείται πρακτικά Περιοχής III προσομοιώνοντας ένα πάρα πολύ λεπτόκοκκο υλικό με μεγάλη ποικιλία μεγέθους πόρων. Έτσι υπάρχει αρχικά οριζόντιος κλάδος που αντιστοιχεί στην Περιοχή I και στη συνέχεια κλάδος σταθερής κλίσης μέχρι την μύζηση 1000000 kPa (παράβαλε Σχ. 4.5 με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού της αργίλου Regina από τους Vanapalli, et al., 1999). Στο Σχ. 19.13 παρουσιάζονται οι θεωρητικές αυτές χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού. Χάριν απλοποίησης της δυνατότητας εξαγωγής συμπερασμάτων για την εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών, και στις τρεις θεωρητικές καμπύλες εδάφους-νερού έχει θεωρηθεί ίδια η μύζηση η οποία ορίζει την γεωμετρία και των τριών καμπυλών (1000 kPa) καθώς και ο παραμένων βαθμός κορεσμού. Για την πρώτη και την τρίτη καμπύλη δε έχει θεωρηθεί ίδια κλίση της Περιοχής II.

Στο Σχ. 19.14 παρουσιάζονται οι καμπύλες εξέλιξης της εφελκυστικής αντοχής που προβλέφθηκε για τις θεωρητικές μορφές της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του Σχ. 19.13 μέσω των Εξ. 19.14 και 19.16. Στο Σχ. 19.14α παρουσιάζονται οι καμπύλες για το «χονδρόκοκκο» υλικό (χωρίς Περιοχή I) για το πλήρες εύρος τιμών της μύζησης (και στο Σχ. 19.14β για το εύρος μέχρι 2000 kPa), στο Σχ. 19.14γ για το υλικό «ενός μεγέθους πόρων» (χωρίς Περιοχή II) για το πλήρες εύρος τιμών της μύζησης (και στο Σχ. 19.14δ για το εύρος μέχρι 2000 kPa), στο Σχ. 19.14ε για το «πολύ λεπτόκοκκο υλικό» (χωρίς Περιοχή III) για το πλήρες εύρος τιμών της μύζησης (και στο Σχ. 19.14στ για το εύρος μέχρι 20000 kPa) και τέλος στο Σχ. 19.14ζ



**Σχήμα 19.13.** Θεωρητικές μορφές της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που υιοθετήθηκαν για τον έλεγχο των προβλέψεων της εφελκυστικής αντοχής μέσω των Εξ. 19.24 και 19.26.

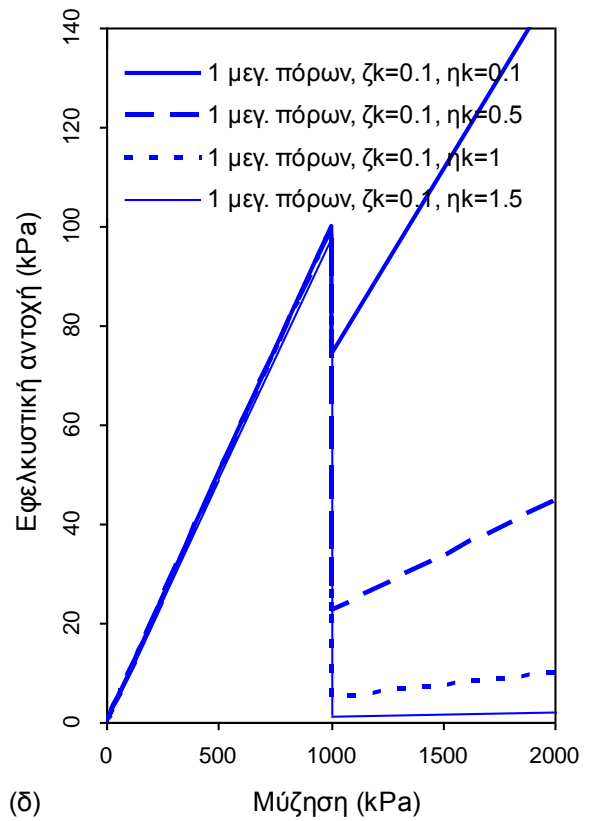
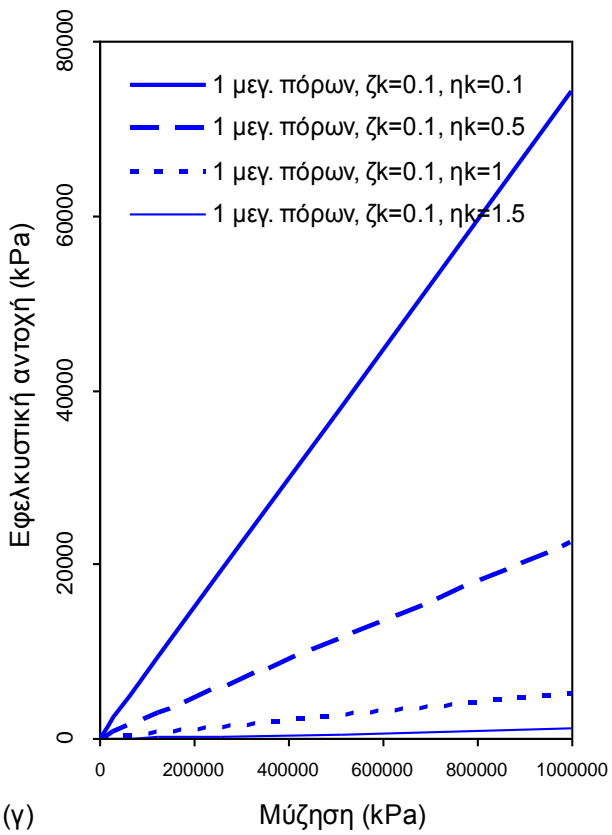
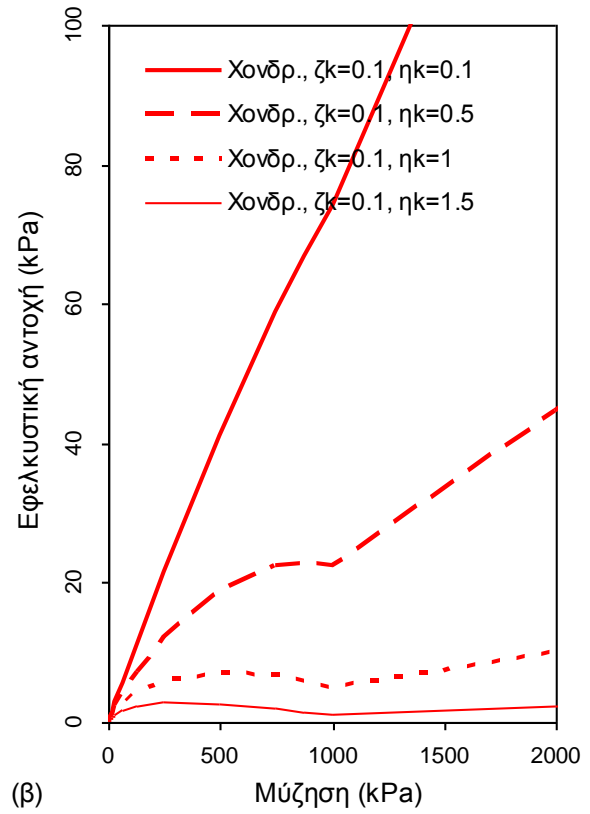
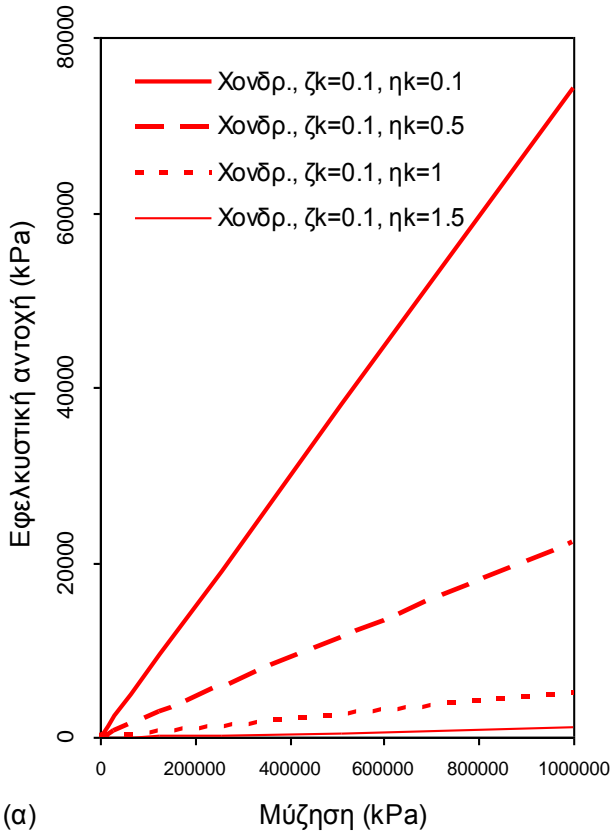
και για τα τρία υλικά για έναν μόνο συνδυασμό  $\zeta_k$  και  $\eta_k$  (0.1 και 0.5) για το πλήρες εύρος τιμών της μύζησης (και στο Σχ. 19.14η για το εύρος μέχρι 1500 kPa). Για κάθε μία από τις τρεις θεωρητικές χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού υποτέθηκαν τέσσερα ζεύγη τιμών  $\zeta_k$ ,  $\eta_k$ : α)  $\zeta_k=0.1$ ,  $\eta_k=0.1$ , β)  $\zeta_k=0.1$ ,  $\eta_k=0.5$ , γ)  $\zeta_k=0.1$ ,  $\eta_k=1$  και γ)  $\zeta_k=0.1$ ,  $\eta_k=1.5$ . Επιλέχθηκε σε αυτήν την διερεύνηση να μην μεταβληθεί και το  $\zeta_k$  αλλά μόνο το  $\eta_k$ .

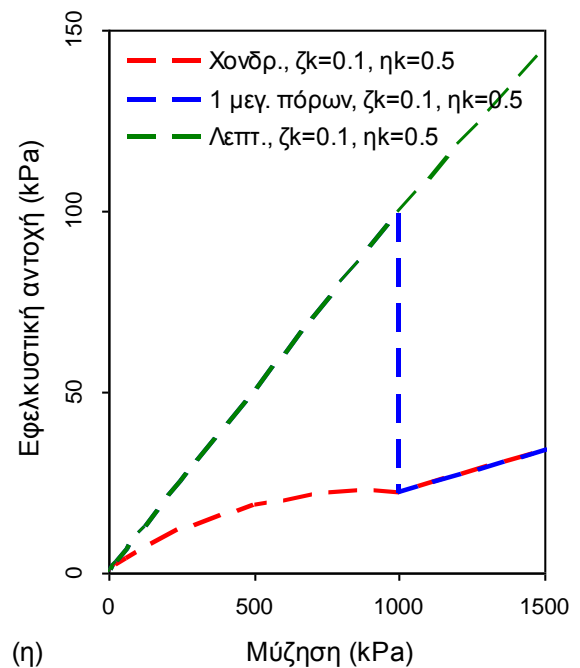
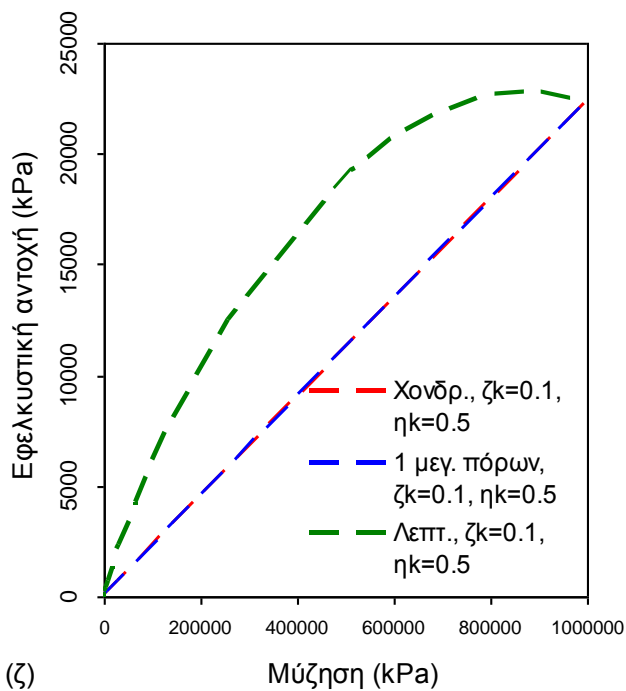
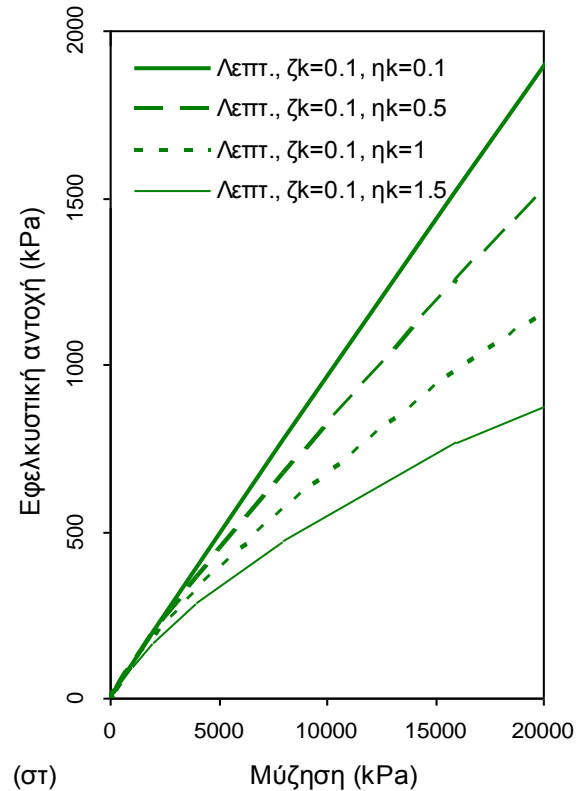
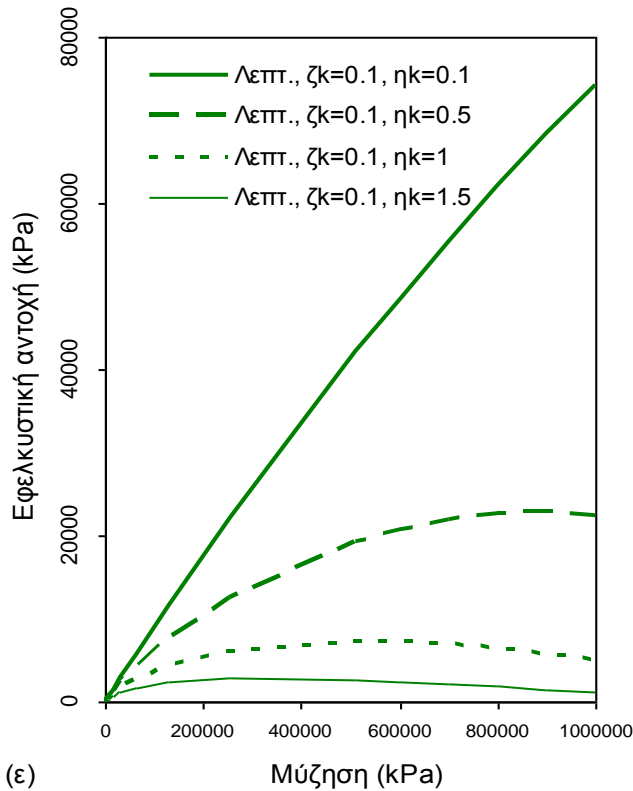
Όπως προκύπτει από το Σχ. 19.14α, για το «χονδρόκοκκο» υλικό αυξάνεται η εφελκυστική αντοχή, τόσο περισσότερο μάλιστα όσο μικρότερη γίνεται η παράμετρος  $\eta_k$ , αλλά όπως φανερώνει η μεγέθυνση στο Σχ. 19.14β, η αύξηση δεν είναι μονοτονική. Για τιμές της μύζησης μέχρι τα 1000 kPa –μύζηση επίτευξης παραμένοντος βαθμού κορεσμού για το υλικό αυτό– υπάρχει τόσο μεγαλύτερη επακόλουθη μείωση της εφελκυστικής αντοχής μετά από μια αρχική αύξηση της μύζησης, όσο μεγαλύτερη γίνεται η παράμετρος  $\eta_k$ , αλλά μετά τα 1000 kPa η εφελκυστική αντοχή αρχίζει και πάλι να αυξάνεται μονοτονικά, τόσο περισσότερο, όσο μικρότερη η παράμετρος  $\eta_k$ . Η αύξηση λοιπόν της παραμέτρου  $\eta_k$  επιτρέπει για ένα

χονδρόκοκκο υλικό (ακόμα και ένα ουσιαστικά χωρίς πίεση διείσδυσης αέρα<sup>3</sup>) να προβλεφθεί χαμηλότερη εφελκυστική αντοχή με δυνατότητες μείωσης ή και σταθεροποίησης της αντοχής. Από την παραμετρική αυτή ανάλυση προκύπτει και το εξής συμπέρασμα με ιδιαίτερη σημασία για την ευστάθεια πρανών: υπό την ίδια εντατική κατάσταση, είναι δυνατόν η αύξηση της μύζησης (ξήρανση) να προκαλέσει αστοχία εάν η εντατική κατάσταση βρισκόταν ήδη αρκετά κοντά στο όριο αστοχίας χωρίς να προκληθεί καμία άλλη μεταβολή στην εντατική κατάσταση. Αυτό μοιάζει καταρχάς οξύμωρο αφού αστοχίες –και μάλιστα πρανών- είναι συνδεδεμένες με μειώσεις της μύζησης (διαβροχή, συνήθως λόγω βροχόπτωσης) και όχι αυξήσεις του μεγέθους αυτού. Εν τούτοις στα χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά πράγματι υπάρχει ένα μεταίχμιο πέραν του οποίου, η περαιτέρω αύξηση της μύζησης μειώνει την αντοχή και προκαλεί αστοχία υπό δεδομένη εντατική κατάσταση, και μάλιστα ο συνδυασμός των Εξ. 19.14 και 19.16 επιτρέπει την πρόβλεψη αυτού του φαινομένου. Το φαινόμενο αυτό συζητείται περαιτέρω στην συνέχεια. Σε ό,τι αφορά δε την διατμητική αντοχή των χονδρόκοκκων εδαφών και την εξέλιξή της με την μύζηση λόγω ξήρανσης είναι σκόπιμο να ανατρέξει κανείς στο Κεφ. 6 και ειδικά την Φωτ. 6.1 και το Σχ. 6.3.

Όπως προκύπτει από το Σχ. 19.14γ προκύπτουν ανάλογα συμπεράσματα για το υλικό «ενός μεγέθους πόρων». Για το υλικό αυτό λοιπόν αυξάνεται η εφελκυστική αντοχή, τόσο περισσότερο μάλιστα όσο μικρότερη γίνεται η παράμετρος  $\eta_k$ , αλλά όπως φανερώνει η μεγέθυνση στο Σχ. 19.14δ, και πάλι η αύξηση δεν είναι μονοτονική. Για τιμές της μύζησης μέχρι τα 1000 kPa –μύζηση επίτευξης παραμένου βαθμού κορεσμού για το υλικό αυτό- υπάρχει τόσο μεγαλύτερη επακόλουθη, και μάλιστα ραγδαία, μείωση της εφελκυστικής αντοχής μετά από μια αρχική αύξηση της μύζησης, όσο μεγαλύτερη γίνεται η παράμετρος  $\eta_k$ , αλλά μετά τα 1000 kPa η εφελκυστική αντοχή αρχίζει και πάλι να αυξάνεται μονοτονικά, τόσο περισσότερο, όσο μικρότερη η παράμετρος  $\eta_k$ . Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού που χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη της εφελκυστικής αντοχής αυτού του ιδεατού υλικού είναι μάλλον δύσκολο να εμφανιστεί σε φυσικά υλικά, παρόλο που είναι η καμπύλη που χαρακτηρίζει υλικά όπως οι κεραμικοί πορόλιθοι υψηλής πίεσης διείσδυσης αέρα, παρέχει ωστόσο την δυνατότητα για ενδιαφέροντα συμπεράσματα σε συνδυασμό και με τα Σχ. 19.14α και 19.14β. Όσο λοιπόν σε ένα εδαφικό υλικό αυξάνεται η ομοιογένεια ως προς το μέγεθος των πόρων του, τόσο πιο «στενή» γίνεται η Περιοχή ΙΙ της χαρακτηριστικής καμπύλης του και ως αποτέλεσμα

<sup>3</sup> Στο παράδειγμα που περιγράφεται σε αυτήν την παράγραφο έχει υποθεθεί ουσιαστικά τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα 1 kPa.





**Σχήμα 19.14.** Εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση για διάφορους συνδυασμούς  $\zeta_k$  και  $\eta_k$ : για το «χονδρόκοκκο» υλικό, α) πλήρες εύρος μύζησης, β) μεγέθυνση, για το υλικό «ενός μεγέθους πόρων», γ) πλήρες εύρος μύζησης, δ) μεγέθυνση, το «πολύ λεπτόκοκκο» υλικό, ε) πλήρες εύρος μύζησης, στ) μεγέθυνση, και συγκριτικά για όλα τα υλικά για το ζεύγος τιμών  $\zeta_k=0.1$  και  $\eta_k=0.5$ , ζ) πλήρες εύρος μύζησης, και η) μεγέθυνση.

αυτού τόσο πιο ραγδαία η μείωση της εφελκυστικής του αντοχής (και άρα γενικά της διατμητικής του αντοχής) με την αύξηση της μύζησης.

Τέλος, όπως προκύπτει από τα Σχ. 19.14ε και 19.14στ (πλήρες εύρος τιμών της μύζησης και εύρος τιμών της από 0 έως 20000 kPa αντίστοιχα), ακόμα και για την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού που αντιστοιχεί σε πολύ λεπτόκοκκο έδαφος προβλέπεται μείωση της εφελκυστικής αντοχής για πολύ μεγάλες τιμές της μύζησης, όσο αυξάνεται το  $\eta_k$ . Βέβαια όπως φαίνεται στο Σχ. 19.14ε για μικρές και μέσες τιμές της μύζησης η μείωση αυτή της εφελκυστικής αντοχής δεν φαίνεται καν, και απλώς μειώνεται ο ρυθμός αύξησης της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση όσο αυξάνεται η τιμή της παραμέτρου  $\eta_k$ . Τέλος στα Σχ. 19.14ζ και 19.14η παρουσιάζεται για σύγκριση η εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής και για τα τρία είδη υλικών για μία τιμή της παραμέτρου  $\eta_k$  για το πλήρες εύρος τιμών της μύζησης (Σχ. 19.14ζ) και μέχρι τα 1500 kPa μόνο (Σχ. 19.14η).

Στον Πιν. 19.8 παρατίθενται οι παράμετροι που χρειάζονται για την προσομοίωση της εξέλιξης της εφελκυστικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών με την μύζηση.

**Πίνακας 19.8.** Παράμετροι του προσομοιώματος για την περιγραφή της εξέλιξης της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση.

Είδος παραμέτρων	Συμβολισμός παραμέτρων	Αριθμός παραμέτρων ανά είδος/συνολικός
Παράμετροι προσέγγισης	$\zeta_k, \eta_k$	2
	<b>Σύνολο:</b>	<b>2</b>

#### 19.2.4.6 Εισαγωγή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού

Όπως προκύπτει άμεσα από την Εξ. 19.16, για να μπορεί να προβλεφθεί ο συντελεστής  $k$  στο MBBM πρέπει να εισάγεται ως παράμετρος η τιμή του βαθμού κορεσμού για κάθε τιμή της μύζησης  $s$ . Σε αντίθεση με το BBM λοιπόν, το οποίο είναι πρακτικά ανεξάρτητο της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού των εδαφών την μηχανική συμπεριφορά των οποίων προορίζεται να προβλέψει, το MBBM απαιτεί ως παράμετρο την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού των υλικών. Εκτός από την ανάγκη πρόβλεψης της εφελκυστικής αντοχής, η

εισαγωγή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού παρέχει το επιπλέον πλεονέκτημα ότι σε περίπτωση εισαγωγής του προσομοιώματος σε κάποιον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων, το προσομοίωμα θα μπορεί να «αντιλαμβάνεται» μεταβολές της μύζησης που προκαλούνται λόγω περιβαλλοντικών συνθηκών που προκαλούν μεταβολές του βαθμού κορεσμού<sup>4</sup>.

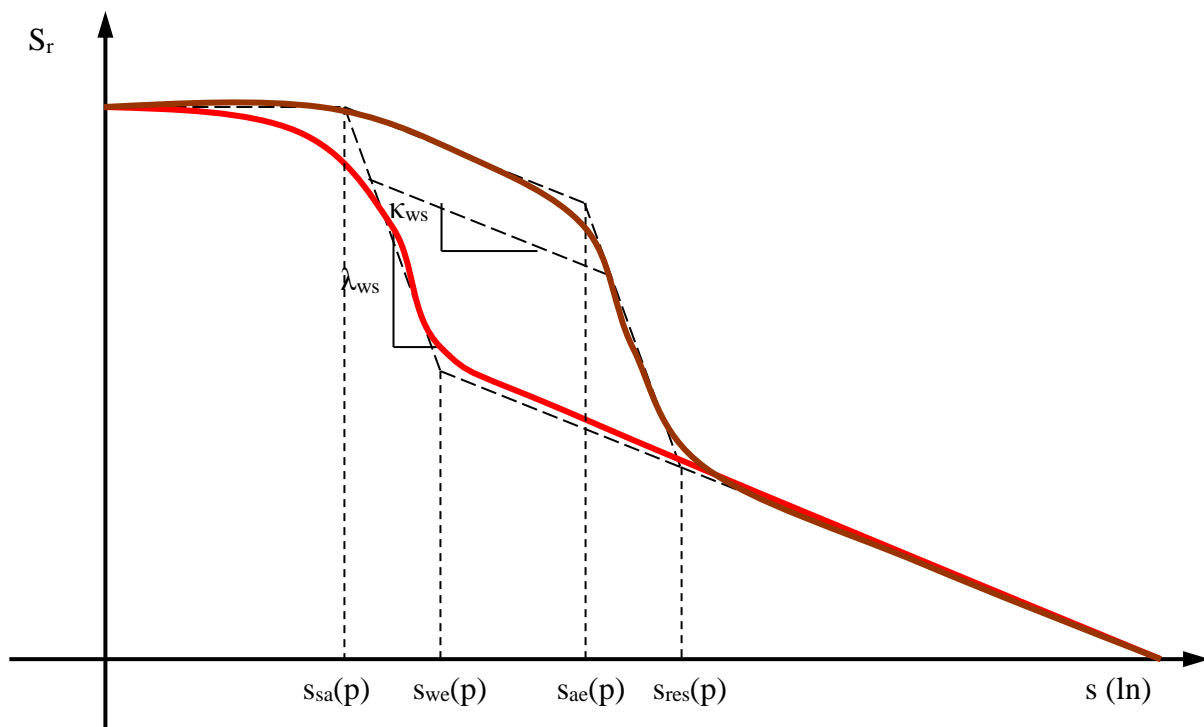
Η εισαγωγή της χαρακτηριστικής καμπύλης λοιπόν γίνεται είτε μέσω οποισδήποτε από τις γνωστές μαθηματικές εξισώσεις προσομοίωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού (βλ. Κεφ. 4) είτε όπως και στο προσομοίωμα των Sheng, et al. (2008), δηλαδή ισχύει η Εξ. 18.140 (Εξ. 19.17 εδώ για λόγους ενιαίας αρίθμησης) για την μεταβολή του βαθμού κορεσμού, όπου ο δείκτης  $\lambda_{ws}$  δίνεται από την Εξ. 18.141 (Εξ. 19.18 για λόγους ενιαίας αρίθμησης) για την περιγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που περιγράφεται στο Σχ. 19.15 (Σχ. 18.31 από το Κεφ. 18).

$$dS_r = -\lambda_{ws} \cdot \frac{ds}{s} \quad (19.17)$$

$$\lambda_{ws} = \begin{cases} 0, & s < s_{sa}(p) \\ \kappa_{ws}, & s_{sa}(p) \leq s < s_{ae}(p) \\ \lambda_{ws}, & s_{ae}(p) \leq s < s_{res}(p) \\ \kappa_{ws}, & s \geq s_{res}(p) \end{cases} \quad (19.18)$$

Όπως φαίνεται από το Σχ. 19.15, οι Sheng, et al. (2008) διέκριναν τρία σημεία καμπής στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού, την μύζηση αποκορεσμού, την ονομαστική πίεση διείσδυσης αέρα (και την αντίστοιχη τιμή της μύζησης διείσδυσης νερού κατά μήκος της οριακής καμπύλης ύγρανσης από κατάσταση παραμένουτος βαθμού κορεσμού) και την μύζηση επίτευξης παραμένουτος βαθμού κορεσμού. Για κάθε δε ενδιάμεση καμπύλη θεώρησαν κλίση  $\kappa_{ws}$ . Η προσομοίωση αυτή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού αποτελεί βελτίωση σε σχέση με την μέθοδο προσομοίωσης των Wheeler, et al. (2003) που περιγράφεται στην §18.3.14, κυρίως σε ό,τι αφορά την περιοχή κοντά στον παραμένουτο βαθμό κορεσμού και γι' αυτό προτείνεται και στο νέο θεωρητικό πλαίσιο.

<sup>4</sup> Αυτό είναι κάτι που συχνά παραγνωρίζεται και για το ίδιο το BBM, αφού και αυτό όταν ενσωματώνεται σε έναν κώδικα πεπερασμένων στοιχείων απαιτείται να συνοδεύεται και από κάποιον προσομοίωμα για την περιγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ώστε να μπορούν να γίνονται «αντιληπτές» μεταβολές της μύζησης που οφείλονται απευθείας σε μεταβολές του βαθμού κορεσμού ή έμμεσες μεταβολές αυτού (π.χ. κατά τις μεταβολές ολικής τάσης υπό σταθερό ποσοστό υγρασίας).



**Σχήμα 19.15.** Προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού σε όρους βαθμού κορεσμού-μύζησης όπως εισήχθη στο MBBM (από τους Sheng, et al., 2008) για τιμή της τάσης ίση με  $p$ .

Στο προτεινόμενο θεωρητικό πλαίσιο, όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη της μύζησης, δηλαδή η μύζηση αποκορεσμού, η ονομαστική πίεση διείσδυσης αέρα, η αντίστοιχη τιμή της μύζησης διείσδυσης νερού κατά μήκος της οριακής καμπύλης ύγρανσης από κατάσταση παραμένουτος βαθμού κορεσμού και η μύζηση επίτευξης παραμένουτος βαθμού κορεσμού θεωρούνται γενικά συναρτήσεις της ιστροπικής τάσης  $p$ . Για την μύζηση αποκορεσμού έχουν ήδη προταθεί οι Εξ. 19.11 και 19.12 και η μύζηση επίτευξης παραμένουτος βαθμού κορεσμού (ίση με την μύζηση επίτευξης παραμένουτος ειδικού όγκου) έχει θεωρηθεί σε αυτό το στάδιο εξέλιξης του προσομοιώματος γραμμική συνάρτηση του φυσικού λογαρίθμου της τάσης. Για τις τιμές της ονομαστικής πίεσης διείσδυσης αέρα δεν προτείνεται κάποια ανεξάρτητη συσχέτιση με την τάση ή την πλαστική ογκομετρική παραμόρφωση αλλά θεωρείται ότι βρίσκονται σε αναλογία με την μύζηση αποκορεσμού και την μύζηση επίτευξης παραμένουτος βαθμού κορεσμού αντίστοιχα, κατά τις προβλέψεις των Εξ. 19.19 και 19.20. Προφανώς ισχύει  $k_{ae} \geq 1$  και  $k_{we} \leq 1$  και οι τιμές των δύο αυτών σταθερών αναλογίας δίνονται από τις Εξ. 19.21 και 19.22 αντίστοιχα, όπως προκύπτουν για τις τιμές των μεγεθών μύζησης που περιγράφουν την χαρακτηριστική καμπύλη



εδάφους-νερού στην τάση αναφοράς  $p^c$  (όταν υποτίθεται λοιπόν σταθερή μύζηση επίτευξης παραμένοντος βαθμού κορεσμού όπως συμβαίνει σε αυτό το στάδιο εξέλιξης του θεωρητικού πλαισίου, τότε προκύπτει σταθερά και η μύζηση διείσδυσης νερού).

$$s_{ae}(p) = k_{ae} \cdot s_{sa}(p) \quad (19.19)$$

$$s_{we}(p) = k_{we} \cdot s_{res}(p) \quad (19.20)$$

$$k_{ae} = s_{ae}(p^c) / s_{sa}(p^c) \quad (19.21)$$

$$k_{we} = s_{we}(p^c) / s_{res}(p^c) \quad (19.22)$$

Οι Εξ. 19.19 και 19.20 είναι ενδεικτικές για αυτό το στάδιο εξέλιξης του θεωρητικού πλαισίου και χρήζουν σημαντικής πειραματικής διερεύνησης κυρίως σε ό,τι αφορά τους κλάδους επανύγρανσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.

Στον Πιν. 19.9 παρατίθενται οι παράμετροι που χρειάζονται για την προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού στο MBBM.

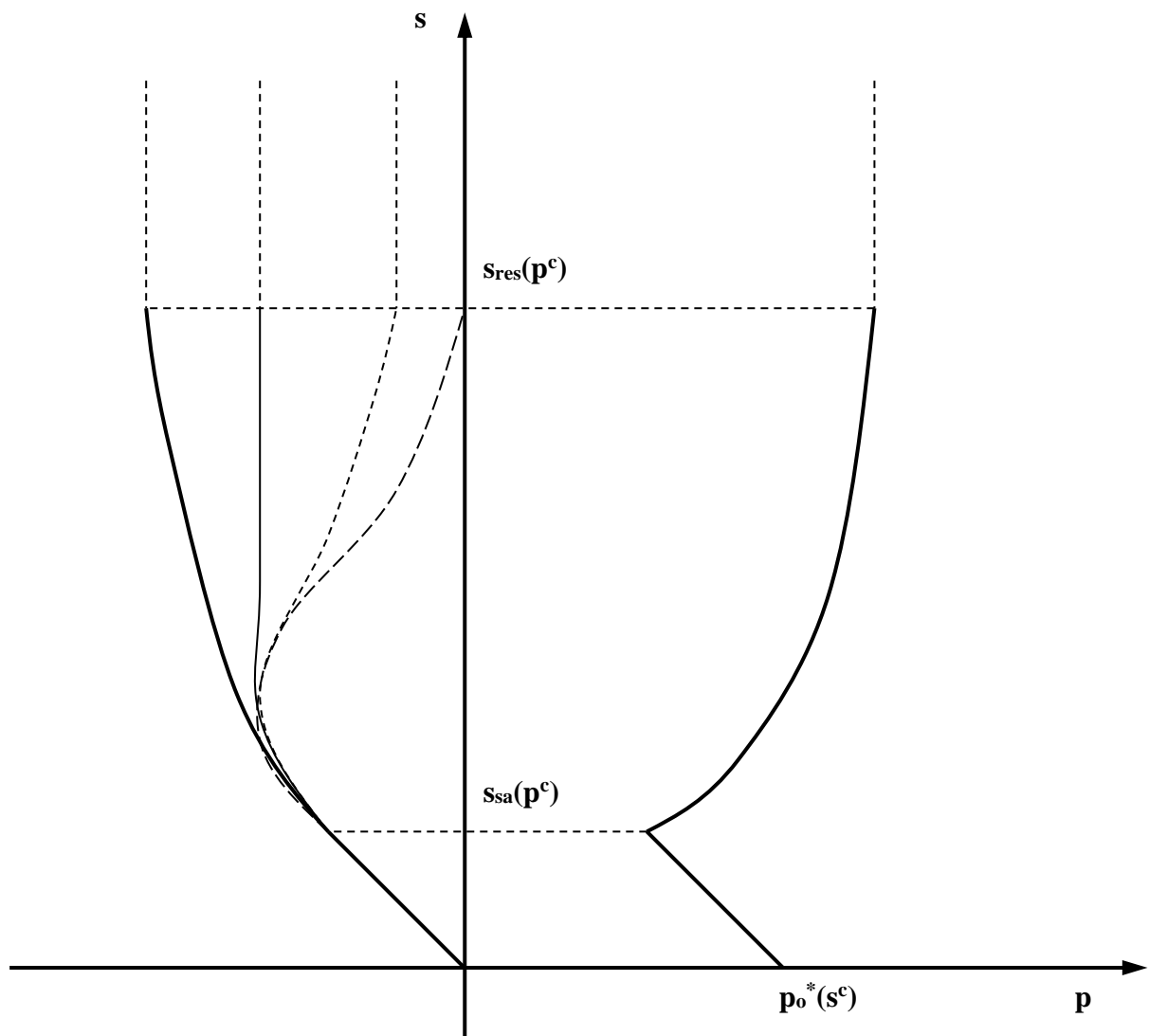
**Πίνακας 19.9.** Παράμετροι του προσομοιώματος για την περιγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.

Είδος παραμέτρων	Συμβολισμός παραμέτρων	Αριθμός παραμέτρων ανά είδος/συνολικός
Παράμετροι του εδαφικού υλικού	$s_{ae}(p^c), s_{we}(p^c),$ $\lambda_{ws}, \kappa_{ws}$	4
	<b>Σύνολο:</b>	<b>4</b>

19.2.4.7 Τομή της επιφάνειας διαρροής του προτεινόμενου προσομοιώματος με το επίπεδο p-s

Ο συνδυασμός των Εξ. 19.14 και 19.16 από τις οποίες προκύπτει η εφελκυστική αντοχή συναρτήσει της μύζησης και ο συνδυασμός των Εξ. 19.7 έως 19.10 από τις οποίες προκύπτει ο γεωμετρικός τύπος των τάσεων διαρροής κατά μήκος καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση, δίνουν την τομή της επιφάνειας διαρροής στον χώρο p-q-s με το επίπεδο p-s. Στο Σχ. 19.16 παρουσιάζεται η τομή της προκύπτουσας επιφάνειας διαρροής με βάση τα χαρακτηριστικά της μηχανικής συμπεριφοράς που ενσωματώθηκαν στο θεωρητικό πλαίσιο με το επίπεδο p-s. Μέχρι την μύζηση αποκορεσμού ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων οπότε η ελαστική ζώνη μετατίθεται προς τα αριστερά και στην συνέχεια αρχίζει η διεύρυνση της ελαστικής ζώνης λόγω της αύξησης της τάσης διαρροής κατά μήκος καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση και της αρχικής αύξησης της εφελκυστικής αντοχής. Στην συνέχεια υπάρχουν τρεις δυνατότητες, όπως αυτές καθορίζονται από τον συνδυασμό των Εξ. 19.14 και 19.16. Η ελαστική περιοχή μπορεί να συνεχίσει να διευρύνεται λόγω μονοτονικής αύξησης της εφελκυστικής αντοχής, μπορεί να παραμείνει αμετάβλητη ως προς αυτό της το άκρο και η αύξησή της να προέρχεται μόνο από την αύξηση της τάσης διαρροής κατά μήκος καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση επειδή η εφελκυστική αντοχή σταθεροποιείται με την μύζηση, ή τέλος μπορεί να αρχίσει να μειώνεται σε μέγεθος εάν η εφελκυστική αντοχή μειώνεται με την μύζηση, οδηγώντας αυτό το άκρο της ελαστικής περιοχής μάλιστα ακόμα και στον άξονα της μύζησης (το αν πράγματι θα συμβεί συρρίκνωση της ελαστικής περιοχής εξαρτάται από την σχέση μεταξύ της αύξησης της τάσης διαρροής και της μείωσης της εφελκυστικής αντοχής. Αυτές οι τρεις δυνατότητες εξέλιξης παρουσιάζονται στο Σχ. 19.16 και επεξηγούνται περαιτέρω και στην επόμενη παράγραφο που παρουσιάζεται η μορφή της επιφάνειας διαρροής του καταστατικού προσομοιώματος στον χώρο p-q-s.

Ανεξάρτητα από την εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής, στο προτεινόμενο προσομοίωμα γίνεται η παραδοχή ότι η εξέλιξη όλων των μεγεθών γίνεται μόνο μέχρι την μύζηση επίτευξης παραμένουτος ειδικού όγκου, η οποία και οριοθετεί την περιοχή που υπάρχει η δυνατότητα ελαστικών ή πλαστικών ογκομετρικών μεταβολών λόγω αύξησης της μύζησης. Στο Σχ. 19.16 και για να είναι ακριβή όσα προαναφέρθηκαν, έχει υποθεθεί  $s_{sa}(p^c) < p_o^*(s^c)$ .



**Σχήμα 19.16.** Τομή της επιφάνειας διαρροής του προτεινόμενου προσομοιώματος με το επίπεδο  $p$ - $s$ .

19.2.4.8 Η επιφάνεια διαρροής στον χώρο p-q-s

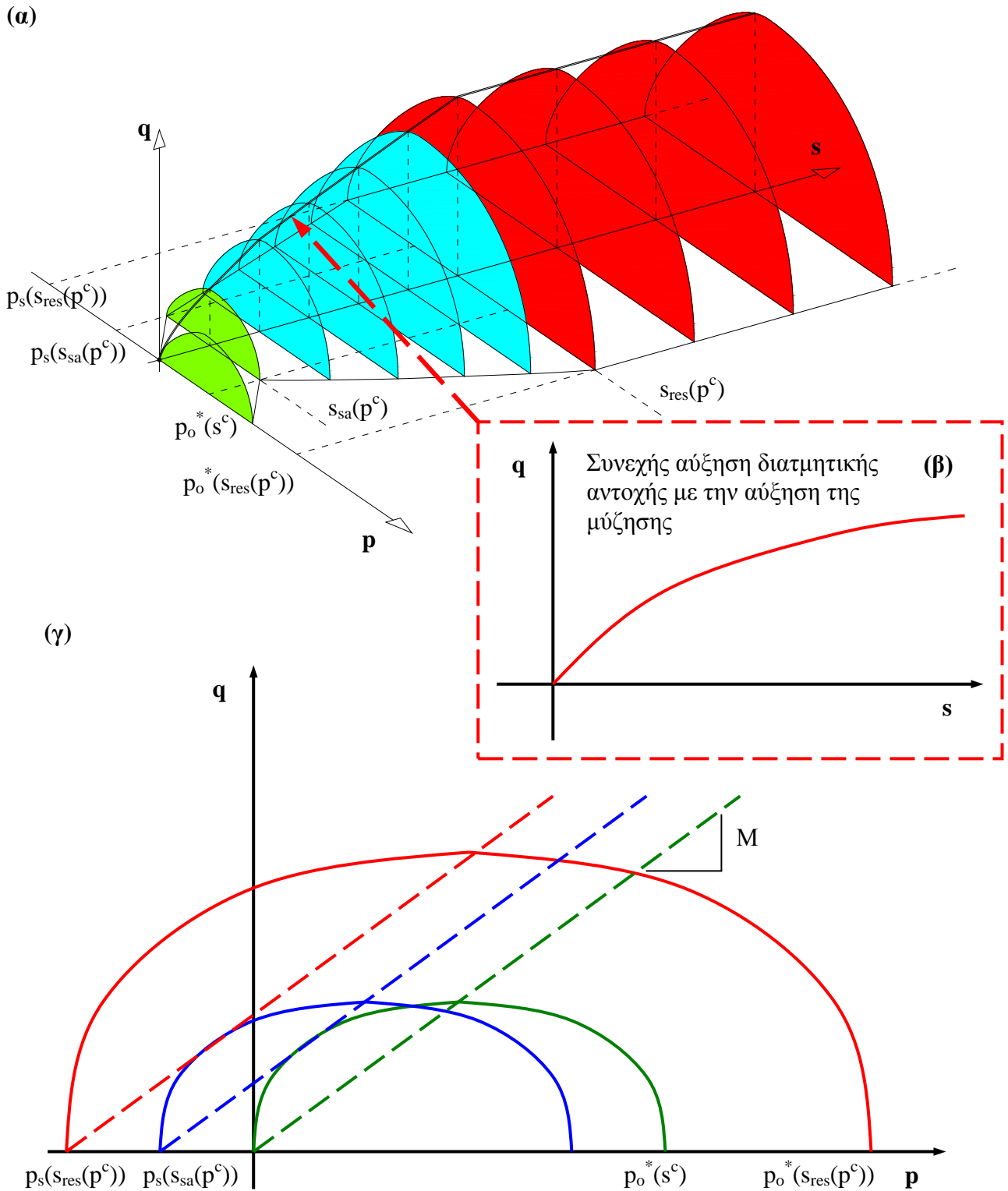
Στην §19.2.4.7 παρουσιάστηκε η μορφή της τομής της επιφάνειας διαρροής του προτεινόμενου καταστατικού προσομοιώματος με το επίπεδο p-s. Στην παράγραφο αυτή δείχνεται η μορφή της επιφάνειας διαρροής στον χώρο p-q-s.

Στα Σχ. 19.17α, 19.18α και 19.19α δείχνονται οι επιφάνειες διαρροής του προτεινόμενου καταστατικού προσομοιώματος για την περίπτωση που η εφελκυστική αντοχή αυξάνεται μονοτονικά, σταθεροποιείται μετά από μία αρχική αύξηση και μειώνεται μέχρι επαφής με τον άξονα της μύζησης αντίστοιχα. Στα Σχ. 19.17β, 19.18β και 19.19β δείχνονται οι αντίστοιχες τομές των επιφανειών διαρροής με το επίπεδο q-s και τέλος στα Σχ. 19.17γ, 19.18γ και 19.19γ δείχνονται οι τομές της επιφάνειας διαρροής με επίπεδα σταθερής μύζησης για τιμές της μύζησης ίσες με  $s^c$ ,  $s_{sa}(p^c)$  και  $s_{res}(p^c)$  για κάθε μια από τις περιπτώσεις εξέλιξης της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση.

Κατά την αναπαράγωγή των Σχ. 19.15α, 19.18α και 19.19α έχει υποτεθεί ότι  $s_{sa}(p^c) < p_o^*(s^c)$ .

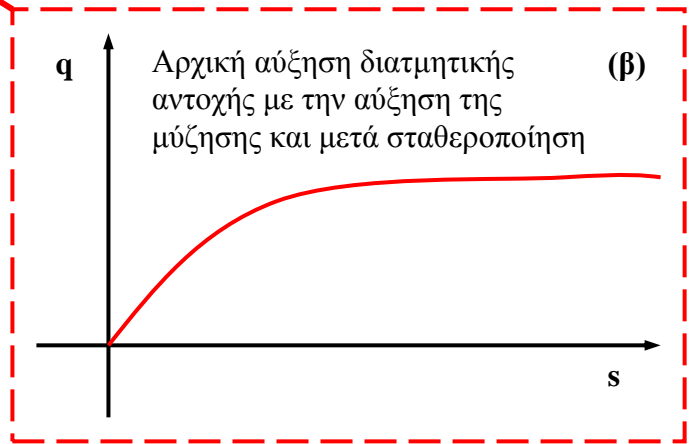
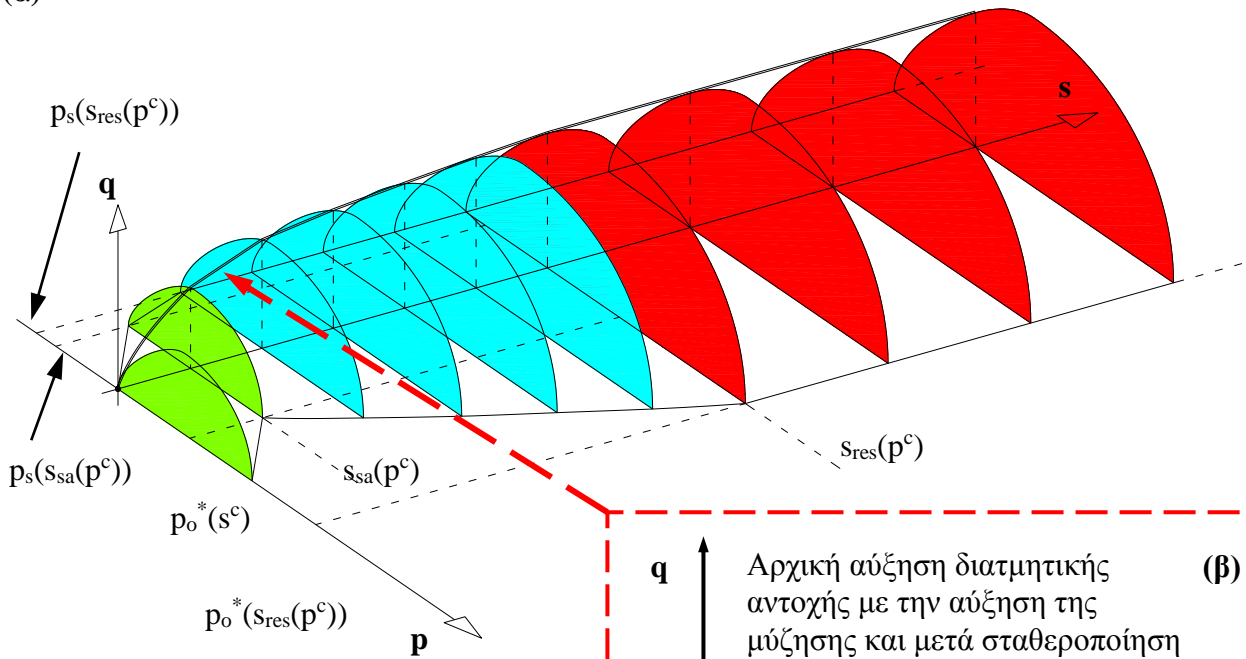
Τέλος, στα Σχ. 19.17γ, 19.18γ και 19.19γ επιδεικνύεται η χρήση σταθερής, ανεξάρτητης της μύζησης, τιμής της κλίσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης M. Η γεωμετρική μορφή των τομών αυτών ταυτίζεται με ελλείψεις, ο μεγάλος άξονας των οποίων κείται επί του άξονα της ολικής τάσης p και ο μικρός καθορίζεται από το μέγεθος του μεγάλου άξονα, την κλίση της γραμμής κρίσιμης κατάστασης και είναι παράλληλος με τον άξονα της διεκτροπικής τάσης σε θέση τέτοια που καθορίζεται από το μέγεθος της τάσης διαρροής κατά μήκος καμπυλών ισοτροπικής συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση και το μέγεθος της εφελκυστικής αντοχής. έτσι η εξίσωση που περιγράφει τις ελλείψεις αυτές είναι όμοια με αυτή του BBM (Εξ. 18.1 στο Κεφ. 18) και εδώ γίνεται Εξ. 19.23.

$$f_1[p, q, s, p_o^*(s^c)] \equiv q^2 - M^2 \cdot (p + p_s) \cdot (p_o - p) = 0 \quad (19.23)$$

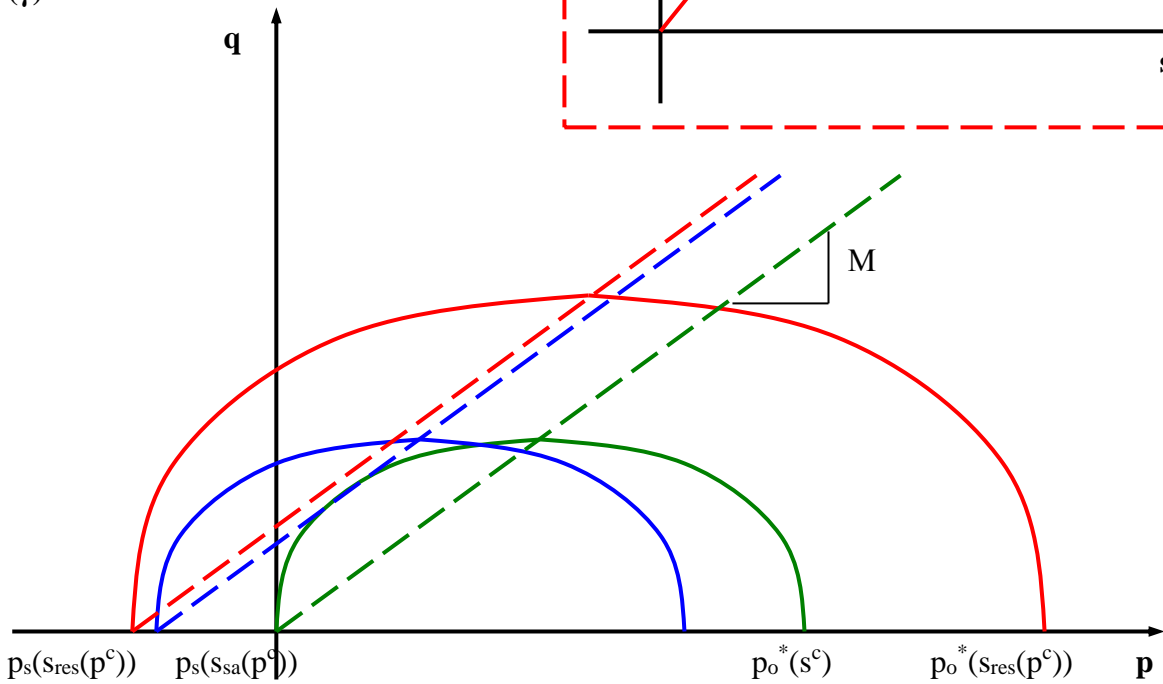


**Σχήμα 19.17.** α) Τριδιάστατη μορφή της επιφάνειας διαρροής του MBBM για εδαφικά υλικά η διατμητική αντοχή των οποίων αυξάνεται συνεχώς με την μύζηση μέχρι σταθεροποίησής της στην μύζηση επίτευξης παραμένοντος ειδικού όγκου, β) το μή της επιφάνειας διαρροής σε αυτήν την περίπτωση με το επίπεδο q-s, και γ) τομές σταθερής μύζησης στην ίδια περίπτωση εδαφικού υλικού.

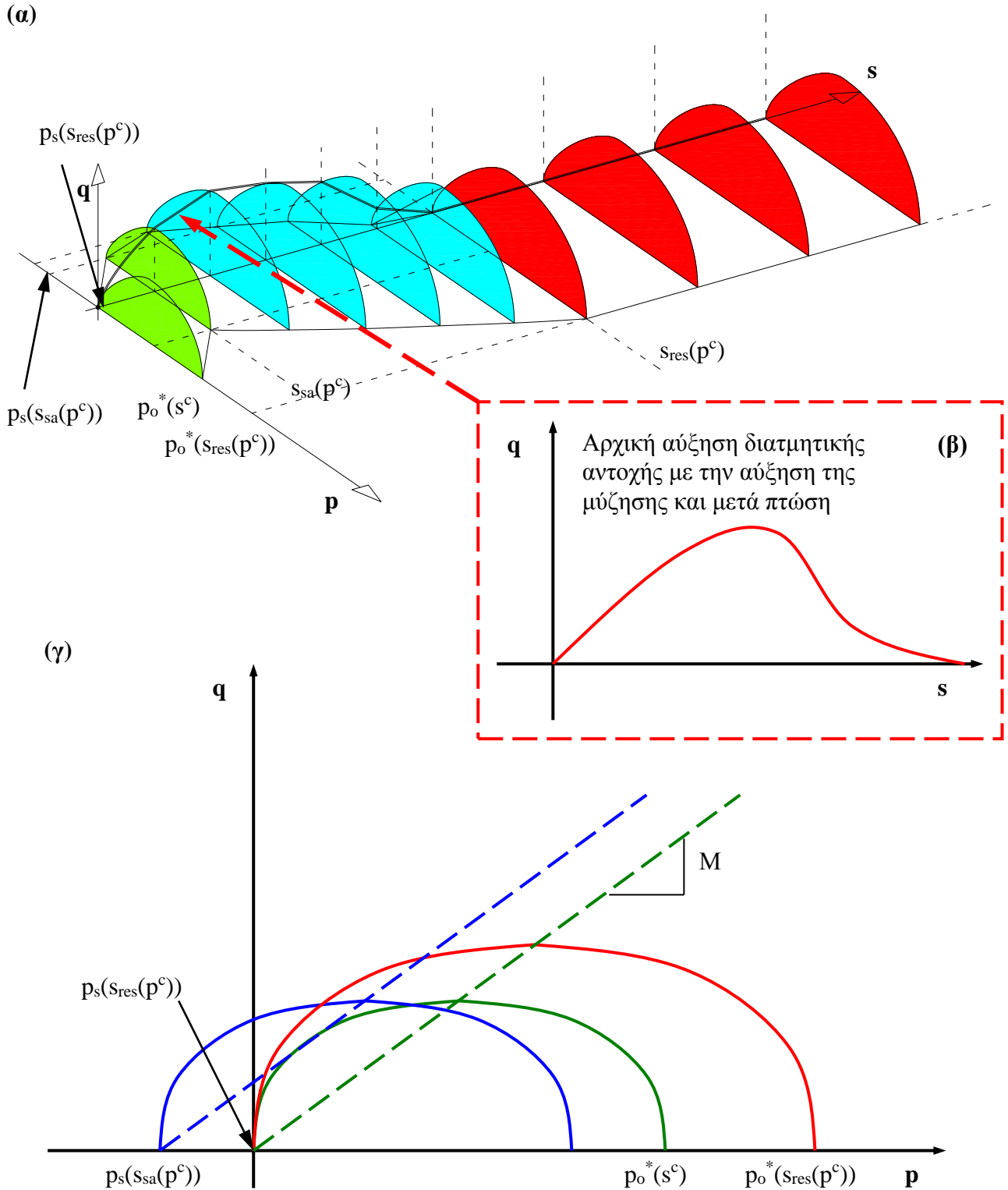
(α)



(γ)



**Σχήμα 19.18.** α) Τριδιάστατη μορφή της επιφάνειας διαρροής του MBBM για εδαφικά υλικά η διατμητική αντοχή των οποίων αυξάνεται συνεχώς με την μύζηση μέχρι σταθεροποίησής της στην μύζηση επίτευξης παραμένοντος ειδικού όγκου, β) τομή της επιφάνειας διαρροής σε αυτήν την περίπτωση με το επίπεδο q-s, και γ) τομές σταθερής μύζησης στην ίδια περίπτωση εδαφικού υλικού.



**Σχήμα 19.19.** α) Τριδιάστατη μορφή της επιφάνειας διαρροής του MBBM για εδαφικά υλικά η διατμητική αντοχή των οποίων αυξάνεται συνεχώς με την μύζηση μέχρι σταθεροποίησής της στην μύζηση επίτευξης παραμένοντος ειδικού όγκου, β) τομή της επιφάνειας διαρροής σε αυτήν την περίπτωση με το επίπεδο q-s, και γ) τομές σταθερής μύζησης στην ίδια περίπτωση εδαφικού υλικού.

19.2.4.9 Συνόψιση νόμων ροής, νόμων κράτνσης και μορφής ελαστικών παραμορφώσεων

Οι νόμοι ροής, οι νόμοι κράτνσης και η μορφή των ελαστικών παραμορφώσεων στο προτεινόμενο καταστατικό προσομοίωμα είναι όμοιοι με τους αντίστοιχους του BBM και περιγράφονται από τις Εξ. 18.11 έως 18.19, 18.20 έως 18.21 και 18.22 έως 18.23 αντίστοιχα. Δεν έχει νόημα οποιαδήποτε περαιτέρω εμβάθυνση στο παρόν στάδιο της εξέλιξης του θεωρητικού πλαισίου.

$$d\varepsilon_{vp}^p = \mu_1 n_p \quad (18.11)$$

$$d\varepsilon_s^p = \mu_1 n_q \quad (18.12)$$

$$n_p = 1 \quad (18.13)$$

$$n_q = \frac{2q\alpha}{M^2(2p + p_s - p_o)} \quad (18.14)$$

$$\frac{d\varepsilon_s^p}{d\varepsilon_{vp}^p} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{1 - \kappa / \lambda(0)} \quad (18.15)$$

$$\left( \frac{q}{p} + p_s \right) = 3 \frac{1 - K_o}{1 + 2K_o} \quad (18.16)$$

$$K_o = 1 - \sin \varphi' = \frac{6 - 2 \cdot M}{6 + M} \quad (18.17)$$

$$\alpha = \frac{M(M - 9)(M - 3)}{9(6 - M)} \frac{1}{1 - \kappa / \lambda(0)} \quad (18.18)$$

$$d\varepsilon_{vs}^p = \mu_2 \quad (18.19)$$

$$\frac{dp_o^*}{p_o^*} = \frac{\nu}{\lambda(0) - \kappa} d\varepsilon_v^p \quad (18.20)$$

$$\frac{ds_o}{s_o + p_{at}} = \frac{\nu}{\lambda_s - \kappa_s} d\varepsilon_v^p \quad (18.21)$$

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{\nu} \frac{dp}{p} + \frac{\kappa_s}{\nu} \frac{ds}{(s + p_{at})}, \quad (18.22)$$

$$d\varepsilon_s^e = \frac{1}{3G} dq \quad (18.23)$$



19.2.4.9 Συνοψιση απαιτούμενων παραμέτρων του προτεινόμενου προσομοιώματος

Στην παράγραφο αυτή συνοψίζονται οι παράμετροι που απαιτούνται από το προτεινόμενο καταστατικό προσομοίωμα. Στον Πίν. 19.10 συγκεντρώνονται όλες οι παράμετροι ανά είδος παραμέτρου και χαρακτηριστικό του προσομοιώματος. Το προσομοίωμα απαιτεί συνολικά 31 παραμέτρους, εκ των οποίων οι 12 είναι παράμετροι του εδαφικού υλικού, οι 3 παράμετροι κράτυνσης, οι 12 παράμετροι προσέγγισης και οι 4 παράμετροι έκφρασης της τρέχουσας εντατικής κατάστασης.

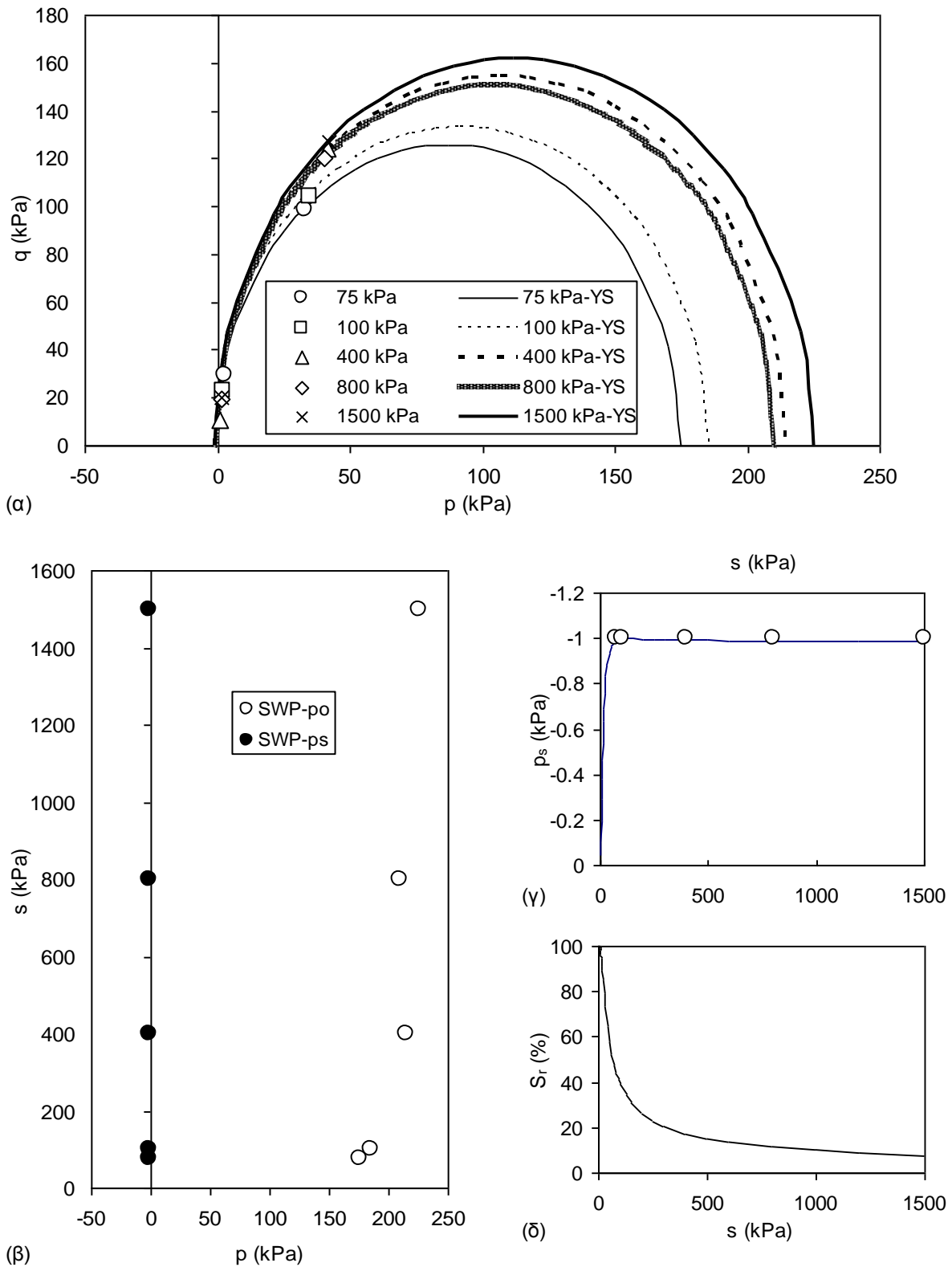
**Πίνακας 19.10.** Συνοψιση παραμέτρων του προτεινόμενου καταστατικού προσομοιώματος για μή κορεσμένα εδάφη.

Χαρακτηριστικό	Παράμετροι του εδαφικού υλικού	Παράμετροι κράτυνσης	Παράμετροι προσέγγισης	Παράμετροι έκφρασης τρέχουσας εντατικής κατάστασης	Σύνολο παραμέτρων ανά χαρακτηριστικό
Ογκομετρικές μεταβολές λόγω μεταβολών της τάσης υπό «μηδενική» μύζηση	$\kappa(s^c), \lambda(s^c), N(p^c, s^c)$	$p_o^*(s^c)$	$p^c, s^c$	$v, p$	8
Ογκομετρικές μεταβολές λόγω μεταβολών της μύζησης υπό «μηδενική» τάση	$S_{sa}(p^c), S_{res}(p^c), v_{res}(p^c), \kappa_s$		$\mu_\lambda, \mu_s, \mu_p$	$s$	8
Εξέλιξη του δείκτη συμπίεσης και της τάσης διαρροής με την μύζηση	-	-	$r, \beta$	-	2
Εξέλιξη των χαρακτηριστικών συμπίεστότητας λόγω μεταβολών της μύζησης με την τάση	$\mathbf{k}_{res}$	-	-	-	1
Εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση	-	-	$\zeta_k, \eta_k$	-	2
Εισαγωγή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού	$S_{ae}(p^c), S_{we}(p^c), \lambda_{ws}, \mathbf{k}_{ws}$	-	-	-	4
Περιγραφή διεκτροπικών καταστάσεων	$M$	-	-	$q$	2
Νόμοι ροής	$G$	-	$\mu_1, \mu_2, \alpha$	-	4
Σύνολο παραμέτρων ανά είδος παραμέτρου	12	3	12	4	31

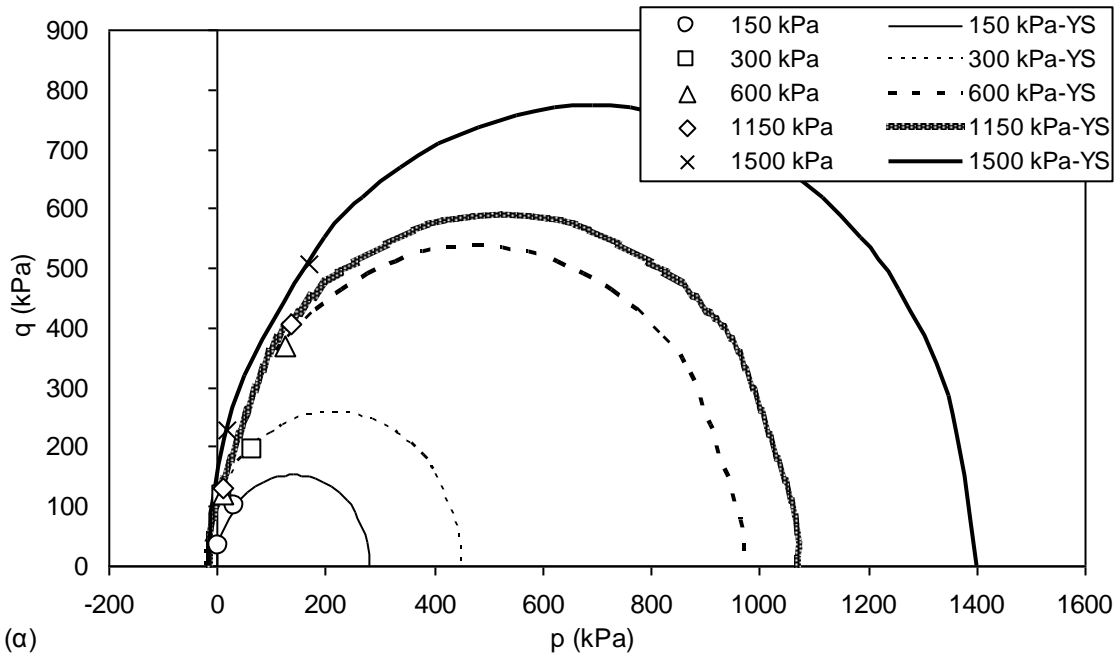
### 19.2.5 Αξιοποίηση των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα για διάφορες τιμές της μύζησης

Στο Κεφ. 15 του δεύτερου μέρους παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα που πραγματοποιήθηκαν σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά μετά από εφαρμογή διάφορων τιμών της μύζησης. Μάλιστα στην §15.7.5 τα αποτελέσματα των δύο ειδών δοκιμών συνδυάστηκαν για κάθε τιμή της μύζησης που εφαρμόστηκε προκειμένου να εκτιμηθεί η φαινόμενη συνοχή για κάθε τιμή της μύζησης και στη συνέχεια να εκτιμηθεί για κάθε υλικό η εξέλιξη της με την μύζηση καταλήγοντας μάλιστα σε τιμές της γωνίας αύξησης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση  $\phi_b$ .

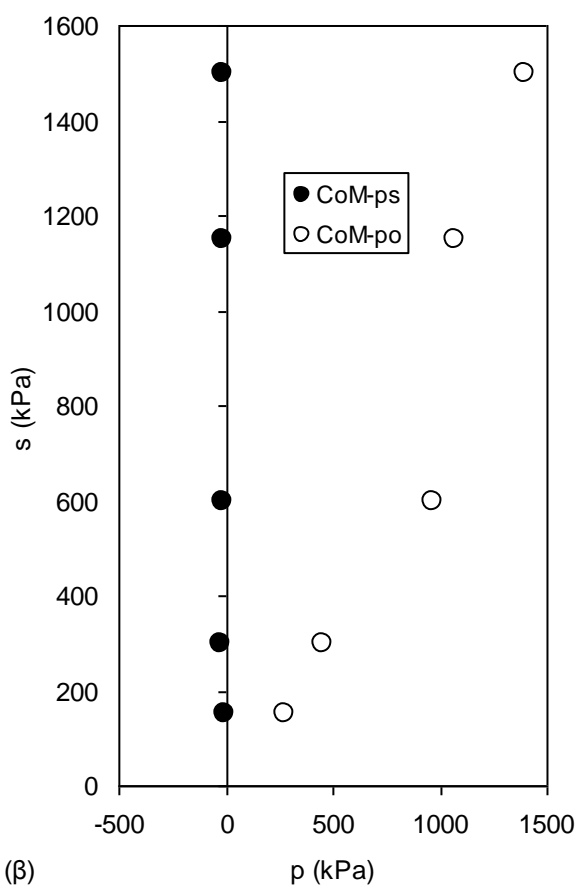
Στο παρόν κεφάλαιο τα ίδια πειραματικά αποτελέσματα χρησιμοποιούνται προκειμένου να εκτιμηθεί η επιφάνεια διαρροής και από αυτήν η τάση διαρροής κατά μήκος της καμπύλης ισοτροπικής συμπίεσης υπό διάφορες τιμές της μύζησης  $p_0$  και η εφελκυστική αντοχή  $p_s$ . Για όλα τα εδαφικά υλικά υποτέθηκε σταθερή τιμή της κλίσης της γραμμής κρίσιμης κατάστασης  $M$  με την αύξηση της μύζησης και χαράχθηκαν οι επιφάνειες διαρροής για κάθε υλικό. Αυτό παρουσιάζεται για κάθε ένα από τα πέντε εδαφικά υλικά στα Σχ. 19.20α έως 19.24α. Από αυτές τις προσομοιώσεις προέκυψαν οι τιμές του  $p_s$  και  $p_0$  για κάθε τιμή της μύζησης. Αυτές σχεδιάστηκαν με την μύζηση για κάθε εδαφικό υλικό στα Σχ. 19.20β έως 19.24β. Στη συνέχεια ειδικά οι τιμές της  $p_s$  σχεδιάστηκαν με την μύζηση στα Σχ. 19.20γ έως 19.24γ. Στα ίδια σχήματα έχουν σχεδιαστεί και οι βέλτιστες προσομοιώσεις των πειραματικών δεδομένων με βάση την Εξ. 19.16. Για τη χάραξη των προσομοιώσεων αυτών χρησιμοποιήθηκαν χάριν απλότητας (και ελλείψει και κλάδων επανύγρυνσης που θα επέτρεπαν την πλήρη αξιοποίηση των Εξ. 19.17 και 19.18), οι βέλτιστες τιμές προσέγγισης με βάση το μαθηματικό προσομοίωμα του Van Genuchten (βλ. §14.3.15, Πιν. 14.3). Οι προσομοιούμενες χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή τη σειρά δοκιμών με μορφή πολτού παρουσιάζονται στα Σχ. 19.20δ έως 19.24δ με τον άξονα της μύζησης σε γραμμική κλίμακα για πλήρη αντιστοίχιση με τα Σχ. 19.20γ έως 19.24γ. Τέλος στο Σχ. 19.25 παρουσιάζεται για κάθε εδαφικό υλικό η εξέλιξη της τάσης διαρροής  $p_0$  με την μύζηση μαζί με τις βέλτιστες καμπύλες προσομοίωσης με βάση την Εξ. 19.7. Δεδομένου ότι όλα τα υλικά ήταν αναζυμωμένα σε μορφή πολτού, ετέθη ως  $p_0^*$  η τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα του κάθε εδαφικού υλικού στην ίδια μορφή. Εξαιρέση έγινε μόνο για την Αργίλο Αμαρουσίου όπως φαίνεται στο Σχ. 19.25ε αφού για την τιμή των 1500 kPa προβλέπεται μόνο το ένα σημείο, το οποίο όμως αποκλίνει αισθητά από τα υπόλοιπα, η εξέλιξη των οποίων προβλέπεται ορθά για την τιμή των 100 kPa.



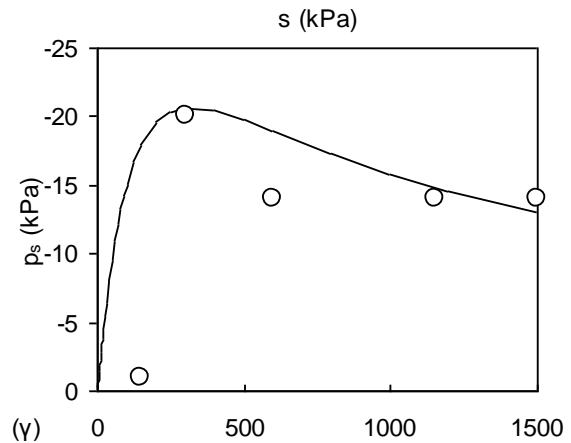
**Σχήμα 19.20.** α) Επιφάνειες διαρροής για όλες τις τιμές της μύζησης για Αποσαθρωμένο Φυλλίτη Σκύρου μαζί με τα πειραματικά δεδομένα, β) επίπεδο  $p$ - $s$  με τις τιμές  $p_0$  και  $p_s$  για κάθε τιμή της μύζησης, γ) τιμές  $p_s$  με τη μύζηση και η βέλτιστη προσέγγιση με βάση την Εξ. 19.16 ( $\zeta_k = 0.05$ ,  $\eta_k = 1.7$ ), και δ) εξέλιξη του βαθμού κορεσμού με τη μύζηση για το συγκεκριμένο υλικό με βάση την προσομοίωσή του με την εξίσωση του Van Genuchten (βλ. Πιν. 14.3 στο Κφ.14).



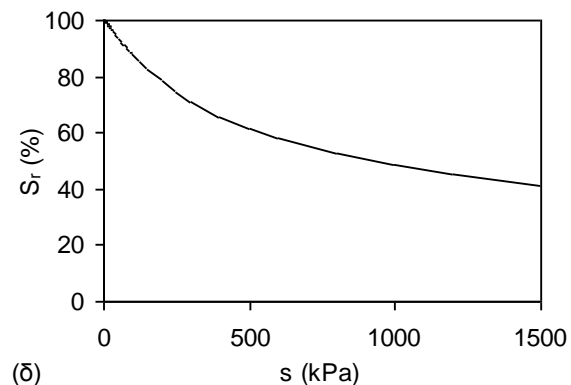
(α)



(β)

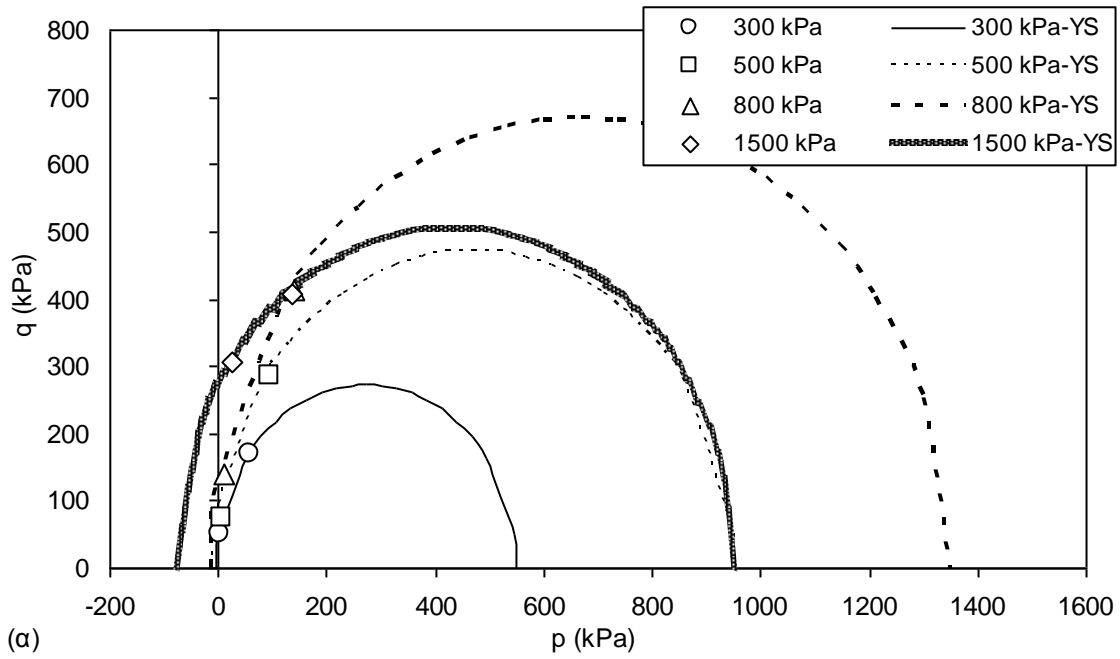


(γ)

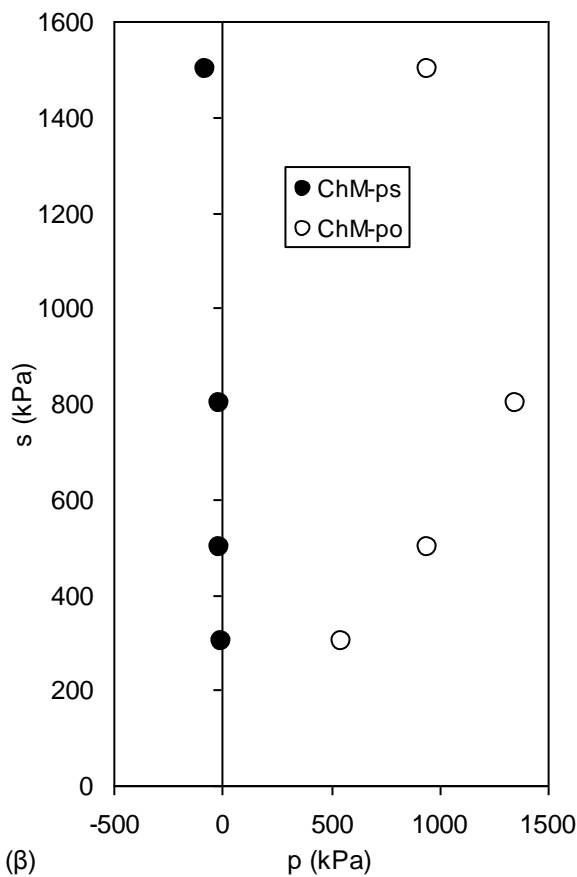


(δ)

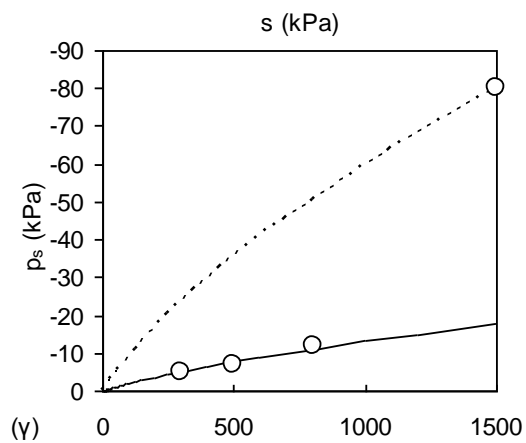
**Σχήμα 19.21.** α) Επιφάνειες διαρροής για όλες τις τιμές της μύζησης για Μάργα Κορίνθου μαζί με τα πειραματικά δεδομένα, β) επίπεδο p-s με τις τιμές  $p_o$  και  $p_s$  για κάθε τιμή της μύζησης, γ) τιμές  $p_s$  με τη μύζηση και η βέλτιστη προσέγγιση με βάση την Εξ. 19.16 ( $\zeta_k = 0.25$ ,  $\eta_k = 3.8$ ), και δ) εξέλιξη του βαθμού κορεσμού με τη μύζηση για το συγκεκριμένο υλικό με βάση την προσομοίωσή του με την εξίσωση του Van Genuchten (βλ. Πιν. 14.3 στο Κφ.14).



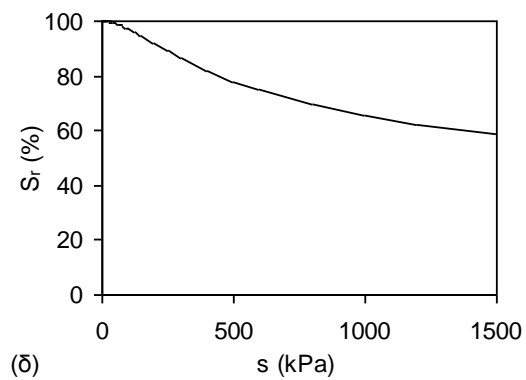
(α)



(β)

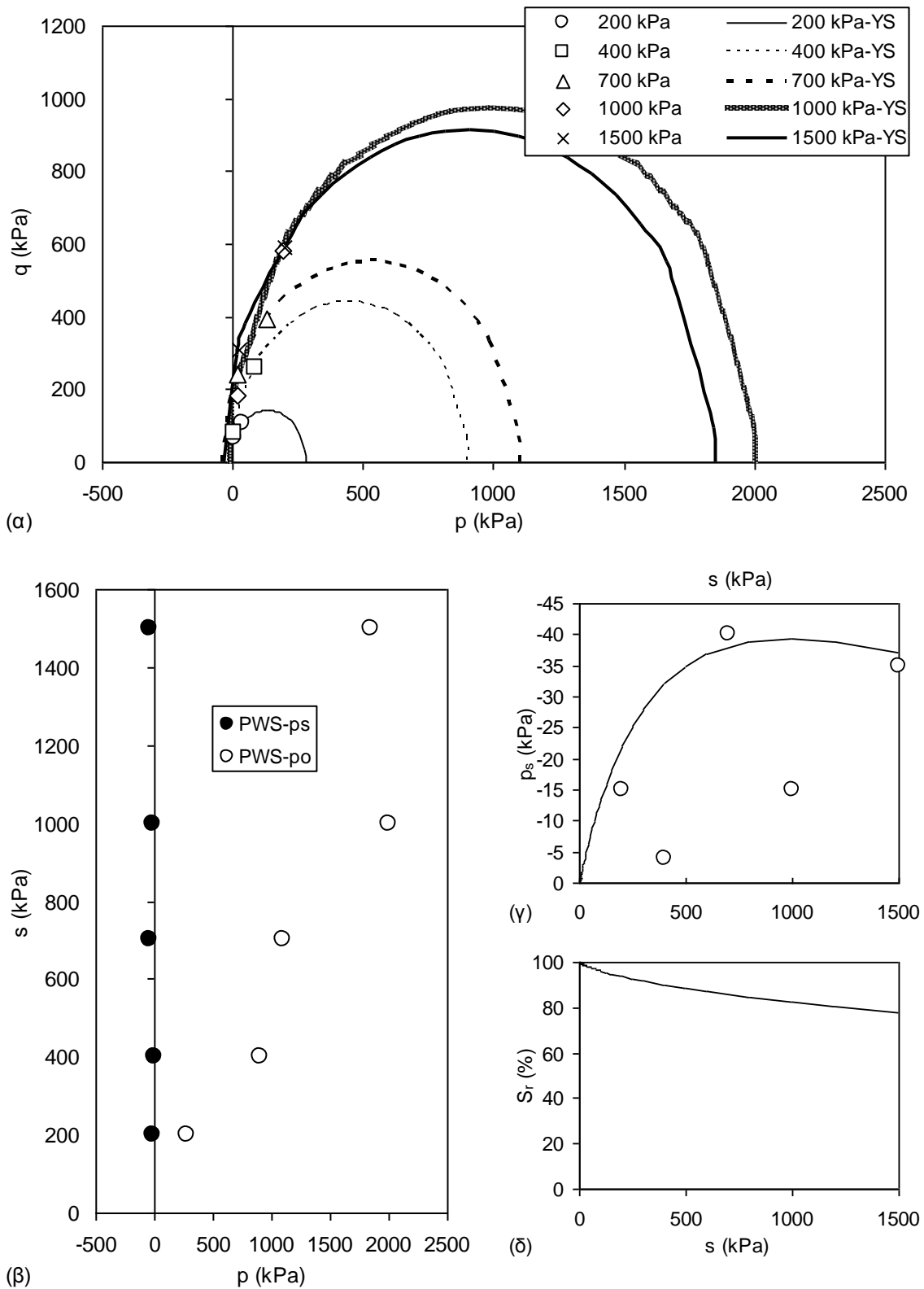


(γ)

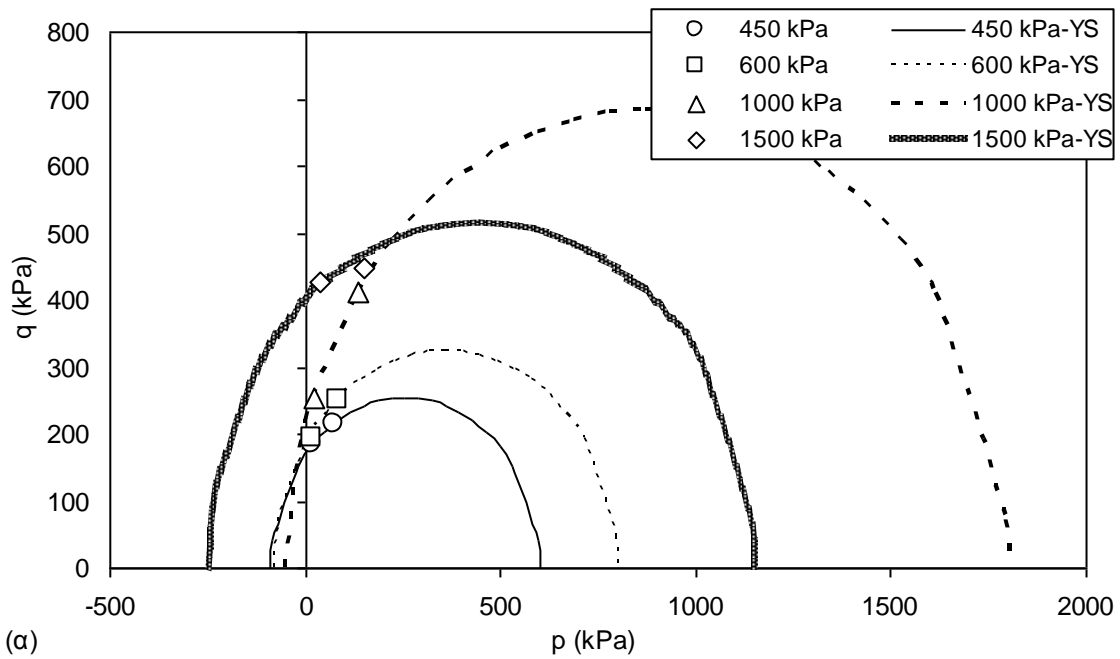


(δ)

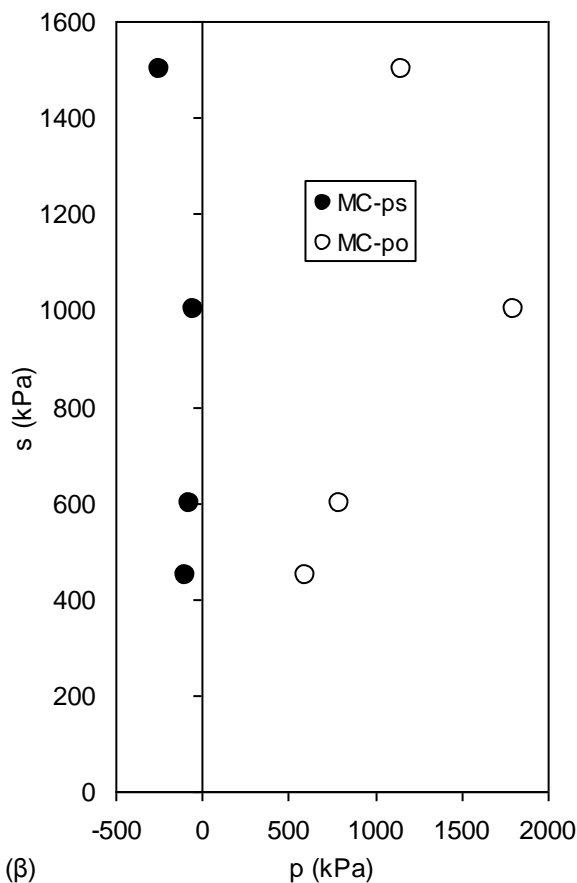
**Σχήμα 19.22.** α) Επιφάνειες διαρροής για όλες τις τιμές της μύζησης για Μάργα Χαλκουτσίου μαζί με τα πειραματικά δεδομένα, β) επίπεδο p-s με τις τιμές  $p_o$  και  $p_s$  για κάθε τιμή της μύζησης, γ) τιμές  $p_s$  με τη μύζηση και η βέλτιστη προσέγγιση με βάση την Εξ. 19.16 ( $\zeta_k = 0.02$ ,  $\eta_k=1$  για τα 3 σημεία,  $\zeta_k = 0.091$ ,  $\eta_k=1$  για τα 1500 kPa), και δ) εξέλιξη του βαθμού κορεσμού με τη μύζηση για το συγκεκριμένο υλικό με βάση την προσομοίωσή του με την εξίσωση του Van Genuchten (βλ. Πιν. 14.3 στο Κφ.14).



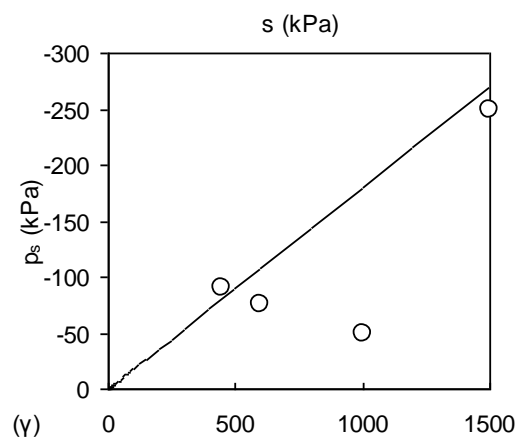
**Σχήμα 19.23.** α) Επιφάνειες διαρροής για όλες τις τιμές της μύζησης για Αποσαθρωμένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας μαζί με τα πειραματικά δεδομένα, β) επίπεδο p-s με τις τιμές  $p_o$  και  $p_s$  για κάθε τιμή της μύζησης, γ) τιμές  $p_s$  με τη μύζηση και η βέλτιστη προσέγγιση με βάση την Εξ. 19.16 ( $\zeta_k = 0.185$ ,  $\eta_k=8$ ), και δ) εξέλιξη του βαθμού κορεσμού με τη μύζηση για το συγκεκριμένο υλικό με βάση την προσομοίωσή του με την εξίσωση του Van Genuchten (βλ. Πιν. 14.3 στο Κφ.14).



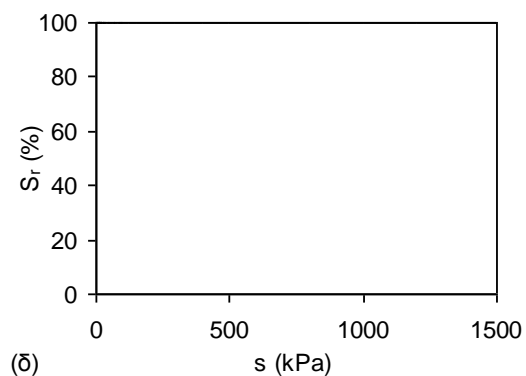
(α)



(β)

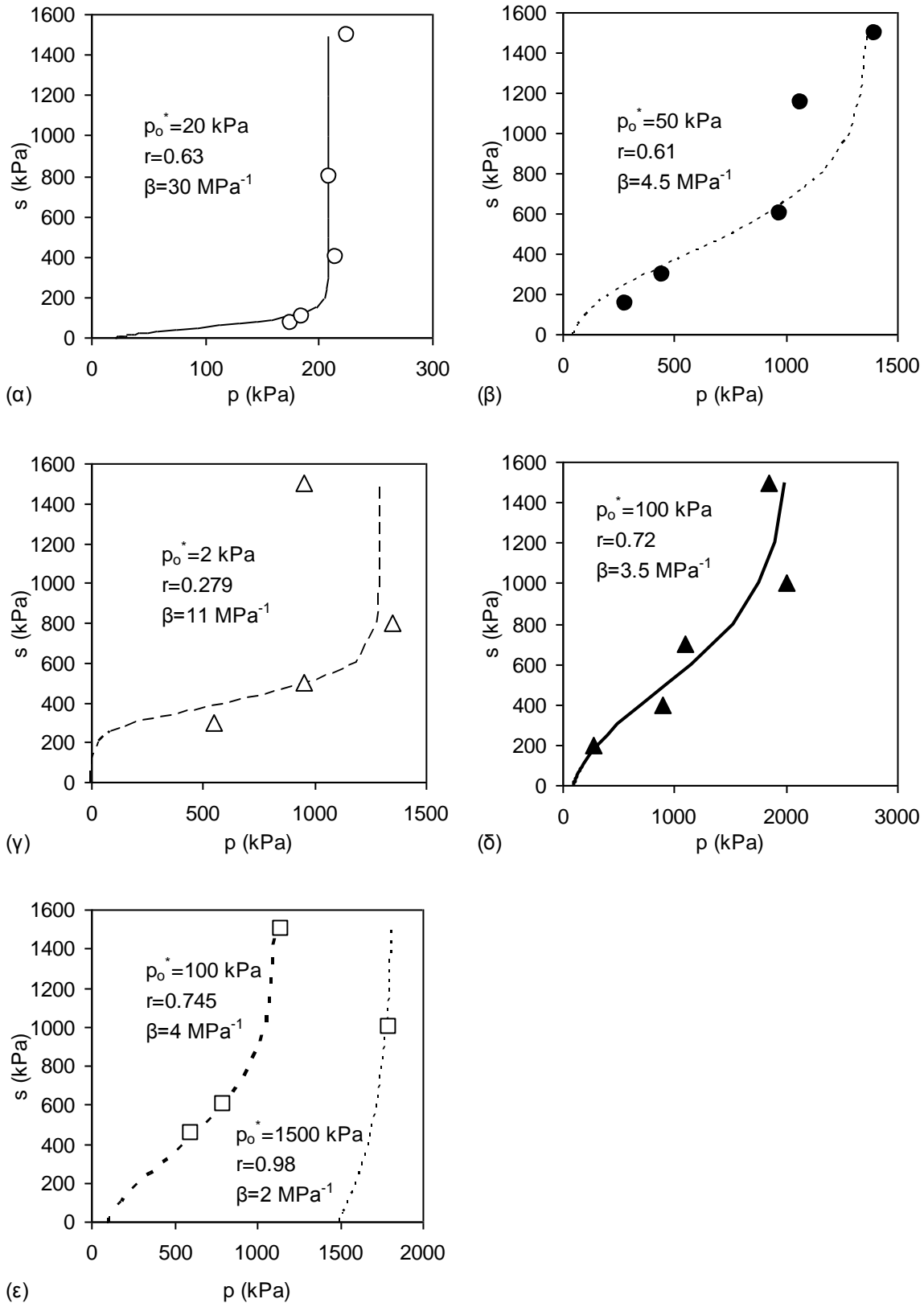


(γ)



(δ)

**Σχήμα 19.24.** α) Επιφάνειες διαρροής για όλες τις τιμές της μύζησης για Άργιλο Αμαρουσίου μαζί με τα πειραματικά δεδομένα, β) επίπεδο p-s με τις τιμές  $p_o$  και  $p_s$  για κάθε τιμή της μύζησης, γ) τιμές  $p_s$  με τη μύζηση και η βέλτιστη προσέγγιση με βάση την Εξ. 19.16 ( $\zeta_k = 0.25$ ,  $\eta_k = 1.7$ ), και δ) εξέλιξη του βαθμού κορεσμού με τη μύζηση για το συγκεκριμένο υλικό με βάση την προσομοίωσή του με την εξίσωση του Van Genuchten (βλ. Πιν. 14.3 στο Κφ.14) –η καμπύλη ταυτίζεται με τη γραμμή  $S_r = 100\%$ .



**Σχήμα 19.25.** Εξέλιξη τάσης διαρροής με την μύζηση μαζί με τις καμπύλες βέλτιστης προσομοίωσης με βάση την Εξ. 19.7 για α) αποσαθρωμένο Φυλλίτη Σκύρου, β) Μάργα Κορίνθου, γ) Μάργα Χαλκουτσίου, δ) αργιλοποιημένο Ιλυόλιθο Πάρνηθας, και ε) Άργιλο Αμαρουσίου (καμπύλες και για πίεσης διείδυσης αέρα 1500 kPa και για πίεση διείδυσης αέρα 100 kPa –βλ. κείμενο).



Στον Πιν. 19.11 συγκεντρώνονται οι κύριες τιμές παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για αυτές τις προσομοιώσεις και προέκυψαν από αυτές για κάθε εδαφικό υλικό. Δεν διαπιστώθηκε κάποια αξία λόγου εμπειρική συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων  $r$  και  $\beta$ , και  $\zeta_k$  και  $\eta_k$  με κάποια άλλη παράμετρο.

**Πίνακας 19.11.** Σύνοψη τιμών παραμέτρων από τις προσομοιώσεις με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε αναζυμωμένα εδαφικά υλικά μετά από εφαρμογή διαφόρων τιμών της μύζησης.

Εδαφικό υλικό	Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκόρου	Μάργα Κορίνθου	Μάργα Χαλκουτσίου	Αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας	Αργίλος Αμαρουσίου
$\lambda(0)$	0.064	0.080	0.109	0.082	0.178
$p_o^*$ (kPa)	20	50	2	100	100
$r$	0.63	0.61	0.279	0.72	0.745
$\beta$	30	4.5	11	3.5	4
$a$	0.0492	0.0041	0.0042	0.00019	0.000109
$n$	2.459	1.098	1.837	0.744	19.775
$m$	0.241	0.417	0.156	0.759	0.027
$\varphi^*$	35.3	27.5	25.0	24.7	19.2
$M^*$ [ $M = 6\sin\varphi' /$ ( $3-\sin\varphi'$ ) ]	1.431	1.091	0.984	0.971	0.739
$K_o^*$ ( $=1-\sin\varphi'$ )	0.422	0.538	0.577	0.582	0.671
$\zeta_k$	0.05	0.25	0.02	0.185	0.18
$\eta_k$	1.7	3.8	1	8	1

### 19.3 ΣΥΝΟΨΙΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο Κεφάλαιο 19 παρουσιάστηκε το θεωρητικό πλαίσιο που διατυπώθηκε και προτείνεται για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών.

Τα κύρια σημεία που διαφοροποιούν το προσομοίωμα από άλλα προσομοιώματα είναι τα εξής:

- Προβλέπει παύση της περαιτέρω μείωσης του λόγου κενών των εδαφικών υλικών από την μύζηση που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών και μετά. Όπως επιδείχθηκε, προηγούμενα προσομοιώματα όπως το BBM δεν έχουν τέτοια δυνατότητα, ενώ ακόμα και προσομοιώματα όπως αυτό των Sheng, et al. (2008) που ενσωματώνουν τέτοιες δυνατότητες δεν έχουν την ικανότητα να «στοχεύσουν» την ορθή τιμή του παραμένοντος ειδικού όγκου όπως το νέο θεωρητικό πλαίσιο χάρη στις Εξ. 19.5 και 19.6. Η εισαγωγή και χρήση των εξισώσεων αυτών αναδεικνύει και τη σημασία των εμπειρικών συσχετίσεων που αναπτύχθηκαν με βάση την πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής (βλ. §14.6.4, Εξ. 14.11 έως 14.16 στον Πιν. 14.7). Χρησιμοποιώντας τις εμπειρικές αυτές συσχετίσεις ως εργαλείο πρόβλεψης του παραμένοντος λόγου κενών (και άρα του παραμένοντος ειδικού όγκου) ακόμα και με μεγάλα κενά στο εύρος τιμών της μύζησης μεταξύ της μεθόδου μετατόπισης άξονα και της μεθόδου υδατικών διαλυμάτων για τον έλεγχο της μύζησης, μπορεί να εκτιμηθεί μία τιμή της μύζησης επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών ώστε οι προσομοιώσεις να καταλήγουν στην επιθυμητή τιμή του ειδικού όγκου.
- Διά της μορφής των Εξ. 19.5 και 19.6, το νέο θεωρητικό πλαίσιο μπορεί να προβλέψει την δυνατή περιοχή εμφάνισης πλαστικών ογκομετρικών μεταβολών λόγω μεταβολής της μύζησης.
- Περιγράφει την εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση έτσι ώστε να είναι δυνατόν να προβλεφθεί οποιαδήποτε δυνατή εξέλιξη της διατμητικής αντοχής μετά την πίεση διείσδυσης αέρα (περαιτέρω αύξηση της αντοχής, σταθεροποίηση ή μείωση) διά της Εξ. 19.16.
- Λόγω της νέας μορφής του νόμου εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με την μύζηση απαιτεί την εισαγωγή και της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του εδαφικού υλικού.

Το MBBM ισχύει για τα εξής εδαφικά υλικά και εντατικές καταστάσεις:

- Εδαφικά υλικά με ένα κυρίαρχο μέγεθος πόρων, πρακτικά ομοιογενή ως προς τον βαθμό κορεσμού τους (ή με μικρές μόνο διαφορές), τα οποία παρουσιάζουν μόνο ελαστική διόγκωση κατά την μείωση της μύζησης.
- Λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα εδάφη τα οποία επιδεικνύουν είτε αύξηση, είτε σταθεροποίηση, είτε και μείωση ακόμα της διατμητικής τους αντοχής με την αύξηση της μύζησης.
- Παραμορφώσιμα εδάφη η ξήρανση των οποίων έχει φτάσει ή ακόμα και υπερβεί την μύζηση επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών.
- Για λόγους συνέπειας με το πρώτο σημείο, εδαφικά υλικά με χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού δύο μόνο σημείων καμπής (δηλαδή ενός κυρίαρχου μεγέθους πόρων). Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού εισάγεται ουσιαστικά για την δυνατότητα πρόβλεψης της διατμητικής αντοχής και όχι της συμπιεστότητας του προσομοιούμενου εδαφικού υλικού, οπότε θα μπορούσε να εισαχθεί καμπύλη οποιασδήποτε γεωμετρικής μορφής. Αυτό όμως δεν θα βρισκόταν σε συνέπεια με την δυνατότητα προσομοίωσης μεταβολών όγκου και μεταβολών της επιφάνειας διαρροής του προσομοιώματος.
- Εδαφικά υλικά με απλή ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρυνσης που περιορίζεται σε απλές, ανεξάρτητες του ρυθμού φόρτισης, φορτίσεις και αποφορτίσεις και ξηράνσεις και υγράνσεις.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 20

## ΣΥΝΟΨΙΣΗ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΡΙΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

### 20.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το τρίτο μέρος της διδακτορικής διατριβής αποτελεί το κείμενο στο οποίο παρουσιάστηκε το νέο θεωρητικό πλαίσιο περιγραφής της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Έχει ήδη προηγηθεί το πρώτο μέρος στο οποίο παρουσιάζεται η φύση και η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών και το δεύτερο μέρος στο οποίο παρουσιάστηκαν και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής.

Στο παρόν κεφάλαιο συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα των κεφαλαίων που προηγήθηκαν στο τρίτο μέρος της διατριβής.

### 20.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΑ ΕΔΑΦΗ

Στο Κεφάλαιο 18 παρουσιάστηκαν τα περισσότερα από τα διατυπωμένα καταστατικά προσομοιώματα για μη κορεσμένα εδάφη, καθώς και μία διεξοδικότερη παραμετρική ανάλυση του Βασικού Προσομοιώματος της Βαρκελώνης (BBM) και κυρίως των συνεπειών του σε ό,τι αφορά την πρόβλεψη της διατμητικής αντοχής και της παραμόρφωσης λόγω κατάρρευσης κατά την διαβροχή υπό υψηλές τιμές της τάσης. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής δόθηκε σημασία κυρίως στα προσομοιώματα που είναι διατυπωμένα σε όρους ολικής τάσης και μύζησης όπως

και το νέο θεωρητικό πλαίσιο που παρουσιάστηκε στο Κεφ. 19. Τα προσομοιώματα που διακρίνονται για τις καινοτόμες συνεισφορές τους στην προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών είναι:

- Το καταστατικό προσομοίωμα των Alonso, et al. (1990), γνωστό και ως BBM. Υπήρξε το πρώτο ολοκληρωμένο μαθηματικά, και όχι περιγραφικά, διατυπωμένο καταστατικό προσομοίωμα, ικανό να περιγράψει τα βασικά χαρακτηριστικά της μηχανικής συμπεριφοράς μή κορεσμένων εδαφών χωρίς μεγάλη διόγκωση υπό χαμηλές τιμές της τάσης.
- Το καταστατικό προσομοίωμα των Tang & Graham (2002). Υπήρξε το πρώτο προσομοίωμα στο οποίο επιχειρήθηκε μία σοβαρή, μαθηματικά και όχι περιγραφικά διατυπωμένη προσέγγιση μίας ενιαίας, συνεχώς παραγωγίσιμης επιφάνειας διαρροής στον χώρο  $p$ - $q$ - $s$ . Δευτερευόντως –και κατά την γνώμη του γράφοντος– η ισοδύναμη τάση των Tang & Graham (2002) είναι η πιο σοβαρή προσέγγιση στην εισαγωγή μιας ενεργού τάσης για μή κορεσμένα εδάφη μέχρι σήμερα, σε πραγματική αντιστοιχία και αναλογία με την ενεργό τάση όπως χρησιμοποιείται για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των πλήρως κορεσμένων εδαφικών υλικών.
- Το καταστατικό προσομοίωμα των Sheng, et al. (2008). Υπήρξε το πρώτο προσομοίωμα που προσπάθησε να περιγράψει την μηχανική συμπεριφορά των μή κορεσμένων εδαφών με αφετηρία όχι κάποιο αυθαίρετα επιλεγμένο σημείο στον χώρο  $p$ - $q$ - $s$ - $v$  αλλά την κατάσταση που αντιστοιχεί σε ένα αναζυμωμένο εδαφικό υλικό (παρόλο που και πάλι περιορίστηκε σε εδαφικά υλικά που ξεκίνησαν μεν από κατάσταση πολτού αλλά στην συνέχεια φορτίστηκαν υπό μηδενική μύζηση μέχρι μία τιμή της τάσης και στη συνέχεια αποφορτίστηκαν).

Η σταχυολόγηση αυτή δεν μειώνει την συνεισφορά των υπολοίπων καταστατικών προσομοιωμάτων που παρουσιάστηκαν. Επισημαίνει ωστόσο τις καίριες συνεισφορές στην καταστατική προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφικών υλικών. Επισημαίνεται η παρουσία του Πιν. 18.1 στον οποίο αναφέρονται συνοπτικά τα καταστατικά προσομοιώματα που συγκεντρώθηκαν και παρουσιάζονται οι κύριες συνεισφορές τους στην εξέλιξη της προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών.

## 20.3 ΤΟ ΝΕΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Στο Κεφάλαιο 19 παρουσιάστηκε το νέο θεωρητικό πλαίσιο που διατυπώθηκε και προτείνεται για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των μή κορεσμένων εδαφών.

Τα κύρια σημεία που διαφοροποιούν το προσομοίωμα από άλλα προσομοιώματα είναι τα εξής:

- Προβλέπει παύση της περαιτέρω μείωσης του λόγου κενών των εδαφικών υλικών από την μύζηση που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών και μετά. Όπως επιδείχθηκε, προηγούμενα προσομοιώματα όπως το BBM δεν έχουν τέτοια δυνατότητα, ενώ ακόμα και προσομοιώματα όπως αυτό των Sheng, et al. (2008) που ενσωματώνουν τέτοιες δυνατότητες δεν έχουν την ικανότητα να «στοχεύσουν» την ορθή τιμή του παραμένοντος ειδικού όγκου όπως το νέο θεωρητικό πλαίσιο χάρη στις Εξ. 19.5 και 19.6. Η εισαγωγή και χρήση των εξισώσεων αυτών αναδεικνύει και τη σημασία των εμπειρικών συσχετίσεων που αναπτύχθηκαν με βάση την πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής (βλ. §14.6.4, Εξ. 14.11 έως 14.16 στον Πιν. 14.7). Χρησιμοποιώντας τις εμπειρικές αυτές συσχετίσεις ως εργαλείο πρόβλεψης του παραμένοντος λόγου κενών (και άρα του παραμένοντος ειδικού όγκου) ακόμα και με μεγάλα κενά στο εύρος τιμών της μύζησης μεταξύ της μεθόδου μετατόπισης άξονα και της μεθόδου υδατικών διαλυμάτων για τον έλεγχο της μύζησης, μπορεί να εκτιμηθεί μία τιμή της μύζησης επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών ώστε οι προσομοιώσεις να καταλήγουν στην επιθυμητή τιμή του ειδικού όγκου.
- Διά της μορφής των Εξ. 19.5 και 19.6, το νέο θεωρητικό πλαίσιο μπορεί να προβλέψει την δυνατή περιοχή εμφάνισης πλαστικών ογκομετρικών μεταβολών λόγω μεταβολής της μύζησης.
- Περιγράφει την εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση έτσι ώστε να είναι δυνατόν να προβλεφθεί οποιαδήποτε δυνατή εξέλιξη της διατμητικής αντοχής μετά την πίεση διείσδυσης αέρα (περαιτέρω αύξηση της αντοχής, σταθεροποίηση ή μείωση) διά της Εξ. 19.16.
- Λόγω της νέας μορφής του νόμου εξέλιξης της διατμητικής αντοχής με την μύζηση απαιτεί την εισαγωγή και της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού του εδαφικού υλικού.

Το MBBM ισχύει για τα εξής εδαφικά υλικά και εντατικές καταστάσεις:

- Εδαφικά υλικά με ένα κυρίαρχο μέγεθος πόρων, πρακτικά ομοιογενή ως προς τον βαθμό κορεσμού τους (ή με μικρές μόνο διαφορές), τα οποία παρουσιάζουν μόνο ελαστική διόγκωση κατά την μείωση της μύζησης.
- Λεπτόκοκκα ή χονδρόκοκκα εδάφη τα οποία επιδεικνύουν είτε αύξηση, είτε σταθεροποίηση, είτε και μείωση ακόμα της διατμητικής τους αντοχής με την αύξηση της μύζησης.
- Παραμορφώσιμα εδάφη η ξήρανση των οποίων έχει φτάσει ή ακόμα και υπερβεί την μύζηση επίτευξης παραμένουτος λόγου κενών.
- Για λόγους συνέπειας με το πρώτο σημείο, εδαφικά υλικά με χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού δύο μόνο σημείων καμπής (δηλαδή ενός κυρίαρχου μεγέθους πόρων). Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού εισάγεται ουσιαστικά για την δυνατότητα πρόβλεψης της διατμητικής αντοχής και όχι της συμπίεστότητας του προσομοιούμενου εδαφικού υλικού, οπότε θα μπορούσε να εισαχθεί καμπύλη οποιασδήποτε γεωμετρικής μορφής. Αυτό όμως δεν θα βρισκόταν σε συνέπεια με την δυνατότητα προσομοίωσης μεταβολών όγκου και μεταβολών της επιφάνειας διαρροής του προσομοιώματος.
- Εδαφικά υλικά με απλή ιστορία φόρτισης-αποφόρτισης και ξήρανσης-ύγρανσης που περιορίζεται σε απλές, ανεξάρτητες του ρυθμού φόρτισης, φορτίσεις και αποφορτίσεις και ξηράνσεις και υγράνσεις.

#### **20.4 ΚΑΤΑΛΗΞΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Ο παρών τρίτος τόμος της διδακτορικής διατριβής αποτελεί το πρώτο κείμενο στην ελληνική γλώσσα όπου συγκεντρώθηκαν, παρουσιάστηκαν και αξιολογήθηκαν τα περισσότερα διατυπωμένα καταστατικά προσομοιώματα για την μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Αποτελεί το κείμενο αναφοράς για μελλοντικές εργασίες στην περιοχή της αναλυτικής διερεύνησης της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και το κείμενο στο οποίο παρουσιάστηκε το νέο θεωρητικό πλαίσιο για αυτήν που αναπτύχθηκε.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την αξιολόγηση των συγκεντρωθέντων καταστατικών προσομοιωμάτων είναι τα εξής:



- α. Κανένα από τα διατυπωμένα καταστατικά προσομοιώματα δεν έχει ικανότητα πρόβλεψης διαφορετικής εξέλιξης της διατμητικής αντοχής συναρτήσει της μύζησης. Όλα τα προσομοιώματα προβλέπουν συστηματική αύξηση ή το πολύ σταθεροποίηση της διατμητικής αντοχής με την αύξηση της μύζησης, αλλά κανένα δεν προβλέπει μείωση όπως είναι γνωστό ότι συμβαίνει σε κοκκώδη εδαφικά υλικά και ορισμένα αργιλικά εδαφικά υλικά χαμηλής πλαστικότητας.
- β. Κανένα από τα διατυπωμένα καταστατικά προσομοιώματα δεν προβλέπει σταθεροποίηση του ολικού όγκου για τιμές της μύζησης που υπερβαίνουν την μύζηση που αντιστοιχεί στο παραμένοντα λόγο κενών με *ταυτόχρονη* ικανότητα κατάληξης σε επιλεγμένη τιμή του παραμένοντος λόγου κενών (αυτή που έχει μετρηθεί εργαστηριακά).
- γ. Πολύ λίγα καταστατικά προσομοιώματα προβλέπουν παραγωγίσιμη επιφάνεια διαρροής στον χώρο ισοτροπικής συνιστώσας του τανυστή των τάσεων-.

Μετά την συγκέντρωση, παρουσίαση και αξιολόγηση των διατυπωμένων καταστατικών προσομοιωμάτων για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά, παρουσιάστηκε το νέο θεωρητικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Τα κύρια χαρακτηριστικά του νέου προσομοιώματος είναι τα εξής:

- α. Περιγράφει την εξέλιξη της εφελκυστικής αντοχής με την μύζηση έτσι ώστε να είναι δυνατόν να προβλεφθεί οποιαδήποτε δυνατή εξέλιξη της διατμητικής αντοχής μετά την πίεση διεύθυνσης αέρα (περαιτέρω αύξηση της αντοχής, σταθεροποίηση ή μείωση).
- β. Προβλέπει παύση της περαιτέρω μείωσης του λόγου κενών των εδαφικών υλικών από την μύζηση που αντιστοιχεί στον παραμένοντα λόγο κενών και μετά με *ταυτόχρονη* ικανότητα κατάληξης σε επιλεγμένη τιμή του παραμένοντος λόγου κενών (αυτή που έχει μετρηθεί εργαστηριακά).
- γ. Διά της μορφής που προβλέπει παύση της περαιτέρω μείωσης του λόγου κενών, το νέο θεωρητικό πλαίσιο μπορεί να προβλέψει την δυνατή περιοχή εμφάνισης πλαστικών ογκομετρικών μεταβολών λόγω μεταβολής της μύζησης. Αυτό το σημείο αποτελεί ίσως το πιο καινοτόμο σημείο του νέου θεωρητικού πλαισίου, καθώς εισάγει για πρώτη φορά την έννοια ότι υπάρχει μία περιοχή τιμών της μύζησης (πρακτικά πέρα από την τιμή της μύζησης επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών) στην οποία *πλαστικές ογκομετρικές παραμορφώσεις μπορούν να συμβούν μόνο λόγω αύξησης της ολικής τάσης και όχι λόγω αύξησης της μύζησης.*

## 20.5 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Το νέο θεωρητικό πλαίσιο, δεν αποτελεί σε καμμία περίπτωση στο παρόν στάδιο εξέλιξης ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα. Πρώτο και κύριο βήμα στην εξέλιξή του λοιπόν θα είναι η μετεξέλιξή του σε τέτοιο.

Επί της ουσίας των ιδιαιτεροτήτων που εισάγει εκκρεμεί η καλύτερη διερεύνηση (κύρια εργαστηριακή) της εξέλιξης της μύζησης αποκορεσμού και της μύζησης επίτευξης παραμένοντος λόγου κενών με την τάση, η οποία όμως όπως εξηγήθηκε στο Κεφ. 19 εμπλέκεται (ειδικά στην περίπτωση του δεύτερου μεγέθους) με την αναγκαιότητα χρήσης μίας μεθόδου ελέγχου της μύζησης στην περιοχή τιμών της μύζησης 1500 kPa έως 15 MPa. Πειραματικά δεδομένα από αυτήν την περιοχή τιμών μύζησης σε πλήρεις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού θα τεκμηριώσουν την μορφή της εξίσωσης που εισήχθη για την εξέλιξη του δείκτη συμπίεσης λόγω αύξησης της μύζησης ή θα υποδείξουν την περαιτέρω αναλυτική διερεύνηση σε αυτό το συγκεκριμένο σημείο.

Τέλος εξακολουθεί να υφίσταται σημαντικό κενό γνώσης στην περιοχή της μετάβασης μεταξύ της Περιοχής I της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού και της Περιοχής II (μετάβαση από πλήρως κορεσμένο έδαφος με αρνητική πίεση πόρων σε μη κορεσμένο έδαφος με μύζηση). Η διερεύνηση για τιμές της μύζησης σε αυτό το εύρος τιμών αποτελεί σημαντική ανάγκη και πρέπει να διερευνηθεί πρώτα πειραματικά αλλά με πολύ σημαντικές συνέπειες και στις σχετικές αναλυτικές διερευνήσεις.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abou-Bekr, N., Bendi-Ouis, A., Taibi, S., 2006, *Characterization of the clay of Sikkak earth dam core (west of Algeria)*, in Miller et al (eds), *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, 2-5 April, 2006*, 1607-1616, Reston, Virginia: ASCE Press.
- Abou-Bekr, N., Derfouf, F. M., Bekkouche, A., 2005, *Behavior upon drying-wetting paths of Maghnia Bentonite (west of Algeria)*, in “Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics”, Tarantino, Romero & Cui (eds), Taylor & Francis Group, London, pp. 49-52.
- Agus, S.S., Schanz, T., 2006, *Drying, wetting, and suction characteristic curves of a bentonite-sand mixture*, in Miller et al (eds), *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, 2-5 April, 2006*, 1405-1414, Reston, Virginia: ASCE Press.
- Aitchison, G. D., 1961, *Relationship of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils*, Pore Pressure and Suction in Soils, Butterworths, London, England, pp. 47-52.
- Aitchison, G. D., Butler, P. F., 1951, *Gypsum block moisture meters as instruments for the measurement of tension in soil*, Australian Journal of Applied Science, **2**, pp. 257-266.
- Aitchison, G. D., Butler, P. F., Gurr, C. G., 1951, *Techniques associated with the use of gypsum block soil moisture meters*, Australian Journal of Applied Science, **2**, pp. 57-75.
- Aitchison, G. D., Richards, B. G., 1965, *A broadscale study of moisture conditions in pavement subgrades throughout Australia*, Moisture in Soils beneath Covered Areas, Butterworths, Australia, pp. 198-204.
- Albrecht, B. A., Benson, C. H., Beuermann, S., 2003, *Polymer capacitance sensors for measuring gas humidity in drier soils*, Geotechnical Testing Journal, **26**, 1, pp. 3-11.
- Al-Khafaf, S., Hanks, R. J., 1974, *Evaluation of the filter paper method for estimating soil water potential*, Soil Science, **117**, 4, pp. 194-199.
- Al-Mukhtar, M., Robinet, Liu, C. W., Plas, F., 1993, *Hydromechanical behaviour of partially saturated low porosity clay*, proc. Int. Conf. on Engineering Fills, Thomas Telford, pp. 87-98.
- Alonso, E. E., 2003, *Exploring the limits of unsaturated soil mechanics: The behaviour of coarse granular soil and rockfill*, The 11<sup>th</sup> Spencer J. Buchanan Lecture.
- Alonso, E. E., Oldecop, L. A., 2000, *Fundamentals of rockfill collapse*, Rahardjo et al. (eds), “Unsaturated Soils for Asia”, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 3-13.
- Alonso, E. E., Gens, A., Hight, D. W., 1987, *Special problem soils: general report*, Proc. 9th Eur. Conf. Soil Mech. Found. Engng, Dublin 3, 1087-1146.
- Alonso, E. E., Gens, A., Josa, A., 1990, *A constitutive model for partially saturated soils*, Géotechnique, **40**, 3, pp. 405-430.
- Alonso, E. E., Olivella, S., Pinyol, N. M., 2005, *A review of Beliche Dam*, Géotechnique, **55**, 4, pp. 267-285.
- Alonso, E. E., Ortega Iturralde, E. F., Romero, E. E., 2007, *Dilatancy of coarse granular aggregates*, in T., Schanz (Ed.), Experimental Unsaturated Soil Mechanics, SPP 112, Springer, Berlin, pp. 121-135.
- Alonso, E. E., Vaunat, J., Gens, A., 1999, *Modelling the mechanical behaviour of expansive clays*, Engng Geol., **54**, No. 1, 173-183.
- Αναστασίου, Ν., 2004, *Μελέτη της συμπεριφοράς μεγάλων άμμου-μπεντονίτη, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.*
- Arbhabharama, A., Kridakorn, C., 1968, *Steady downward flow to a water table*, Water Resour. Res., **4**, pp. 1249-1257.
- Arya, L. M., Paris, J. F., 1981, *A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data*, Soil Science Society of America Journal, **45**, pp. 1023-1030.
- ASTM, 2006, D2166. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive

- Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, *D 2325 – 68 (2000). Capillary moisture relationships for coarse- and medium-textured soils by porous-plate apparatus*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, *D 2435 – 68 (2000). Test methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, *D 3152 – 72 (2000). Capillary moisture relationships for fine-textured soils by pressure-membrane apparatus*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, *D 5298 – 03. Measurement of soil potential (suction) using filter paper*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, *D 6276-99a: Using pH to estimate the soil-lime proportion requirement for soil stabilisation*, Annual Book of Standards 2006, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, *D 6527 – 00 (2008). Test Method for Determining Unsaturated and Saturated Hydraulic Conductivity in Porous Media by Steady-State Centrifugation*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, *D 6539 – 00. Measurement of pneumatic permeability of partially saturated porous materials by flowing air*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM, 2006, *D 6836 – 02. Determination of the soil-water characteristic curve for desorption using a hanging column, pressure extractor, chilled mirror hygrometer, and/or centrifuge*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Averjanof, S. F., 1950, *About permeability of subsurface soils in case of incomplete saturation*, “The theory of ground water movement”, English Collection, Vol. 7. As quoted by P. Ya Palubarinova, 1962, English Translation by I. M. Roger DeWiest, Princeton University Press, Princeton, N.J., pp. 19-21.
- Baker, R., Kassiff, G., Levy, A., 1973, *Experience with a psychrometric technique*, 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Expansive Soils, Israel, pp. 83-95.
- Bao, C. G., Gong, B., Zhan, L., 1998, *Properties of unsaturated soils and slope stability of expansive soil*, Keynote Lecture, 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Uns. Soils, Beijing, China, 1998.
- Bardanis, M., 1998, *An experimental study of the ‘robustness’ of the Intrinsic Compression Line*, MSc Dissertation, Imperial College of Science, Technology & Medicine, London, UK, 89 p.
- Bardanis, M. E., 1999, *An experimental study of the properties of intrinsic compressibility of one clay and one marl*, Proc. 13<sup>th</sup> Young Geotechnical Engineers Conference, Santorini, Greece, 23-25 September 1999, pp. 88-97.
- Bardanis, M. E., 2014, *Collapse of coarse-grained materials due to inundation under one-dimensional compression conditions*, Proc. 6th Int. Conf. on Unsaturated Soils, 2-4 July 2014, Sydney, Australia, Vol. 2, pp. 1659-1665.
- Bardanis, M. E., 2015, *Field suction and volumetric water content measurements in semi-urban area near Athens, Greece*, proc. Int. Symp. Shrink-Swell Processes in Soils, Climate & Construction, 18-19 June 2015, Marne-la-Vallée, France.
- Bardanis, M. E., Dounias, G. T., 2004, *Water pressure profile in a landslide mass overlying a buried river-bed and the effect of large drainage wells*, 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering, GEO-Filters 2004, 19<sup>th</sup>-21<sup>st</sup> October 2004, Stellenbosch, South Africa.
- Bardanis, M., Grifiza, S., 2010, *Collapse potential of a compacted weathered serpentinite from Skiros island, Greece*, in Alonso, E. E. & Gens, A. (eds), proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, Barcelona, Spain, Vol. 1, pp. 187-192.
- Bardanis, M. E., Kavvadas, M. J., 2003a, *Laboratory Investigation of the Virgin Drying of the Corinth Marls*, in T., Schanz (Ed.), Unsaturated Soils: Experimental Studies, Proc. of the Int. Conf. “From Experimental Evidence towards Numerical Modelling of Unsaturated

- Soils”, Weimar, 17-18 September 2003, Springer, Berlin, Vol. I, pp. 421-432.
- Bardanis, M. E., Kavvadas, M. J., 2003b, *The Concept of ‘Apparent’ Compression Index*, in T., Schanz (Ed.), *Unsaturated Soils: Experimental Studies*, Proc. of the Int. Conf. “From Experimental Evidence towards Numerical Modelling of Unsaturated Soils”, Weimar, 17-18 September 2003, Springer, Berlin, Vol. I, pp. 343-354.
- Bardanis, M., Kavvadas, M., 2006, *Prediction of the limiting void ratio of clayey soils after drying*, 4<sup>th</sup> International Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, USA, April 2-5 2006, Vol. 1, pp. 1085-1096.
- Bardanis, M., Kavvadas, M., 2008a, *Soil-water characteristic curves and void ratio changes relative to suction for soils from Greece*, *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering*, Toll et al. (eds), Proc. 1st Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Durham, UK, 2-4 July, 2008, pp. 263-269.
- Bardanis, M., Kavvadas, M., 2008b, *Modifying the Barcelona Basic Model to account for residual void ratio and subsequent decrease of shear strength relative to suction*, *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering*, Toll et al. (eds), Proc. 1st Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Durham, UK, 2-4 July, 2008, pp. 589-595.
- Bardanis, M., Kavvadas, M., 2008c, *Prediction of the residual void ratio of clayey soils after drying, from their initial state, physical properties and structure*, *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering*, Toll et al. (eds), Proc. 1st Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Durham, UK, 2-4 July, 2008, pp. 381-387.
- Bardanis, M., Cavounidis, S., Dounias, G., 2009, *Numerical simulation of the pore pressure regime in landslides with underdrainage*, Proc. 17<sup>th</sup> ICSMGE, “The Academia & Practice of Geotechnical Engineering”, M. Hamza et al. (eds), IOS Press, Vol. 2, pp. 1518-1521.
- Barden, L., Pavlakis, G., 1971, *Air and water permeability of compacted unsaturated cohesive soil*, *Journal of Soil Science*, **22**, pp. 302-317.
- Barden, L., Madedor, A. O., Sides, G. R., 1969, *Volume change characteristics of unsaturated clay*, *ASCE J. Soil Mech. Found. Div.*, **95**, SM1, pp. 33-52.
- Barrera, M., Romero, E., Lloret, A., Vaunat, J., 2002, *Hydro-mechanical behaviour of a clayey silt during controlled-suction shearing*, Juca et al. (eds), proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 2, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 485-490.
- Bauman, P., 1960, *Rockfill dams: Cogswell and San Gabriel dams*, *Transactions of the ASCE*, **125**, Part 2, pp. 29-57.
- Baumgartl, Th., Winkelmann, P., Graesle, W., Richards, B. G., Horn, R., 1995, *Measurement of the interaction of soil mechanical properties and hydraulic processes with modified triaxial test*, proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Uns. Soils, Paris 1995, Alonso & Delage (eds), Vol. 2, pp. 433-438.
- Bernier, F., Volckaert, G., Alonso, E. E., Villar, M., 1997, *Suction controlled experiments on Boom clay*, *Engineering Geology*, **47**(4), pp. 325-338.
- Bertolino, A. V. F. A., Souza, A. P., Fernandes, N. F., Rangel, A. M., de Campos, T. M. P., Shock, C. C., 2002, *Monitoring the field soil matrix potential using mercury tensiometer and granular matrix sensors*, Juca et al. (eds), proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 1, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 335-338.
- Bian, H. B., Nishimura, T., Shahrour, I., 2010, *Mechanical model for partially saturated sandy soils: Application to liquefaction*, in Alonso, E. E. & Gens, A. (eds), proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, Barcelona, Spain, Vol. 2, pp. 763-769.
- Biesheuvel, P. M., Raangs, R., Vewelij, H., 1999, *Response of the osmotic tensiometer to varying temperatures: Modeling and experimental validation*, *Soil Science Soc. of America*, **63**, pp. 1571-1579.
- Bishop, A. W., 1959, *The principle of effective stress*, *Teknisk Ukeblad*, **106**: No. 39, pp. 859-863.

- Bishop, A. W., 1971, *Shear strength parameters for undisturbed and remoulded soil specimens*, proc. of the Roscoe Memorial Symposium, Cambridge, Foulis.
- Bishop, A. W., Blight, G. E., 1963, *Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils*, Géotechnique, **13**, 3, pp. 177-197.
- Bishop, A. W., Donald, I. B., 1961, *The experimental study of partly saturated soil in the triaxial apparatus*, Proc. 5th ICSMFE, Vol. 1, pp. 13-21.
- Bishop, A. W., Alpan, I., Blight, G. E., Donald, I. B., 1960, *Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils*, Proceedings of the ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, University of Colorado, Boulder, Colo., pp. 503-532.
- Blatz, J. A., Ferreira, N. J., Graham, J., 2004, *Effects of near-surface environmental conditions on instability of an unsaturated soil slope*, Can. Geotech. J., **41**, 6, pp. 1111-1126.
- Blatz, J., Graham, J., 2000, *A system for controlled suction in triaxial tests*, Géotechnique, **50**, 4, pp. 465-469.
- Bocking, K. A., Fredlund, D. G., 1980, *Use of the osmotic tensiometer to measure negative pore water pressure*, Geotech. Testing J., **2**, 1, pp. 3-10.
- Bocking, K. A., Fredlund, D. G., 1980, *Limitations of the axis translation technique*, Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Expansive Soils, pp. 117-135.
- Bolt, G. H., 1956, *Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays*, Géotechnique **6**, pp. 86-93.
- Bolzon, G., Schrefler, B. A., Zienkiewicz, O. C., 1996, *Elastoplastic soil constitutive laws generalized to partially saturated states*, Géotechnique, **46**, pp. 279-289.
- Boso, M., Tarantino, A., Mongiovi, L., 2005, *A direct shear box improved with the osmotic technique*, in Tarantino, A., Romero, E., Cui, Y. J. (eds), *Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Taylor & Francis Group, London, pp. 85-91.
- Bouyoucos, G. J., 1947, *A new electrical resistance thermometer for soils*, Soil Science, **63**, pp. 291-298.
- Bouyoucos, G. J., Mick, A. H., 1940, *Comparison of absorbent materials employed in the electrical resistance method of making a continuous measurement of soil moisture under field conditions*, Proc. of Soil Science Society of America, **5**, pp. 77-79.
- Brady, A. P., Huff, H., McBain, J. W., 1951, *Measurement of vapour pressure by means of matched thermistors*, Journal of Physical and Colloid Chemistry, **55**, pp. 304-321.
- Brandl, H., 1996, *Stabilization of multiple progressive slope failures*, proc. 7th Int. Symp. On Landslides, Trondheim, Norway, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 1661-1666.
- Brandl, H., 1997, *Risks and responsibilities of geotechnics in highway-, bridge-, and slope engineering*, proc. XIVth ICSMFE, Hamburg, Germany, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 2595-2607.
- Briggs, L. J., McLane, J. W., 1907, *The moisture equivalents of soils*, U.S. Department of Agriculture, Bureau of Soils Bulletin, No. 45.
- Bromhead, E. N., 1979, *A simple ring shear apparatus*, Ground Eng., **12**, pp. 40-44.
- Brooks, R., Corey, A., 1964, *Hydraulic properties of porous media*, Hydrology Paper No. 3, Colorado State University, Fort Collins, Co.
- Brown, R. W., 1970, *Measurement of water potential with thermocouple psychrometers: Construction and applications*, U.S.D.A. Forest Service Res., Paper INT-80, p.27.
- Bruce, R., Klute, A., 1956, *The measurement of soil moisture diffusivity*, Soil Science Society of America Proceedings, **20**, pp. 458-462.
- Brutsaert, W., 1966, *Probability laws for pore size distributions*, Soil Science, **101**, pp. 85-92.
- Bulut, R., Wray, W. K., 2005, *Free energy of water –suction- in filter papers*, Geotech. Testing J., ASTM International, **28**, 4, pp. 355-364.
- Bulut, R., Lytton, R. L., Wray, W. K., 2001, *Soil suction measurements by filter paper*, Expansive Clay Soils and Vegetative Influence on Shallow Foundations (GSP 115)

- Proceedings of the Geo - Institute Shallow Foundation and Soil Properties Committee Sessions at the ASCE 2001 Civil Engineering Conference.
- Bulut, R., Park, S.-W., Lytton, R. L., 2000α, *A new matric suction calibration curve*, Rahardjo, et al. (eds), "Unsaturated Soils for Asia", A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 263-267.
- Bulut, R., Park, S.-W., Lytton, R. L., 2000β, *Comparison of total suction values from psychrometer and filter paper methods*, Rahardjo, et al. (eds), "Unsaturated Soils for Asia", A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 269-273.
- Burdine, N. T., 1953, *Relative permeability calculations from pore size distribution data*, Trans. AIME, **198**, pp. 71-77.
- Burger, C.A., Shackelford, C.D., 2001, *Soil-water characteristic curves and dual porosity of sand-diatomaceous earth mixtures*, ASCE J. Geotech. Geoenvironmental Engng, **127**, 9, pp. 790-800
- Burland, J. B., 1964, *Effective stresses in partly saturated soils*, Discussion of 'Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils' by G. E. Blight & A. W. Bishop, Géotechnique, **14**, pp. 65-68.
- Burland, J. B., 1965, *Some aspects of the mechanical behaviour of partly saturated soils*, in Aitchison, G. D. (ed.) "Moisture Equilibria and Moisture Changes in the Soils beneath Covered Areas", Butterworths, Australia, pp. 270-278.
- Burland, J. B., 1990, *On the compressibility and shear strength of natural clays*, Géotechnique, **40**, No. 3, pp. 327-378.
- Burland, J. B., 1998, *Προσωπική επικοινωνία με τον γράφοντα*, Imperial College, London, UK.
- Βαρβατάκος, Δ., 2006, *Προσωπική επικοινωνία επί των ιδιοτήτων της οδοντιατρικής γύψου*, Αθήνα.
- Campbell, E. C., Campbell, G. S., Barlow, W. K., 1973, *A dewpoint hygrometer for water potential measurement*, Agricultural Meteorology, **12**, pp. 113-121.
- Campbell, G. S., 1974, *A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data*, Soil Sci., **117**(6), pp. 311-314.
- Campbell, G. S., Gardner, W. H., 1971, *Psychrometric measurement of soil potential: temperature and bulk density effects*, Soil Science Society of America Proceedings, **35**, pp. 8-12.
- Cattoni, E., Cecconi, M., Pane, V., 2005, *An experimental study on a partially saturated pyroclastic soil: the Pozzolana Nera from Roma*, in Mancuso & Tarantino (eds.) "Unsaturated Soils: Advances in testing, modeling and engineering applications", Taylor & Francis, London, UK, pp. 29-42.
- Cattoni, E., Cecconi, M., Pane, V., 2007, *Geotechnical properties of an unsaturated pyroclastic soil from Roma*, Bul. Eng. Geol. Environ., **66**, pp. 403-414
- Chandler, R. J., 2000, *Clay Sediments in Depositional Basins: the Geotechnical Cycle*, Q. J. of Eng. Geol. and Hydrogeology, **33**, pp. 5-39.
- Chandler, R. J., Gutierrez, C. I., 1986, *The filter paper method of suction measurement*, Géotechnique, **36**, pp. 265-268.
- Chandler, R. J., Crilly, M. S., Montgomery-Smith, 1992, *A low cost method of assessing clay desiccation for low-rise buildings*, proc. Institution of Civil Engineers, pp. 82-89.
- Chapman, P. J., Richards, B. E., Trevena, D. H., 1975, *Monitoring the growth of tension in a liquid in a Berthelot tube*, J. of Physics, E: Scientific Instruments, **8**, pp. 731-735.
- Childs, E. C., 1969, *Soil water phenomena*, Wiley-Interscience, New York.
- Childs, E. C., Collis-George, N., 1950, *The permeability of porous materials*, Proc. R. Soc., London, Ser. A, 201, pp. 392-405.
- Chipera, S. J., Carey, J. W., Bish, D. L., 1997, *Controlled-humidity XRD analyses: Application to the study of smectite expansion/contraction*, in in Advances in X-Ray Analysis, Vol. 39, Gilfrich, J. V. et al. (eds), plenum, New York, pp. 713-721.

- Chiu, C. F., Ng, C. W. W., 2003, *A state-dependent elasto-plastic model for saturated and unsaturated soils*, Géotechnique, **53**, 9, pp. 809-829.
- Chiu, C. F., Cui, Y. J., Delage, P., De Laure, E., Haza, E., 2005, *Lessons learnt form suction monitoring during centrifuge modelling*, in Tarantino, A., Romero, E., Cui, Y. J. (eds), *Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Taylor & Francis Group, London, pp. 3-8.
- Chiu, T. F., Shackelford, C. D., 1998, *Unsaturated hydraulic conductivity of compacted sand-kaolin mixtures*, ASCE J. Geotech. Geoenvironmental Engng, **124**, 2, pp. 160-170.
- Colmenares, J. E., Ridley, A. M., 2002, *Stress-strain and strength relationships for a reconstituted clayey silt*, Juca et al. (eds), proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 2, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 481-484.
- Conca, J., Wright, J. A., 1998, *The UFA method for rapid, direct measurement of unsaturated transport properties in soil, sediment, and rock*, Australian Journal of Soil Research, **36**, pp. 291-315.
- Corey, A. T., 1954, *The interrelation between gas and oil relative permeabilities*, Producer's Monthly, **19** (November), pp. 7-10.
- Corey, A. T., 1957, *Measurement of water and air permeability in unsaturated soil*, Proc. Soil Science Society of America, **21**(1), pp. 7-10.
- Corey, A.T., 1977, *Mechanics of heterogeneous fluids in porous media*, Water Resources Publications, Fort Collins, CO, p. 259.
- Crilly, M. S., Schreiner, H. D., Gourley, C. S., 1991, *A simple field suction probe*, Proc. 10<sup>th</sup> Regional Conf. for Africa on Soil Mech. & Found. Eng., Maseru, Lesotho, pp. 291-298.
- Croney, D., Coleman, J. D., 1947, *The electrical resistance method of measuring soil moisture*, British Journal of Applied Physics, Vol. **2**.
- Croney, D., Coleman, J., 1961, *Pore pressure and suction in soils*, Proc. Conf. "Pore Pressure and Suction in Soils", Butterworths, London, pp. 31-37.
- Croney, D., Coleman, J. D., Black, W. P. M., 1958, *The movement and distribution of water in soil in relation to highway design and performance*, Highway Research Board Special Report No. 40, Washington, D.C.
- Croney, D., Coleman, J. D., Bridge, P. M., 1952, *The suction of moisture held in soil and other porous materials*, Department of Scientific and Industrial Research, Road Research Technical Paper No. 24, H.M. Stationery Office, London.
- Cui, Y. J., Delage, P., 1996, *Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt*, Géotechnique, **46**, 2, pp. 291-311.
- Cuisinier, O., Masrouri, F., 2002, *Study of the hydromechanical behaviour of a swelling soil under high suctions*, Juca et al. (eds), proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 2, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 587-591.
- Cummings, R. W., Chandler, R. F., 1940, *A field comparison of the electrothermal and gypsum block electrical resistance methods with the tensiometer method for estimating soil moisture in-situ*, Proc. of Soil Science Society of America, **5**, pp. 80-85.
- Cunningham, M.R., Ridley, A.M., Dineen, K., Burland, J.B., 2003, *The mechanical behaviour of a reconstituted unsaturated silty clay*, Géotechnique 53(2): 183-194.
- D' Onza, F., Gallipoli, D., Wheeler, S., 2010, *Effect of anisotropy on the prediction of unsaturated soil response under triaxial and oedometric conditions*, in Alonso, E. E. & Gens, A. (eds), proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, Barcelona, Spain, Vol. 2, pp. 787-794.
- Darcy, H., 1856, *Histoire Des Fontatines Publique de Dijon*, Paris, Dalmont, pp. 590-594.
- De Bano, L. F., 2000, *Water repellency in soils : A historical overview*, J. of Hydrology, **231-232**, pp. 4-32.
- De Campos, T. M. P., Carrillo, C. W., 1995, *Direct shear testing on an unsaturated soil from Rio*



- de Janeiro*, proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Uns. Soils, Paris 1995, Alonso & Delage (eds), Vol. 1, pp. 31-38.
- Delage, P., 2004, *Experimental unsaturated soil mechanics*, in Juca et al. (eds), proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Recife, Brazil, Swets & Zeitlinger, Lisse, Vol. 3, pp. 973-996.
- Delage, P., Graham, J., 1995, *Mechanical behaviour of unsaturated soils: Understanding the behaviour of unsaturated soils requires reliable conceptual models*, proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Uns. Soils, Paris 1995, Alonso & Delage (eds), Vol. 3, pp. 1223-1256.
- Delage, P., Howat, M., Cui, Y. J., 1998, *The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay*, Engineering Geology, **50** (1-2), pp. 31-48.
- Delage, P., Suraj de Silva, G. P. R., de Laure, E., 1987, *Un nouvel appareil triaxial pour le sols non saturés*, proc. 9<sup>th</sup> Eur. Conf. Soil Mech. & Foundations Engng, Dublin, Vol. 1, pp. 26-28.
- Delage, P., Suraj de Silva, G. P. R., Vicol, T., 1992, *Suction controlled testing of non saturated soils with an osmotic consolidometer*, 7<sup>th</sup> Int. Conf. Expansive Soils, Dallas, pp. 206-211.
- Di Maio, C., 1996a, *The influence of pore fluid composition on the residual shear strength of some natural clayey soils*, in K. Seneset (ed.), proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Landslides, 2, pp. 1189-1194, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Di Maio, C., 1996b, *Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effect*, Géotechnique, **46**, 4, pp. 695-707.
- Di Mariano, A., Vaunat, J., Romero, E., 2002, *Insights into the elastic behavior of unsaturated soils*, Juca et al. (eds), proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 2, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 473-479.
- Dineen, K., 1997, *The influence of soil suction on compressibility and swelling*, PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.
- Dineen, K., 1998, *Προσωπική επικοινωνία με τον γράφοντα*, Imperial College, London, UK.
- Dineen, K., Burland, J. B., 1995, *A new approach to osmotically controlled oedometer testing*, proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, France, Vol. 2, pp. 459-465.
- Donald, I. B., 1956, *Shear strength measurements in unsaturated non-cohesive soils with negative pore pressures*, proc. 2<sup>nd</sup> Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering, Christchurch, New Zealand, pp. 200-205.
- Eades, J. L., Grim, R. E., 1996, *A quick test to determine lime requirements for lime stabilization*, Highway Research Record No. 3, National Academy of Sciences, National Research Council, Highway Research Board, Washington, DC.
- Ebrahimi-Birang, N., Gitirana, G. F. N. Jr., Fredlund, D. G., Fredlund, M. D., Samarasekera, L., 2004, *A lower limit for the water permeability coefficient*, proc. 57<sup>th</sup> Canadian Geotechnical Conf., Vol. 1, Quebec City, Quebec, Canada, pp. 12-19.
- El-Ehwany, Houston, S. L., 1990, *Settlement and movement in collapsible soils*, ASCE J. Geotech. Engng, **116**, 10, pp. 1521-1535.
- Engelhardt, W. V., Gaida, K. H., 1963, *Journal of sedimentary petrology*, **33**, pp. 919-930.
- Escario, V., 1980, *Suction controlled penetration and shear tests*, Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Expansive Soils, Denver, Colo.
- Escario, V., Juca, F., 1989, *Strength and deformation of partly saturated soils*, proc. 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 43-46.
- Escario, V., Sáez, J., 1973, *Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction*, proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Expansive Soils, Haifa, pp. 195-200.
- Escario, V., Sáez, J., 1986, *The shear strength of partly saturated soils*, Géotechnique, Vol. 36, 3, pp. 453-456.
- Esteban Moratilla F., 1990, *Caracterización experimental de la expansividad de una roca evaporítica. Identificación de los mecanismos de hinchamiento*, PhD Thesis, Universidad

- de Cantabria, Santander, 352 p.
- Fawcett, R. G., Collis-George, N., 1967, *A filter paper method for determining the moisture characteristics of soil*, Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry, **7**, pp. 162-167.
- Fleureau, J.M., Kheirbek-Saoud, S., Soemitro, R., Taibi, S., 1993, *Behavior of clayey soils on drying-wetting paths*, Can. Geotech. J. **30**: 287-296.
- Fleureau, J.M., Hadiwardoyo, S., Kheirbek-Saoud, S., 2004, *Simplified approach to the behavior of compacted soils on drying and wetting paths*, in Jucá et al. (eds), Proc. 3rd Int. Conf. Unsaturated Soils, UNSAT 2002, 10-13 March 2002, Recife, Brazil **3**: 1147-1154, Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Fleureau, J.M., Verbrugge, J.C., Huergo, P.J., Correia, A.G., Kheirbek-Saoud, S., 2002, *Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths*, Can. Geotech. J. **39**(6): 1341-1357.
- Fourie, A. B., Rowe, D., Blight, G. E., 1999, *The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump*, Géotechnique, Vol. **49**, pp. 1-13.
- Francois, B. Laloui, L., 2008, *Thermo-plasticity in unsaturated soils, a constitutive approach*, Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering, Toll et al. (eds), Proc. 1st Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Durham, UK, 2-4 July, 2008, pp. 539-545.
- Fredlund, D. G., 1975, *A diffused air volume indicator for unsaturated soils*, Can. Geot. J., Vol. **12**, pp. 533-539.
- Fredlund, D. G., 1981, *Seepage in saturated soils. Panel discussion: ground water and seepage problems*, proc. 10<sup>th</sup> ICSMFE, Stockholm, Sweden, Balkema, Rotterdam, vol. **4**, pp. 629-641.
- Fredlund, D. G., 2004, *Use of soil-water characteristic curves in the implementation of unsaturated soil mechanics*, in Jucá, J. F. T., de Campos, T. M. P., Marinho, F. A. M., (eds), proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. **3**, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 887-902.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., 1977, *Stress state variables for unsaturated soils*, J. Geot. Eng. Div. ASCE, **103**, pp. 447-466.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., 1988, *State-of-development in the measurement of soil suction*, Proc. Int. Conf. on the Engineering Problems of Regional Soils, Beijing, China, pp. 582-588.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., 1993, *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, New York, N.Y., 517 pp.
- Fredlund, D. G., Wong, K. H., 1989, *Calibration of thermal conductivity sensors for measuring soil suction*, Geotechnical Testing Journal, **12**, **3**, pp. 188-194.
- Fredlund, D. G., Xing, A., 1994, *Equations for the soil-water characteristic curve*, Can. Geot. J., vol. **31**, pp. 521-532.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., Widger, R. A., 1978, *The shear strength of unsaturated soils*, Can. Geot. J., Vol. **15**, pp. 313-321.
- Fredlund, D. G., Shuai, F., Feng, M., 2000, *Use of a new thermal conductivity sensor for laboratory suction measurement*, Rahardjo et al. (eds), "Unsaturated Soils for Asia", A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 275-280.
- Fredlund, D. G., Xing, A., Huang, S., 1994, *Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve*, Can. Geot. J., Vol. **31**, pp. 533-546.
- Fredlund, D. G., Xing, A., Fredlund, M. D., Barbour, S. L., 1996, *The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve*, Can. Geot. J., Vol. **33**, pp. 440-448.
- Fredlund, M. D., Fredlund, D. G., Wilson, G. W., 1997a, *Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties*, 3<sup>rd</sup> Brazilian

- Symposium on Unsaturated Soils, Rio de Janeiro, Brazil, April 22-25, 1997.
- Fredlund, M.D., Fredlund, D.G., Wilson, G.W., 2000, *An equation to represent grain-size distribution*, Can. Geot. J. 37(4): 817-827.
- Fredlund, M. D., Wilson, G. W., Fredlund, D. G., 1997β, *Indirect procedures to determine unsaturated soil property functions*, proc. 50<sup>th</sup> Can. Geotech. C., Ottawa, Ontario, Canada, October 20-22, 1997.
- Fredlund, M. D., Wilson, G. W., Fredlund, D. G., 2000, *Use of grain-size functions in unsaturated soil mechanics*, in Shackelford, C. D., Houston, S. L., Chang, N. Y., "Advances in Unsaturated Geotechnics", GSP 99, ASCE, Reston, Virginia, p. 69-83.
- Fredlund, M. D., Wilson, G. W., Fredlund, D. G., 2002, *Representation and estimation of the shrinkage curve*, Juca et al. (eds), proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 1, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 145-149.
- Freyberg, V., 1973, *Geologie des Isthmus von Korinth*, Erlangen Geologische Abhandlungen, Heft 95, Junge und Sohn, Universitäts Buchdruckerei Erlangen, 183p.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A., 1979, *Groundwater*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 604.
- Gallipoli, D., Wheeler, S. J., Karstunen, M., 2003a, *Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil*, Géotechnique, **53**, 1, pp. 105-112.
- Gallipoli, D., Gens, A., Sharma, R., Vaunat, J., 2003b, *An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour*, Géotechnique, **53**, 1, pp. 123-135.
- Gan, J. K. M., Fredlund, D. G., Rahardjo, H., 1988, *Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test*, Can. Geotech. J., **25**, 3, pp. 500-510.
- Gardner, W. H., 1986, *Water Content*, in Methods of Soil Analysis, Part I, Physical and Mineralogical Methods, Soil Science Society of America, Monograph No. 9, Madison, WI, pp. 493-544.
- Gardner, W. R., 1937, *A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range*, Soil Science, **43**, pp. 277-283.
- Gardner, W.R., 1956, *Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution*, Soil Sci. Soc. Am. Proc., **20**, pp. 151-153.
- Gardner, W. R., 1958, *Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils*, Highway Research Board Special Report No. 40, Int. Symp. on Physico-Chemical Phenomenon in Soils, Washington, D.C., pp. 78-87.
- Gardner, W. R., Israelsen, O. W., Edlefsen, N. E., Clyde, H., 1922, *The capillary potential function and its relation to irrigation practice*, Phys. Rev., **20**, pp. 196.
- Gee, G., Campbell, M., Campbell, G., Campbell, J., 1992, *Rapid measurement of low soil potentials using a water activity meter*, Soil Science Soc. of America Journal, **56**, pp. 1068-1070.
- Gee, G. W., Ward, A. L., Zhang, Z. F., Campbell, G. S., Mathison, J., 2002, *The influence of hydraulic non-equilibrium on pressure plate data*, Vadose Zone Journal, **1**, pp. 172-178.
- Geiser, F., Laloui, L., Vulliet, L., 2000, *On the volume measurement in unsaturated triaxial test*, Rahardjo, H., Toll, D. G. & Leong, E. C. (eds), Proc. 1<sup>st</sup> Asian Conf. on Unsaturated Soils, Singapore, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 669-674.
- Gens, A., Alonso, E. E., 1992, *A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays*, Can. Geotech. J., **29**, pp. 1013-1032.
- Goldin, A. L., Rasskazov, L. N., 1992, *Design of Earth Dams*, Translated form Russian by R. B. Zeidler, Selected translations of Russian Geotechnical Literature, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Greacen, E. L., Walker, G. R., Cook, P. G., 1987, *Evaluation of the filter paper method for measuring soil water suction*, Int. Conf. on Measurement of Soil and Plant Water Status,

- pp. 137-143.
- Grim, R. E., 1968, *Clay mineralogy*, McGraw-Hill, Inc., 2<sup>nd</sup> Edition.
- Guan, Y., Fredlund, D. G., 1997, *Use of the tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction*, *Can. Geotech. J.*, **34**, pp. 604-614.
- Gulhati, S. K., Satija, D. J., 1981, *Shear strength of partially saturated soils*, proc. 10<sup>th</sup> ICSMFE, Stockholm, pp. 609-612.
- Gupta, S. C., Larson, W. E., 1979, *Estimating soil-water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density*, *Water Resources Research Journal*, **15**, 6, pp. 1633-1635.
- Hagen, L. J., Skidmore, E. L., Fryrear, D. W., 1987, *Using two sieves to characterize dry soil aggregate size distribution*, *Transactions of the ASAE*, **30**, 1, pp. 162-165.
- Haines, W. B., 1927, *A further contribution to the theory of capillary phenomena in soils*, *J. Agric. Sci.*, **17**, pp. 264-290.
- Haise, H. R., Kelley, O. J., 1946, *Relation of moisture tension to heat transfer and electrical resistance in plaster of paris blocks*, *Soil Science*, **61**, pp. 411-422.
- Hamblin, A. P., 1981, *Filter paper method for routine measurement of field water potential*, *J. of Hydrology*, **53**, pp. 355-360.
- Hardy, B., 1992, *Two-pressure humidity calibration on the factory floor*, *Sensors*, July, pp. 15-19.
- Harvey, E. N., Barnes, D. K., McElroy, W. D., Whiteley, A. H., Pease, D. C., Cooper, K. W., 1944, *Bubble formations in animal, I-Physical Factor*, *J. Cellular and Comparative Physiology*, **24** (1), pp. 1-22.
- Hashizume, H., Shimomura, S., Yamada, H., Fujita, T., Nakazawa, H., Akutsu, O., 1996, *X-ray diffraction system with controlled relative humidity and temperature*, *Powder Diffraction*, **11**, pp. 288-289.
- Hassler, G. L., Brunner, E., 1945, *Measurement of capillary pressures in small core samples*, *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, **160**, pp. 114-123.
- Haverkamp, R., Parlange, J. Y., 1986, *Predicting the water-retention curve from a particle size distribution: I. Sandy soils with organic matter*, *Soil Science*, **142**, 6, pp. 325-339.
- He, L., Leong, E.-C., Elgamal, A., 2006, *A miniature tensiometer for measurement of high matric suction*, in Miller, G. A., Zapata, C. E., Houston, S. L., Fredlund, D. G. (eds), proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, Vol. 2, pp. 1897-1907.
- Henderson, S. J., Speedy, R. J., 1980, *A Berthelot-Bourdon tube method for studying water under tension*, *J. of Physics, E: Scientific Instrumentation*, **13**, pp. 778-782.
- Hilf, J. W., 1956, *An investigation of pore water pressures in compacted cohesive soils*, Technical Memorandum 654, U.S. Dept. of Interior, Bureau of Reclamation, Denver, Colo.
- Hill, A. V., 1930, *A thermal method of measuring the vapour pressure of an aqueous solution*, *Proc. Royal Society of London (A)*, No. 127, pp. 9-19.
- Hillel, D., 1982, *Introduction to soil physics*, Academic Press, New York, p. 364.
- Ho, D. Y. F., Fredlund, D. G., 1982, *Increase in strength due to suction for two Hong Kong soils*, *Proc. of the Conf. on Engineering and Construction in Tropical and Residual Soils*, ASCE, Honolulu, Hawaii.
- Hoffmann, C., Romero, E., Alonso, E. E., 2005, *Combining different controlled-suction techniques to study expansive clays*, in "Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics", Tarantino, Romero & Cui (eds), Taylor & Francis Group, London, pp. 61-67.
- Hoffmann, C., Tarantino, A., Mongiovi, L., 2006, *Thermal effects on response of high suction tensiometer*, in Miller, G. A., Zapata, C. E., Houston, S. L., Fredlund, D. G. (eds), proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, Vol. 2, pp. 1887-1896.
- Hondros, G., 1959, *The Evaluation of Poisson's Ratio and the Modulus of Materials of a Low*

- Tensile Resistance by the Brazilian (Indirect Tensile) Test with Particular Reference to Concrete*, Aust. J. Appl. Sci., 10, pp. 243-264.
- Hormdee, D., Ochiai, H., Yasufuku, N., 2005, *Direct shear and compression behaviors for an unsaturated compacted soil with water content and matric suction measurement*, in Tarantino, A., Romero, E., Cui, Y. J. (eds), *Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Taylor & Francis Group, London, pp. 265-272.
- Houlsby, G. T., 1997, *The work input to an unsaturated granular material*, Géotechnique, **47**, 1, pp. 193-196.
- Houston, S. L., Houston, W. N., Wagner, A., 1994, *Laboratory filter paper suction measurements*, GTJODJ, **17**, 2, pp. 177-184.
- Huang, S. Y., 1994, *Evaluation and laboratory measurement of the coefficient of permeability in deformable, unsaturated soils*, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Huang, S., Barbour, S.L., Fredlund, D.G., 1998, *Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated soil*, Can. Geotech. J., Vol. 35, pp. 411-425.
- Huang, S., Fredlund, D. G., Barbour, S. L., 1998, *Measurement of the coefficient of permeability for a deformable unsaturated soil using a triaxial permeameter*, Can. Geot. J., **35**, pp. 426-432.
- Irmay, S., 1954, *On the hydraulic conductivity of unsaturated soils*, Trans., Am. Geophys. Union, **35**(3), pp. 463-476.
- Iyer, B., 1990, *Pore water extraction – Comparison of saturation extract and high-pressure squeezing*, Physico-chemical aspects of soil and related materials, ASTM STP 1095, Hoddinott, K. B., Lamb, R. O. (eds), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Jaky, J., 1948, *Pressure in silos*, proc. 2<sup>nd</sup> ICSMFE, Vol. 1, pp. 103-107.
- Janbu, N., 1957, *Stability Analysis of Slopes with Dimensionless Parameters*, Harvard University, Soil Mechanics Series, No. 46.
- Janbu, N., 1973, *Slope Stability Computations in Embankment Dam Engineering*, Casagrande Memorial Volume, Hirshfield and Poulos (Eds.), John Wiley, New York,
- Jefferies, M. G., 1993, *Nor sand: a simple critical state model for sand*, Géotechnique, **43**, pp. 1037-1042.
- Jefferies, M. G., 1997, *Technical note – Plastic work and isotropic softening in unloading*, Géotechnique, **43**, pp. 1037-1042.
- Jennings, J. E. B., 1961, *A revised effective stress law for use in the prediction of the behaviour of unsaturated soils*, Pore Pressure and Suction in Soils, Butterworths, London, England, pp. 26-30.
- Jennings, J. E. B., Burland, J. B., 1962, *Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils*, Géotechnique, **12**, 2, pp. 125-144.
- Jiang, G., Wang, Z., Tan, G., Qiu, J. Y., 2000, *Suction calibration curve of filter paper made in China*, Rahardjo et al. (eds), “Unsaturated Soils for Asia”, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 293-298.
- Johnston, L. N., 1942, *Water permeable jacketed thermal radiators as indicators of field capacity and permanent wilting percentage in soils*, Soil Science, **54**, pp. 123-126.
- Jones, W. M., Overton, G. D. N., Trevena, D. H., 1981, *Tensile strength experiments with water using a new type of Berthelot tube*, J. of Physics, D: Applied Physics, **14**, pp. 1283-1291.
- Josa, A., Alonso, E. E., Gens, A., Lloret, A., 1987, *Stress-strain behaviour of partially saturated soils*, Proc. 9<sup>th</sup> ECSMFE, Vol. 2, pp. 561-564.
- Josa, A., Balmaceda, A., Gens, A., Alonso, E. E., 1992, *An elastoplastic model for partially saturated soil exhibiting a maximum of collapse*, In Computational plasticity III (eds D. R. J. Owen, E. Onate and E. Hinton), Vol. 1, pp. 815–826. Swansea: Pineridge Press.

- Jucá, J. F.T., Maciel, F. J. (2006), *Gas permeability of a compacted soil used in a landfill cover layer*, 4<sup>th</sup> International Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, USA, April 2-5 2006, Vol. 2, pp. 1535-1546.
- Καββαδάς, Μ. Ι., 1998, *Στοιχεία περιβαλλοντικής γεωτεχνικής*, Εκδόσεις Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
- Καβουνίδης, Σ., Ντουνιάς, Γ., Μπαρδάνης, Μ., 2003, *Αντιμετωπίζοντας τα ασταθή εδάφη του Τμήματος 3.1 της Εγνατίας Οδού (Μ. Περιστέρι-Ανθοχώρι)*, Πρακτικά Επιστημονικής Δημερίδας «Γεωλογικά – Γεωτεχνικά Θέματα. Σημασία & Πρόοδος της Εγνατίας Οδού», Νοέμβριος 2003, Ιωάννινα, σελ. 93-103.
- Kalteziotis, N., 1993, *The residual shear strength of some Hellenic clayey soils*, Geotechnical and Geological Engineering, **11**, pp. 125-145.
- Kamiya, K., Bakrie, R. T., Honjo, Y., 2005, *Evaluation of air permeability of unsaturated sandy soils*, in “Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics”, Tarantino, Romero & Cui (eds), Taylor & Francis Group, London, pp. 369-375.
- Karube, D., Kawai, K., 2001, *The role of pore water in the mechanical behaviour of unsaturated soils*, Geotechnical & Geological Engineering, **19**, pp. 211-241.
- Kassif, G., Ben Shalom, A., 1971, *Experimental relationship between swell pressure and suction*, Geotechnique, **21**, 3, pp. 255-255.
- Kato, S., Kawai, K., Yoshimura, Y., Sunden, W., 2002, *Effect of suction on unconfined compressive strength and undrained shear strength of a compacted silty clay*, Juca et al. (eds), proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 2, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 513-519.
- Katti, R. K., Katti, D. R., Katti, A. R., 2002, *Behaviour of saturated expansive soil and control methods*, Revised Enlarged Edition, Taylor & Francis, p. 1270.
- Kavvadas, M., Anagnostopoulos, A.G., 1998, *A framework for the mechanical behaviour of structured soils*, Proc. 2nd Int. Symp. on the Geotechnics of Hard Soils - Soft Rocks, Napoli, October 1998, Vol. 2, pp 603-614, A.A. Balkema Publishers, Rotterdam.
- Kavvadas M., Anagnostopoulos, A.G., Kalteziotis, N., 1993, *A framework for the mechanical behaviour of the cemented Corinth marl*, Proc. Int. Symp. on Hard Soils - Soft Rocks, Athens, Greece, pp. 577-583.
- Kavvadas, M. J., Anagnostopoulos, A. G., Georgiannou, V. N., Bardanis, M. E., 2002, *Characterisation and engineering properties of the Corinth Marl*, Tan et al (eds.), Proc. Int. Workshop ‘Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils’, Singapore, 2002, A. A. Balkema Publishers, Vol. 2, pp. 1435-1459.
- Kay, B. D., Low, P. F., 1970, *Measurement of the total suction of soils by a thermistor psychrometer*, Proc. of Soil Science Society of America, **34**, pp. 373-376.
- Kenney, T. C., 1967, *The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils*, proc. Geotech. Conf. on the Shear Strength properties of natural soils and rocks, 1, pp. 123-129.
- Khallili, N., Khabbaz, M. H., 1998, *A unique relationship for the determination of the shear strength of unsaturated soils*, Géotechnique, **48**, 5, pp. 681-687.
- Khanzode, R. M., Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., 2002, *Measurement of soil-water characteristic curves for fine grained soils using small-scale centrifuge*, Can. Geotech. J., **39**, 5, pp. 1209-1217.
- Khristianovich, S. A., 1940, *Groundwater motion which does not obey Darcy’s law*, Prikl. matem. mekh. AN SSR IV, pp. 33-52 (in Russian).
- Klute, A., 1972, *The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils*, Soil Science, **113**(4), pp. 264-276.
- Klute, A., Dirksen, C., 1986, *Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods*, Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods, Soil Science

- Society of America, Monograph No. 9, Madison, WI, pp. 687-734.
- Kohgo, Y., 2004, *Elastoplastic models for unsaturated soils with two suction effects and unsaturated soil behavior*, in Jucá et al. (eds), *Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, UNSAT 2002, 10-13 March 2002, Recife, Brazil* 3: 905-915, Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Kohgo, Y., Nakano, M., Miyazaki, T., 1993a, *Theoretical aspects of constitutive modelling for unsaturated soils*, *Soils & Foundations*, **33**, pp. 49-63.
- Kohgo, Y., Nakano, M., Miyazaki, T., 1993b, *Verification of the generalised elastoplastic model for unsaturated soils*, *Soils & Foundations*, **33**, pp. 64-73.
- Komornik, A., Livneh, M., Smucha, S., 1980, *Shear strength and swelling of of clays under suction*, *proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Expansive Soils*, Denver, Vol. 1, pp. 206-226.
- Koorevaar, P., Menelik, G., Dirksen, C., 1983, *Elements of soil physics*, Elsevier, Amsterdam, p. 228.
- Kosugi, K., 1994, *The parameter lognormal distribution model for soil water retention*, *Water Resource Research*, vol. 30, pp. 891-901.
- Krahn, J., Fredlund, D. G., Klassen, M. J., 1989, *Effect of soil suction on slope stability at Notch Hill*, *Can. Geot. J.*, Vol. 26, pp. 269-278.
- Kühnel, R. A., van der Gaast, S. J., 1993, *Humidity-controlled diffractometry and its applications*, in *Advances in X-Ray Analysis*, Vol. 36, Gilfrich, J. V. et al. (eds), plenum, New York, pp. 439-449.
- Kumar, S., Malik, R. S., 1990, *Verification of quick capillary rise approach for determining pore geometrical characteristics in soils of varying texture*, *Soil Science*, **150** (6), pp. 883-888.
- Lade, P. V., Liggió, C. D., Yamamuro, J. A., 1998, *Effect of Gradation and Fine Content on the Undrained Response of Sand*, *Hydraulic fill structure*, Geotechnical Special Publication 21, ASCE, New York, pp. 330-345.
- Lagerwerff, J. V., Ogata, G., Eagle, H. E., 1961, *Control of osmotic pressure of culture solutions with polyethylene glycol*, *Science*, **133**, pp. 1486-1487.
- Laloui, L., Francois, B., Nuth, M., Peron, H., Koliji, A., 2008, *A thermo-hydro-mechanical stress-strain framework for modeling the performance of clay barriers in deep geological repositories for radioactive waste*, *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering*, Toll et al. (eds), *Proc. 1st Eur. Conf. on Unsaturated Soils*, Durham, UK, 2-4 July, 2008, pp. 63-80.
- Laloui, L., Geiser, F., Vulliet, L., Li, X. L., Bolle, A., Charlier, R., 1997, *Characterization of the mechanical behaviour of an unsaturated sandy silt*, *proc. XIV ICSMGE*, Hamburg, 6-12 September 1997, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 347-350.
- Lambe, T. W., 1960, *A mechanistic picture of shear strength in clay*, *Proceedings of the ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, University of Colorado, Boulder, Colo., pp. 555-580.
- Lang, A. R. G., 1967, *Osmotic coefficients and water potentials of sodium chloride solutions from 0 to 40 °C*, *Australian Journal of Chemistry*, **20**, pp. 2017-2023.
- Laplace, P. S., 1806, *Mecanique Celeste*, suppl. 10th vol. English translation reprinted by Chelsea, New York (1966).
- Lee, H. C., Wray, W. K., 1992, *Evaluation of soil suction instruments*, *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Expansive Soils*, Dallas, USA, pp. 307-321.
- Lee, I. M., Sung, S. G., Cho, G. C., 2005, *Effect of stress state on the unsaturated shear strength of a weathered granite*, *Can. Geotech. J.*, **42**, 2, pp. 624-631.
- Leong, E. C., He, L., Rahardjo, H., 2002, *Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements*, *Geotech. Testing J.*, ASTM International, **25**, 3, pp. 322-333.
- Leong, E. C., Rahardjo, H., 1999, *Discussion to "Soil-water characteristic curves for compacted clays" by Tinjum et al., 1997*, *ASCE J. Geotech. Geoenvironmental Engng*, **125**, 7, pp.

- 629-630.
- Leong, E. C., Tripathy, S., Rahardjo, H., 2003, *Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique*, *Géotechnique*, **53**, 2, pp. 173-182.
- Leroueil, S., Magnan, J. P., Tavenas, F., 1985, *Remblais sur argiles molles*, Tech. Doc., Paris, Lavoisier.
- Letey, J., Osborn, J., Pelishek, R. E., 1962, *Measurement of liquid-solid contact angles in soils and sand*, *Soil Science*, **93**, pp. 149-153.
- Li, A. G., Yue, Z. Q., Tham, L. G., Lee, C. F., Law, K. T., 2005, *Field-monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope*, *Can. Geotech. J.*, **42**, 1, pp. 13-26.
- Li, X. S., 2007a, *Thermodynamics based constitutive framework for unsaturated soils. 1: Theory*, *Géotechnique*, **57**, 5, pp. 411-422.
- Li, X. S., 2007a, *Thermodynamics based constitutive framework for unsaturated soils. 2: A basic triaxial model*, *Géotechnique*, **57**, 5, pp. 423-435.
- Li, X. S., Dafalias, Y. F., 2000, *Dilatancy for cohesionless soils*, *Géotechnique*, **50**, 4, pp. 449-460.
- Likos, W. J., Lu, N., 2001, *Automated measurement of total suction characteristics in the high suction range: application to the assessment of swelling potential*, *Journal of the Transportation Research Board*, No 1755, TRB, Washington, DC, pp. 120-128.
- Likos, W. J., Lu, N., 2002, *Filter paper technique for measuring total soil suction*, *Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board*, No. 1821, TRB, Washington, DC, pp. 120-128.
- Likos, W. J., Lu, N., 2003, *Automated humidity system for measuring total suction characteristics of clay*, *Geotechnical Testing Journal*, **26** (2), pp. 178-189.
- Liu, M.D., Carter, J.P., 1999, *Virgin compression of structured soils*, *Géotechnique*, Vol. 49, pp. 43-57.
- Liu, M.D., Carter, J.P., 2000, *Modelling the destructuring of soils during virgin compression*, *Géotechnique*, Vol. 50, pp. 479-483.
- Livingston, B. E., 1908, *A method for controlling plant moisture*, *Plant World*, **11**, pp. 39-40.
- Livingston, B. E., 1918, *Porous clay cones for the auto-irrigation of potted plants*, *Plant World*, **21**, pp. 202-208.
- Livingston, B. E., Hawkins, L. A., 1915, *The water relation between plant and soil*, Publ. 204, Carnegie Inst., Washington D. C., pp. 3-48.
- Lloret, A., 1982, *Comportamiento deformacional del suelo no saturado bajo condiciones drenadas y no drenadas*, These Doctorat, Universidad Politécnica de Catalunya.
- Lloret, A., Alonso, E. E., 1980, *Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behaviour*, *Géotechnique*, **30**, 4, pp. 449-477.
- Lloret, A., Alonso, E. E., 1985, *State surfaces for partially saturated soils*, Proc. 11th Int. Conf. Soil Mech. Fdn Engng, San Francisco, **2**, pp. 557-562.
- Lourenço, S. D. N., Gallipoli, D., Toll, D. G., Evans, F. D., 2006, *Development of a commercial tensiometer for triaxial testing of unsaturated soils*, in Miller, G. A., Zapata, C. E., Houston, S. L., Fredlund, D. G. (eds), proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, Vol. 2, pp. 1875-1886.
- Lu, N., Likos, W. J., 2004, *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 556 p.
- Lupini, J. F., Skinner, A. E., Vaughan, P. R., 1981, *The drained residual strength of cohesive soils*, *Géotechnique*, **31**, 2, pp. 181-213.
- Maâtouk, A., Leroueil, S., La Rochelle, P., 1995, *Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil*, *Géotechnique*, **45**, 3, pp. 465-477.
- Macari, E. J., Parker, J. C., Costes, N. C., 1997, *Measurement of volume changes in triaxial tests*



- using digital image processing*, Geotech. Testing J., **22**(1), pp. 103-109.
- Maciel, F. J., Jucá, J. F.T. (2000), *Laboratory and field tests for studying gas flow through MSW landfill cover soil*, Shackelford, et al. (eds), "Advances in Unsaturated Geotechnics", Geot. Sp. Publication No. 99, A.S.C.E. Press, pp. 569-585.
- Mahler, C. F., Mendes, C. A. R., 2003, *Measurement of suction of thick textured soil using filter paper method and equivalent tensiometer - EQT*, in T., Schanz (Ed.), *Unsaturated Soils: Experimental Studies*, Proc. of the Int. Conf. "From Experimental Evidence towards Numerical Modelling of Unsaturated Soils", Weimar, 17-18 September 2003, Springer, Berlin, Vol. I, pp. 183-192.
- Mahler, C. F., Goncalves, H., Pacheco, A. C., 2002, *Development of an automatic tensiometer in laboratory using a mini-lysimeter*, Juca et al. (eds), proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 3, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 1021-1027.
- Maksimović, M., 1989, *On the residual shearing strength of clays*, Géotechnique, **39**, 2, pp. 347-351.
- Marachi, N. D., Chan, C. K., Seed, H. B., Duncan, J. M., 1969, *Strength and deformation characteristics of rockfill materials*, Department of Civil Engineering, Report No. TE-69-5, University of California.
- Marinho, F. A. M., Chandler, R. J., 1994, *Discussion to 'A new instrument for the measurement of soil moisture suction'*, Géotechnique, **44**, 3, pp. 551-556.
- Marinho, F. A. M., Chandler, R. J., 1995, *Cavitation and direct measurement of soil suction*, in Alonso, E. E., Delage, P. (eds), proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 2, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 623-630.
- Marinho, F. A. M., Oliveira, O. M., 2006, *The filter paper method revisited*, Geotech. Testing J., ASTM International, **29**, 3, pp. 250-258.
- Marsal, R. J., 1973, *Mechanical properties of rockfill*, Embankment Dam Engineering. Casagrande Volume, Hirschfeld, R. C. & Poulos, S. J., eds., John Wiley & Sons.
- Marsal, R. J., Arellano, L. R., Guzman, M. A., Adame, H., 1976, *El Infernillo. Behaviour of dams built in Mexico*, Instituto de Ingenieria, UNAM, Mexico.
- Marshall, R. J., 1979, *Analysis of fundamentals of compacted soils, General Report, Main Session, IV*, proc. 6<sup>th</sup> Panamerican Conf. Soil Mech. Found. Engng, Lima, Peru, **3**, pp. 328-348.
- Marshall, T. J., Holmes, J. W., Rose, C. W., 1996, *Soil Physics*, Cambridge University Press, 3<sup>rd</sup> Edition, 453 p.
- Matyas, E. L., 1967, *Air and water permeability of compacted soils*, in "Permeability and Capillarity of Soils", ASTM STP 417, American Society of Testing and Materials, 1967, pp. 160-175.
- Matyas, E. L., Radhakrishna, 1968, *Volume change behaviour of partially saturated soils*, Géotechnique, **18**, 4, pp. 432-448.
- McKee, C.R., Bumb, A.C., 1984, *The importance of unsaturated flow parameters in designing a monitoring system for hazardous wastes and environmental emergencies*, Hazardous Materials Control Research Institute National Conference, Houston, TX, March 1984, pp. 50-58.
- McKeen, R. G., 1980, *Field studies of airport pavements on expansive soils*, proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Expansive Soils, pp. 242-261.
- McQueen, I. S., Miller, R. F., 1968, *Calibration and evaluation of a wide-range gravimetric method for measuring moisture stress*, Soil Science, **106**, 3, pp. 225-231.
- Meilani, I., Rahardjo, H., Leong, E. C., Fredlund, D. G., 2002, *Mini suction probe for matric suction measurements*, Can. Geotech. J., **39**, pp. 1427-1432.
- Melgarejo, M.L., Ridley, A.M., Dineen, K., 2002, *A comparison of the soil water characteristic curves for reconstituted and undisturbed samples of a colluvium from Rio de Janeiro*, in

- Juca, et al. (eds), Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, UNSAT 2002, 10-13 March 2002, Recife, Brazil 1: 313-316, Lisse: Swets & Zeitlinger.
- Mendoza, C. E., Colmenares, J. E., Merchán, V. E., 2005, *Stiffness of an unsaturated compacted clayey soil at very small strains*, in Tarantino, A., Romero, E., Cui, Y. J. (eds), "Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics", Taylor & Francis, London, UK, pp. 199-204.
- Merchán, V., Vaunat, J., Romero, E., Meca, T., 2008, *Experimental study of the influence of suction on the residual friction angle of clays*, Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering, Toll et al. (eds), Proc. 1st Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Durham, UK, 2-4 July, 2008, pp. 423-428.
- Meyer, J., 1911, *Negative pressure in liquids*, Abn. dt. Buns. Ges., **6**, pp. 1-53 (στα γερμανικά).
- Miller, C. J., Yesiller, N., Yaldo, K., Merayyan, S., 2002, *Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic*, ASCE J. Geotech. Geoenvironmental Engng, **128**, 9, pp. 733-742.
- Miller, D. J., Nelson, J. D., 1992, *Osmotic suction as a valid state variable in unsaturated soils*, proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. on Expansive Soils, Dallas, USA, pp. 179-184.
- Miller, G. A., Hamid, T. B., 2005, *Direct shear testing of interfaces in unsaturated soil*, in Tarantino, A., Romero, E., Cui, Y. J. (eds), Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Taylor & Francis Group, London, pp. 111-116.
- Miller, G. A., Hamid, T. B., 2007, *Interface direct shear testing of unsaturated soil*, Geotech. Testing J., **30**, 3, pp. 182-191.
- Mitchell, J., 1976, *Fundamentals of Soils Behavior*, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Mokady, R. S., Low, P. F., 1968, *Simultaneous transport of water and salt through clays, I: Transport Mechanisms*, Soil Science, **105**, pp. 112-131.
- Μπαρδάνης, Μ., 2010, *Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς των αναζυμωμένων εδαφικών υλικών*, 6<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτ. & Γεωπερ/κής Γεωτεχνικής, Βόλος, 29/9-1/10/2010.
- Μπαρδάνης, Μ., 2010, *Η θεωρητική γραμμή εγγενούς συμπίεσης και η χρήση της στην εκτίμηση της δομής φυσικών εδαφικών υλικών*, 6<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτ. & Γεωπερ/κής Γεωτεχνικής, Βόλος, 29/9-1/10/2010.
- Μπαρδάνης, Μ., 2013, *Οι έμμεσες μέθοδοι μέτρησης του ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας και η δυνατότητα χρήσης τους στον ποιοτικό έλεγχο της κατασκευής χωμάτων φραγμάτων*, Πρακτικά 2<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Φραγμάτων και Ταμιευτήρων, Αθήνα, 7-8 Νοεμβρίου 2013
- Μπαρδάνης, Μ., Γρίφιζα, Σ., 2010, *Μηχανική συμπεριφορά ενός συμπυκνωμένου αποσαθρωμένου σερπεντινίτη από την Σκύρο*, Πρακτ. 5<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Βόλος, 29 Σεπτεμβρίου-1 Οκτωβρίου 2010.
- Μπαρδάνης, Μ., Γρίφιζα, Σ., 2012, *Η σημασία των δοκιμών συμμόρφωσης στις εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής. Το παράδειγμα των δοκιμών μονοδιάστατης συμπίεσης*, Πρακτικά 4<sup>ο</sup> Τακτικού Εθνικού Συνεδρίου Μετρολογίας, Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012.
- Μπαρδάνης, Μ., Γρίφιζα, Σ., 2012, *Επιβολή ολικής μύζησης σε εδαφικά δοκίμια μέσω αέρα σχετικής υγρασίας ελεγχόμενης με υδατικά διαλύματα αλάτων*, Πρακτικά 4<sup>ο</sup> Τακτικού Εθνικού Συνεδρίου Μετρολογίας, Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012
- Μπαρδάνης, Μ., Καββαδάς, Μ., 2005, *Εργαστηριακή διάταξη προσδιορισμού χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού. Χρήση ξεχωριστών δοκιμών χωρίς υπόθεση σταθερού όγκου*, Πρακτικά 1<sup>ο</sup> Τακτικού Εθνικού Συνεδρίου Μετρολογίας, Αθήνα, 11-12 Νοεμβρίου 2005, σελ. 405-414.
- Μπαρδάνης, Μ., Καββαδάς, Μ., 2006α, *Πρόβλεψη του παραμένοντος λόγου κενών αργιλικών εδαφών μετά από ξήρανση, από την αρχική κατάσταση, τη φύση και τη δομή τους*, Πρακτ. 5<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, 31 Μαΐου-2 Ιουνίου 2006, Τόμ. 1, σελ. 119-126.
- Μπαρδάνης, Μ., Καββαδάς, Μ., 2006β, *Ελαστοπλαστική καταστατική προσομοίωση της*

- μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών, Πρακτ. 5<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, 31 Μαΐου-2 Ιουνίου 2006, Τόμ. 1, σελ. 127-134.
- Μπαρδάνης, Μ., Καββαδάς, Μ., 2006γ, *Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού εδαφικών υλικών από τον ελλαδικό χώρο*, Πρακτ. 5<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, 31 Μαΐου-2 Ιουνίου 2006, Τόμ. 1, σελ. 135-142.
- Μπαρδάνης, Μ., Καββαδάς, Μ., 2006δ, *Συμπιεστότητα, διαπερατότητα και συρρίκνωση της Μάργας Κορίνθου*, Πρακτ. 5<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, 31 Μαΐου-2 Ιουνίου 2006, Τόμ. 1, σελ. 143-150.
- Μπαρδάνης, Μ., Καβουνίδης Σ., 2001α, *Εμπειρικές συσχετίσεις του δείκτη συμπιεστότητας αργιλικών εδαφών με τα φυσικά χαρακτηριστικά τους*, Πρακτ. 4<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Αθήνα, 30 Μαΐου – 1 Ιουνίου 2001, Τόμ. 1, σελ. 123-130.
- Μπαρδάνης, Μ., Καβουνίδης Σ., 2001β, *Σύγκριση δείκτη συμπιεστότητας από εμπειρικές συσχετίσεις και από δοκιμές σε αργιλικά εδάφη από τον ελλαδικό χώρο*, Πρακτ. 4<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Αθήνα, 30 Μαΐου – 1 Ιουνίου 2001, Τόμ. 1, σελ. 131-138.
- Μπαρδάνης, Μ., Γρίφιζα, Σ., Κόκκαλη, Π., 2014, *Διατμητική αντοχή πολύ χονδρόκοκκων εδαφικών υλικών και μετρήσεις του συντελεστή ωθήσεων γαιών ηρεμίας τους*, 7<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα, 5-7 Νοεμβρίου 2014
- Μπαρδάνης, Μ., Καβουνίδης, Σ., Ντουνιάς, Γ., 2013, *Μια νέα συσκευή άμεσης διάτμησης για χονδρόκοκκα εδάφη και εδάφη με μεγάλα συσσωματώματα. Μετρήσεις διατμητικής αντοχής και μεταβολών όγκου*, Πρακτικά 2<sup>ο</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου Φραγμάτων και Ταμιευτήρων, Αθήνα, 7-8 Νοεμβρίου 2013
- Μπαρδάνης, Μ., Ντουνιάς, Γ., Καβουνίδης, Σ., 2006α, *Αριθμητική προσομοίωση του καθεστώτος των πύσεων πόρων σε υλικά κατολίθησης χαμηλής διαπερατότητας με υποστράγγιση*, Πρακτ. 5<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, 31 Μαΐου-2 Ιουνίου 2006, Τόμος 2, σελ. 595-602.
- Μπαρδάνης, Μ., Ντουνιάς, Γ., Καβουνίδης, Σ., 2006β, *Υλικά κατολίθησης χαμηλής διαπερατότητας με υποστράγγιση - Παραδείγματα από τον ελλαδικό χώρο*, Πρακτ. 5<sup>ο</sup> Παν. Συν. Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, 31 Μαΐου-2 Ιουνίου 2006, Τόμος 2, σελ. 603-610.
- Mualem, Y., 1976α, *Hysteretical models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*, Water Resour. Res., **12**(6), pp. 1248-1254.
- Mualem, Y., 1976β, *A new model for predicting hydraulic conductivity of unsaturated porous media*, Water Resour. Res., **12**(3), pp. 513-522.
- Ng, C. W. W., Pang, Y. W., 2000, *Influence of stress state on soil-water characteristics and slope-stability*, J. Geotech. & Geoenvironmental Engng, February 2000, pp.157-166.
- Ng, C. W. W., Chiu, C. F., Rahardjo, H., 2000, *Laboratory study of loosely compacted unsaturated volcanic fill*, Rahardjo, H., Toll, D. G. & Leong, E. C. (eds), Proc. 1<sup>st</sup> Asian Conf. on Unsaturated Soils, Singapore, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 551-556.
- Ng, C. W. W., Zhan, L. T., Bao, C. G., Fredlund, D. G., Gong, B. W., 2003, *Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration*, Géotechnique, **53**, 2, pp. 143-157.
- Nielsen, D. R., Biggar, Y. W., 1961, *Measuring capillary conductivity*, Soil Sci., **92**, pp. 192-193.
- Nimmo, J. R., Akstin, K., 1988, *Hydraulic conductivity of a saturated soil at low water content after compaction by various methods*, Soil Science Society of America Journal, **52**, pp. 303-310.
- Nimmo, J. R., Akstin, K., Mello, K., 1992, *Improved apparatus for measuring hydraulic*

- conductivity at low water content*, Soil Science Society of America Journal, **56**, pp. 1758-1761.
- Nimmo, J. R., Rubin, J., Hammermeister, D. P., 1987, *Unsaturated flow in a centrifugal field: Measurement of hydraulic conductivity and testing of Darcy's law*, Water Resources Research, **23**(1), pp. 124-134.
- Nishimura, T., Murasawa, Y., Okami, T., 2006, *Estimating air-water hydraulic conductivity using soil-water characteristic curve*, 4<sup>th</sup> International Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, USA, April 2-5 2006, Vol. 2, pp. 1595-1606.
- Nobari, E. S., Duncan, J. M., 1972, *Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams*, Department of Civil Engineering, Report No. TE-72-1, University of California.
- Ντούλης, Γ., Ρίτσος, Α., 1997, *Εμπειρίες από τη διάνοιξη δοκιμαστικής σήραγγας σε μαργαϊκό σχηματισμό*, Πρακτικά 3<sup>ου</sup> Παν. Συν. Γεωτεχνικής Μηχανικής, Τόμ. 2, σελ. 201-208.
- Oberg, A., Sallfors, G., 1997, *Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve*, Geotech. Testing J., **20**, 1, pp. 40-48.
- O'Connor, K. M., Dowding, C. H., 1999, *Geomeasurements by pulsing TDR cables and probes*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Ohde, Y., Okamoto, H., Ouchi, T., Takeshita, T., Hayashi, 1991, *Pre- and post-treatment conditioning approach for a metal Berthelot tube*, J. of Physics, D: Applied Physics, **24**, 6, pp. 1864-1874.
- Oldecop, L. A., Alonso, E. E., 2001, *A model for rockfill compressibility*, Géotechnique, **51**, 2, pp. 127-140.
- Oldecop, L. A., Alonso, E. E., 2003, *Suction effects on rockfill compressibility*, Géotechnique, **53**, 2, pp. 289-292.
- Oldecop, L. A., Alonso, E. E., 2007, *Theoretical investigation of the time-dependent behaviour of rockfill*, Géotechnique, **57**, 3, pp. 289-301.
- Oliveira, O. M., Fernando, F. A. M., 2006, *Study of equilibration time in the pressure plate*, 4<sup>th</sup> International Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, USA, April 2-5 2006, Vol. 2, pp. 1085-1096.
- Or, D., 2001, *Who invented the tensiometer?*, Soil Science Soc. of America J., **65**, 1, pp. 1-3.
- Oteo-Mazo, C., Saez Aunon, J., Esteban, F., 1996, *Laboratory tests and equipment with suction control*, in "Unsaturated Soils", Alonso, E. E. & Delage, P. (eds), Vol. 3, pp. 1509-1515.
- Padilla, J. M., Perera, Y. Y., Houston, W. N., Fredlund, D. G., 2005, *A new soil-water characteristic curve device*, in "Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics", Tarantino, Romero & Cui (eds), Taylor & Francis Group, London, pp. 15-22.
- Padilla, J. M., Houston, W. N., Lawrence, C. A., Fredlund, D. G., Houston, S. L., Perez, N. P., 2006a, *An automated triaxial testing device for unsaturated soils*, 4<sup>th</sup> International Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, USA, April 2-5 2006, Vol. 2, pp. 1775-1786.
- Padilla, J. M., Perera, Y. Y., Houston, W. N., Perez, N. P., Fredlund, D. G., 2006b, *Quantification of air diffusion through high air-entry ceramic disks*, 4<sup>th</sup> International Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, USA, April 2-5 2006, Vol. 2, pp. 1852-1863.
- Pastor, M., Zienkiewicz, O. C., Chan, A. H. C., 1990, *Generalised plasticity and the modeling of soil behaviour*, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomechanics, **14**, pp. 151-190.
- Peck, A. J., Rabbage, R. M., 1969, *Design and performance of an osmotic tensiometer for measuring capillary potential*, Proc. of Soil Science Society of America, **33**, pp. 196-202.
- Pereira, J.-M., de Gennaro, V., 2010, *On the time-dependent behaviour of unsaturated geomaterials*, in Alonso, E. E. & Gens, A. (eds), proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, Barcelona, Spain, Vol. 2, pp. 921-925.
- Perez-Garcia, Cortez-Ochoa, J., 2002, *Oedomètre à succion contrôlée pour effectuer des essais sur des sols non saturés*, proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Recife, Brazil, Swets &

- Zeitlinger, Lisse, Vol. 2, pp. 535-540.
- Péron, H., Laloui, L., Hueckel, T., Hu, L., 2006, *Experimental study of dessication of soil*, In Miller et al (eds), Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, 2-5 April, 2006, 1073-1084, Reston, Virginia: ASCE Press.
- Phene, C. J., Hoffman, G. J., Rawlins, S. L., 1971 $\alpha$ , *Measuring soil matric potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body: I. Theory and sensor construction*, Proc. of Soil Science Society of America, **35**, pp. 27-33.
- Phene, C. J., Hoffman, G. J., Rawlins, S. L., 1971 $\beta$ , *Measuring soil matric potential in situ by sensing heat dissipation within a porous body: II. Experimental results*, Proc. of Soil Science Society of America, **35**, pp. 225-229.
- Picornell, M., Lytton, R. L., Steinberg, M., 1983, *Matric suction instrumentation of a vertical moisture barrier*, Transportation Research Record, **945**, pp. 16-21.
- Pineda, J.A., Colmenares, J.E., 2006, *Stress-strain-suction behaviour of two clayey materials under unconfined conditions*, in Miller et al (eds), Proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, 2-5 April, 2006, 1109-1120, Reston, Virginia: ASCE Press.
- Pinyol, N., Vaunat, J., Alonso, E. E., 2007, *A constitutive model for soft clayey rocks that includes weathering effects*, Géotechnique, **57**, 2, pp. 137-151.
- Pullin, A. J., 2004, *Comparative investigation of various soil water content measurement techniques for small scale agriculture*, Seminar, School of Bioresources Engineering and Environmental Hydrology, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, South Africa.
- Rahardjo, H., Leong, E. C., 2006, *Suction Measurements*, in Miller, G. A., Zapata, C. E., Houston, S. L., Fredlund, D. G. (eds), proc. 4<sup>th</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, Vol. 1, pp. 81-104.
- Rahardjo, H., Lee, T. T., Leong, E. C., Rezaur, R. B., 2005, *Response of a residual soil slope to failure*, Can. Geotech. J., **42**, 2, pp. 340-351.
- Rampino, C., Mancuso, C., Vinale, F., 1999, *Laboratory testing of an unsaturated soil: equipment, procedures and first experimental results*, Can. Geotech. J., **36**, pp. 1-12.
- Rampino, C., Mancuso, C., Vinale, F., 2000, *Experimental behaviour and modeling of an unsaturated compacted soil*, Can. Geotech. J., **37**, pp. 748-763.
- Rassam, D. W., Williams, D. J., 1999, *A relationship describing the shear strength of unsaturated soils*, Can. Geot. J., Vol. 36, pp. 363-368.
- Rawlins, S. L., Dalton, F. N., 1967, *Psychrometric measurement of soil water potential without precise temperature control*, Proc. of Soil Science Society of America, **31**.
- Rees, E. P., Trevena, D. H., 1966, *A study of the Berthelot method of measuring tensions in liquids*, Br. J. Applied Physics, **17**, 5, pp. 671-674.
- Richards, B. E., Trevena, D. H., 1976, *The measurement of positive and negative pressures in a liquid contained in a Berthelot tube*, J. of Physics, D: Applied Physics, **9**, pp. L123-L126.
- Richards, B. G., 1965, *Measurement of the free energy of soil moisture by the psychrometric technique using thermistors*, Moisture in Soils beneath Covered Areas, Butterworths, Australia, pp. 39-46.
- Richards, B. G., 1966, *The significance of moisture flow and equilibria in unsaturated soils in relation to the design of engineering structures built on shallow foundations in Australia*, Symposium on Permeability and Capillarity, American Society for Testing and Materials, Atlantic City, N.J.
- Richards, B. G., 1969, *Psychrometric techniques for measuring soil water potential*, Div. of Soil Mechanics, CSIRO, Tech. Report No. 9.
- Richards, B. G., 1980, *Measurement of soil suction in expansive clays*, Institution of Australian Engineers, Civil Engineering Transactions, pp. 252-261.
- Richards, B. G., Peter, F., 1987, *Measurement of negative pore pressures or soil water suction*, Lecture, Extension Course, "Geotechnical Instrumentation", Australian Geomechanics

- Society, Melbourne, Australia.
- Richards, L. A., Ogata, G., 1958, *Thermocouple for vapour pressure measurement in biological and soil systems at high humidity*, Science, **128**, pp. 1089-1090.
- Richards, L. A., 1941, *A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution*, Soil Science, **51**, pp. 377-386.
- Ridley, A. M., 1993, *The measurement of soil moisture suction*, PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, 281 p.
- Ridley, A. M., 1998, *Προσωπική επικοινωνία*, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK.
- Ridley, A. M., Burland, J. B., 1993, *A new instrument for the measurement of soil moisture suction*, Géotechnique, **43**, 2, pp. 321-324.
- Ridley, A. M., Burland, J. B., 1994, *A new device for the direct measurement of soil suction over a wide range*, in Fookes, P. G., Parry, R. H. G. (eds), Engineering Characteristics of Arid Soils, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 289-295.
- Ridley, A. M., Burland, J. B., 1996, *A pore pressure probe for the in situ measurement of a wide range soil suctions*, in C. Craig (ed), Advances in site investigation practice, Thomas Telford, London, pp. 510-520.
- Ridley, A. M., Burland, J. B., 1999, *Discussion to 'Use of the tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction'*, Can. Geotech. J., **36**, pp. 178-180.
- Ridley, A. M., Wray, W. K., 1995, *Suction measurement: A review of current theory and practices*, in Alonso & Delage (eds), proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, France, Vol. 3, pp. 1293-1322.
- Rijtema, P. E., 1965, *An analysis of actual evapotranspiration*, Agricultural Research Rep. No. 659, Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Robinson, R. A., 1945, *The vapour pressures of solutions of Potassium Chloride and Sodium Chloride*, Trans. of the Royal Society of New Zealand, **75**, Part. 2, pp. 203-217.
- Romero, E., 1999, *Characterisation and thermo-hydro-mechanical behaviour of unsaturated Boom Clay: an experimental study*, PhD Thesis, Universitat, Politecnica de Catalunya, Spain.
- Romero, E., Vaunat, J., 2000, *Retention curves of deformable clays*, in “Experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils” (eds. A. Tarantino & C. Mancuso), Balkema, Rotterdam, pp. 91-106.
- Romero, E., Garcia, I., Knobelsdorf, J., 2005, *Gas permeability evolution of a sand/bentonite during controlled suction paths*, in “Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics”, Tarantino, Romero & Cui (eds), Taylor & Francis Group, London, pp. 385-390.
- Romero, E., Facio, J. A., Lloret, A., Gens, A., Alonso, E. E., 1997, *A new suction and temperature controlled triaxial apparatus*, proc. 14<sup>th</sup> ICSMFE, Hamburg, Vol. 1, pp. 185-188, A. A. Balkema.
- Roscoe, K. H., Burland, J. B., 1968, *On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay*, in Engineering Plasticity (eds J. Heyman & F. A. Leckie), pp. 535-609, Cambridge University Press.
- Rouainia, M., Pereira, J.-M., 2010, *Modelling the unsaturated behaviour of structured soils*, in Alonso, E. E. & Gens, A. (eds), proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, Barcelona, Spain, Vol. 2, pp. 939-944.
- Russell, M. B., Richards, L. A., 1938, *The determination of soil moisture energy relations by centrifugation*, Soil Science Society of America Proceedings, **3**, pp. 65-69.
- Salgueiro, R., Olivella, S., Suriol, J., 2010, *Constitutive model developments for compacted unsaturated fine grained soils based on porosimetry*, in Alonso, E. E. & Gens, A. (eds), proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, Barcelona, Spain, Vol. 2, pp. 951-956.
- Satija, D. J., 1978, *Shear behaviour of partially saturated soils*, PhD Thesis, Indian Institute of

- Technology, Delhi, India.
- Sattler, P., Fredlund, D. G., 1989, *Use of thermal conductivity sensors to measure matric suction in the laboratory*, Can. Geot. J., **26**, pp. 491-498.
- Schofield, A. W., Wroth, C. P., 1968, *Critical state soil mechanics*, London, McGraw-Hill.
- Schofield, R. K., 1935, *The pF of the water in soil*, Transactions for the 3<sup>rd</sup> Int. Congress for Soil Science, **2**, pp. 37-48.
- Schreiner, H. D., 1987, *Measurement of solute suction in high plasticity clays*, 9<sup>th</sup> Regional Conf. for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Lagos, Nigeria, pp. 163-171.
- Schreiner, H. D., 1988, *Volume change of highly plastic african clays*, PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.
- Sedano, J. A. I., Vanapalli, S. K., Garga, V. K., 2007, *Modified ring shear apparatus for unsaturated soils testing*, Geotech. Test. J., **30**, 1, pp. 39-46.
- Sharma, R. S., Hong, L., Singhal, S., 2006, *Developments in measurement of volume change in triaxial testing of unsaturated soils*, proc. of Sessions of Geoshangai, June 6-8, 2006, GSP 148, Advances in unsaturated soil, seepage and environmental geotechnics, pp. 93-101.
- Shaw, B., Baver, L. D., 1939 $\alpha$ , *Heat conductivity as an index of soil moisture*, J. of the American Society of Agronomy, **31**, pp. 886-891.
- Shaw, B., Baver, L. D., 1939 $\beta$ , *An electrothermal method for following moisture changes of the soil in-situ*, Soil Science Society of America Proceedings, **4**, pp. 78-83.
- Sheng, D., 2010, *Answers to discussion on his general report on Constitutive Modelling of Unsaturated Soils*, 5<sup>th</sup> Int. Conference on Unsaturated Soils, Barcelona, 6<sup>th</sup> September 2010.
- Sheng, D., Fredlund, D. G., Gens, A., 2008, *A new modeling approach for unsaturated soils using independent stress variables*, Can. Geotech. J., **45**, pp. 511-534.
- Sheng, D., Sloan, S. W., Gens, A., 2004, *A constitutive model for unsaturated soils: thermomechanical and computational aspects*, Computational Mechanics, **33**, pp. 453-465, Springer-Verlag.
- Shuai, F., Clements, C., Ryland, L., Fredlund, D. G., 2002, *Some factors that influence soil suction measurements using a thermal conductivity sensor*, in Jucá, J. F. T., de Campos, T. M. P., Marinho, F. A. M., (eds), proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Vol. 1, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 325-329.
- Shuai, F., Fredlund, D. G., 2000, *Use of a new thermal conductivity sensor to measure soil suction*, Shackelford, et al. (eds), "Advances in Unsaturated Geotechnics", Geot. Sp. Publication No. 99, A.S.C.E. Press, pp. 1-12.
- Sibley, J. W., Williams, D. J., 1990, *A new filter material for measuring soil suction*, Geotechnical Testing Journal, **13**, 4, pp. 381-384.
- Sibley, J. W., Smyth, G. K., Williams, D. J., 1990, *Suction-moisture content calibration of filter papers from different boxes*, Geotechnical Testing Journal, **13**, 3, pp. 257-262.
- Siemens, G. A., Blatz, J. A., 2005, *Soil suction measurement using the xeritron sensor in two different types of infiltration tests on a swelling soil*, in Tarantino, A., Romero, E., Cui, Y. J. (eds), Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Taylor & Francis Group, London, pp. 23-26.
- Sillers, W., Fredlund, D. G., Zakerzadeh, N., 2001, *Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models*, Geot. & Geol. Eng., vol. 19, pp. 243-283.
- Sivakumar, V., 1993, *A critical state framework of unsaturated soils*, PhD thesis, University of Sheffield.
- Sivakumar, V., Wheeler, S. J., 2000, *Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay. Part 1: wetting and isotropic compression*, Géotechnique, **50**, 4, pp. 359-368.
- Skempton, A. W., 1964, *The 4<sup>th</sup> Rankine Lecture: Long-term stability of clay slopes*,

- Géotechnique, **14**, 1, pp. 77-102.
- Skempton, A. W., 1970, *The consolidation of clays by gravitational compaction*, Q. J. Geol. Soc., Vol. 125, pp. 373-411.
- Skempton, A. W., 1985, *Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory*, Géotechnique, **35**, 1, pp. 3-18.
- Skibinsky, D. N., 1996, *A centrifuge method to obtain the soil-water characteristic curve*, M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan.
- Slatter, E. E., Jungnickel, C. A., Smith, D. W., Allman, M. A., 2000, *Investigation of suction generation in apparatus employing osmotic methods*, in Rahardjo et al. (eds), "Unsaturated Soils for Asia", A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 297-302.
- Smethurst, J. A., Clarke, D., Powrie, W., 2006, *Seasonal changes in pore water pressure in a grass-covered cut slope in London Clay*, Géotechnique, **56**, 8, pp. 523-537.
- Soilmoisture Equipment Corporation (SEC), 2003, *Commercial publications*, SEC, Santa Barbara, CA.
- Sowers, G. F., Williams, R. C., Wallace, T. S., 1965, *Compressibility of broken rock and settlement of rockfill*, Proc. 6<sup>th</sup> ICSMFE, Vol. 2, pp. 561-565.
- Spanner, D. C., 1951, *The Peltier effect and its use in the measurement of suction pressure*, Journal of Experimental Botany, **2**, pp. 145-168.
- Springman, S. M., Jommi, C., Teyssie, P., 2003, *Instabilities on moraine slopes induced by loss of suction: a case history*, Géotechnique, **53**, 1, pp. 3-10.
- Stannard, D. I., 1992, *Tensiometers – Theory, Construction and Use*, Geotechnical Testing Journal, **15**, 1, pp. 48-58.
- Stark, T. D., Eid, H. T., 1994, *Drained residual strength of cohesive soils*, J. of Geotech. Engng, ASCE, **120**, 5, pp. 856-871.
- Stropeit, K., Wheeler, S., Cui, Y.-J., 2008, *An anisotropic elasto-plastic model for unsaturated soils*, Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering, Toll et al. (eds), Proc. 1st Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Durham, UK, 2-4 July, 2008, pp. 625-632.
- Suraj de Silva, G. P. R., 1987, *Etude expérimentale du comportement d' un limon non saturé sous succion contrôlée*, Thèse de doctorat, Ecole des Ponts et Chaussées, Paris.
- Tabor, D., 1979, *Gases, liquids and solids*, 2<sup>nd</sup> Ed., Cambridge University Press.
- Taha, M. R., Hossain, M. K., Mofiz, S. A., 2000, *Shear strength behaviour of unsaturated granite residual soil*, Rahardjo, H., Toll, D. G. & Leong, E. C. (eds), Proc. 1<sup>st</sup> Asian Conf. on Unsaturated Soils, Singapore, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 575-580.
- Taibi, S., Ghembaza, M. S., Fleureau, J. M., 2005, *On the suction control techniques in studying the THM behavior of unsaturated soils*, Proc. Int. Symp. on Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics, Balkema, pp. 69-75.
- Take, W. A., Bolton, M. D., 2003, *Tensiometer saturation and the reliable measurement of soil suction*, Géotechnique, **53**, 2, pp. 159-172.
- Tamagnini, R., 2004, *An extended Cam-clay model for unsaturated soils with hydraulic hysteresis*, Géotechnique, **54**, 3, pp. 223-228.
- Tami, D., Rahardjo, H., Leong, E. C., Fredlund, D. G., 2004, *A physical model for sloping capillary barriers*, Geotech. Testing J., ASTM International, **27**, 2, pp. 173-183.
- Tang, A. M., Cui, Y. J., De Laure, E., Lassabatère, T., 2006, *Developing a new suction and temperature controlled isotropic cell for studying the thermo-mechanical behaviour of compacted MX80 clay*, 4<sup>th</sup> International Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, USA, April 2-5 2006, Vol. 2, pp. 1799-1810.
- Tang, G. X., Graham, J., 2002, *A possible elastic-plastic framework for unsaturated soils with high plasticity*, Can. Geotech. J., **39**, pp. 894-907.
- Tarantino, A., 2003, *Closure to discussion*, Int. Conf. "From Experimental Evidence towards Numerical Modelling of Unsaturated Soils", Bauhaus Universität, Weimar, 18-19



- September 2003.
- Tarantino, A., 2004α, *Discussion to 'Tensiometer saturation and the reliable measurement of soil suction'*, *Géotechnique*, **54**, 3, pp. 229-232.
- Tarantino, A., 2004β, *Direct measurement of soil water tension*, in Jucá, J. F. T., de Campos, T. M. P., Marinho, F. A. M., (eds), *proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Vol. 3, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 1005-1017.
- Tarantino, A., 2009, *A water retention model for deformable soils*, *Géotechnique*, **59**, 9, pp. 751-762.
- Tarantino, A., Mongiovi, L., 2000, *Experimental investigations on the stress variables governing unsaturated soil behaviour at medium to high degrees of saturation*, in A. Tarantino, C. Mancuso (eds), *Experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils*, *Proceeding of an international workshop*, A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 1-22.
- Tarantino, A., Mongiovi, L., 2000, *A study of the efficiency of semi-permeable membranes in controlling soil matrix suction using the osmotic technique*, in Rahardjo et al. (eds), "Unsaturated Soils for Asia", A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 303-308.
- Tarantino, A., Mongiovi, L., 2001, *Experimental procedures and cavitation mechanisms in tensiometer measurements*, *Geotechnical and Geological Engineering*, **19**, 3, pp. 189-210.
- Tarantino, A., Mongiovi, L., 2002, *Design and construction of a tensiometer for direct measurement of matric suction*, in Jucá, J. F. T., de Campos, T. M. P., Marinho, F. A. M., (eds), *proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils*, Vol. 1, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 319-324.
- Tarantino, A., Mongiovi, L., 2003, *Calibration of tensiometer for direct measurement of matric suction*, *Géotechnique*, **53**, 1, pp. 137-141.
- Tarantino, A., Tombolato, S., 2005, *Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clay*, *Géotechnique*, **55**, 4, pp. 307-317.
- Tarantino, A., Mongiovi, L., Bosco, G., 2000, *An experimental investigation on the independent isotropic stress variables for unsaturated soils*, *Géotechnique*, **50**, 3, pp. 275-282.
- Temperley, R. N. V., Chambers, L. G., 1946, *The behaviour of water under hydrostatic tension*, *Proc. Physics Society*, **58**, pp. 420-436.
- Terzaghi, K., 1925, *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*, Franz Deuticke, Leipzig und Wien.
- Terzaghi, K., 1928, *The physical properties of clays*, M.I.T., *Tech. Eng. News*, **9**: 10, 11, 36.
- Terzaghi, K., 1936, *The shearing resistance of saturated soils*, *Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Soil Mech. Found. Engng*, Cambridge, MA, Vol. 1, pp. 54-56.
- Terzaghi, K., 1960, *Discussion on Salt Springs and Lower Bear River Dams*, *Trans. ASCE*, **125**, Part 2, pp. 139-148.
- Thomas, H. R., He, Y., 1998, *Modelling the behaviour of unsaturated soil using an elastoplastic constitutive model*, *Géotechnique*, **48**, 5, pp. 589-603.
- Thomson, W., 1871, *Philosophical Magazine*, **42**, pp. 448.
- Thu, T. M., Rahardjo, H., Leong, E. C., 2007, *Soil-water characteristic curve and consolidation behavior for a compacted silt*, *Can. Geot. J.*, **44**, pp. 266-275.
- Tika, T. E., Vaughan, P., Lemos, L. J., 1996, *Fast shearing of pre-existing shear zones in soil*, *Géotechnique*, **46**, 2, pp. 197-233.
- Tinjum, J. M., Benson, C. H., Blotz, L. R., 1997, *Soil-water characteristic curves for compacted clays*, *ASCE J. Geotech. Geoenvironmental Engng*, **123**, 11, pp. 1060-1069.
- Toker, N. K., Germaine, J. T., Sjoblom, K. J., Culligan, P. J., 2004, *A new technique for rapid measurement of continuous soil moisture characteristic curves*, *Géotechnique*, **54**, 3, pp. 179-186.
- Toll, D. G., 1990, *A framework for unsaturated soil behaviour*, *Géotechnique*, **40**, 1, pp. 31-44.
- Toll, D.G., 1995, *A conceptual model for the drying and wetting of soil*, in Alonso & Delage

- (eds), Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, Paris, 2: 805-810, Rotterdam: Balkema.
- Toll, D. G., 2000, *The influence of fabric on the shear behaviour of unsaturated compacted soils*, in Shackelford, C. D., Houston, S. L., Chang, N. Y., “Advances in Unsaturated Geotechnics”, GSP 99, ASCE, Reston, Virginia, pp. 222-234.
- Toll, D. G., 2004, *The critical state in unsaturated soils*, in Juca et al. (eds), proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, Recife, Brazil, Swets & Zeitlinger, Lisse, Vol. 3, pp. 999-1003.
- Toll, D. G., Ong, B. H., 2000, *Critical state parameters for unsaturated soils*, proc. 4<sup>th</sup> Int. Congress on Advances in Civil Engng, Cyprus, 1, pp. 33-44.
- Toll, D. G., Ong, B. H., 2003, *Critical state parameters for an unsaturated residual sandy clay*, Géotechnique, **53**, 1, pp. 93-103.
- Τόλης, Σ., Καβουνίδης, Σ., 2004, *Για το υπέδαφος στην περιοχή του ΟΑΚΑ*, ΕΕΕΕΓΜ: Ημερίδα «Τα θεμέλια των Ολυμπιακών Αγώνων της Αθήνας 2004», Αθήνα, 2004.
- Τόλης, Σ., Καβουνίδης, Σ., Μπαρδάνης, Μ., 2006, *Γεωτεχνικές ιδιότητες της Αργίλου του Αμαρουσίου*, Πρακτ. 5<sup>ου</sup> Παν. Συν. Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, 31 Μαΐου-2 Ιουνίου 2006, Τόμος 1, σελ. 293-300.
- Topp, G. C., Miller, E. E., 1966, *Hysteresis moisture characteristics and hydraulic conductivities for glass-bead media*, J. Soil Science, **30**, pp. 156-162.
- Topp, G. C., Davis, J. L., Annan, A. P., 1980, *Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines*, Water Resources Research, **16**(3), pp. 574-582.
- Truong, H. V. P., Holden, J. C., 1995, *Soil suction measurement with transistor psychrometer*, proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Uns. Soils, Paris 1995, Alonso, E. E., Delage, P. (eds), A. A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 659-665.
- Tsaras, I., Rahardjo, H., Toll, D. G., Leong, E. C., 2003, *Infiltration characteristics of two instrumented residual soil slopes*, Can. Geotech. J., **40**, 5, pp. 1012-1032.
- U.S.D.A., 1950, *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*, Agricultural Handbook, n. 60.
- van der Raadt, P., Fredlund, D. G., Clifton, A. W., Klassen, M. J., Jubien, W. E., 1987, *Soil suction measurement at several sites in Western Canada*, Transportation Research Record, **1137**, pp. 24-35.
- van Genuchten, M. Th., 1980, *A closed form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*, Soil Science Society of America Journal, vol. 44, pp. 892-898.
- van Haveren, B. P., Brown, R. W., 1972, *The properties and behaviour of water in the soil-plant-atmosphere continuum*, in Brown, R. W., van Haveren, B. P. (eds), Psychrometry in Water Relations Research, Utah Agric. Experimental Station, Utah State Univ., Logan, pp. 1-27.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., Clifton, A. W., 1996, *Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction*, Can. Geotech. J., **33**, pp. 379-392.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., 1999, *The influence of soil structure and stress history on the soil-water characteristic curves of a compacted till*, Géotechnique, **49**, 2, pp. 143-159.
- Vaunat, J., Romero, E., Jommi, C., 2000, *An elastoplastic hydro-mechanical model for unsaturated soils*, in Tarantino & Mancuso (eds), “Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils”, 2000, Balkema, Rotterdam, pp. 121-138.
- Vaunat, J., Amador, C., Romero, E., Djeran-Maigre, I., 2006, *Residual strength of a low plasticity clay at high suctions*, 4<sup>th</sup> International Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, USA, April 2-5 2006, Vol. 1, pp. 1279-1289.
- Vaunat, J., Merchán, V., Romero, E., Pineda, J., 2007, *Residual strength of clays at high suctions*, in T., Schanz (Ed.), Theoretical and Numerical Unsaturated Soil Mechanics, Proc. of the Int. Conf. “Mechanics of Unsaturated Soils”, Weimar, 7-9 March 2007,

- Springer, Berlin, Vol. II, pp. 151-163.
- Vilar, O. M., 2006, *A simplified procedure to estimate the shear strength envelope of unsaturated soils*, Can. Geotech. J., **43**, 10, pp. 1088-1095.
- Watson, K. K., 1967, *A recording field tensiometer with rapid response characteristics*, Journal of Hydrology, **5**, pp. 33-39.
- Wagner, L. E., Ding, D., 1994, *Representing aggregate size distributions as modified lognormal distributions*, American Society of Agricultural Engineers, **37**, 3, pp. 815-821.
- Wesley, L. D., 2003, *Residual strength of clays and correlations using Atterberg limits*, Géotechnique, **53**, 7, pp. 669-672.
- Wheeler, S. J., 1988, *The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles*, Géotechnique, **38**, pp. 399-413.
- Wheeler, S. J., 1990, *An alternative framework for unsaturated soil behaviour*, Géotechnique, **41**, pp. 257-261.
- Wheeler, S. J., 1997, *A rotational hardening elasto-plastic model for clays*, proc. 14<sup>th</sup> ICSMFE, Hamburg, Vol. 1, pp. 431-434.
- Wheeler, S. J., 2006, *Constitutive modeling of unsaturated soils*, Keynote lecture delivered at the 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Unsaturated Soils, 2-6 April 2006, Carefree, Arizona, USA.
- Wheeler, S. J., Sivakumar, V., 1995, *An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soils*, Géotechnique, **45**, 1, pp. 35-53.
- Wheeler, S. J., Sivakumar, V., 2000, *Influence of compaction procedure on the mechanical behaviour of an unsaturated compacted clay. Part 2: shearing and constitutive modelling*, Géotechnique, **50**, 4, pp. 369-376.
- Wheeler, S. J., Sharma, R. S., Buisson, M. S. R., 2003, *Coupling of hydraulic hysteresis and stress-strain behaviour in unsaturated soils*, Géotechnique, **53**, 1, pp. 41-54.
- Wheeler, S. J., Nääätänen, A., Karstunen, M., Lojander, M., 2003, *An anisotropic elastoplastic model for soft clays*, Can. Geotech. J., **40**, 2, pp. 403-418.
- Whitney, M., Gardner, F. D., Briggs, L. J., 1897, *An electrical method of determining the moisture content of arable soil*, Dep. Bull. US Dept. Agric., No. 6.
- Wiederhold, P., 1997, *Water vapor measurement methods and instrumentation*, Marcel Dekker, New York.
- Williams, J. , Shaykewich, C. F., 1969, *An evaluation of polyethylene glycol (PEG) 6000 and PEG 20000 in the osmotic control of soil matric potential*, Can. J. Soil Sci., **102**, 6, pp. 394-398.
- Willis, M. R., Hamilton, P. S., 1996, *Prospect Park: A study of tectonic shear zones in the London clay*, MSc Dissertation, Imperial College of Science, Technology and medicine.
- Wind, G. P., 1955, *Field experiment concerning capillary rise of moisture in heavy clay soil*, Neth. J. Agric. Sci., **3**, pp. 60-69.
- Woodburn, J. A., Lucas, B., 1995, *New approaches to the laboratory and field measurement of soil suction*, proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Uns. Soils, Paris 1995, Alonso, E. E., Delage, P. (eds), A. A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 667-671.
- Woodburn, J. A., Holden, J. C., Peter, P., 1993, *The transistor psychrometer – A new instrument for measuring soil suction*, proc. ASCE Convention on Unsaturated Soils, Dallas, pp. 91-102.
- Yang, S. L., Lacasse, S., Sandven, R. F., 2006, *Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines*, Geotechnical Testing Journal, **29**, 2, pp. 102- 107.
- Yang, C., Huang, M. S., Cui, Y.-J., 2010, *Constitutive model of unsaturated structured soils under cyclic loading*, in Alonso, E. E. & Gens, A. (eds), proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Unsaturated Soils, Barcelona, Spain, Vol. 2, pp. 987-992.
- Yang, H., Rahardjo, H., Leong, E. C., Fredlund, D. G., 2004a, *A study of infiltration on three sand capillary barriers*, Can. Geotech. J., **41**, pp. 629-643.

- Yang, H., Rahardjo, H., Leong, E. C., Fredlund, D. G., 2004β, *A soil column apparatus for laboratory infiltration study*, Geotech. Testing J., ASTM International, **27**, 4, pp. 347-355.
- Yasufuku, N., Ochiai, H., Hormdee, D., 2005, *An empirical relationship for evaluating collapsible settlements of volcanic ash sandy soil*, in Tarantino, A., Romero, E., Cui, Y. J. (eds), *Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Taylor & Francis Group, London, pp. 265-272.
- Young, J. F., 1967, *Humidity control in the laboratory using salt solutions – A review*, Journal of Applied Chemistry, **17**, pp. 241-245.
- Young, T., 1805, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **95**, 65.
- Yuster, S. T., 1951, *Theoretical considerations of multiphase flow in idealized capillary systems*, proc. 3<sup>rd</sup> World Petroleum Congress, Vol. 2, pp. 437-445.
- Zakaria, I., Wheeler, S. J., Anderson, W. F., 1995, *Yielding of unsaturated compacted kaolin*, proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Uns. Soils, Paris 1995, Alonso, E. E., Delage, P. (eds), A. A. Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 223-228.
- Zapata, C. E., Houston, W. N., Houston, S. L., Walsh, K. D., 2000, *Soil-Water Characteristic Curve Variability*, in Shackelford, C. D., Houston, S. L., Chang, N. Y., “Advances in Unsaturated Geotechnics”, GSP 99, ASCE, Reston, Virginia, pp. 84-124.
- Zerhouni, M. I., 1995, *Triaxial testing using psychrometers*, proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Uns. Soils, Paris 1995, Alonso, E. E., Delage, P. (eds), A. A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 673-678 (στα γαλλικά).
- Zhan, T. L. T., Ng, C. W. W., Fredlund, D. G., 2007, *Field study of rainfall infiltration into a grassed unsaturated expansive soil slope*, Can. Geotech. J., **44**, 4, pp. 392-408.
- Zollinger, W. D., Cambell, G. S., Taylor, S. A., 1966, *A comparison of water potential measurements made using two types of thermocouple psychrometer*, Soil Science, **102**, 4, pp. 231-239.
- Zur, B., 1966, *Osmotic control of the matric soil-water potential*, Soil Sci., **102**, pp. 394-398.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## ΠΡΟΤΑΘΕΙΣΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

### Α.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Ο Burland (1990) όρισε τον δείκτη κενών  $I_v$  ως εξής:

$$I_v = \frac{e - e^*_{100}}{e^*_{100} - e^*_{1000}} = \frac{e - e^*_{100}}{C_c^*} \quad (\text{A.1})$$

και τον χρησιμοποίησε για την κανονικοποίηση των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης. Τη μία και μοναδική καμπύλη στην οποία συμπίπτουν όλες οι κανονικοποιημένες καμπύλες μονοδιάστατης συμπίεσης την ονόμασε Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (ΓΕΣ). Οι μέχρι σήμερα προταθείσες εξισώσεις για τη γραμμή εγγενούς συμπίεσης είναι αυτές των Burland (1990), Chandler (2000) και Bardanis (1999). Οι εξισώσεις αυτές είναι αντίστοιχα:

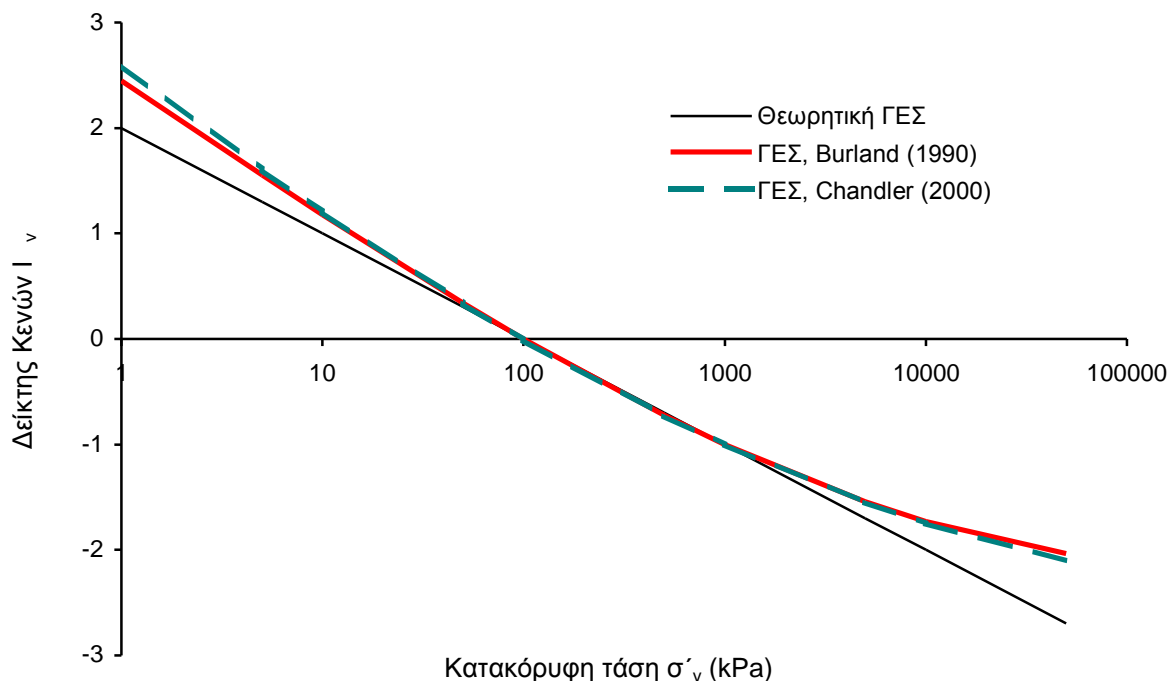
$$I_v = 2.45 - 1.285x + 0.015x^3 \quad (\text{A.2})$$

$$I_v = 2.6 - 1.475x + 0.075x^2 + 0.0055x^3 \quad (\text{A.3})$$

$$I_v = 2 - x \quad (\text{A.4})$$

όπου  $x = \log \sigma'_v$  ( $\sigma'_v$  σε kPa). Οι Εξισώσεις A.2 και A.3 έχουν προκύψει μετά από στατιστική επεξεργασία πειραματικών δεδομένων από δοκιμές σε αργιλικά εδαφικά υλικά με όρια Atterberg πάνω από τη «Γραμμή Α» στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande, ενώ η Εξ. A.4 έχει αποδειχθεί αναλυτικά (βλ. Κεφάλαιο 10).

Η ύπαρξη τριών διαφορετικών εξισώσεων για τη γραμμή εγγενούς συμπίεσης οδηγεί στην ανάγκη αξιολόγησης της απόστασης των προβλέψεών τους για τις ίδιες τιμές της κατακόρυφης τάσης. Στον Πίν. Α.1 παρατίθενται τιμές του λόγου κενών υπολογισμένες από τις Εξ. Α.2, Α.3 και Α.4 για διάφορες τιμές της κατακόρυφης ενεργού τάσης από 1 έως 100000 kPa και στο Σχ. Α.1 παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις των τριών εξισώσεων για τιμές της κατακόρυφης ενεργού τάσης στο ίδιο εύρος τιμών. Όπως προκύπτει από τις παρατιθέμενες στον Πίν. Α.1 τιμές του δείκτη κενών και την σύγκριση των γραφικών παραστάσεων των τριών εξισώσεων στο Σχ. Α.1 οι διαφορές στις προβλέψεις των Εξισώσεων Α.2 και Α.3 είναι πολύ μικρές αλλά σημαντικές σε σχέση με τις προβλέψεις της Εξ. Α.4 ιδίως εκτός του εύρους τιμών τάσης 50 έως 5000 kPa. Κύρια διαφορά είναι η ελαφρά καμπυλότητα προς τα πάνω των γραφικών παραστάσεων των εξισώσεων των Burland (1990) και Chandler (2000) η οποία επιτρέπει την επιτυχή πρόβλεψη της παρατηρηθείσας καμπύλωσης των εγγενών γραμμών εγγενούς συμπίεσης για πολύ υψηλές τιμές της τάσης. Κατά τα άλλα η αντίστοιχη προβλεπόμενη καμπύλωση για χαμηλές τιμές της τάσης από τις ίδιες εξισώσεις συνιστά μειονέκτημα εν όψει των πειραματικών αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 13.



**Σχήμα Α.1.** Γραφική απεικόνιση των συσχετίσεων που περιγράφουν τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (ΓΕΣ).

**Πίνακας Α.1.** Προβλεπόμενες τιμές του Δείκτη Κενών από τις εξισώσεις για τη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης.

Κατακόρυφη τάση $\sigma'_v$ (kPa)	Δεκαδικός λογάριθμος κατακόρυφης τάσης $\log \sigma'_v$	Δείκτης κενών		
		Burland (1990)	Chandler (2000)	Bardanis (1999)
1	0,000	2,450	2,600	2,000
4	0,602	1,680	1,740	1,398
10	1,000	1,180	1,206	1,000
40	1,602	0,453	0,452	0,398
100	2,000	0,000	-0,006	0,000
400	2,602	-0,629	-0,633	-0,602
1000	3,000	-1,000	-1,002	-1,000
4000	3,602	-1,478	-1,483	-1,602
10000	4,000	-1,730	-1,748	-2,000
40000	4,602	-2,002	-2,064	-2,602
100000	5,000	-2,100	-2,213	-3,000

## A.2 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΕΙΚΤΗ ΚΕΝΩΝ

Αν αντί των τιμών του λόγου κενών στις τιμές της κατακόρυφης τάσης 100 και 1000 kPa χρησιμοποιηθούν για την κανονικοποίηση των εγγενών καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης οι εγγενείς τιμές του λόγου κενών σε δύο τυχαίες τιμές της τάσης  $a$  και  $b$  (και οι δύο σε kPa) τέτοιες ώστε  $a < b$  και  $C_c^* = (e^*_b - e^*_a) / (\log_{10}a - \log_{10}b)$ , τότε η νέα παράμετρος κανονικοποίησης  $I_v'$  έχει τη μορφή της Εξ. Α.5 και συνδέεται με την τιμή του δείκτη κενών όπως περιγράφεται από την Εξ. Α.1 μέσω της Εξ. Α.6.

$$I_v' = \frac{e - e^*_a}{e^*_a - e^*_b} \quad (\text{A.5})$$

$$I_v = 2 + I_v' \log (b/a) - \log a \quad (\text{A.6})$$

Στην ειδική περίπτωση που συμβαίνει  $b/a = 10$  η Εξ. Α.6 γίνεται:

$$I_v = 2 + I_v' - \log a \quad (\text{A.7})$$

και στην ειδική περίπτωση που συμβαίνει  $a = 100$  kPa η Εξ. Α.6 γίνεται:

$$I_v = I'_v \log (b/a) \quad (\text{A.8})$$

Προφανώς στην περίπτωση που συμβαίνει  $a = 100 \text{ kPa}$  και  $b = 1000 \text{ kPa}$  γίνεται  $I_v = I'_v$ .

### A.3 ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΚΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΓΡΑΜΜΗ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Αναδιατάσσοντας την Εξ. A.1 ως προς τον λόγο κενών  $e$  προκύπτει η Εξ. A.9:

$$e = I_v C_c^* + e^*_{100} \quad (\text{A.9})$$

με βάση την οποία αν είναι γνωστή η τιμή του δείκτη κενών  $I_v$  για δεδομένη τάση (με χρήση κάποιας εξίσωσης για τη γραμμή εγγενούς συμπίεσης) και οι τιμές του εγγενούς δείκτη συμπίεσης  $C_c^*$  και του εγγενούς λόγου κενών για κατακόρυφη ενεργό τάση  $100 \text{ kPa}$ ,  $e^*_{100}$ , τότε είναι δυνατόν να προβλεφθεί για την τάση αυτή ο εγγενής λόγος κενών. Αναγνωρίζοντας την χρησιμότητα αυτή της γραμμής εγγενούς συμπίεσης, ο Burland (1990) πρότεινε δύο εμπειρικές εξισώσεις για τον εγγενή δείκτη συμπίεσης  $C_c^*$  (Εξ. A.10) και τον εγγενή λόγο κενών για κατακόρυφη ενεργό τάση  $100 \text{ kPa}$   $e^*_{100}$  (Εξ. A.11). Σημειώνεται και πάλι ότι οι Εξ. A.10 και A.11 έχουν προκύψει μετά από στατιστική επεξεργασία πειραματικών δεδομένων από δοκιμές σε αργιλικά εδαφικά υλικά με όρια Atterberg πάνω από τη «Γραμμή A» στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande.

$$C_c^* = 0.256 e_L - 0.04 \quad (\text{A.10})$$

$$e^*_{100} = 0.109 + 0.679 e_L - 0.089 e_L^2 + 0.016 e_L^3 \quad (\text{A.11})$$

Το μέγεθος  $e_L$  είναι η τιμή του λόγου κενών ενός αργιλικού υλικού θεωρούμενου ως πλήρως κορεσμένου για ποσοστό υγρασίας ίσο με το όριο υδαρότητάς του,  $w_L$  ( $e_L = G_s \cdot w_L$ , όπου  $G_s$  το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών). Υποθέτοντας μία μέση τιμή του ανηγμένου ειδικού βάρους στερεών ίση με 2.65, από την Εξ. A.10 προκύπτει προσεγγιστικά η Εξ. A.12 (Μπαρδάνης & Καβουνίδης, 2001α) για το όριο υδαρότητας εκπεφρασμένο ως ποσοστό επί τοις εκατό η οποία ομοιάζει προς άλλες εμπειρικές συσχετίσεις που έχουν προταθεί για την τιμή του δείκτη συμπίεσης.



$$C_c^* = 0.0068 w_L - 0.04 = 0.0068 (w_L - 5.9) \quad (\text{A.12})$$

Εναλλακτικά της Εξ. Α.11 για τον εγγενή λόγο κενών στα 100 kPa ο Chandler (2000) πρότεινε την Εξ. Α.13 που οδηγεί σε διαφορές στην τιμή του  $e^*_{100}$  κατά μέγιστο 5% από τις προβλεπόμενες τιμές από την Εξ. Α.11 για τιμές του ορίου υδαρότητας από 25% έως 170% και της οποίας τη χρήση προτείνει για τιμές του ορίου υδαρότητας μεγαλύτερες του 170%.

$$e^*_{100} = 0.114 + 0.581 e_L \quad (\text{A.13})$$

Σε ό,τι αφορά εναλλακτικές εξισώσεις των Α.10 και Α.12 για τον εγγενή δείκτη συμπίεσης, οι Μπαρδάνης & Καβουνίδης (2001α) συγκέντρωσαν τις διατυπωθείσες εμπειρικές συσχετίσεις για τον δείκτη συμπίεσης και τις αξιολόγησαν. Άλλες εξισώσεις για το δείκτη συμπίεσης έχουν προταθεί για φυσικές αργίλους και άλλες για αναζυμωμένες αργίλους. Οι εξισώσεις που έχουν προταθεί για αναζυμωμένες αργίλους εκτός από αυτή του Burland (1990) είναι εκείνες του Skempton (1944) και των Matsui & Sakagami (1995) οι οποίες συσχετίζουν το δείκτη συμπίεσης αναζυμωμένων αργίλων με το όριο υδαρότητας και εκείνες των Schofield & Wroth (1968) και των Nakase, et al. (1988) που τον συσχετίζουν με τον δείκτη πλαστικότητας. Οι συσχετίσεις αυτές είναι αντίστοιχα:

$$C_c^* = 0.007 (w_L - 10) \quad (\text{A.14})$$

$$C_c^* = 0.0066 (w_L - 9.8) \quad (\text{A.15})$$

$$C_c^* = 0.0135 I_p \quad (\text{A.16})$$

$$C_c^* = 0.046 + 0.0104 I_p \quad (\text{A.17})$$

Προς απλούστευση του υπολογισμού του μέσου όρου του δείκτη συμπίεσης που προβλέπεται από τις Εξ. Α.12, Α.14 και Α.15 οι Μπαρδάνης & Καβουνίδης (2001α) πρότειναν την Εξ. Α.18 που τον δίνει απευθείας.

$$C_c^* = 0.0068 (w_L - 8.57) \quad (\text{A.18})$$

Ο Burland (1990) προτείνει να αποφεύγεται η συσχέτιση των παραμέτρων εγγενούς συμπίεστικότητας  $C_c^*$  και  $e_{100}^*$  με τον δείκτη πλαστικότητας  $I_p$ , καθώς αν και η συσχέτισή τους με την παράμετρο αυτή είναι αρκετά καλή για υψηλές τιμές της, στις χαμηλές τιμές του δείκτη πλαστικότητας τα λάθη στον υπολογισμό του μπορεί να είναι μεγαλύτερα λόγω της ταυτόχρονης επιρροής λάθους υπολογισμού στον υπολογισμό και του ορίου υδαρότητας και του ορίου πλαστικότητας. Επισημαίνει επίσης ότι εκτός του ότι οι προτεινόμενες από αυτόν εξισώσεις έχουν προκύψει μετά από στατιστική επεξεργασία πειραματικών δεδομένων από δοκιμές σε αργιλικά εδαφικά υλικά με όρια Atterberg πάνω από τη «Γραμμή Α» στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande, μία άλλη ιδιαιτερότητά τους είναι ότι τα αργιλικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είχαν αναζυμωθεί σε ποσοστό υγρασίας 1.0 έως 1.5 φορές το όριο υδαρότητάς τους. Συγκρίνοντας τις προβλέψεις των Εξ. Α.10 και Α.12 στις οποίες κατέληξε με τα πειραματικά αποτελέσματα των Nakase, et al. (1988), οι οποίοι πραγματοποίησαν δοκιμές σε αργιλικά υλικά αναζυμωμένα σε πολύ υψηλότερες τιμές του ποσοστού υγρασίας, διαπίστωσε ότι ενώ η πρόβλεψη του εγγενούς δείκτη συμπίεσης μέσω της Εξ. Α.10 είναι πάρα πολύ καλή, η Εξ. Α.11 υποεκτιμά τις τιμές του εγγενούς λόγου κενών στα 100 kPa ως αποτέλεσμα του υψηλότερου ποσοστού υγρασίας αναζύμωσης. Η επιρροή του αρχικού ποσοστού υγρασίας πολλών αναζυμωμένων αργίλων διερευνάται διεξοδικά στο Κεφάλαιο 13. Τέλος, από το μοναδικό αργιλικό υλικό από αυτά που χρησιμοποίησε ο ίδιος και από το μοναδικό στα αργιλικά υλικά που χρησιμοποίησαν οι Nakase, et al. (1988) με όρια Atterberg κάτω από τη «Γραμμή Α» στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande, παρατήρησε ότι οι Εξ. Α.10 και Α.11 υπερεκτιμούν ελαφρώς και υποτιμούν σημαντικά τον εγγενή δείκτη συμπίεσης και τον εγγενή λόγο κενών στα 100 kPa τέτοιων αργιλικών εδαφών αντίστοιχα. Ο Dineen (1997) μάλιστα με βάση δικά του πειραματικά αποτελέσματα σε αργιλικά υλικά με όρια Atterberg κάτω από τη «Γραμμή Α» στο διάγραμμα πλαστικότητας του Casagrande και τα αντίστοιχα του Schreiner (1991) πρότεινε εναλλακτικά της Εξ. Α.11 για τον εγγενή λόγο κενών στα 100 kPa κατακόρυφης τάσης την Εξ. Α.19 η οποία διορθώνει τις προβλέψεις του εγγενούς λόγου κενών για τέτοια υλικά.

$$e_{100}^* = 0.409 + 0.679 e_L - 0.089 e_L^2 + 0.016 e_L^3 \quad (\text{A.19})$$

Η διαφορά της Εξ. Α.19 από την Εξίσωση Α.11 βρίσκεται μόνο στο σταθερό όρο, ο οποίος είναι μεγαλύτερος. Η εξίσωση αυτή λοιπόν αναπαριστά απλώς γραμμή παράλληλα μετατεθειμένη ως προς τη γραμμή που αναπαριστά η Εξ. Α.11.

#### **A.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Η χρήση των Εξ. Α.9 έως Α.11 (ή κάποιας από τις εναλλακτικές εξισώσεις που παρατέθηκαν για την πρόβλεψη του εγγενούς δείκτη συμπίεσης και του εγγενούς λόγου κενών στα 100 kPa) σε συνδυασμό με κάποια από τις Εξ. Α.2 έως Α.4 επιτρέπει την εμπειρική πρόβλεψη της τιμής του εγγενούς λόγου κενών ενός αργιλικού υλικού για κάθε τιμή κατακόρυφης ενεργού τάσης. Προφανώς η χρήση των εξισώσεων των Burland (1990) και Chandler (2000) για την εκτίμηση του εγγενούς δείκτη κενών οδηγεί στην πρόβλεψη εγγενών καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης με τα κοίλα στραμμένα προς τα πάνω (όπως ακριβώς προβλέπουν και οι εξισώσεις αυτές για τον εγγενή δείκτη κενών), ενώ η χρήση της εξίσωσης του Bardanis (1999) για τη Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης οδηγεί στην πρόβλεψη εγγενών καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης που είναι ευθείες. Κατά τη διαδικασία εμπειρικής πρόβλεψης των καμπυλών μονοδιάστατης συμπίεσης ( $e-s'_v$ ) μέσω των εξισώσεων που παρατίθενται συγκεντρωμένες στο παρόν παράρτημα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί και οι παρατηρήσεις που αναφέρθηκαν, καθώς και τα συμπεράσματα των Κεφαλαίων 10 και 13, στα οποία παρατίθενται αποτελέσματα αναλυτικών και εργαστηριακών διερευνήσεων των περισσότερων από τα ερωτηματικά που συνοδεύουν τις προταθείσες κατά το παρελθόν εξισώσεις. Η χρήση δε της ημιεμπειρικής εξίσωσης για τη Γενικευμένη Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης (Κεφάλαια 10 και 13) που εκφυλίζεται υπό προϋποθέσεις στην εξίσωση για τη Θεωρητική Γραμμή Εγγενούς Συμπίεσης αποτελεί ένα πολύ πιο ολοκληρωμένο εργαλείο για την περιγραφή της συμπεριφοράς των αναζυμωμένων λεπτόκοκκων εδαφών.



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

## ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΜΕ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΑΓΝΩΣΤΟΥΣ. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ ΚΑΙ $\delta$ ΤΗΣ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΕΓΓΕΝΟΥΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται η επίλυση του γραμμικού συστήματος τεσσάρων εξισώσεων με τέσσερις αγνώστους που διατυπώθηκε στο Κεφάλαιο 10 για τον υπολογισμό των τιμών των σταθερών  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$ . Οι τέσσερις εξισώσεις με αγνώστους  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  είναι:

$$\alpha + 2\beta + 2^2\gamma + 2^3\delta = 0$$

$$\alpha + 3\beta + 3^2\gamma + 3^3\delta = -1$$

$$\alpha + \Delta\beta + \Delta^2\gamma + \Delta^3\delta = \Delta - 3$$

$$\beta + 2\Delta\gamma + 3\Delta^2\delta = -1$$

Ορίζοντας την παράμετρο  $\Delta$  ως  $dd$  στο Mathcad 7 Professional της MathSoft και σχηματίζοντας τους πίνακες  $ar(dd)$  και  $de(dd)$  με τους συντελεστές των αγνώστων και τους σταθερούς όρους των εξισώσεων αντίστοιχα, υπολογίστηκε αρχικά ο αντίστροφος του πίνακα  $ar(dd)$ ,  $anti(dd)$ , ο οποίος πολλαπλασιαζόμενος με τον πίνακα-στήλη  $de(dd)$  οδήγησε στον πίνακα  $solu(dd)$  με τις λύσεις των  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  ως προς  $\Delta$  ( $dd$ ). Στη συνέχεια οι εξισώσεις για τις σταθερές της γενικευμένης γραμμής εγγενούς συμπίεσης επιλύθηκαν (εξισώσεις τους ίσες με το 0). Ακολουθούν τα στάδια αυτής της επίλυσης στο Mathcad.

Οι πίνακες  $ar(dd)$  και  $de(dd)$  με τους συντελεστές των αγνώστων και τους σταθερούς όρους των εξισώσεων αντίστοιχα:

$$ar(dd) := \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2^2 & 2^3 \\ 1 & 3 & 3^2 & 3^3 \\ 1 & dd & dd^2 & dd^3 \\ 0 & 1 & 2 \cdot dd & 3 \cdot dd^2 \end{bmatrix} \quad de(dd) := \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ dd - 3 \\ -1 \end{bmatrix}$$

Ο αντίστροφος του πίνακα  $ar(dd)$ ,  $anti(dd)$ :

$$anti(dd) := ar(dd)^{-1} dd = \begin{bmatrix} 3 \frac{dd^2}{(dd^2 - 4 \cdot dd + 4)} & -2 \frac{dd^2}{(dd^2 - 6 \cdot dd + 9)} & 6 \frac{(3 \cdot dd^2 - 10 \cdot dd + 6)}{(dd^4 - 10 \cdot dd^3 + 37 \cdot dd^2 - 60 \cdot dd + 36)} & -6 \frac{dd}{(dd^2 - 5 \cdot dd + 6)} \\ -(dd + 6) \frac{dd}{(dd^2 - 4 \cdot dd + 4)} & (dd + 4) \frac{dd}{(dd^2 - 6 \cdot dd + 9)} & -dd \frac{(15 \cdot dd - 38)}{(dd^4 - 10 \cdot dd^3 + 37 \cdot dd^2 - 60 \cdot dd + 36)} & \frac{(5 \cdot dd + 6)}{(dd^2 - 5 \cdot dd + 6)} \\ \frac{(2 \cdot dd + 3)}{(dd^2 - 4 \cdot dd + 4)} & -2 \frac{(dd + 1)}{(dd^2 - 6 \cdot dd + 9)} & \frac{(3 \cdot dd^2 - 19)}{(dd^4 - 10 \cdot dd^3 + 37 \cdot dd^2 - 60 \cdot dd + 36)} & \frac{-(dd + 5)}{(dd^2 - 5 \cdot dd + 6)} \\ \frac{-1}{(dd^2 - 4 \cdot dd + 4)} & \frac{1}{(dd^2 - 6 \cdot dd + 9)} & \frac{-(2 \cdot dd - 5)}{(dd^4 - 10 \cdot dd^3 + 37 \cdot dd^2 - 60 \cdot dd + 36)} & \frac{1}{(dd^2 - 5 \cdot dd + 6)} \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας  $solu(dd)$  με τις λύσεις των  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  και  $\delta$  ως προς  $\Delta(dd)$ :

$$solu(dd) := anti(dd) \cdot de(dd) \rightarrow \begin{bmatrix} 2 \frac{(dd^4 + 8 \cdot dd^3 - 68 \cdot dd^2 + 126 \cdot dd - 54)}{(dd^2 - 5 \cdot dd + 6)^2} \\ - \frac{(dd^4 + 20 \cdot dd^3 - 114 \cdot dd^2 + 130 \cdot dd + 36)}{(dd^2 - 5 \cdot dd + 6)^2} \\ \frac{(6 \cdot dd^3 - 15 \cdot dd^2 - 38 \cdot dd + 95)}{(dd^2 - 5 \cdot dd + 6)^2} \\ - \frac{(4 \cdot dd^2 - 20 \cdot dd + 25)}{(dd^2 - 5 \cdot dd + 6)^2} \end{bmatrix}$$

Η επίλυση των εξισώσεων για τις σταθερές της γενικευμένης γραμμής εγγενούς συμπίεσης θέτοντάς τις ίσες με το 0:

$$dd^4 + 8 \cdot dd^3 - 68 \cdot dd^2 + 126 \cdot dd - 54 = 0 \text{ solve, dd} \rightarrow \begin{bmatrix} -13.669867210878980582 \\ .61932192959076430799 \\ 2.5252726406441081372 - .037636649078001293937 \cdot i \\ 2.5252726406441081372 + .037636649078001293937 \cdot i \end{bmatrix}$$

$$dd^4 + 20 \cdot dd^3 - 114 \cdot dd^2 + 130 \cdot dd + 36 = 0 \text{ solve, dd} \rightarrow \begin{bmatrix} -24.804810328116104965 \\ -.22907714363733053528 \\ 2.5169437358767177499 - .023487131482222785860 \cdot i \\ 2.5169437358767177499 + .023487131482222785860 \cdot i \end{bmatrix}$$

$$6 \cdot dd^3 - 15 \cdot dd^2 - 38 \cdot dd + 95 = 0 \text{ solve, dd} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{5}{2} \\ \frac{1}{3} \sqrt{57} \\ \frac{-1}{3} \sqrt{57} \end{bmatrix}$$

$$4 \cdot dd^2 - 20 \cdot dd + 25 = 0 \text{ solve, dd} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{5}{2} \\ \frac{5}{2} \end{bmatrix}$$

$$dd^2 - 5 \cdot dd + 6 = 0 \text{ solve, dd} \rightarrow \begin{bmatrix} 3 \\ 2 \end{bmatrix}$$





# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ

### ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ

#### Γ.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία μαθηματικής προσομοίωσης καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης. Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος αναπτύχθηκε από τους Fredlund, et al. (2000) και σε αντίθεση με τη συνηθισμένη πρακτική ένωσης των σημείων που έχουν προσδιοριστεί για μια καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης υιοθετεί μία συνάρτηση του ποσοστού διερχομένου υλικού με τη διάμετρο των κόκκων και των πλακιδίων, η γραφική παράσταση της οποίας διέρχεται δια μέσω των πειραματικά προσδιορισθέντων σημείων. Οι τιμές των παραμέτρων της συνάρτησης βελτιστοποιούνται έτσι ώστε να προσδιοριστεί η βέλτιστη προσομοίωση της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων κατά τη βελτιστοποίηση (σε απλοποιημένη μορφή, δηλαδή υπολογιζόταν για κάθε δοκιμαζόμενη τιμή παραμέτρου προσομοίωσης το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών των προβλέψεων με βάση τη δοκιμαζόμενη τιμή και των μετρήσεων μέχρι να βρεθεί ο συνδυασμός τιμών παραμέτρων για τον οποίο γινόταν ελάχιστο). Η σκοπιμότητα πραγματοποίησης της προσομοίωσης αυτής ήταν ο προσδιορισμός των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης των καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης (η οποία προσδιορίζεται εύκολα σε αντίθεση με τις μηχανικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών, ιδίως όταν είναι μη κορεσμένα) για την αναζήτηση τυχόν συσχετίσεων μεταξύ αυτών και των παραμέτρων προσομοίωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού ή άλλων παραμέτρων.

## Γ.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ FREDLUND, ET AL. (2000)

Οι Fredlund, et al. (2000) παρουσίασαν μία μέθοδο προσομοίωσης της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης βασιζόμενη στην εξίσωση των Fredlund & Xing (1994) για την προσομοίωση της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Αρχικά παρατήρησαν τη γεωμετρική ομοιότητα μεταξύ των καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης και των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους-νερού. Το ίδιο σιγμοειδές σχήμα των καμπυλών (κανονικό προκειμένου για τις καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης και ανάστροφο για τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού όπως έχει καθιερωθεί να σχεδιάζονται τα δύο είδη καμπυλών) τους οδήγησε στην υιοθέτηση μιας διατυπωμένης εξίσωσης μαθηματικής προσομοίωσης της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού

Η εξίσωση που πρότειναν συνδέει το προβλεπόμενο ποσοστό διερχομένων με τη διάμετρο του κοσκίνου μέσω τεσσάρων παραμέτρων προσομοίωσης (Εξ. Γ.1).

$$P_p(d) = \frac{1}{\left\{ \ln \left[ \exp(1) + \left( \frac{\alpha_{gr}}{d} \right)^{n_{gr}} \right] \right\}^{m_{gr}}} \left\{ 1 - \frac{\left[ \ln \left( 1 + \frac{d_{rgr}}{d} \right) \right]^7}{\left[ \ln \left( 1 + \frac{d_{rgr}}{d_m} \right) \right]^7} \right\} \quad (\Gamma.1)$$

όπου:  $\alpha_{gr}$ , παράμετρος που αντιστοιχεί στο σημείο καμπής της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης και σχετίζεται με το αρχικό σημείο καμπύλωσης της καμπύλης,

$n_{gr}$ , παράμετρος που σχετίζεται με την πιο απότομη κλίση της καμπύλης,

$m_{gr}$ , παράμετρος που σχετίζεται με το σχήμα της καμπύλης,

$d_{rgr}$ , παράμετρος που σχετίζεται με τη διάμετρο των λεπτόκοκκων σε ένα εδαφικό υλικό,

$d$ , διάμετρος κόκκων, και

$d_m$ , διάμετρος του ελάχιστου επιτρεπόμενου μεγέθους κόκκων.

Η Εξ. Γ.1 προτάθηκε για καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικών υλικών με ένα κύριο μέγεθος κόκκων ή πλακιδίων (unimodal equation). Η τυπική μορφή αυτών των καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης φαίνεται στο Σχ. Γ.1α. Εκτός όμως από καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης αυτής της μορφής υπάρχουν και εκείνες όπως στο Σχ. Γ.1β που αντιστοιχούν σε εδαφικά υλικά με δύο κύρια μεγέθη κόκκων ή πλακιδίων. Για αυτά τα εδαφικά υλικά, οι

Fredlund et al (2000) παρουσίασαν ξεχωριστή εξίσωση απαντώμενη στην αγγλική ορολογία με τον όρο bimodal equation (Εξ. Γ.2).

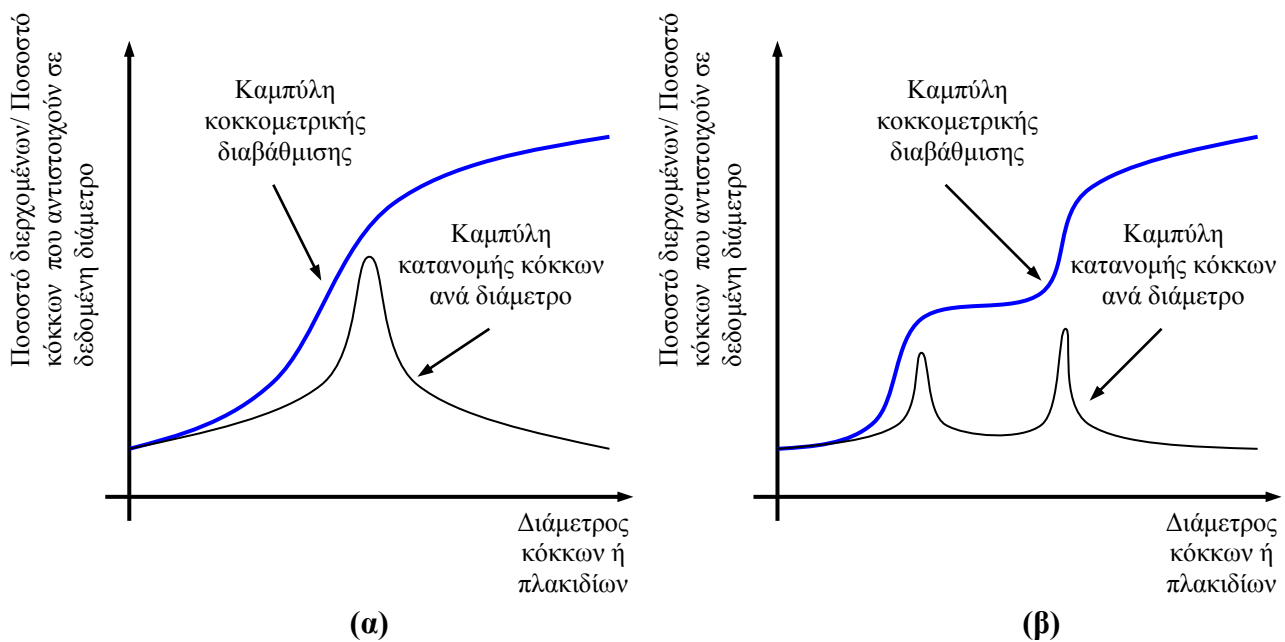
$$P_p(d) = \left\{ w \left[ \frac{1}{\left( \ln \left( \exp(1) + \left( \frac{a_{bi}}{d} \right)^{n_{bi}} \right) \right)^{m_{bi}}} + (1-w) \left[ \frac{1}{\left( \ln \left( \exp(1) + \left( \frac{j_{bi}}{d} \right)^{k_{bi}} \right) \right)^{l_{bi}}} \right] \right\} \left[ 1 - \frac{\left( \ln \left( 1 + \frac{d_{r_{bi}}}{d} \right) \right)^7}{\left( \ln \left( 1 + \frac{d_{r_{bi}}}{d_m} \right) \right)^7} \right] \quad (\Gamma.2)$$

όπου:  $a_{bi}$ , παράμετρος σχετιζόμενη με το αρχικό σημείο καμπής επί της καμπύλης,  
 $n_{bi}$ , παράμετρος σχετιζόμενη με την πιο απότομη κλίση σε ένα τμήμα της καμπύλης,  
 $m_{bi}$ , παράμετρος σχετιζόμενη με το σχήμα της καμπύλης,  
 $j_{bi}$ , παράμετρος σχετιζόμενη με το δεύτερο σημείο καμπής κατά μήκος της καμπύλης,  
 $k_{bi}$ , παράμετρος σχετιζόμενη με την δεύτερη απότομη κλίση κατά μήκος της καμπύλης,  
 $l_{bi}$ , παράμετρος σχετιζόμενη με το σχήμα του δεύτερου κυρτού τμήματος της καμπύλης,  
 $d_{r_{bi}}$ , παράμετρος σχετιζόμενη με την ποσότητα των λεπτόκοκκων σε ένα εδαφικό υλικό,  
 $d$ , διάμετρος του θεωρούμενου μεγέθους κόκκων, και  
 $d_m$ , διάμετρος του ελάχιστου επιτρεπτού μεγέθους κόκκων.

Η Εξ. Γ.2 μπορεί να γενικευτεί για  $k$  κύρια μεγέθη κόκκων ή πλακιδίων (Εξ. Γ.3).

$$P_p(d) = \left[ \sum_{i=1}^k w_i \left[ \frac{1}{\left( \ln \left( \exp(1) + \left( \frac{a_{gr}}{d} \right)^{n_{gr}} \right) \right)^{m_{gr}}} \right] \right] \left[ 1 - \frac{\left( \ln \left( 1 + \frac{d_r}{d} \right) \right)^7}{\left( \ln \left( 1 + \frac{d_r}{d_m} \right) \right)^7} \right] \quad (\Gamma.3)$$

όπου:  $k$ , ο αριθμός των «υποσυστημάτων» που σχηματίζουν την καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης,  
 $w_i$ , οι συντελεστές βαρύτητας των επιμέρους καμπύλων, τέτοιοι ώστε  $0 < w_i < 1$  και  $\sum w_i = 1$ , και οι υπόλοιπες παράμετροι όπως έχουν ήδη οριστεί.



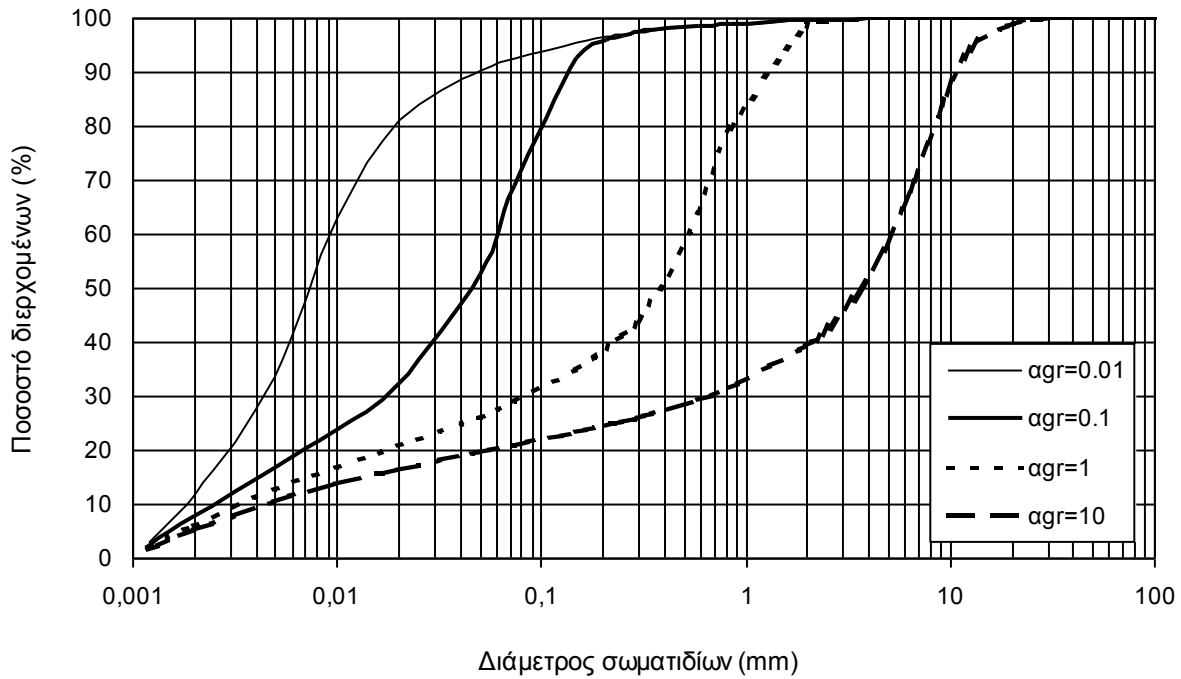
**Σχήμα Γ.1.** α) Μορφή καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικού υλικού με ένα κύριο μέγεθος κόκκων ή πλακιδίων με την αντίστοιχη καμπύλη κατανομής κόκκων ή πλακιδίων ανά διάμετρο, και β) μορφή καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικού υλικού με δύο κύρια μεγέθη κόκκων ή πλακιδίων με την αντίστοιχη καμπύλη κατανομής κόκκων ή πλακιδίων ανά διάμετρο.

Η σημασία των εξισώσεων αυτών έγκειται στη δυνατότητα παραγωγίσις τους, οπότε προκύπτει η συνάρτηση κατανομής ποσοστού περιεχόμενων κόκκων ή πλακιδίων ανά μέγεθος κόκκων ή πλακιδίων, αλλά και στη δυνατότητα άμεσου υπολογισμού οποιασδήποτε διαμέτρου για οποιοδήποτε ποσοστό διερχομένων.

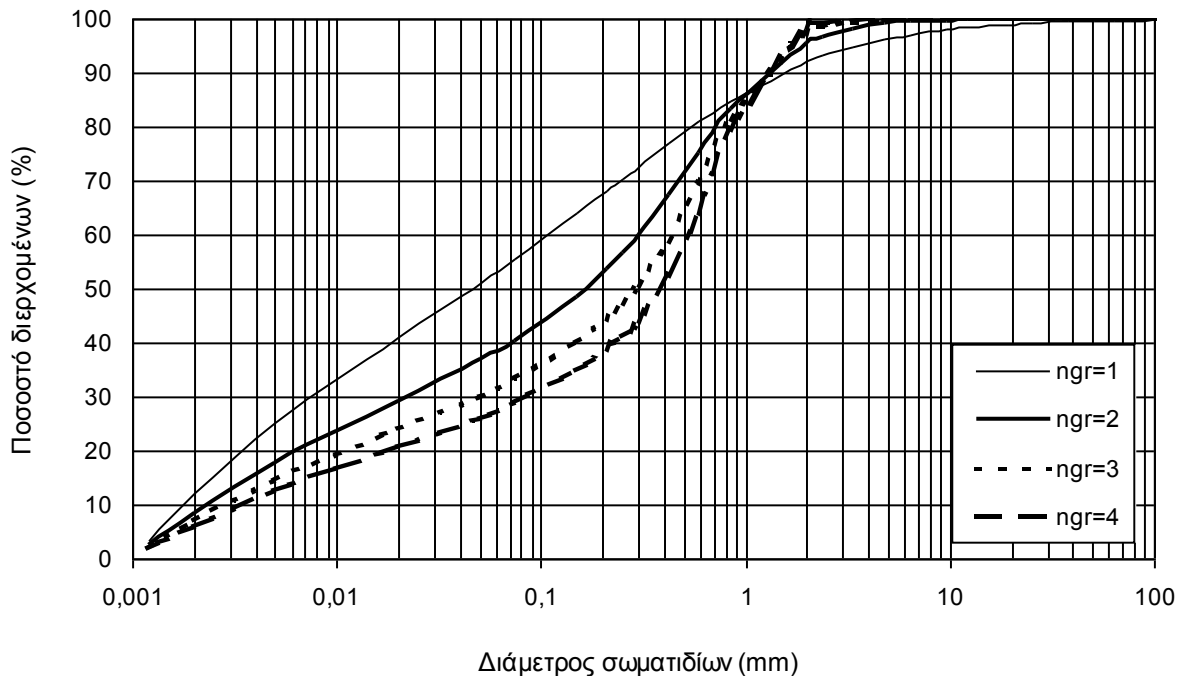
Προφανώς η πιο χρήσιμη από τις Εξ. Γ.1 έως Γ.3 είναι η Εξ. Γ.1 για τα εδαφικά υλικά με ένα κύριο μέγεθος κόκκων. Για την καλύτερη κατανόηση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται και του τρόπου που επηρεάζουν το σχήμα της καμπύλης προσομοίωσης ακολουθούν τα Σχ. Γ.2 έως Γ.5 όπου παρατίθενται τα αποτελέσματα παραμετρικών αναλύσεων ως προς τις παραμέτρους  $a_{gr}$ ,  $n_{gr}$ ,  $m_{gr}$  και  $d_{gr}$ . Όπως φαίνεται από το Σχ. Γ.2, η παράμετρος  $a_{gr}$  ρυθμίζει ουσιαστικά την θέση του απότομου τμήματος της καμπύλης προσομοίωσης κατά μήκος του άξονα της διαμέτρου κόκκων, δηλαδή όσο πιο μεγάλη τιμή λαμβάνει, τόσο προς τις μεγαλύτερες τιμές του άξονα της διαμέτρου κόκκων τοποθετείται το τμήμα με την πιο απότομη κλίση της καμπύλης προσομοίωσης. Από το Σχ. Γ.3 φαίνεται ότι η παράμετρος  $n_{gr}$  ρυθμίζει την

καμπυλότητα του κοίλου τμήματος της καμπύλης προσομοίωσης, δηλαδή όσο πιο μεγάλη γίνεται η τιμή της παραμέτρου, τόσο πιο καμπύλο γίνεται το πρώτο κοίλο τμήμα της καμπύλης προσομοίωσης. Από το Σχ. Γ.4 φαίνεται ότι η παράμετρος  $m_{gr}$  ρυθμίζει την θέση κατά μήκος του άξονα του ποσοστού διερχομένων του πρώτου τμήματος της καμπύλης προσομοίωσης πριν την ραγδαία αύξηση της τιμής του ποσοστού διερχομένων, δηλαδή όσο μειώνεται η τιμή του  $m_{gr}$  τόσο το τμήμα αυτό της καμπύλης βρίσκεται ψηλότερα κατά μήκος του άξονα. Τέλος, όπως φαίνεται από το Σχ. Γ.5 η παράμετρος  $d_{gr}$  ρυθμίζει ουσιαστικά την καμπυλότητα του πρώτου κυρτού τμήματος της καμπύλης προσομοίωσης, δηλαδή όσο πιο μικρή γίνεται η τιμή του  $d_{gr}$ , τόσο πιο καμπύλο γίνεται το πρώτο κυρτό τμήμα της καμπύλης προσομοίωσης. Αντίστοιχες παραμετρικές αναλύσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν και για τις παραμέτρους των Εξ. Γ.2 και Γ.3.

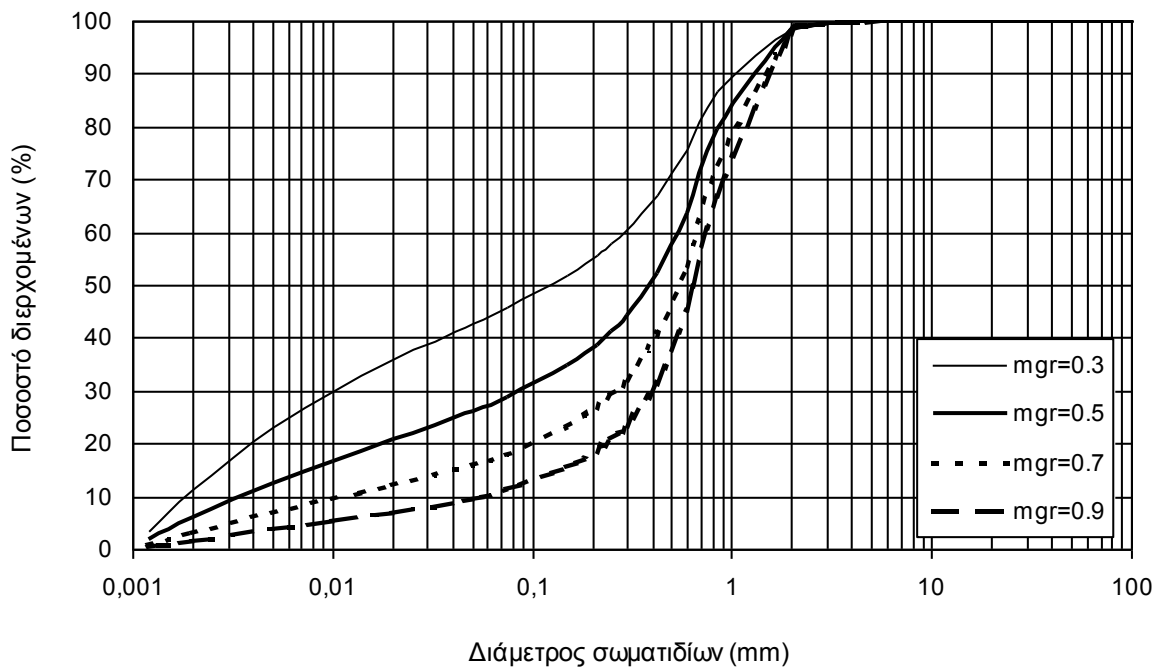
Μετά την παρουσίαση της μεθόδου των Fredlund, et al. (2000) για την προσομοίωση των καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης προχωρούμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης των καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην εργαστηριακή διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των καμπυλών κοκκομετρικής διαβάθμισης των εδαφικών υλικών φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και στη συνέχεια των εδαφικών υλικών τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης. Στην §Γ.3 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων της Εξ. Γ.1 για την προσομοίωση της κάθε καμπύλης και στην §Γ.4 συγκεντρώνονται σε πίνακες οι τιμές των παραμέτρων για όλα τα εδαφικά υλικά. Στο τέλος του παραρτήματος παρατίθενται τα φύλλα υπολογισμών της βέλτιστης προσέγγισης της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης για κάθε εδαφικό υλικό.



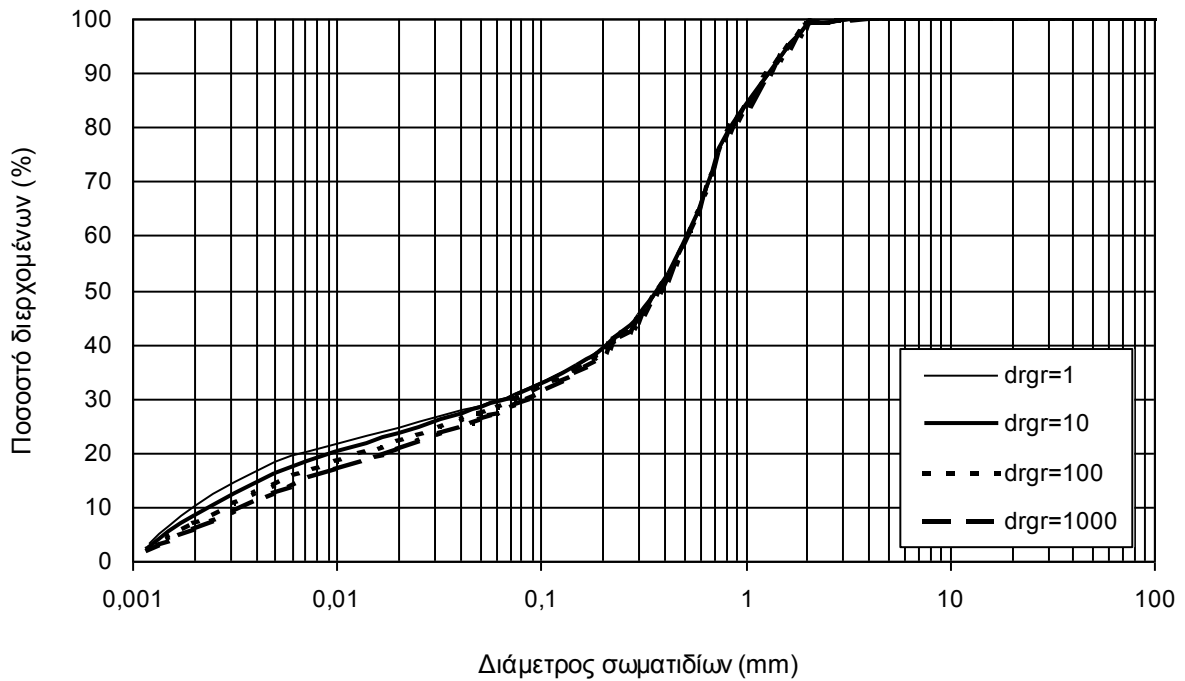
**Σχήμα Γ.2.** Επίδραση της παραμέτρου  $\alpha_{gr}$  στην προσομοιούμενη καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης ( $n_{gr} = 4$ ,  $m_{gr} = 0.5$ ,  $dr_{gr} = 1000$  και  $d_m = 0.001$ ).



**Σχήμα Γ.3.** Επίδραση της παραμέτρου  $n_{gr}$  στην προσομοιούμενη καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης ( $\alpha_{gr} = 1$ ,  $m_{gr} = 0.5$ ,  $dr_{gr} = 1000$  και  $d_m = 0.001$ ).



**Σχήμα Γ.4.** Επίδραση της παραμέτρου  $m_{gr}$  στην προσομοιούμενη καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης ( $\alpha_{gr} = 1$ ,  $n_{gr} = 4$ ,  $d_{r_{gr}} = 1000$  και  $d_m = 0.001$ ).



**Σχήμα Γ.5.** Επίδραση της παραμέτρου  $d_{r_{gr}}$  στην προσομοιούμενη καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης ( $\alpha_{gr} = 1$ ,  $n_{gr} = 4$ ,  $m_{gr} = 0.5$  και  $d_m = 0.001$ ).

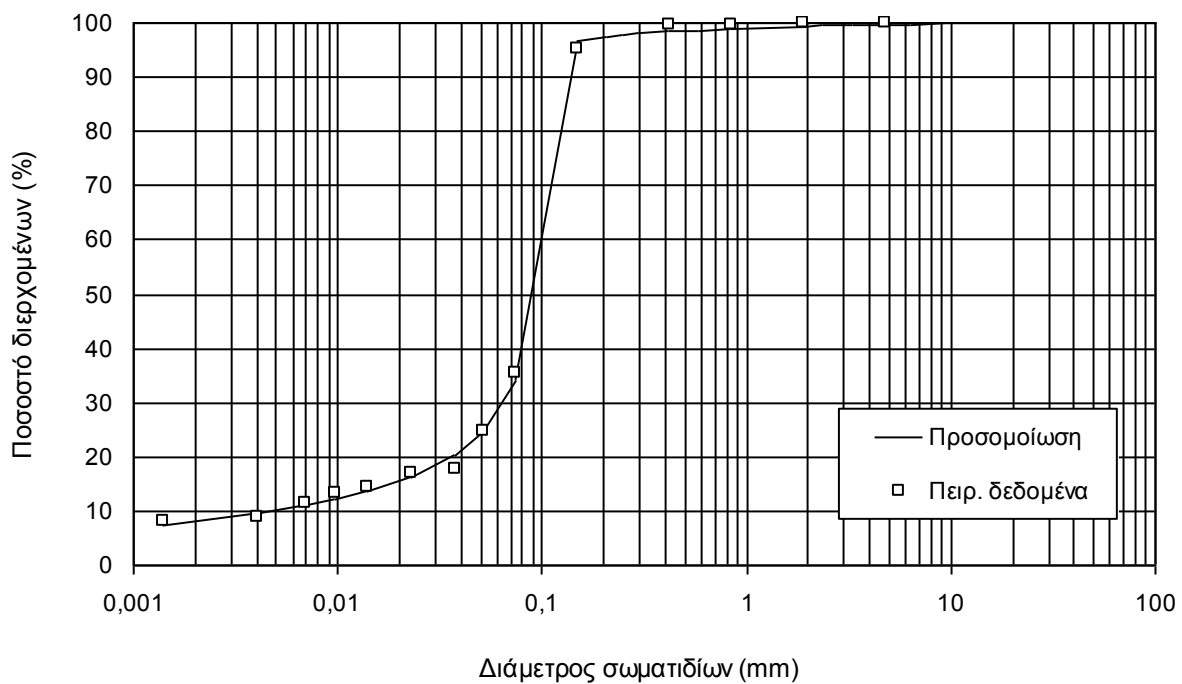
### Γ.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

#### Γ.3.1 Εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης

##### *Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων*

Στο Σχ. Γ.6 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.115	14.5	0.55	39000	0.000042



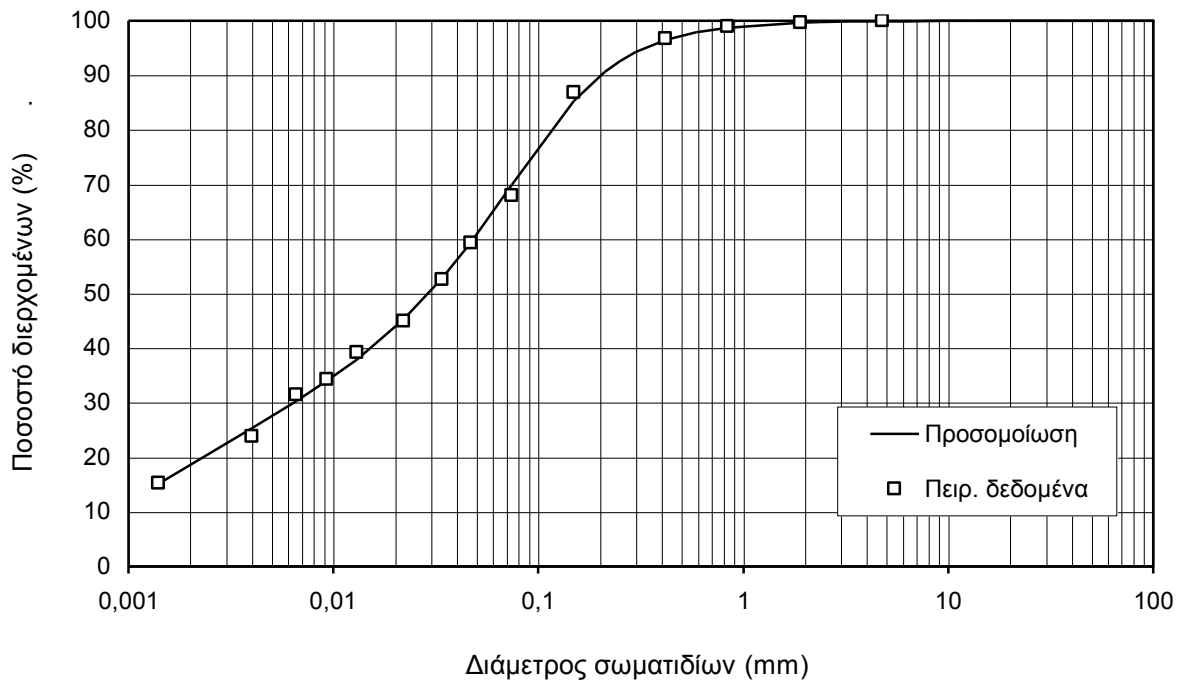
**Σχήμα Γ.6.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Ιλύος Λίμνης Ιωαννίνων και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.



Αργίλος Χανίων

Στο Σχ. Γ.7 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Χανίων και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.137	1.85	0.55	950	0.000362

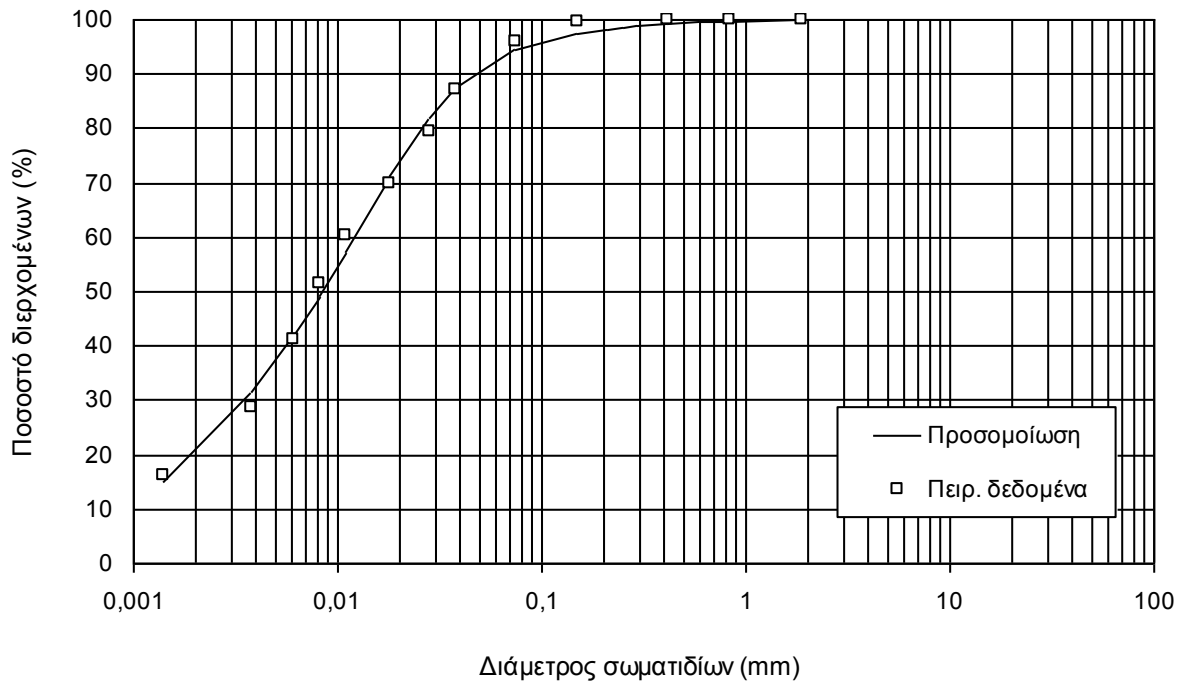


**Σχήμα Γ.7.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Χανίων και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Αργίλος Κορίνθου

Στο Σχ. Γ.8 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Κορίνθου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.022	2.00	0.59	310	0.000527

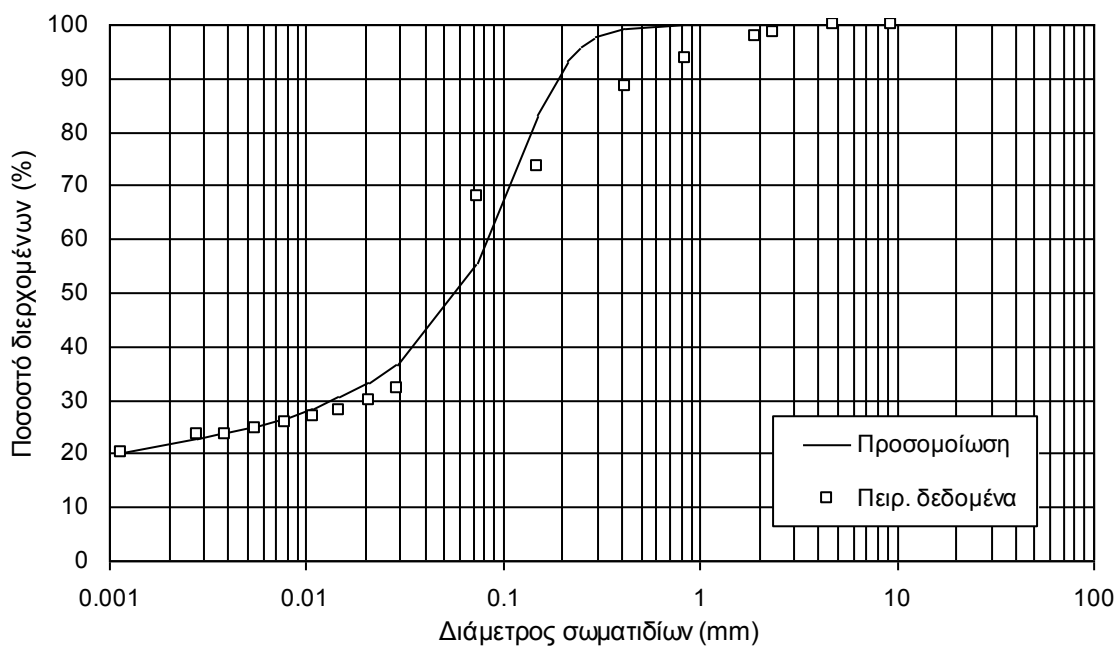


**Σχήμα Γ.8.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Κορίνθου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Αργίλος Λιβαδερού Δράμας

Στο Σχ. Γ.9 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Λιβαδερού Δράμας και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Η ποιότητα της προσέγγισης είναι χαμηλή λόγω της ιδιομορφίας της συγκεκριμένης καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.16	3.50	0.56	0.1	0.000001

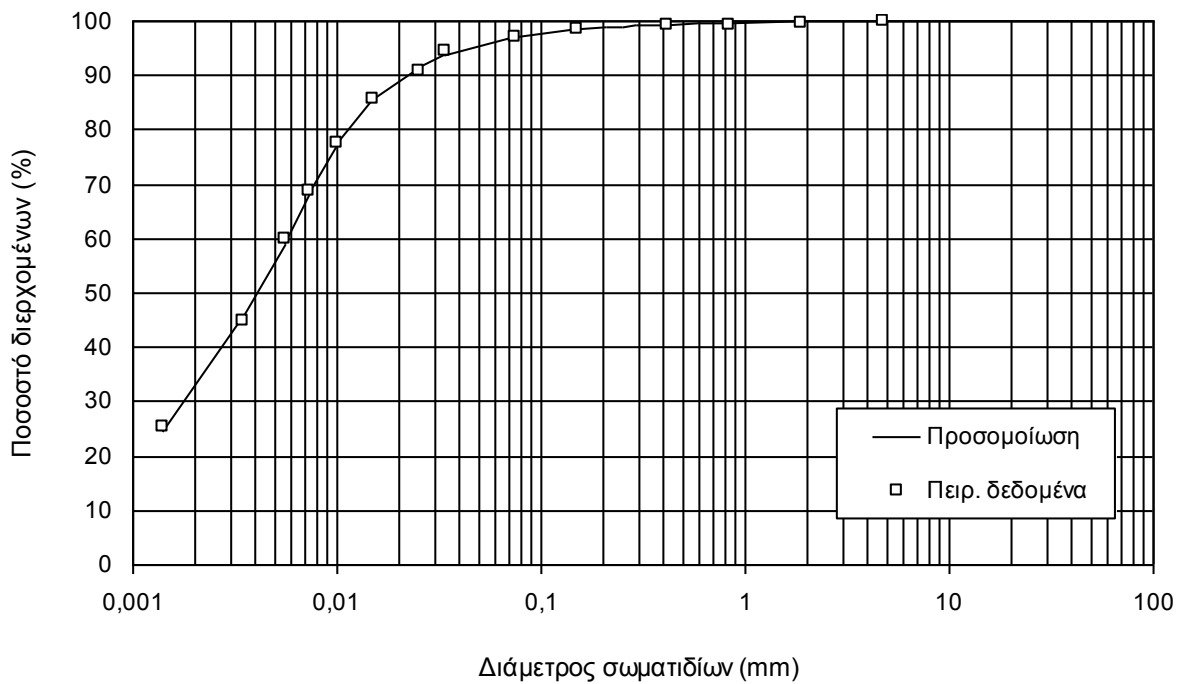


**Σχήμα Γ.9.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Λιβαδερού Δράμας και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Αργίλος Κηφισιάς

Στο Σχ. Γ.10 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Κηφισιάς και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.009	2.55	0.48	270	0.000360

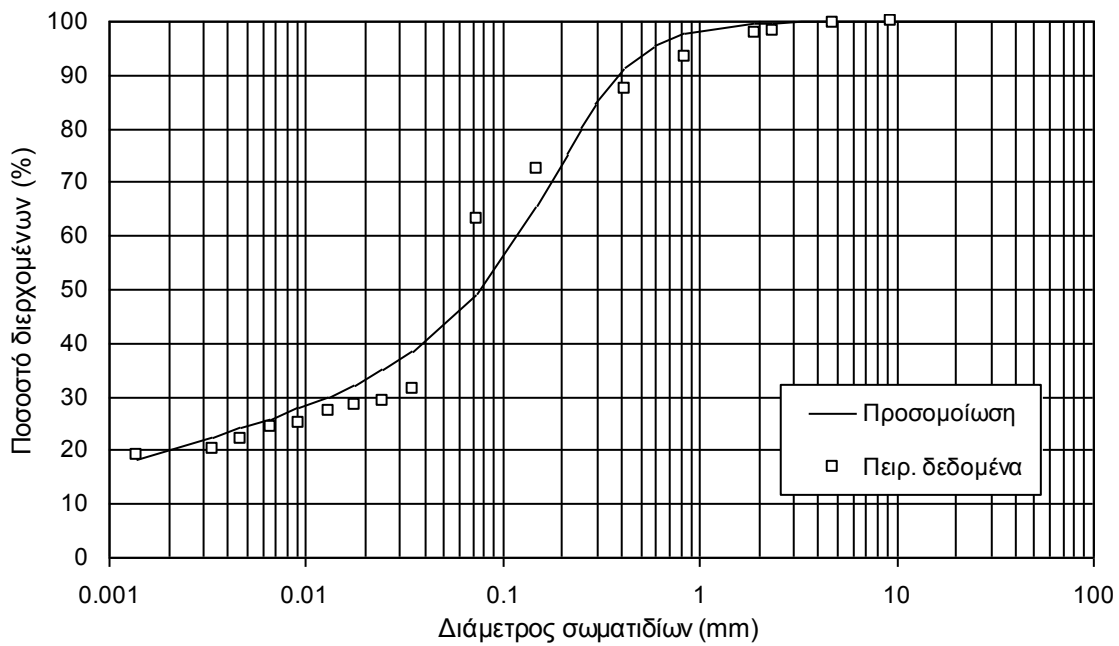


**Σχήμα Γ.10.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Κηφισιάς και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Αργίλος Μελίτης Φλώρινας

Στο Σχ. Γ.11 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Μελίτης Φλώρινας και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{igr}$	$d_m$
0.30	2.25	0.59	300	0.000063

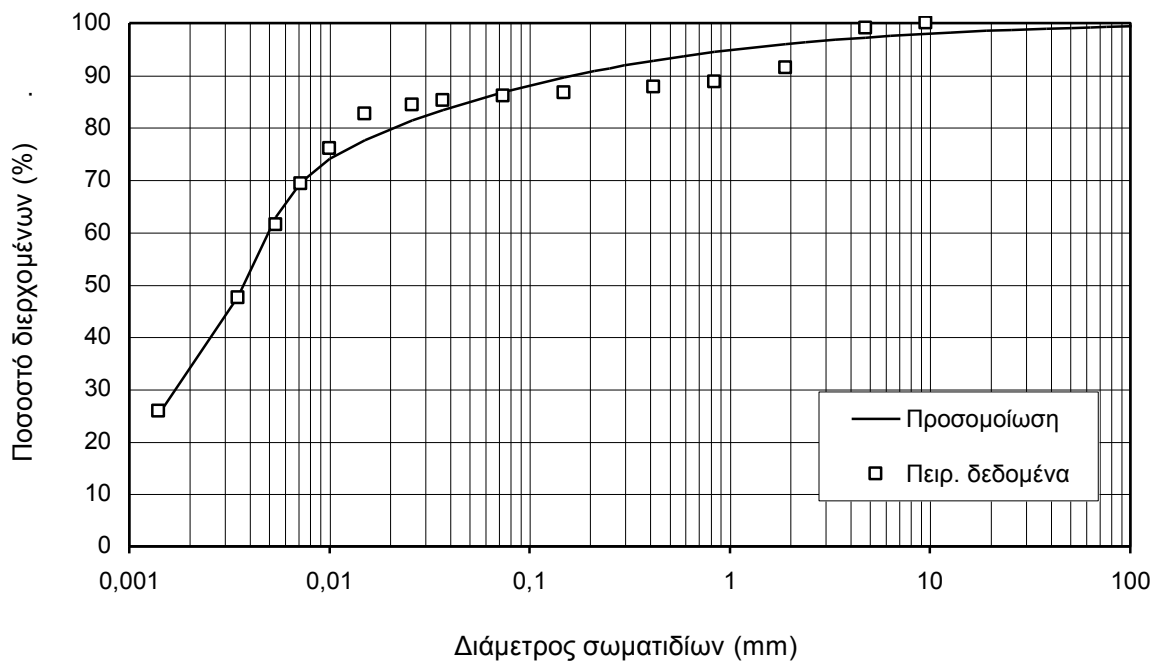


**Σχήμα Γ.11.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Μελίτης Φλώρινας και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Αργίλος Αμαρουσίου

Στο Σχ. Γ.12 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Αμαρουσίου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.005	4.00	0.48	77000000	0.00007



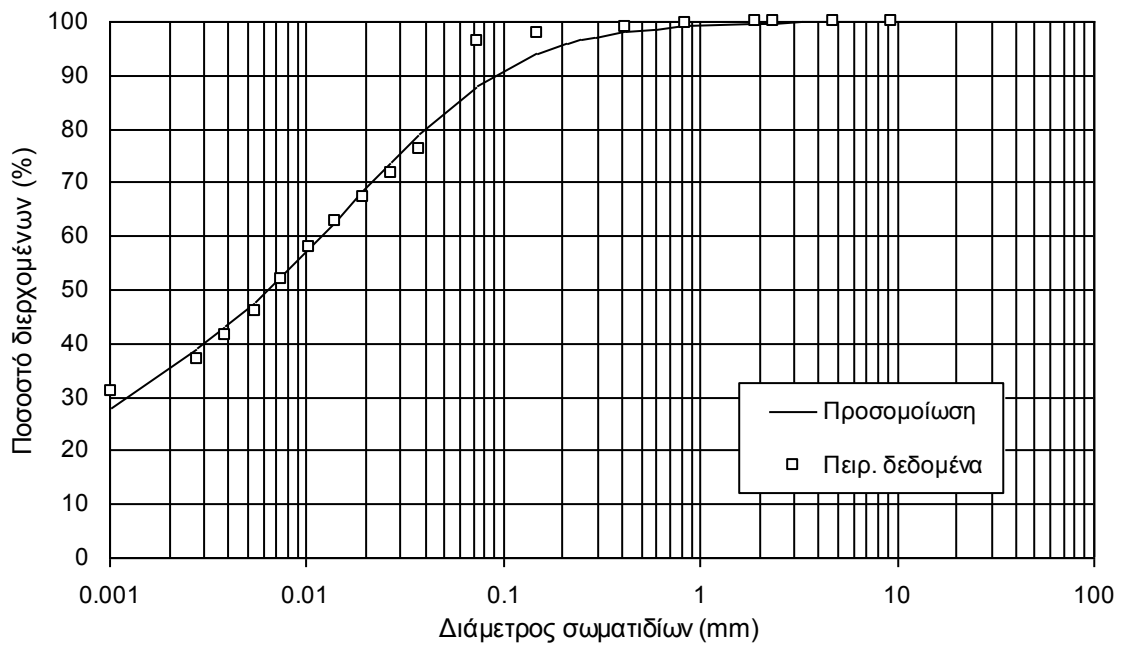
**Σχήμα Γ.12.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Αμαρουσίου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Όπως φαίνεται από το Σχ. Γ.12 η Αργίλος Αμαρουσίου αποτελεί μάλλον υλικό με δύο κύρια μεγέθη κόκκων και άρα θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί για μεγαλύτερη ακρίβεια η Εξ. Γ.2 για την προσομοίωση της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης του υλικού.

Αργίλος Ορεστιάδας Έβρου

Στο Σχ. Γ.13 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Ορεστιάδας Έβρου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.045	1.15	0.66	200	0.000074

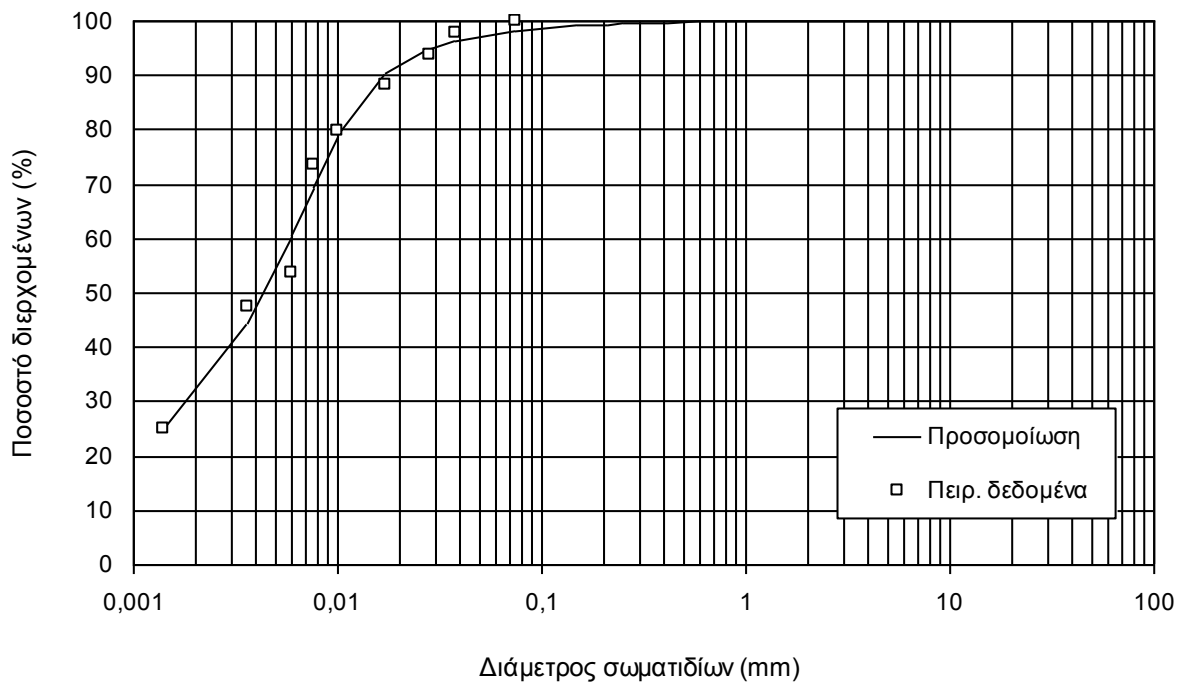


**Σχήμα Γ.13.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Ορεστιάδας Έβρου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Αργίλος Λονδίνου

Στο Σχ. Γ.14 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Λονδίνου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.01	3.25	0.46	90	0.000311



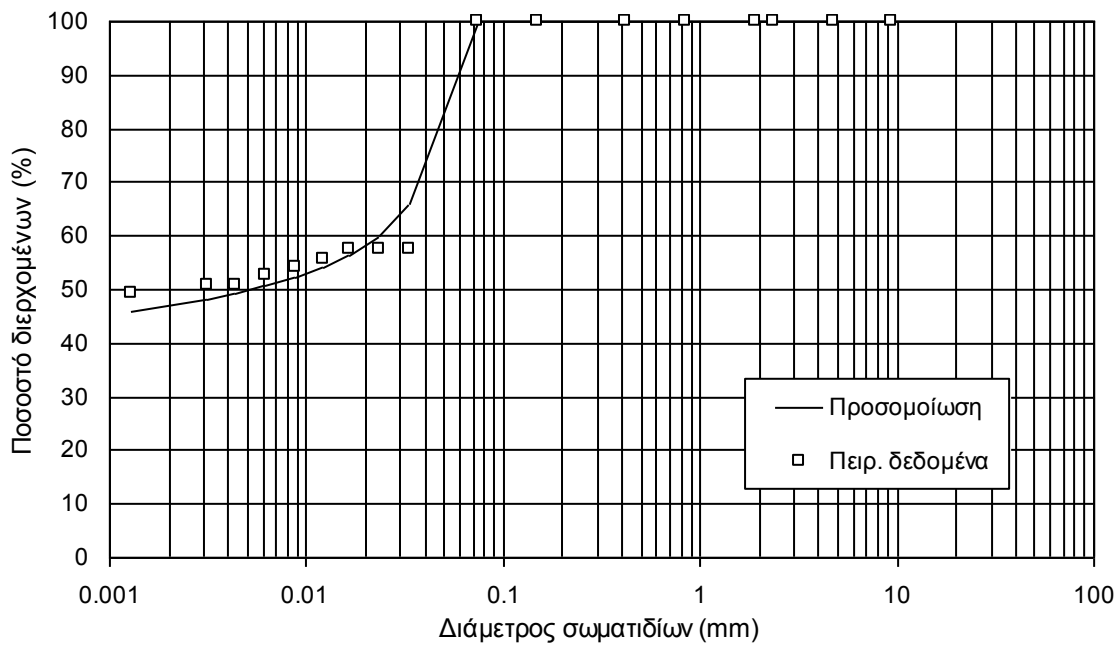
**Σχήμα Γ.14.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Λονδίνου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.



Αργίλος Αμφιλοχίας

Στο Σχ. Γ.15 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Αμφιλοχίας και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.055	20.00	0.18	1	0.00000001

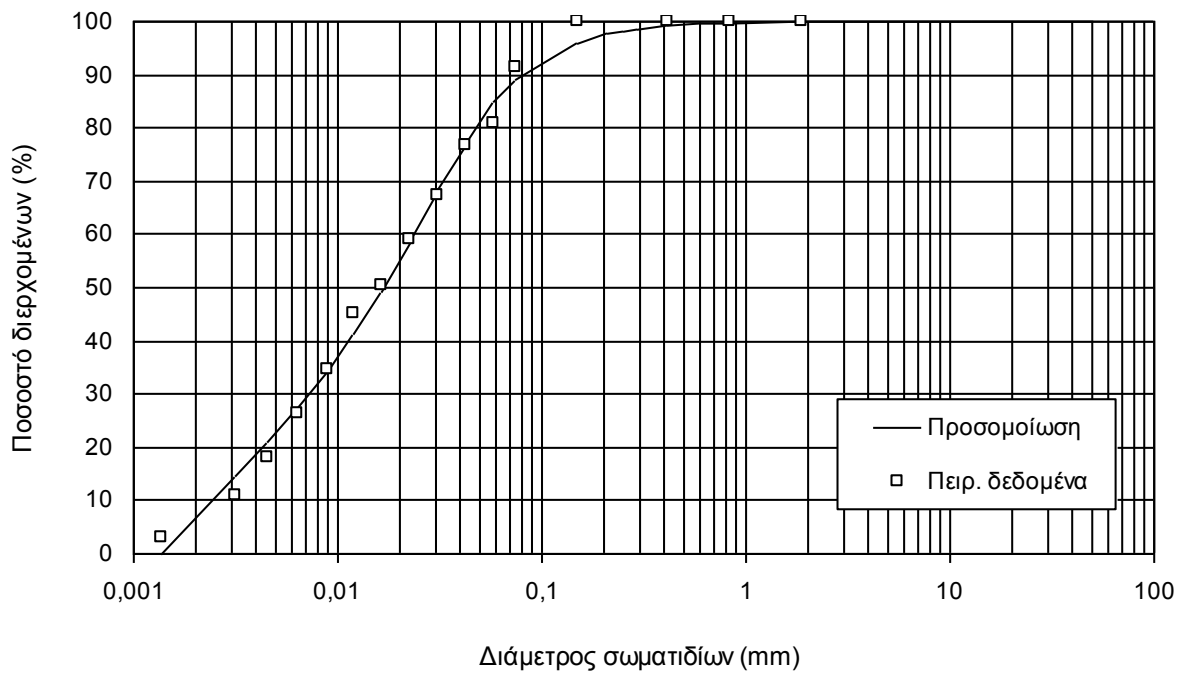


**Σχήμα Γ.15.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αργίλου Αμφιλοχίας και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Μάργα Κορίνθου

Στο Σχ. Γ.16 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Μάργας Κορίνθου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.043	1.99	0.64	90	0.00137

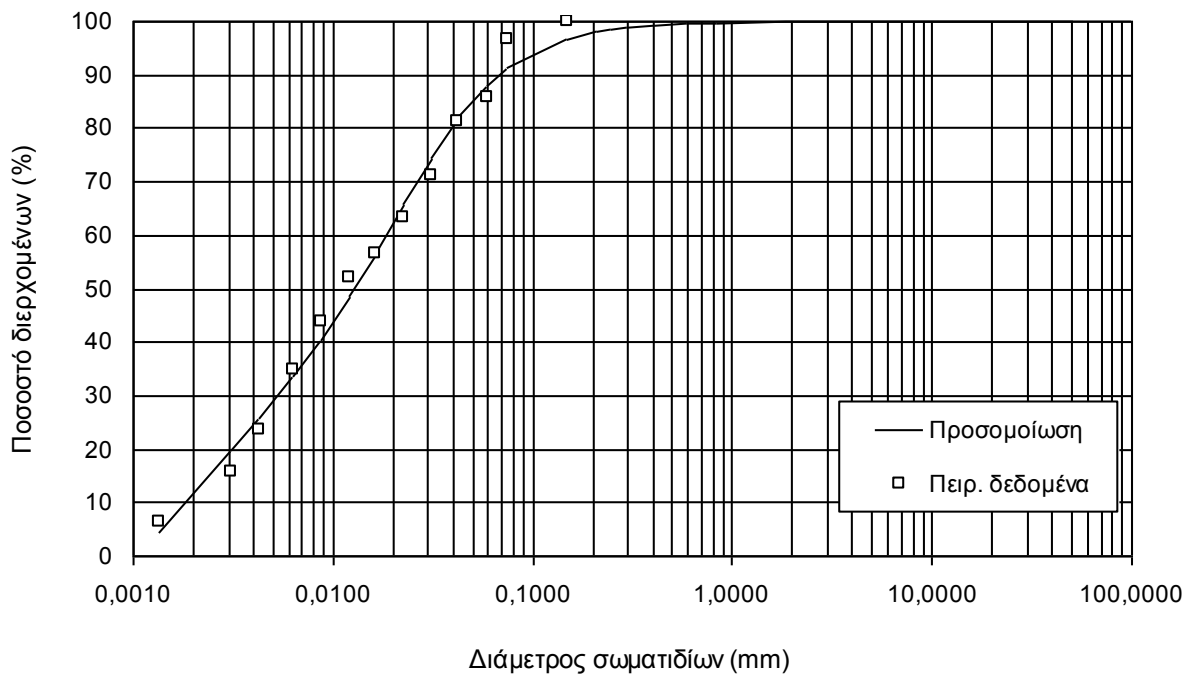


**Σχήμα Γ.16.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Μάργας Κορίνθου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Πλαστική Μάργα Κορίνθου

Στο Σχ. Γ.17 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Πλαστικής Μάργας Κορίνθου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.037	1.82	0.62	60	0.00109

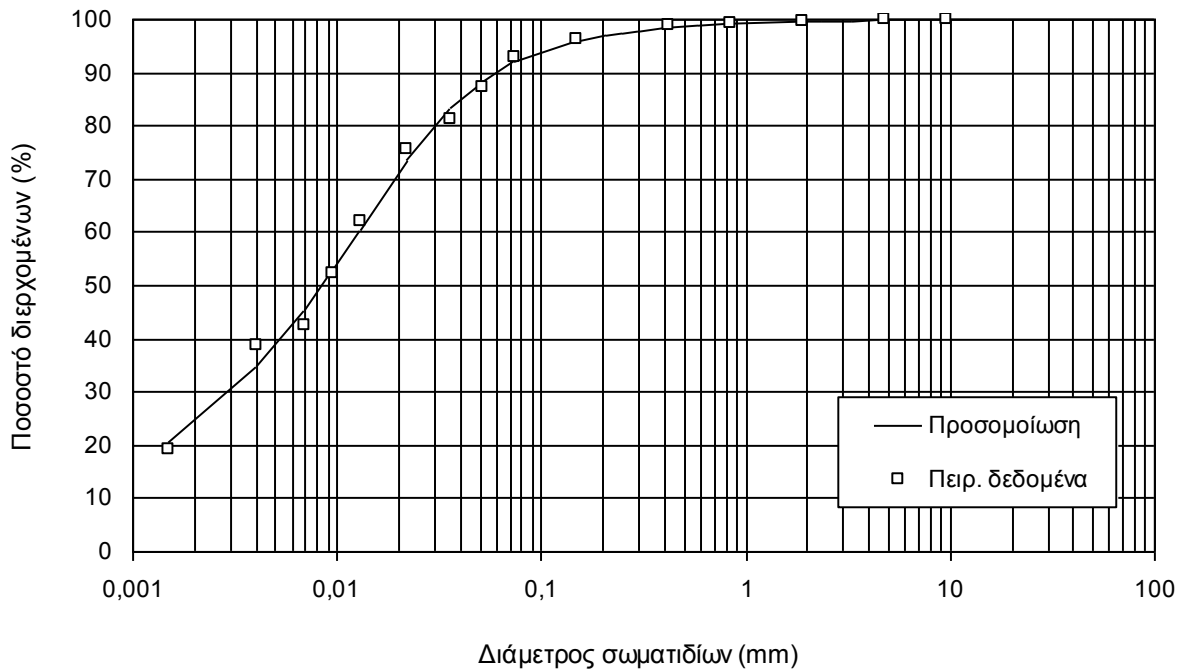


**Σχήμα Γ.17.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Πλαστικής Μάργας Κορίνθου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Μάργα Κηφισιάς

Στο Σχ. Γ.18 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Μάργας Κηφισιάς και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.025	1.80	0.59	3000	0.000274

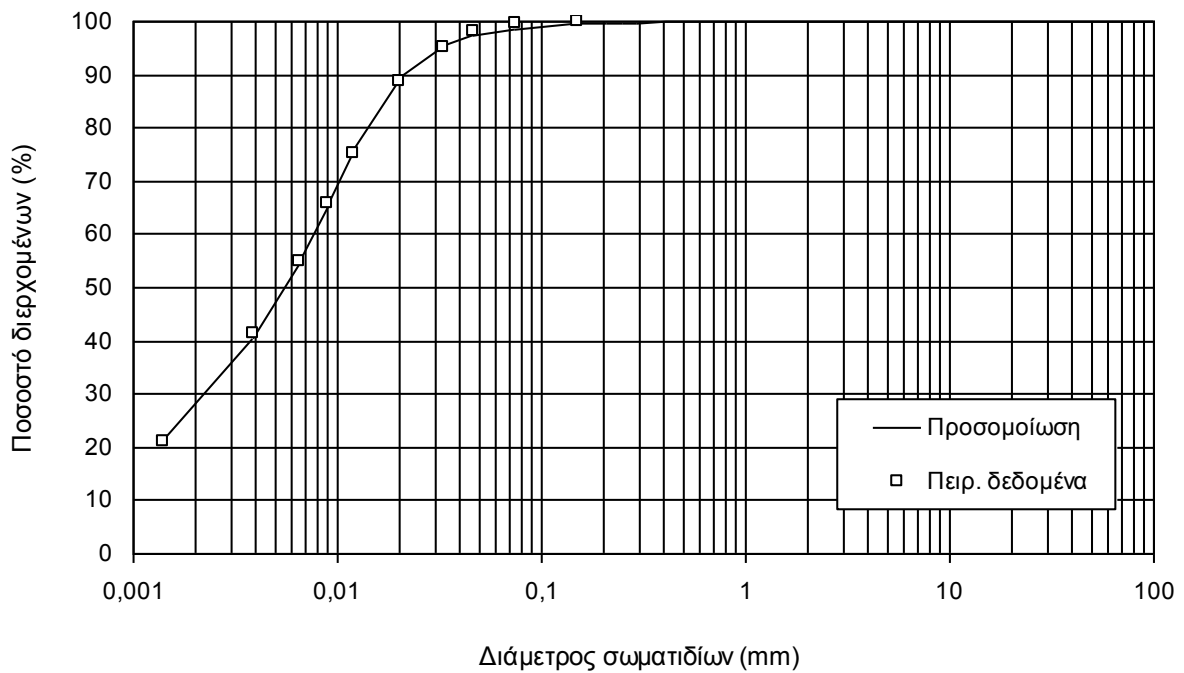


**Σχήμα Γ.18.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Μάργας Κηφισιάς και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Μάργα Πατρών

Στο Σχ. Γ.19 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Μάργας Πατρών και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.014	2.80	0.52	28	0.000398

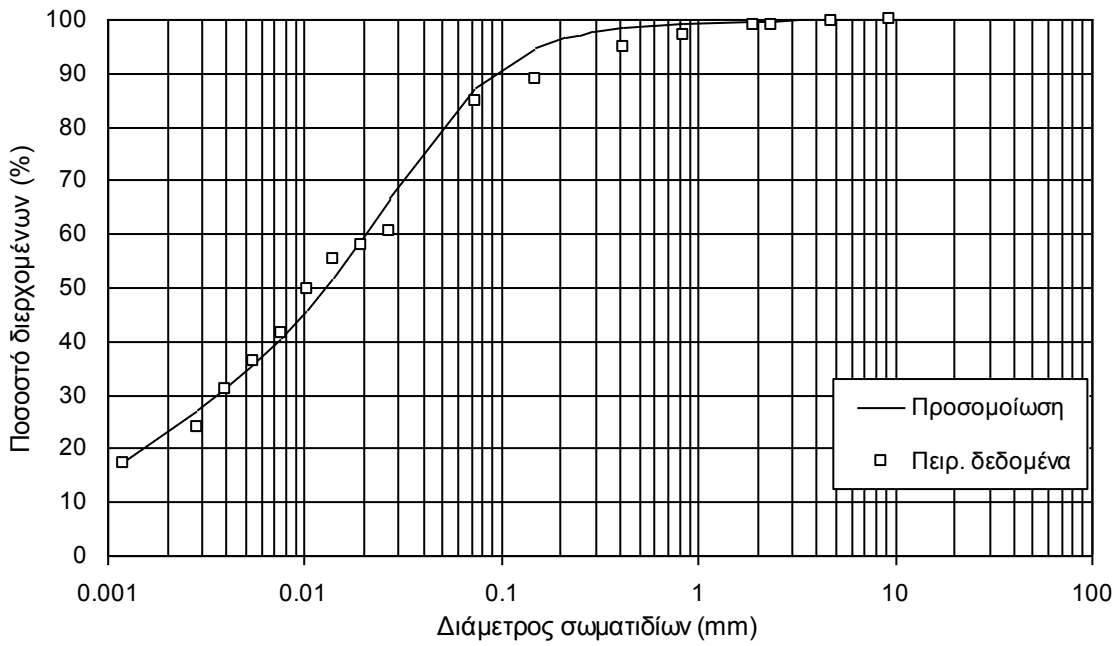


**Σχήμα Γ.19.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Μάργας Πατρών και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Μάργα Χαλκουτσίου

Στο Σχ. Γ.20 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Μάργας Πατρών και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{gr}$	$d_m$
0.05	1.70	0.60	1000	0.00025



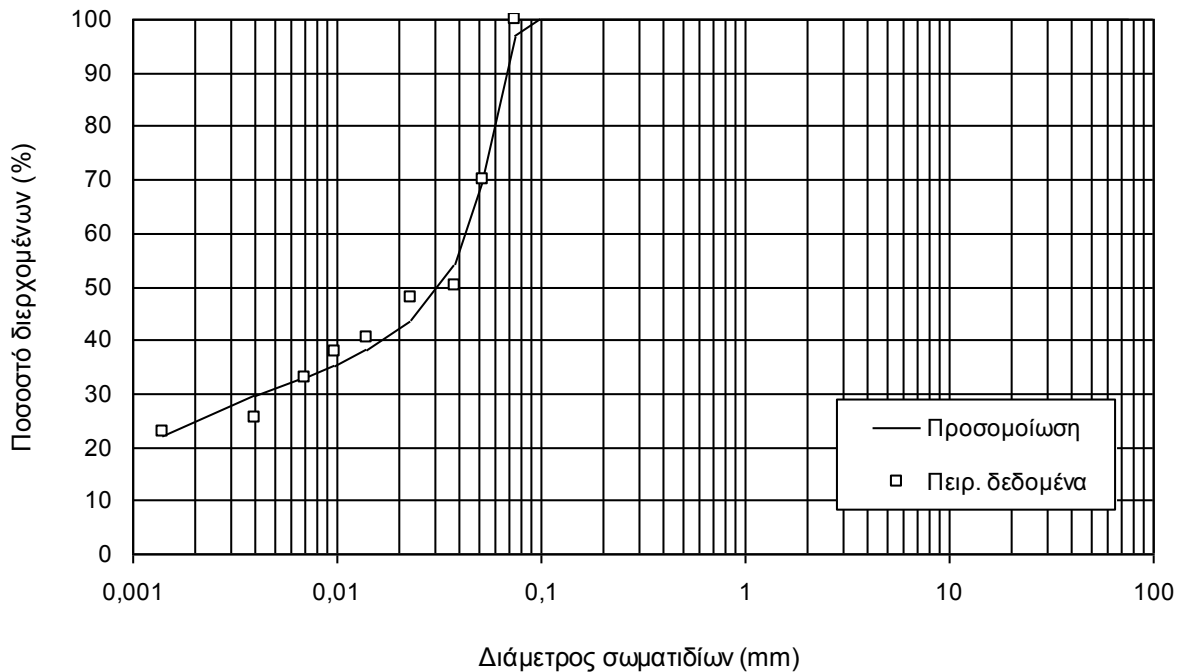
**Σχήμα Γ.20.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Μάργας Χαλκουτσίου και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

### Γ.3.2 Εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης

#### Αμιγούς Ιλύος

Στο Σχ. Γ.21 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αμιγούς Ιλύος και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.066	11.5	0.33	1.3	0.000284

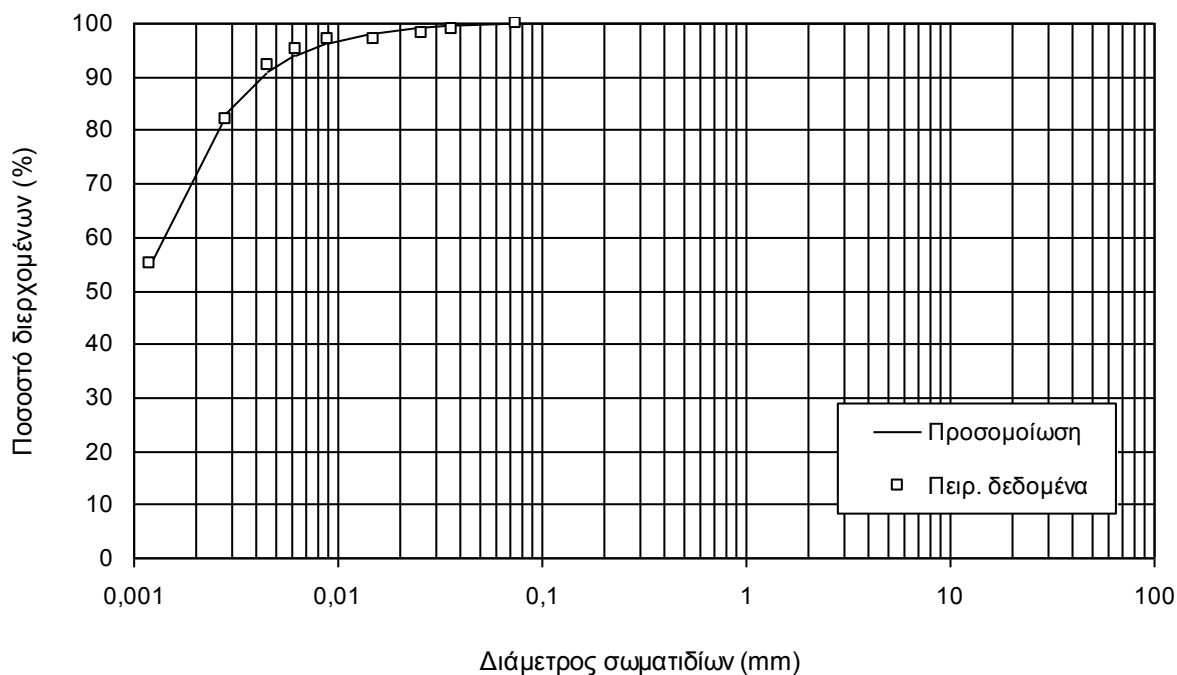


**Σχήμα Γ.21.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης της Αμιγούς Ιλύος και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Καολίνης τύπου Speswhite

Στο Σχ. Γ.22 παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης του Καολίνη τύπου Speswhite και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης. Οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης είναι:

$\alpha_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
0.002	2.9	0.39	2.7	0.000266



**Σχήμα Γ.22.** Πειραματικά σημεία της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης του Καολίνη τύπου Speswhite και η καμπύλη βέλτιστης προσέγγισης.

Πολύ λεπτόκοκκη άμμος, μείγματα Καολίνη-Άμμου και μείγματα Μπεντονίτη-Άμμου

Για την πολύ λεπτόκοκκη άμμο, τα μείγματά της με τον καολίνη και τον μπεντονίτη, δεν επιχειρήθηκε προσομοίωση της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισής τους γιατί αυτές έχουν σχήμα αρκετά διαφορετικό από το επιδιωκόμενο να περιγραφεί από την Εξ. Γ.1.



#### Γ.4 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον Πίν. Γ.1 συγκεντρώνονται οι τιμές των παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης για τα εδαφικά υλικά φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και στον Πίν. Γ.2 οι αντίστοιχες τιμές για τα εδαφικά υλικά τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης.

**Πίνακας Γ.1.** Τιμές παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικών υλικών **φυσικής κοκκομετρικής διαβάθμισης.**

Εδαφικό υλικό	$a_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
Ιλύς Λίμνης Ιωαννίνων	0.115	14.5	0.55	39000	0.000042
Αργίλος Χανίων	0.137	1.85	0.55	950	0.000362
Αργίλος Κορίνθου	0.022	2.00	0.59	310	0.000527
Αργίλος Λιβαδερού Δράμας	0.16	3.50	0.56	0.1	0.000001
Αργίλος Κηφισιάς	0.009	2.55	0.48	270	0.000360
Αργίλος Μελίτης Φλώρινας	0.30	2.25	0.59	300	0.000063
Αργίλος Αμαρουσίου	0.005	4.00	0.48	77000000	0.00007
Αργίλος Ορεστιάδας Έβρου	0.045	1.15	0.66	200	0.000074
Αργίλος Λονδίνου	0.01	3.25	0.46	90	0.000311
Αργίλος Αμφιλοχίας	0.055	20.00	0.18	1	0.00000001
Μάργα Κορίνθου	0.043	1.99	0.64	90	0.00137
Πλ. Μάργα Κορίνθου	0.037	1.82	0.62	60	0.00109
Μάργα Κηφισιάς	0.025	1.80	0.59	3000	0.000274
Μάργα Πατρών	0.014	2.80	0.52	28	0.000398
Μάργα Χαλκουτσίου	0.05	1.70	0.60	1000	0.00025

**Πίνακας Γ.2.** Τιμές παραμέτρων βέλτιστης προσομοίωσης καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφικών υλικών **τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης.**

Εδαφικό υλικό	$a_{gr}$	$n_{gr}$	$m_{gr}$	$d_{rgr}$	$d_m$
Αμιγής Ιλύς	0.066	11.5	0.33	1.3	0.000284
Καολίνη Speswhite	0.002	2.9	0.39	2.7	0.000266

**Murray Fredlund Unimodal Equation**

**Soil: Ioannina Lake Silt**

Param. $\alpha_{gr}$	<b>0.115</b>
$n_{gr}$	<b>14.5</b>
$m_{gr}$	<b>0.55</b>
$d_{rgr}$	<b>39000</b>
$d_m$	<b>0.000042</b>

**Soil: Chania Clay**

Param. $\alpha_{gr}$	<b>0.137</b>
$n_{gr}$	<b>1.85</b>
$m_{gr}$	<b>0.55</b>
$d_{rgr}$	<b>950</b>
$d_m$	<b>0.000362</b>

Predicted		Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)	
			<b>15.29</b>

Predicted		Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)	
			<b>11.66</b>

	0.0014	7.40	8.07	0.450738		0.0014	15.10	15.2	0.010646
	0.004	9.74	8.94	0.638258		0.004	25.31	23.83	2.194791
	0.0069	11.22	11.57	0.120833		0.0066	30.32	31.43	1.23312
	0.0097	12.32	13.33	1.014088		0.0093	34.01	34.31	0.090286
	0.014	13.74	14.21	0.218291		0.013	37.96	39.15	1.407842
	0.023	16.30	16.84	0.287404		0.022	45.27	44.9	0.134872
	0.038	20.40	17.71	7.240105		0.034	52.78	52.62	0.024242
	0.052	24.74	24.73	4.52E-05		0.047	59.41	59.29	0.014763
<b>#200</b>	0.074	34.48	35.25	0.588956	<b>#200</b>	0.074	69.94	67.93	4.026586
<b>#100</b>	0.149	96.61	95.05	2.427667	<b>#100</b>	0.149	85.29	86.85	2.439676
<b>#70</b>	0.21	97.58			<b>#70</b>	0.21	90.61		
<b>#60</b>	0.25	97.82			<b>#60</b>	0.25	92.65		
<b>#50</b>	0.297	98.03			<b>#50</b>	0.297	94.26		
<b>#40</b>	0.417	98.39	99.5	1.227442	<b>#40</b>	0.417	96.52	96.75	0.053548
<b>#30</b>	0.59	98.70			<b>#30</b>	0.59	97.92		
<b>#20</b>	0.84	98.97	99.81	0.711548	<b>#20</b>	0.84	98.76	98.89	0.017653
<b>#10</b>	1.9	99.41	99.93	0.275139	<b>#10</b>	1.9	99.61	99.67	0.003363
<b>#8</b>	2.38	99.49			<b>#8</b>	2.38	99.72		
<b>#6</b>	3.36	99.61			<b>#6</b>	3.36	99.83		
<b>#4</b>	4.76	99.70	100	0.090849	<b>#4</b>	4.76	99.90	100	0.010994
<b>#3</b>	6.35	99.76			<b>#3</b>	6.35	99.93		
<b>#3/8''</b>	9.52	99.83			<b>#3/8''</b>	9.52	99.96		
<b>#1/2''</b>	12.7	99.87			<b>#1/2''</b>	12.7	99.98		
<b>#3/4''</b>	19.1	99.91			<b>#3/4''</b>	19.1	99.99		
<b>#1''</b>	25.4	99.93			<b>#1''</b>	25.4	99.99		
<b>#1.5''</b>	38.1	99.95			<b>#1.5''</b>	38.1	100.00		
<b>#2''</b>	50.8	99.96			<b>#2''</b>	50.8	100.00		
<b>#2.5''</b>	63.5	99.97			<b>#2.5''</b>	63.5	100.00		
<b>#3''</b>	76.2	99.98			<b>#3''</b>	76.2	100.00		
<b>#4''</b>	101.6	99.98			<b>#4''</b>	101.6	100.00		

**Murray Fredlund Unimodal Equation**

Soil: **Corinth Clay**

Param.	$\alpha_{gr}$	<b>0.022</b>
	$n_{gr}$	<b>2</b>
	$m_{gr}$	<b>0.59</b>
	$d_{rgr}$	<b>310</b>
	$d_m$	<b>0.000527</b>

Soil: **Livadero Clay**

Param.	$\alpha_{gr}$	<b>0.16</b>
	$n_{gr}$	<b>3.5</b>
	$m_{gr}$	<b>0.56</b>
	$d_{rgr}$	<b>0.1</b>
	$d_m$	<b>0.000001</b>

Predicted		Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)	
			<b>43.98</b>

Predicted		Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)	
			<b>0.05</b>

	0.0014	15.12	16.13	1.028829		0.001148	20.25	20.298	2.47E-07
	0.0038	31.80	28.56	10.49958		0.00277	22.63	23.529	8.12E-05
	0.0061	41.78	41.11	0.4522		0.003917	23.79	23.529	6.9E-06
	0.0082	49.14	51.6	6.038865		0.005511	25.11	24.605	2.6E-05
	0.011	57.27	60.24	8.814809		0.007753	26.66	25.682	9.65E-05
	0.018	71.43	69.91	2.300816		0.010907	28.51	26.759	0.000307
	0.028	82.15	79.47	7.16221		0.014856	30.53	27.836	0.000727
	0.038	87.55	87.19	0.126484		0.020783	33.25	29.99	0.00106
<b>#200</b>	0.074	94.39	95.83	2.087627		0.029068	36.75	32.143	0.002118
<b>#100</b>	0.149	97.46	99.65	4.798851	<b>#200</b>	0.074	55.44	67.83	0.015341
<b>#70</b>	0.21	98.26			<b>#100</b>	0.149	83.27	73.60	0.009355
<b>#60</b>	0.25	98.56			<b>#70</b>	0.21	93.26		
<b>#50</b>	0.297	98.81			<b>#60</b>	0.25	96.07		
<b>#40</b>	0.417	99.18	99.92	0.542984	<b>#50</b>	0.297	97.76		
<b>#30</b>	0.59	99.45			<b>#40</b>	0.417	99.29	88.58	0.011472
<b>#20</b>	0.84	99.64	99.97	0.10966	<b>#30</b>	0.59	99.79		
<b>#10</b>	1.9	99.87	100	0.015858	<b>#20</b>	0.84	99.94	93.66	0.003941
<b>#8</b>	2.38	99.91			<b>#10</b>	1.9	100.00	97.76	0.0005
<b>#6</b>	3.36	99.95			<b>#8</b>	2.38	100.00	98.47	0.000234
<b>#4</b>	4.76	99.97			<b>#6</b>	3.36	100.00		
<b>#3</b>	6.35	99.98			<b>#4</b>	4.76	100.00	99.86	1.96E-06
<b>#3/8''</b>	9.52	99.99			<b>#3/8''</b>	9.52	100.00	100.00	1.61E-14
<b>#1/2''</b>	12.7	99.99			<b>#1/2''</b>	12.7	100.00		
<b>#3/4''</b>	19.1	100.00			<b>#3/4''</b>	19.1	100.00		
<b>#1''</b>	25.4	100.00			<b>#1''</b>	25.4	100.00		
<b>#1.5''</b>	38.1	100.00			<b>#1.5''</b>	38.1	100.00		
<b>#2''</b>	50.8	100.00			<b>#2''</b>	50.8	100.00		
<b>#2.5''</b>	63.5	100.00			<b>#2.5''</b>	63.5	100.00		
<b>#3''</b>	76.2	100.00			<b>#3''</b>	76.2	100.00		
<b>#4''</b>	101.6	100.00			<b>#4''</b>	101.6	100.00		

**Murray Fredlund Unimodal Equation**

**Soil: Kifisia Clay**

Param. $\alpha_{gr}$	0.009
$n_{gr}$	2.55
$m_{gr}$	0.48
$d_{rgr}$	270
$d_m$	0.00036

**Soil: Meliti Clay**

Param. $\alpha_{gr}$	0.3
$n_{gr}$	2.25
$m_{gr}$	0.59
$d_{rgr}$	300
$d_m$	0.000063

Predicted	Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)
		<b>2.66</b>

Predicted	Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)
		<b>0.04</b>

	0.0014	24.72	25.44	0.520071		0.00138	18.18	19.001	6.79E-05
	0.0035	45.56	44.83	0.532568		0.003364	22.41	20.028	0.000565
	0.0055	59.35	59.88	0.278586		0.00471	24.08	22.083	0.000399
	0.0073	68.46	68.68	0.049162		0.006593	25.86	24.137	0.000295
	0.01	77.43	77.58	0.022653		0.009275	27.81	25.164	0.000698
	0.015	85.71	85.53	0.033907		0.012977	29.94	27.218	0.000739
	0.025	91.64	90.83	0.655408		0.017673	32.15	28.245	0.001524
	0.034	93.77	94.33	0.316884		0.024857	34.98	29.272	0.003262
<b>#200</b>	0.074	96.91	96.98	0.005219		0.034764	38.32	31.327	0.004897
<b>#100</b>	0.149	98.37	98.59	0.047412	<b>#200</b>	0.074	49.13	62.93	0.019041
<b>#70</b>	0.21	98.83			<b>#100</b>	0.149	65.54	72.38	0.004674
<b>#60</b>	0.25	99.02			<b>#70</b>	0.21	75.40		
<b>#50</b>	0.297	99.18			<b>#60</b>	0.25	80.25		
<b>#40</b>	0.417	99.42	99.23	0.037515	<b>#50</b>	0.297	84.60		
<b>#30</b>	0.59	99.61			<b>#40</b>	0.417	91.30	87.36	0.001554
<b>#20</b>	0.84	99.74	99.39	0.123322	<b>#30</b>	0.59	95.53		
<b>#10</b>	1.9	99.91	99.73	0.032562	<b>#20</b>	0.84	97.84	93.31	0.00205
<b>#8</b>	2.38	99.94			<b>#10</b>	1.9	99.62	97.68	0.000376
<b>#6</b>	3.36	99.96			<b>#8</b>	2.38	99.76	98.24	0.000232
<b>#4</b>	4.76	99.98	100	0.000474	<b>#6</b>	3.36	99.89		
<b>#3</b>	6.35	99.99			<b>#4</b>	4.76	99.95	99.679	7.14E-06
<b>#3/8''</b>	9.52	99.99			<b>#3</b>	6.35	99.97		
<b>#1/2''</b>	12.7	100.00			<b>#3/8''</b>	9.52	99.99	100	1.47E-08
<b>#3/4''</b>	19.1	100.00			<b>#1/2''</b>	12.7	99.99		
<b>#1''</b>	25.4	100.00			<b>#3/4''</b>	19.1	100.00		
<b>#1.5''</b>	38.1	100.00			<b>#1''</b>	25.4	100.00		
<b>#2''</b>	50.8	100.00			<b>#1.5''</b>	38.1	100.00		
<b>#2.5''</b>	63.5	100.00			<b>#2''</b>	50.8	100.00		
<b>#3''</b>	76.2	100.00			<b>#2.5''</b>	63.5	100.00		
<b>#4''</b>	101.6	100.00			<b>#3''</b>	76.2	100.00		
					<b>#4''</b>	101.6	100.00		

**Murray Fredlund Unimodal Equation**

**Soil: Amaroussion Clay**

Param. $\alpha_{gr}$	<b>0.005</b>
$n_{gr}$	<b>4</b>
$m_{gr}$	<b>0.48</b>
$d_{rgr}$	<b>77000000</b>
$d_m$	<b>0.00007</b>

**Soil: Orestiada Clay**

Param. $\alpha_{gr}$	<b>0.045</b>
$n_{gr}$	<b>1.15</b>
$m_{gr}$	<b>0.66</b>
$d_{rgr}$	<b>200</b>
$d_m$	<b>0.000074</b>

Predicted	Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)
		<b>138.78</b>

Predicted	Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)
		<b>0.01</b>

	0.0014	25.18	25.8	0.384679		0.001021	28.06	31.1393	0.000951
	0.0035	47.79	47.49	0.092723		0.002824	39.25	37.1133	0.000455
	0.0054	62.86	61.44	2.013702		0.00393	43.41	41.5937	0.000329
	0.0072	69.51	69.27	0.058842		0.005466	47.92	46.0742	0.000342
	0.01	74.05	76	3.819627		0.007553	52.73	52.0482	4.69E-05
	0.015	77.65	82.63	24.76772		0.010426	57.89	58.0222	1.81E-06
	0.026	81.35	84.33	8.874936		0.014007	62.86	62.5026	1.27E-05
	0.037	83.38	85.14	3.112902		0.019421	68.49	66.9831	0.000227
<b>#200</b>	0.074	86.79	86.04	0.567417		0.026906	74.02	71.4636	0.000653
<b>#100</b>	0.149	89.61	86.68	8.594929		0.037243	79.20	75.9441	0.001057
<b>#70</b>	0.21	90.79			<b>#200</b>	0.074	88.12	96.23	0.006575
<b>#60</b>	0.25	91.35			<b>#100</b>	0.149	93.93	97.72	0.001435
<b>#50</b>	0.297	91.87			<b>#70</b>	0.21	95.75		
<b>#40</b>	0.417	92.81	87.71	26.0552	<b>#60</b>	0.25	96.47		
<b>#30</b>	0.59	93.68			<b>#50</b>	0.297	97.06		
<b>#20</b>	0.84	94.47	88.8	32.18157	<b>#40</b>	0.417	97.98	99.01	0.000107
<b>#10</b>	1.9	95.98	91.4	20.9912	<b>#30</b>	0.59	98.63		
<b>#8</b>	2.38	96.33			<b>#20</b>	0.84	99.08	99.51	1.84E-05
<b>#6</b>	3.36	96.81			<b>#10</b>	1.9	99.64	99.85	4.27E-06
<b>#4</b>	4.76	97.24	99	3.084872	<b>#8</b>	2.38	99.73	99.89	2.68E-06
<b>#3</b>	6.35	97.56			<b>#6</b>	3.36	99.82		
<b>#3/8''</b>	9.52	97.96	100	4.181479	<b>#4</b>	4.76	99.88	100	1.46E-06
<b>#1/2''</b>	12.7	98.20			<b>#3</b>	6.35	99.91		
<b>#3/4''</b>	19.1	98.51			<b>#3/8''</b>	9.52	99.95	100	2.82E-07
<b>#1''</b>	25.4	98.69			<b>#1/2''</b>	12.7	99.96		
<b>#1.5''</b>	38.1	98.92			<b>#3/4''</b>	19.1	99.98		
<b>#2''</b>	50.8	99.06			<b>#1''</b>	25.4	99.98		
<b>#2.5''</b>	63.5	99.16			<b>#1.5''</b>	38.1	99.99		
<b>#3''</b>	76.2	99.23			<b>#2''</b>	50.8	99.99		
<b>#4''</b>	101.6	99.34			<b>#2.5''</b>	63.5	99.99		
					<b>#3''</b>	76.2	100.00		
					<b>#4''</b>	101.6	100.00		

**Murray Fredlund Unimodal Equation**

**Soil: London Clay**

<b>Param.</b>	$\alpha_{gr}$	<b>0.01</b>
	$n_{gr}$	<b>3.25</b>
	$m_{gr}$	<b>0.46</b>
	$d_{rgr}$	<b>90</b>
	$d_m$	<b>0.000311</b>

**Soil: Amphilochia Clay**

<b>Param.</b>	$\alpha_{gr}$	<b>0.055</b>
	$n_{gr}$	<b>20</b>
	$m_{gr}$	<b>0.18</b>
	$d_{rgr}$	<b>1</b>
	$d_m$	<b>1E-08</b>

Predicted		Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)	
			<b>87.30</b>

Predicted		Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)	
			<b>0.01</b>

	0.0014	25.13	25.11	0.000611		0.001282	45.91	49.246	0.00111
	0.0036	44.36	47.26	8.389753		0.003122	48.23	50.864	0.000695
	0.006	60.53	53.59	48.15857		0.004415	49.36	50.864	0.000225
	0.0076	69.41	73.63	17.81285		0.006208	50.67	52.481	0.000326
	0.01	79.02	79.96	0.889951		0.008729	52.25	54.098	0.000342
	0.017	90.55	88.4	4.608851		0.012272	54.21	55.715	0.000226
	0.028	94.94	93.67	1.603132		0.016705	56.51	57.333	6.83E-05
	0.038	96.35	97.89	2.374493		0.023624	60.11	57.333	0.000773
<b>#200</b>	0.074	98.14	100	3.464314		0.033409	66.10	57.333	0.007694
<b>#100</b>	0.149	99.11			<b>#200</b>	0.074	99.98	100	3.11E-08
<b>#70</b>	0.21	99.39			<b>#100</b>	0.149	100.00	100	4.26E-14
<b>#60</b>	0.25	99.51			<b>#70</b>	0.21	100.00		
<b>#50</b>	0.297	99.60			<b>#60</b>	0.25	100.00		
<b>#40</b>	0.417	99.74			<b>#50</b>	0.297	100.00		
<b>#30</b>	0.59	99.84			<b>#40</b>	0.417	100.00	100	3.24E-17
<b>#20</b>	0.84	99.90			<b>#30</b>	0.59	100.00		
<b>#10</b>	1.9	99.97			<b>#20</b>	0.84	100.00	100	6.41E-20
<b>#8</b>	2.38	99.98			<b>#10</b>	1.9	100.00	100	1.13E-23
<b>#6</b>	3.36	99.99			<b>#8</b>	2.38	100.00	100	8.24E-25
<b>#4</b>	4.76	100.00			<b>#6</b>	3.36	100.00		
<b>#3</b>	6.35	100.00			<b>#4</b>	4.76	100.00	100	1.63E-28
<b>#3/8''</b>	9.52	100.00			<b>#3</b>	6.35	100.00		
<b>#1/2''</b>	12.7	100.00			<b>#3/8''</b>	9.52	100.00	100	1.23E-32
<b>#3/4''</b>	19.1	100.00			<b>#1/2''</b>	12.7	100.00		
<b>#1''</b>	25.4	100.00			<b>#3/4''</b>	19.1	100.00		
<b>#1.5''</b>	38.1	100.00			<b>#1''</b>	25.4	100.00		
<b>#2''</b>	50.8	100.00			<b>#1.5''</b>	38.1	100.00		
<b>#2.5''</b>	63.5	100.00			<b>#2''</b>	50.8	100.00		
<b>#3''</b>	76.2	100.00			<b>#2.5''</b>	63.5	100.00		
<b>#4''</b>	101.6	100.00			<b>#3''</b>	76.2	100.00		
					<b>#4''</b>	101.6	100.00		

**Murray Fredlund Unimodal Equation**

**Soil: Corinth Marl**

Param. $\alpha_{gr}$	<b>0.043</b>
$n_{gr}$	<b>1.99</b>
$m_{gr}$	<b>0.64</b>
$d_{rgr}$	<b>90</b>
$d_m$	<b>0.00137</b>

**Soil: Plastic Corinth Marl**

Param. $\alpha_{gr}$	<b>0.037</b>
$n_{gr}$	<b>1.82</b>
$m_{gr}$	<b>0.62</b>
$d_{rgr}$	<b>60</b>
$d_m$	<b>0.00109</b>

Predicted		Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)	
			<b>86.59</b>

Predicted		Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)	
			<b>118.69</b>

	0.00138	0.13	2.94	7.875224		0.0014	4.39	6.54	4.629499
	0.00317	14.73	11.03	13.69393		0.0031	19.79	15.56	17.83542
	0.00451	20.90	17.87	9.17332		0.0043	25.75	23.68	4.271464
	0.00642	27.45	26.27	1.394966		0.0063	33.55	34.96	1.987728
	0.00886	34.05	34.68	0.392533		0.0087	40.62	43.98	11.30316
	0.0121	41.29	45.19	15.1843		0.0120	48.51	51.88	11.3073
	0.0163	49.18	50.44	1.593474		0.0162	56.62	56.39	0.053735
	0.0225	58.68	58.85	0.028603		0.0225	65.84	63.15	7.200564
	0.0308	68.31	67.26	1.106209		0.0310	74.57	71.05	12.40561
	0.0421	77.23	76.71	0.268731		0.0423	81.94	81.20	0.551516
	0.0585	84.87	80.92	15.63635		0.0588	88.04	85.71	5.4139
<b>#200</b>	0.074	89.01	91.18	4.704286	<b>#200</b>	0.074	91.22	96.81	31.28639
<b>#100</b>	0.149	95.99	99.83	14.72287	<b>#100</b>	0.149	96.77	100	10.44237
<b>#70</b>	0.21	97.57			<b>#70</b>	0.21	98.06		
<b>#60</b>	0.25	98.12			<b>#60</b>	0.25	98.50		
<b>#50</b>	0.297	98.54			<b>#50</b>	0.297	98.85		
<b>#40</b>	0.417	99.12	99.97	0.728731	<b>#40</b>	0.417	99.32		
<b>#30</b>	0.59	99.48			<b>#30</b>	0.59	99.61		
<b>#20</b>	0.84	99.70	99.99	0.085545	<b>#20</b>	0.84	99.78		
<b>#10</b>	1.9	99.92	100	0.005842	<b>#10</b>	1.9	99.95		
<b>#8</b>	2.38	99.95			<b>#8</b>	2.38	99.97		
<b>#6</b>	3.36	99.97			<b>#6</b>	3.36	99.98		
<b>#4</b>	4.76	99.99			<b>#4</b>	4.76	99.99		
<b>#3</b>	6.35	99.99			<b>#3</b>	6.35	100.00		
<b>#3/8''</b>	9.52	100.00			<b>#3/8''</b>	9.52	100.00		
<b>#1/2''</b>	12.7	100.00			<b>#1/2''</b>	12.7	100.00		
<b>#3/4''</b>	19.1	100.00			<b>#3/4''</b>	19.1	100.00		
<b>#1''</b>	25.4	100.00			<b>#1''</b>	25.4	100.00		
<b>#1.5''</b>	38.1	100.00			<b>#1.5''</b>	38.1	100.00		
<b>#2''</b>	50.8	100.00			<b>#2''</b>	50.8	100.00		
<b>#2.5''</b>	63.5	100.00			<b>#2.5''</b>	63.5	100.00		
<b>#3''</b>	76.2	100.00			<b>#3''</b>	76.2	100.00		
<b>#4''</b>	101.6	100.00			<b>#4''</b>	101.6	100.00		

**Murray Fredlund Unimodal Equation**

**Soil: Kifisia Marl**

Param. $\alpha_{gr}$	0.025
$n_{gr}$	1.8
$m_{gr}$	0.59
$d_{rgr}$	3000
$d_m$	0.000274

**Soil: Patras Marl**

Param. $\alpha_{gr}$	0.014
$n_{gr}$	2.8
$m_{gr}$	0.52
$d_{rgr}$	28
$d_m$	0.000398

Predicted		Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)	
			<b>37.68</b>

Predicted		Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)	
			<b>3.98</b>

	0.0015	20.68	19.16	2.309717		0.0014	21.50	21.22	0.080735
	0.004	34.91	38.55	13.25483		0.0039	40.71	41.21	0.250735
	0.0069	45.34	42.52	7.957273		0.0065	54.70	55.05	0.122989
	0.0096	52.88	52.1	0.603229		0.0089	65.47	65.81	0.112755
	0.013	60.45	61.92	2.170951		0.012	76.02	75.04	0.952998
	0.022	73.59	75.47	3.528796		0.02	89.41	88.88	0.276468
	0.036	83.52	81.31	4.891892		0.033	95.44	95.03	0.169959
	0.051	88.47	87.15	1.751709		0.046	97.27	98.1	0.682986
<b>#200</b>	0.074	92.11	92.99	0.765938	<b>#200</b>	0.074	98.62	99.64	1.05043
<b>#100</b>	0.149	95.98	96.19	0.045567	<b>#100</b>	0.149	99.47	100	0.27976
<b>#70</b>	0.21	97.05			<b>#70</b>	0.21	99.68		
<b>#60</b>	0.25	97.47			<b>#60</b>	0.25	99.75		
<b>#50</b>	0.297	97.83			<b>#50</b>	0.297	99.81		
<b>#40</b>	0.417	98.38	98.93	0.299434	<b>#40</b>	0.417	99.89		
<b>#30</b>	0.59	98.81			<b>#30</b>	0.59	99.94		
<b>#20</b>	0.84	99.13	99.37	0.059009	<b>#20</b>	0.84	99.97		
<b>#10</b>	1.9	99.59	99.75	0.025238	<b>#10</b>	1.9	99.99		
<b>#8</b>	2.38	99.67			<b>#8</b>	2.38	100.00		
<b>#6</b>	3.36	99.77			<b>#6</b>	3.36	100.00		
<b>#4</b>	4.76	99.84	99.96	0.014237	<b>#4</b>	4.76	100.00		
<b>#3</b>	6.35	99.88			<b>#3</b>	6.35	100.00		
<b>#3/8''</b>	9.52	99.93	100	0.005144	<b>#3/8''</b>	9.52	100.00		
<b>#1/2''</b>	12.7	99.95			<b>#1/2''</b>	12.7	100.00		
<b>#3/4''</b>	19.1	99.97			<b>#3/4''</b>	19.1	100.00		
<b>#1''</b>	25.4	99.98			<b>#1''</b>	25.4	100.00		
<b>#1.5''</b>	38.1	99.99			<b>#1.5''</b>	38.1	100.00		
<b>#2''</b>	50.8	99.99			<b>#2''</b>	50.8	100.00		
<b>#2.5''</b>	63.5	100.00			<b>#2.5''</b>	63.5	100.00		
<b>#3''</b>	76.2	100.00			<b>#3''</b>	76.2	100.00		
<b>#4''</b>	101.6	100.00			<b>#4''</b>	101.6	100.00		



**Murray Fredlund Unimodal Equation**

**Soil:** Chalkoutsi Marl

**Parameters**

$\alpha_{gr}$	<b>0.05</b>
$n_{gr}$	<b>1.7</b>
$m_{gr}$	<b>0.6</b>
$d_{rgr}$	<b>1000</b>
$d_m$	<b>0.00025</b>

Predicted		Actual	MSM
<b>d</b> (mm)	<b>Pp(d)</b> (%)	<b>Pp(d)</b> (%)	<b>0.01</b>

	0.001212	17.71	17.324	1.5067E-05
	0.002899	27.40	24.065	0.00111539
	0.003997	31.36	30.806	3.038E-05
	0.005534	35.75	36.199	1.9828E-05
	0.007655	40.68	41.591	8.2679E-05
	0.010452	46.07	49.681	0.00130253
	0.01396	51.75	55.073	0.00110379
	0.019489	59.09	57.77	0.00017341
	0.027198	66.98	60.466	0.00423892
<b>#200</b>	0.074	87.46	84.726	0.00074595
<b>#100</b>	0.149	94.66	88.99	0.00321657
<b>#70</b>	0.21	96.52		
<b>#60</b>	0.25	97.19		
<b>#50</b>	0.297	97.73		
<b>#40</b>	0.417	98.49	94.744	0.00140444
<b>#30</b>	0.59	99.00		
<b>#20</b>	0.84	99.34	96.984	0.00055629
<b>#10</b>	1.9	99.75	98.815	8.7808E-05
<b>#8</b>	2.38	99.81	99.05	5.809E-05
<b>#6</b>	3.36	99.88		
<b>#4</b>	4.76	99.92	99.698	5.0801E-06
<b>#3</b>	6.35	99.95		
<b>#3/8''</b>	9.52	99.97	100	8.1349E-08
<b>#1/2''</b>	12.7	99.98		
<b>#3/4''</b>	19.1	99.99		
<b>#1''</b>	25.4	99.99		
<b>#1.5''</b>	38.1	100.00		
<b>#2''</b>	50.8	100.00		
<b>#2.5''</b>	63.5	100.00		
<b>#3''</b>	76.2	100.00		
<b>#4''</b>	101.6	100.00		

**Murray Fredlund Unimodal Equation**

**Soil: Pure Silt**

<b>Param.</b>	$\alpha_{gr}$	<b>0.066</b>
	$n_{gr}$	<b>11.5</b>
	$m_{gr}$	<b>0.33</b>
	$d_{rgr}$	<b>1.3</b>
	$d_m$	<b>0.000284</b>

**Soil: Speswhite Kaolin**

<b>Param.</b>	$\alpha_{gr}$	<b>0.002</b>
	$n_{gr}$	<b>2.9</b>
	$m_{gr}$	<b>0.39</b>
	$d_{rgr}$	<b>2.7</b>
	$d_m$	<b>0.000266</b>

Predicted		Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)	
			<b>70.73</b>

Predicted		Actual	MSM
d (mm)	Pp(d) (%)	Pp(d) (%)	
			<b>6.56</b>

	0.0014	22.02	22.89	0.750704		0.0012	54.80	54.91	0.011422
	0.004	29.50	25.37	17.06527		0.0028	83.21	81.96	1.564174
	0.0069	32.91	32.84	0.004401		0.0045	91.07	91.98	0.831151
	0.0097	35.22	37.81	6.731518		0.0062	94.11	94.99	0.782776
	0.014	38.14	40.3	4.680875		0.009	96.36	96.99	0.401033
	0.023	43.63	47.76	17.02339		0.015	98.16	96.99	1.357471
	0.038	54.20	50.25	15.56375		0.026	99.16	98	1.350109
	0.052	70.26	70.15	0.011511		0.036	99.49	99	0.244369
<b>#200</b>	0.074	97.02	100	8.899194	<b>#200</b>	0.074	99.86	100	0.020954
<b>#100</b>	0.1	99.87			<b>#100</b>	0.1	99.92		
	0.149	99.99				0.149	99.97		
<b>#70</b>	0.21	100.00			<b>#70</b>	0.21	99.98		
<b>#60</b>	0.25	100.00			<b>#60</b>	0.25	99.99		
<b>#50</b>	0.297	100.00			<b>#50</b>	0.297	99.99		
<b>#40</b>	0.417	100.00			<b>#40</b>	0.417	100.00		
<b>#30</b>	0.59	100.00			<b>#30</b>	0.59	100.00		
<b>#20</b>	0.84	100.00			<b>#20</b>	0.84	100.00		
<b>#10</b>	1.9	100.00			<b>#10</b>	1.9	100.00		
<b>#8</b>	2.38	100.00			<b>#8</b>	2.38	100.00		
<b>#6</b>	3.36	100.00			<b>#6</b>	3.36	100.00		
<b>#4</b>	4.76	100.00			<b>#4</b>	4.76	100.00		
<b>#3</b>	6.35	100.00			<b>#3</b>	6.35	100.00		
<b>#3/8''</b>	9.52	100.00			<b>#3/8''</b>	9.52	100.00		
<b>#1/2''</b>	12.7	100.00			<b>#1/2''</b>	12.7	100.00		
<b>#3/4''</b>	19.1	100.00			<b>#3/4''</b>	19.1	100.00		
<b>#1''</b>	25.4	100.00			<b>#1''</b>	25.4	100.00		
<b>#1.5''</b>	38.1	100.00			<b>#1.5''</b>	38.1	100.00		
<b>#2''</b>	50.8	100.00			<b>#2''</b>	50.8	100.00		
<b>#2.5''</b>	63.5	100.00			<b>#2.5''</b>	63.5	100.00		
<b>#3''</b>	76.2	100.00			<b>#3''</b>	76.2	100.00		
<b>#4''</b>	101.6	100.00			<b>#4''</b>	101.6	100.00		

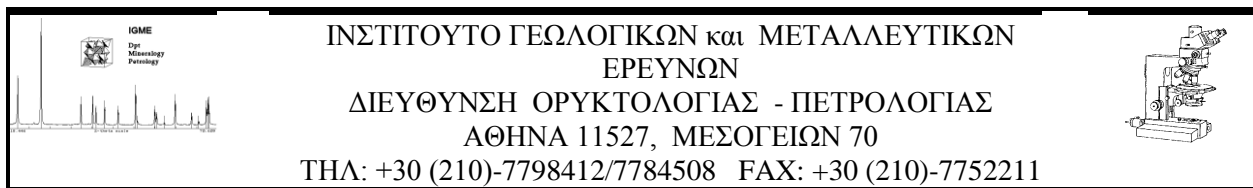
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

## ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΤΑ ΕΔΑΦΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Για την εξασφάλιση της πλήρους κατανόησης των παρατηρηθέντων φαινομένων στις εργαστηριακές δοκιμές του προγράμματος δοκιμών της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν ορυκτολογικές αναλύσεις σε όλα τα χρησιμοποιηθέντα εδαφικά υλικά για τα οποία δεν υπήρχαν αξιόπιστες πληροφορίες για την ορυκτολογική τους σύσταση από την βιβλιογραφία. Οι ορυκτολογικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ) με συνδυασμό των μεθόδων της περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ και του κυανού του μεθυλενίου. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν από την κα Σ. Καραντάση, ορυκτολόγο-πετρογράφο του ΙΓΜΕ.

Στο παρόν Παράρτημα Δ παρατίθεται αυτούσια η γνωμάτευση του ΙΓΜΕ. Η επεξεργασία των στοιχείων από τις ορυκτολογικές αναλύσεις και ο συνδυασμός τους με τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών όπως προσδιορίστηκαν από τις εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 11, 13 και 14.

Εκ παραδρομής η Άργιλος Κηφισιάς και η Μάργα Κηφισιάς αναφέρονται ως Άργιλος Αγ. Αναργύρων και Μάργα Αγ. Αναργύρων αντίστοιχα λόγω της προέλευσής τους από το ογκολογικό νοσοκομείο «Αγ. Ανάργυροι».



Αθήνα 8 / 11 / 2003

**ΓΝΩΜΑΤΕΥΣΗ ΑΡΙΘ. 6123**

από  
**Σταυρούλα Καραντάση**

**Συλλέκτης:** Μιχ. Μπαρδάνης Ε.Μ.Π  
**Προέλευση:** Διάφορες περιοχές της Ελλάδας  
**Έργο:** Υπέρ Τρίτων  
**Αριθμ. Δειγμάτων:** 8  
**Είδος Δειγμάτων:** αργιλικό και μαργαϊκό υλικό  
**Μικροσκοπικές τομές:** παρασκευάσματα κόνεως  
**XRD:** 8  
**Αιτούμενοι προσδιορισμοί:** ποσοτικός ορυκτολογικός προσδιορισμός με XRD

Η παρούσα γνωμάτευση αφορά στον ποσοτικό ορυκτολογικό προσδιορισμό 8 δειγμάτων από αργίλους και μάργες διαφόρων περιοχών της Ελλάδας, ο οποίος έγινε στη Διεύθυνση Ορυκτολογίας – Πετρολογίας του Ι. Γ. Μ. Ε. για τις ανάγκες Προγράμματος του Ε.Μ.Π (υπεύθυνος Μ. Μπαρδάνης), μετά από σχετική αίτηση (αριθ. πρωτ. Ι.Γ.Μ.Ε 1965/19–3–03).

Τα προσκομισθέντα δείγματα μελετήθηκαν με τη μέθοδο περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ, ενώ παράλληλα έγινε στα δείγματα δοκιμή με κυανούν του μεθυλενίου για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας σε μοντμοριλλονίτη, καθώς και απομάκρυνση των ανθρακικών ορυκτών και ποσοτικός προσδιορισμός.

Συμπληρωματικά κρίθηκε σκόπιμη η μικροφωτογράφιση παρασκευασμάτων κόνεως και η συναξιολόγηση των μικροσκοπικών και ακτινογραφικών δεδομένων.

Οι κωδικοί αριθμοί των δειγμάτων είναι :

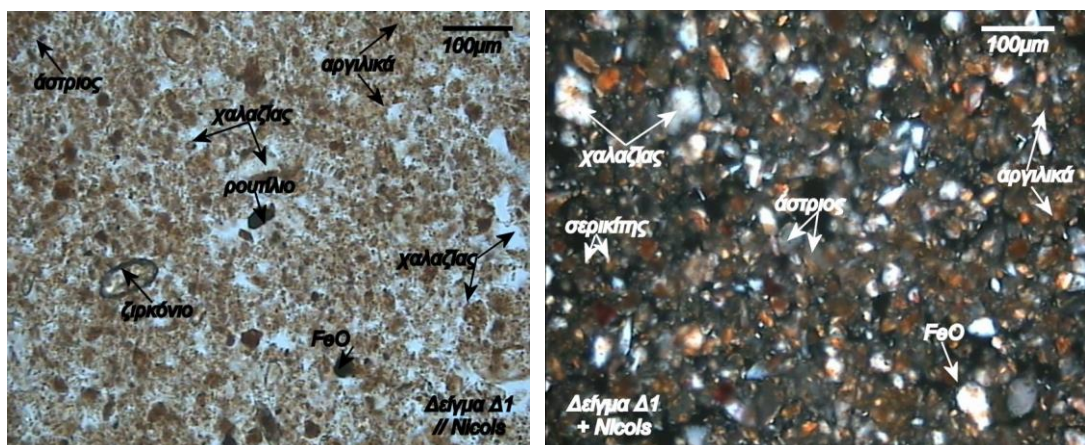
- Δ1 – Άργιλος Χανίων**
- Δ2 – Άργιλος Κορίνθου**
- Δ3 – Άργιλος Αγίων Αναργύρων**
- Δ4 – Άργιλος Αμαρουσίου**
  
- Δ6 – Μάργα Κορίνθου**
- Δ7 / Μάργα Αγίων Αναργύρων**
- Δ8 - Μάργα Πατρών**
  
- Δ9 – Ιλύς λίμνης Ιωαννίνων**

## Δ1 – Άργιλος Χανίων



Φωτ. 1. Καστανοπορτοκαλόχρους άργιλος

### Α. Μικροσκοπικές παρατηρήσεις



Μικροφωτογραφίες παρασκευασμάτων κόνεως, σε παράλληλα και κάθετα πρίσματα

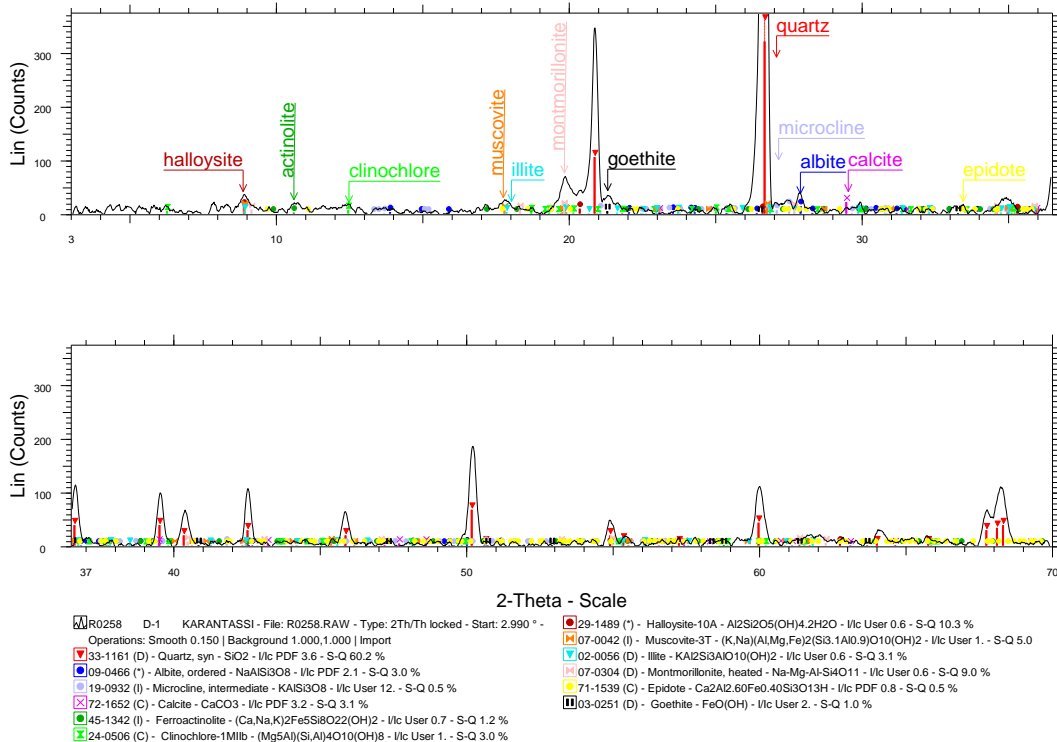
Η παρατήρηση υλικού του δείγματος σε πολωτικό μικροσκόπιο διερχομένου φωτός, μέσω παρασκευασμάτων κόνεως, κατέδειξε ότι η αναλογία αργιλικών και μη αργιλικών ορυκτών είναι 1:2, με επικρατέστερο ορυκτολογικό συστατικό το χαλαζία.

Με βάση αυτή την ποιοτική και ποσοτική σύσταση το εν λόγω υλικό εντάσσεται στην κατηγορία των "πηλών" και όχι των "αργίλων".

## B. Ακτινογραφική ανάλυση (περιθλασιμετρία ακτίνων X)

Στο παρακάτω διάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων X απεικονίζονται τα συστατικά του δείγματος με τους ορυκτολογικούς τύπους και τα ποσοστά τους, που για πρακτικούς λόγους περιέχονται και σε σχετικό πίνακα.

### D1 / Argilos Chanion / R0258



### Πίνακας εκατοστιαίας ορυκτολογικής ανάλυσης

ΟΡΥΚΤΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ Δ-1 ΑΡΓΙΛΟΣ ΧΑΝΙΩΝ
χαλαζίας	60
αλβίτης	3
μικροκλινής	0,5
ασβεστίτης	3
αλλοϋσίτης	10
ιλλίτης	3
μοσχοβίτης	5
χλωρίτης	3
μοντμοριλλονίτης	9
ακτινόλιθος	1
επίδοτο	0,5
γκαιίτης	1
*λοιπά ορυκτά	1

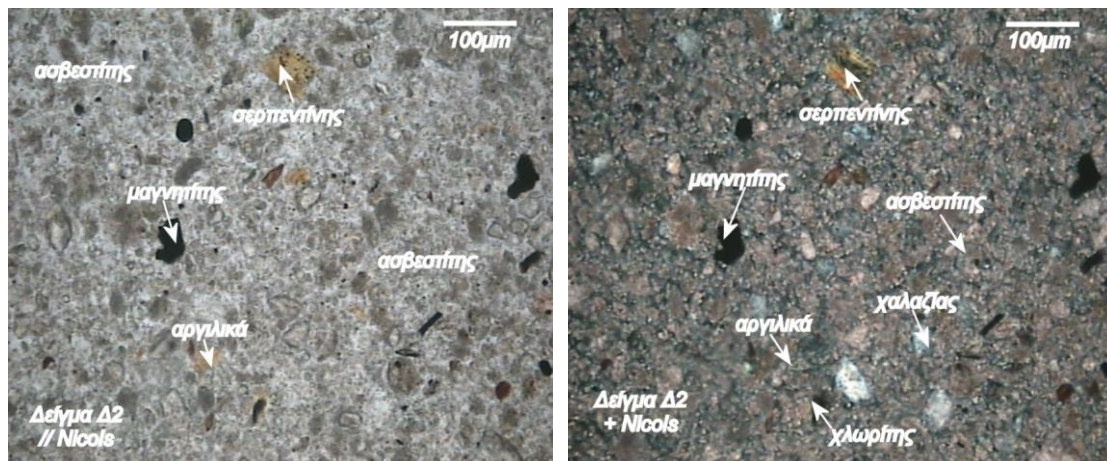
\* επίδοτο, τουρμαλίνης, ζιρκόνιο, ρουτίλιο.

## Δ2 – Άργιλος Κορίνθου



Φωτ. 2. ανοικτότεφρη άργιλος

### Α. Μικροσκοπικές παρατηρήσεις



Μικροφωτογραφίες παρασκευασμάτων κόνεως, σε παράλληλα και κάθετα πρίσματα

Σύμφωνα με τη μικροσκοπική παρατήρηση το δείγμα αποτελείται από τις εξής κύριες ομάδες ορυκτολογικών συστατικών:

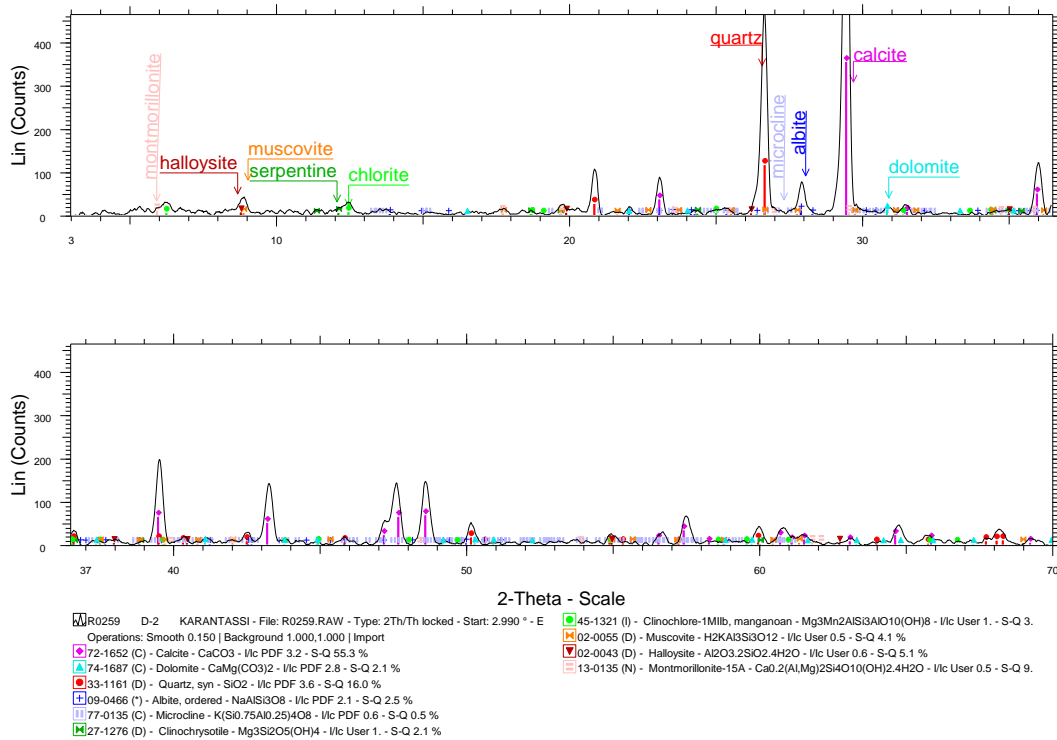
- α) ανθρακικά
- β) αργιλικά ορυκτά.
- γ) χαλαζίας

Η υψηλή περιεκτικότητα του υλικού σε ασβεστίτη σε συνδυασμό με τη συμμετοχή των αργιλικών ορυκτών κατατάσσει το δείγμα στα μαργαϊκά υλικά και όχι στις αργίλους.

## B. Ακτινογραφική ανάλυση (περιθλασιμετρία ακτίνων X)

Τα ορυκτολογικά συστατικά του δείγματος απεικονίζονται στο διάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων X και στον πίνακα εκατοστιαίας ορυκτολογικής ανάλυσης.

### D2 /Argilos Korinthou / R0259



### Πίνακας εκατοστιαίας ορυκτολογικής ανάλυσης

ΟΡΥΚΤΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ Δ-2 ΑΡΓΙΛΟΣ ΚΟΡΙΝΘΟΥ
χαλαζίας	16
αλβίτης	2,5
μικροκλινής	0,5
ασβεστίτης	55
δολομίτης	2
σερπεντίνης	2
χλωρίτης	3
μοσχοβίτης	4
αλλοϋσίτης	5
μοντμοριλλονίτης	9
*λοιπά ορυκτά	1

\* επίδοτο, ζιρκόνιο, ρουτίλιο, τιτανίτης, μαγνητίτης, χρωμίτης.

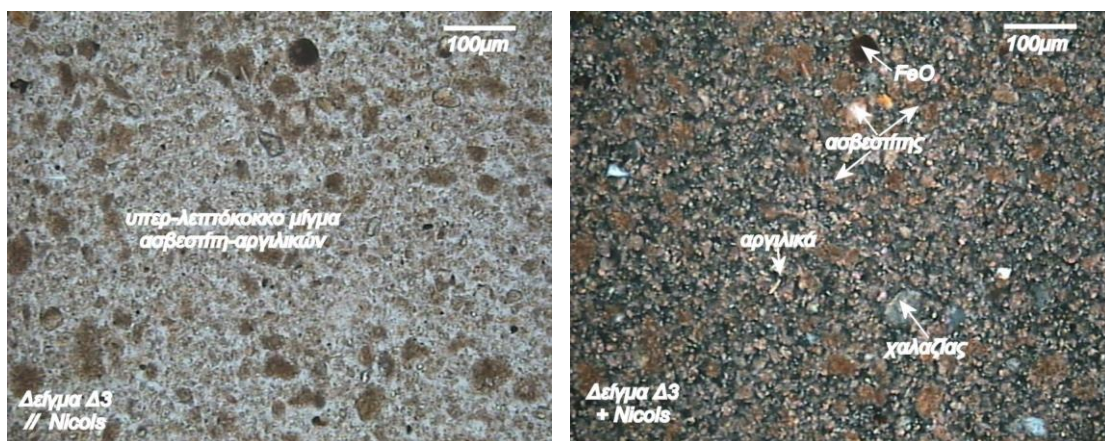


### Δ3 – Άργιλος Αγίων Αναργύρων



Φωτ. 3. Καστανοπορτοκαλόχρους άργιλος

#### Α. Μικροσκοπικές παρατηρήσεις



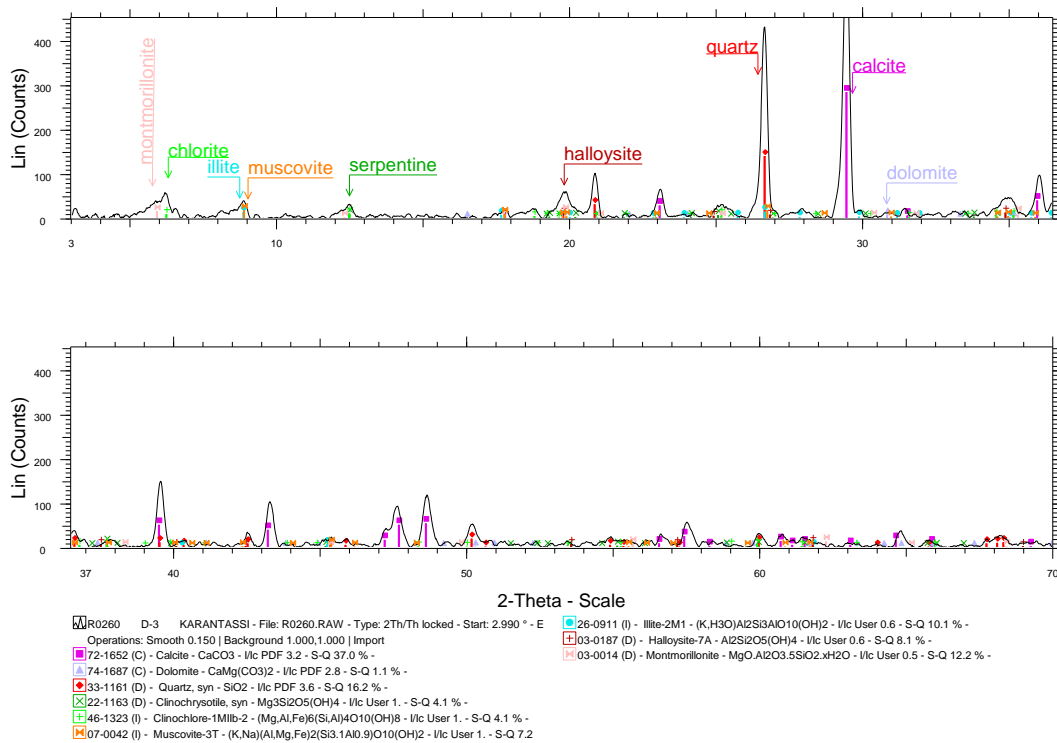
Μικροφωτογραφίες παρασκευασμάτων κόνεως, σε παράλληλα και κάθετα πρίσματα

Στη μάζα του δείγματος επικρατούν τα ορυκτά της ομάδας των αργιλικών και ακολουθούν τα ανθρακικά και ο χαλαζίας. Τα αργιλικά, όπως έδειξε η ανάλυση περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ, αντιπροσωπεύονται κατά σειρά αναλογίας, από μοντμοριλλονίτη, ιλλίτη, αλλοϋσίτη, μοσχοβίτη, σερπεντίνη και χλωρίτη. Το πορτοκαλο-κάστανο χρώμα του δείγματος οφείλεται στη σχετικά αυξημένη παρουσία οξειδίων – υδροξειδίων του σιδήρου.

## B. Ακτινογραφική ανάλυση (περιθλασιμετρία ακτίνων X)

Στο ακτινοδιάγραμμα και στον πίνακα που ακολουθούν αποτυπώνεται το σύνολο των ορυκτολογικών συστατικών του δείγματος.

### D3 / Argilos Ag. Anargyron / R0260



### Πίνακας εκατοστιαίας ορυκτολογικής ανάλυσης

ΟΡΥΚΤΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ Δ-3 ΑΡΓΙΛΟΣ ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΩΝ
χαλαζίας	16
ασβεστίτης	37
δολομίτης	1
σερπεντίνης	4
χλωρίτης	4
μοσχοβίτης	7
ιλλίτης	10
αλλοϋσίτης	8
μοντμοριλλονίτης	12
*λοιπά ορυκτά	1

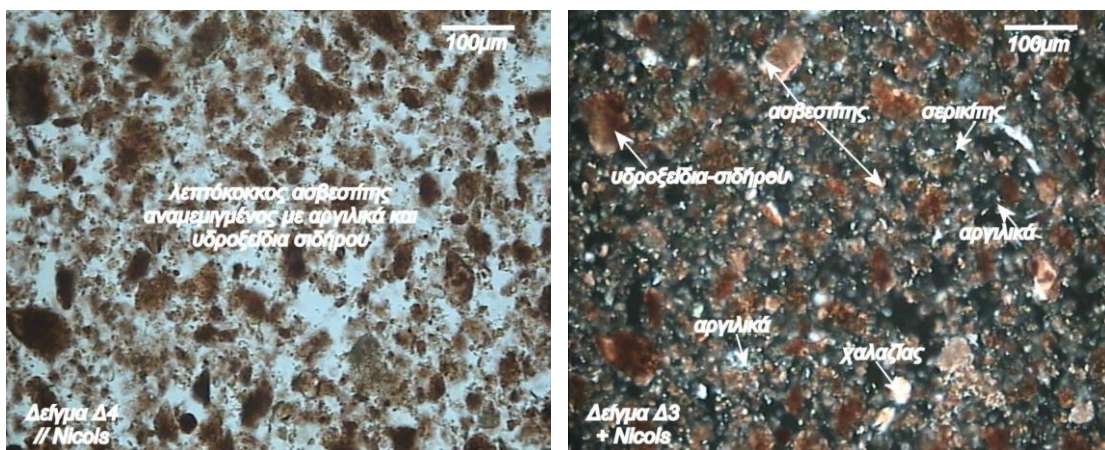
\*άστριοι, τουρμαλίνης, ζirkόνιο, ρουτίλιο, τιτανίτης, οξειδία-υδροξειδία σιδήρου.

## Δ4 – Άργιλος Αμαρουσίου



Φωτ. 4. Ερυθρά άργιλος

### Α. Μικροσκοπικές παρατηρήσεις



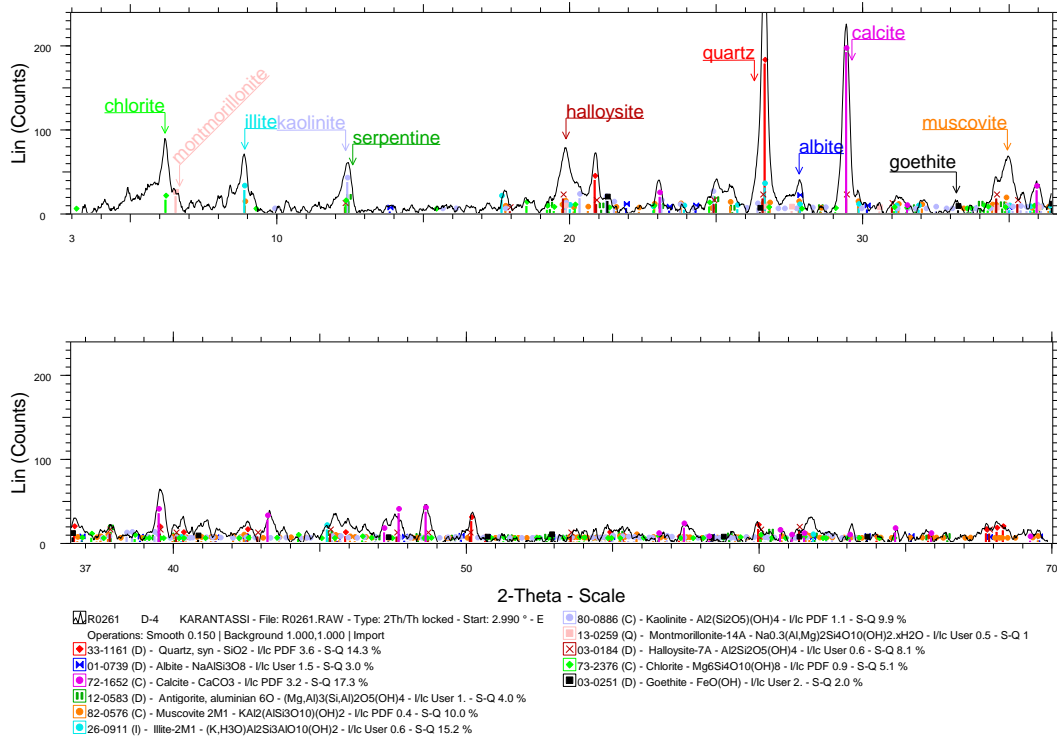
Μικροφωτογραφίες παρασκευασμάτων κόνεως, σε παράλληλα και κάθετα πρίσματα

Τα κύρια γνωρίσματα του εν λόγω υλικού είναι η αυξημένη περιεκτικότητά του σε αργιλικά και σε σιδηρούχες ενώσεις ( αιματίτης-γκαιτίτης). Οι τελευταίες απαντώνται υπό μορφή πυκνών στιγμάτων και εμποτισμάτων και χρησιμεύουν ως φυσική χρωστική του δείγματος.

## B. Ακτινογραφική ανάλυση (περιθλασιμετρία ακτίνων X)

Η ποιοτική και ποσοτική ορυκτολογική σύσταση του δείγματος περιέχονται τόσο στο παρακάτω διάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων X, όσο και στο σχετικό πίνακα.

### D4 / Argilos Amarousiou / R0261

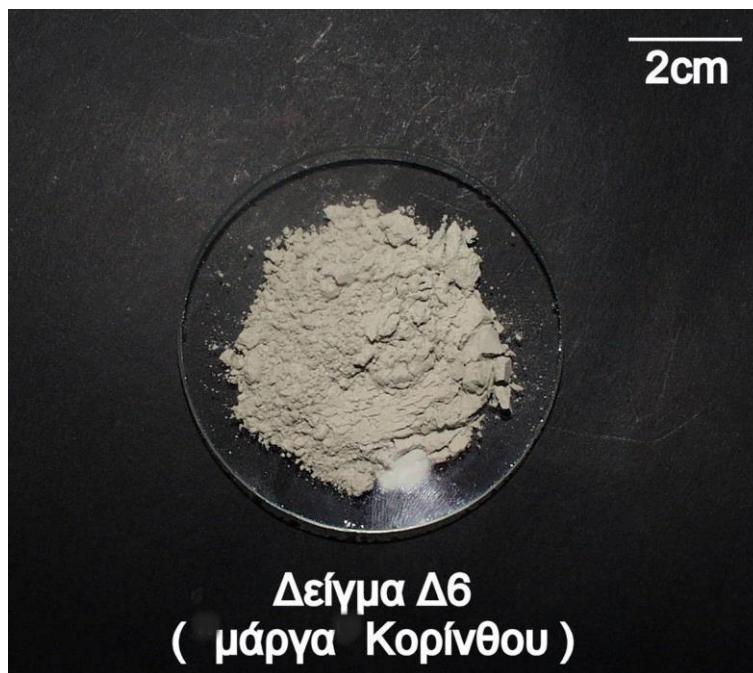


### Πίνακας εκατοστιαίας ορυκτολογικής ανάλυσης

ΟΡΥΚΤΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ Δ-4 ΑΡΓΙΛΟΣ ΑΜΑΡΟΥΣΙΟΥ
χαλαζίας	14
αλβίτης	3
ασβεστίτης	17
σερπεντίνης	4
μοσχοβίτης	10
ιλίτης	15
καολινίτης	10
μοντμοριλλονίτης	11
αλλοϋσίτης	8
χλωρίτης	5
αιματίτης- γκαϊτίτης	2
*λοιπά ορυκτά	1

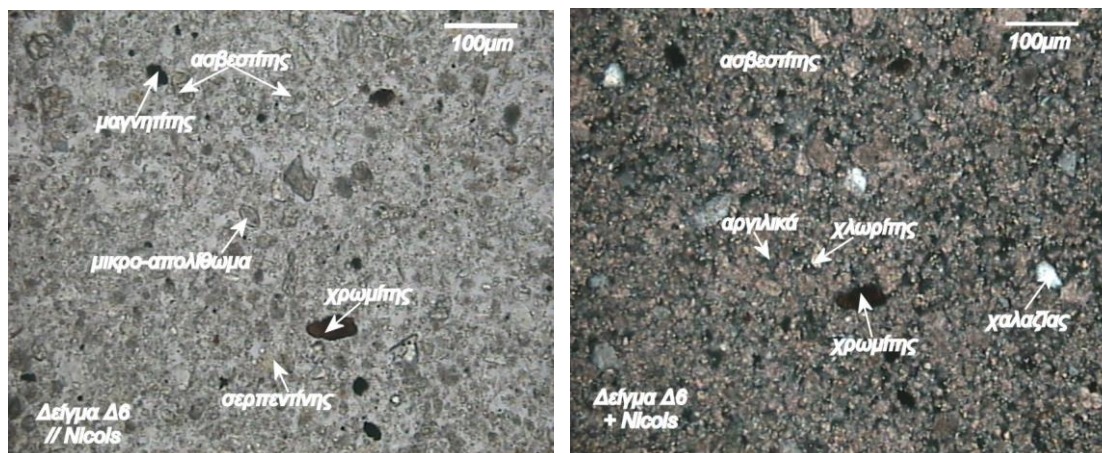
\* επίδοτο, τουρμαλίνης, ζirkόνιο, ρουτίλιο.

## Δ6 – Μάργα Κορίνθου



Φωτ. 5. Μάργα τεφρού χρώματος

### A. Μικροσκοπικές παρατηρήσεις



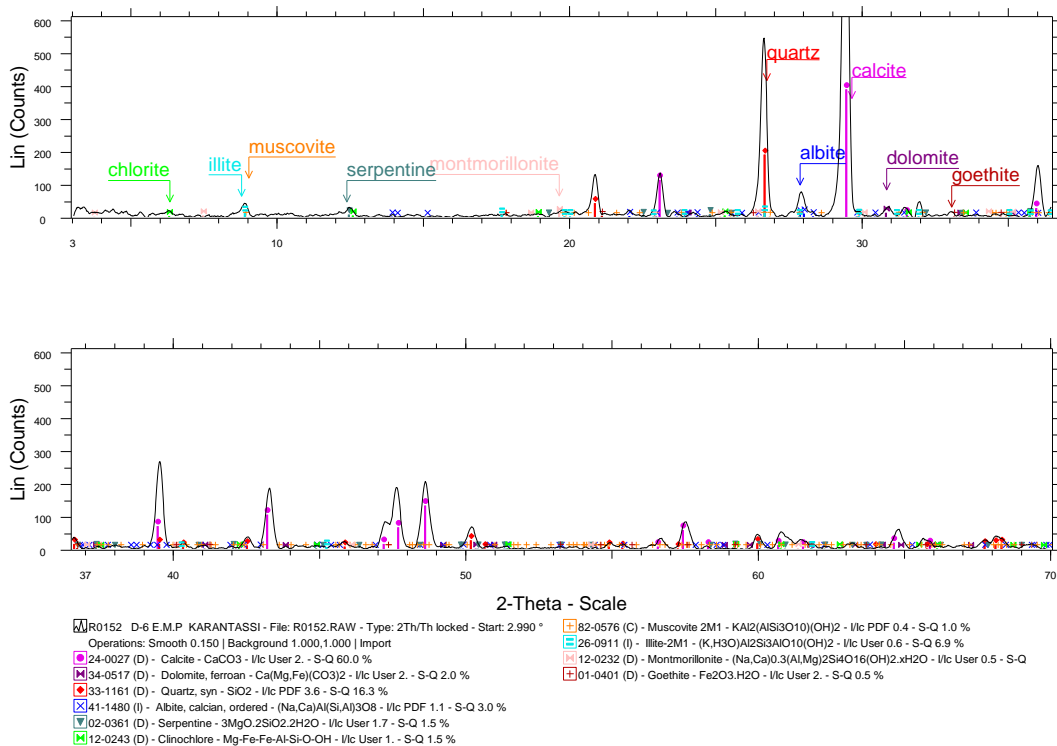
Μικροφωτογραφίες παρασκευασμάτων κόνεως, σε παράλληλα και κάθετα πρίσματα

Πρόκειται για υλικό πλούσιο σε ασβεστίτη και χαλαζία και πτωχό σε ορυκτά της ομάδας των αργιλικών. Αυτό επιβεβαιώθηκε και από την, μέσω περιθλασιμετρίας ακτίνων X ημιποσοτική ανάλυση, σύμφωνα με την οποία τα αργιλικά ορυκτά συμμετέχουν σε ποσοστό περίξ του 20% και εκπροσωπούνται στην ίδια περίπου αναλογία κυρίως από ιλίτη – μοσχοβίτη και μοντμοριλλονίτη.

## B. Ακτινογραφική ανάλυση (περιθλασιμετρία ακτίνων X)

Στο διάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων X και στον πίνακα εκατοστιαίας ορυκτολογικής σύστασης δίδεται το σύνολο των ορυκτολογικών συστατικών του δείγματος.

### D6- Marga Korinthou / R0152



### Πίνακας εκατοστιαίας ορυκτολογικής ανάλυσης

ΟΡΥΚΤΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ Δ-6 ΜΑΡΓΑ ΚΟΡΙΝΘΟΥ
χαλαζίας	16
αλβίτης	3
ασβεστίτης	60
δολομίτης	2
σερπεντίνης	1,5
χλωρίτης	1,5
μοσχοβίτης	1
ιλλίτης	7
μοντμοριλλονίτης	7
*λοιπά ορυκτά	1

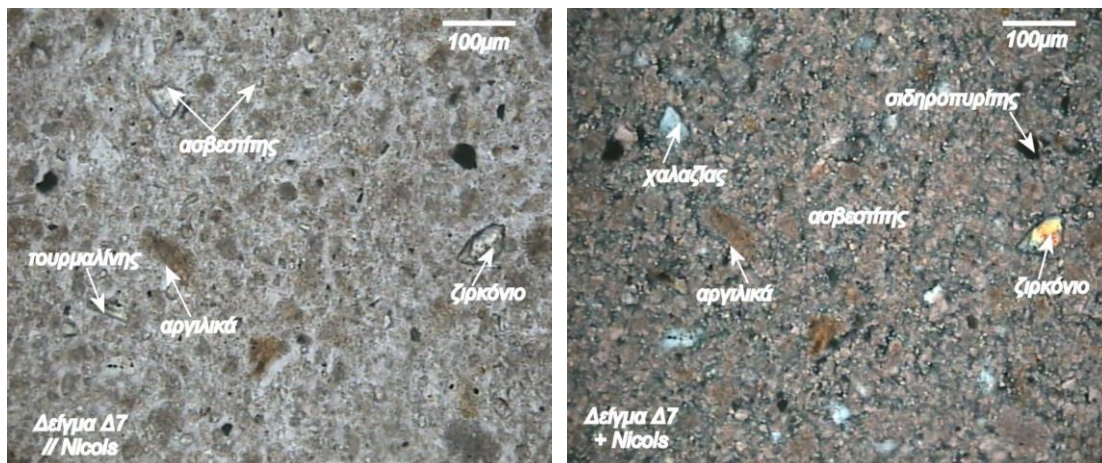
\* ζιρκόνιο, ρουτίλιο, μαγνητίτης, γκαϊτίτης, χρωμίτης.

## Δ7 - Μάργα Αγίων Αναργύρων



Φωτ. 6. Μάργα υποκίτρινου χρώματος

### Α. Μικροσκοπικές παρατηρήσεις



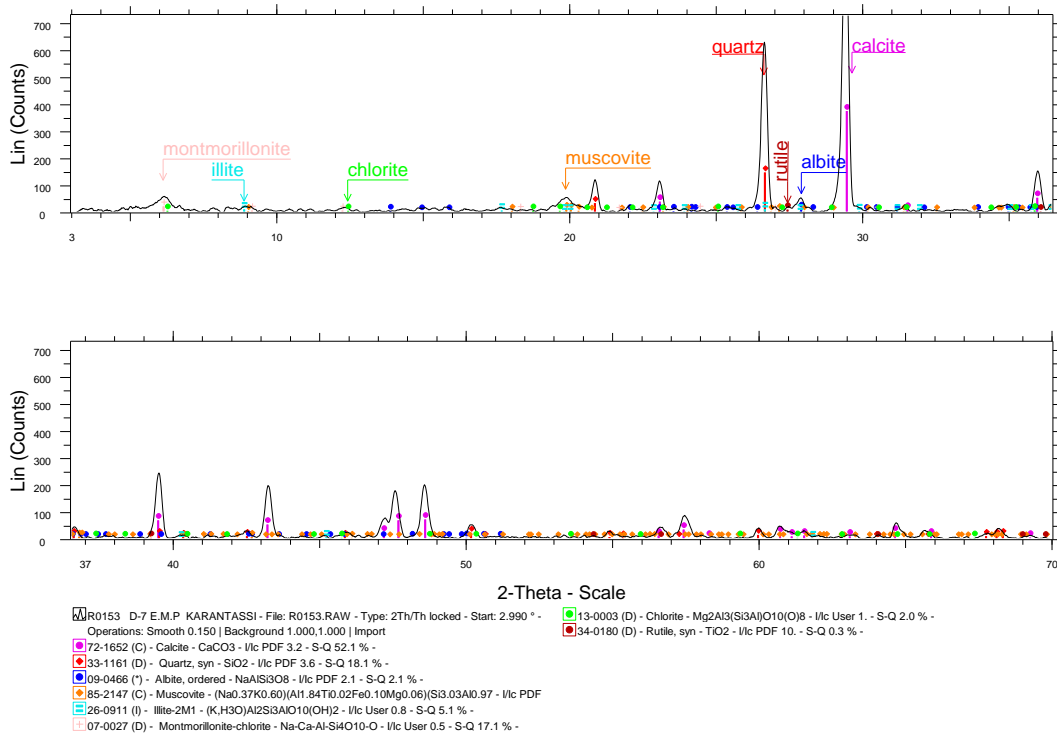
Μικροφωτογραφίες παρασκευασμάτων κόνεως, σε παράλληλα και κάθετα πρίσματα

Ο ασβεστίτης είναι το συστατικό με τη μεγαλύτερη συμμετοχή στη σύσταση του συγκεκριμένου δείγματος. Ακολουθούν τα ορυκτά της ομάδας των αργιλικών και έπεται ο χαλαζίας. Σαν επουσιώδη ορυκτά απαντώνται σε διάσπαρτους κόκκους τουρμαλίνης, ζιρκόνιο, επίδοτο, ρουτίλιο, μερικώς οξειδωμένος σιδηροπυρίτης και λίγα οξείδια-υδροξείδια σιδήρου υπό μορφή εμποτισμάτων.

## B. Ακτινογραφική ανάλυση (περιθλασιμετρία ακτίνων X)

Με την περιθλασιμετρία ακτίνων X προσδιορίστηκαν οι κυριότερες ορυκτολογικές φάσεις και έγινε και ημιποσοτική ανάλυση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δίδονται στο σχετικό ακτινοδιάγραμμα και στον πίνακα εκατοστιαίας ορυκτολογικής ανάλυσης.

### D7 / Marga Ag. Anargyron / R0153



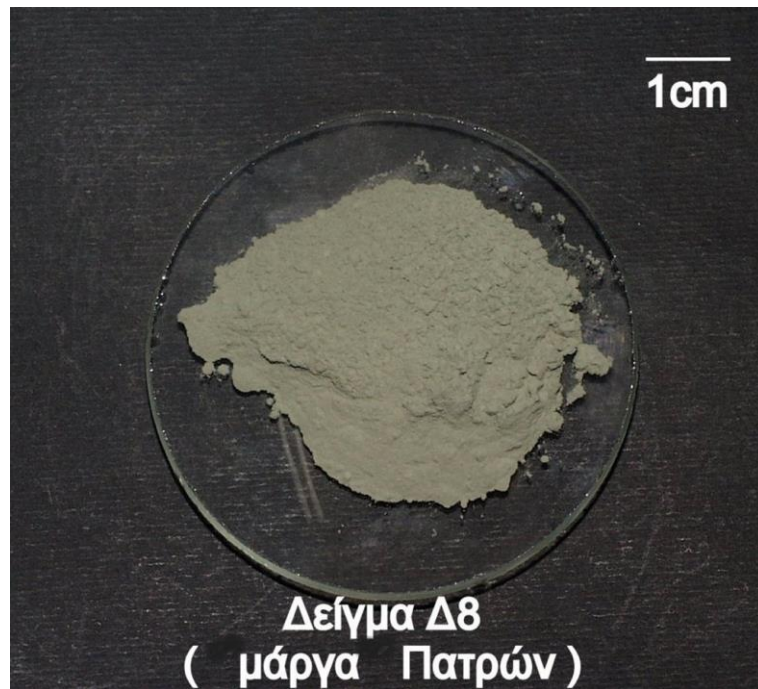
### Πίνακας εκατοστιαίας ορυκτολογικής ανάλυσης

ΟΡΥΚΤΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ Δ-7 ΜΑΡΓΑ ΑΓ. ΑΝΑΡΓΥΡΩΝ
χαλαζίας	18
αλβίτης	2
ασβεστίτης	52
μοσχοβίτης	3
ιλλίτης	5
μοντμοριλλονίτης	17
χλωρίτης	2
*λοιπά ορυκτά	1

\* επίδοτο, τουρμαλίνης, ζirkόνιο, ρουτίλιο, οξειδία-υδροξειδία σιδήρου.

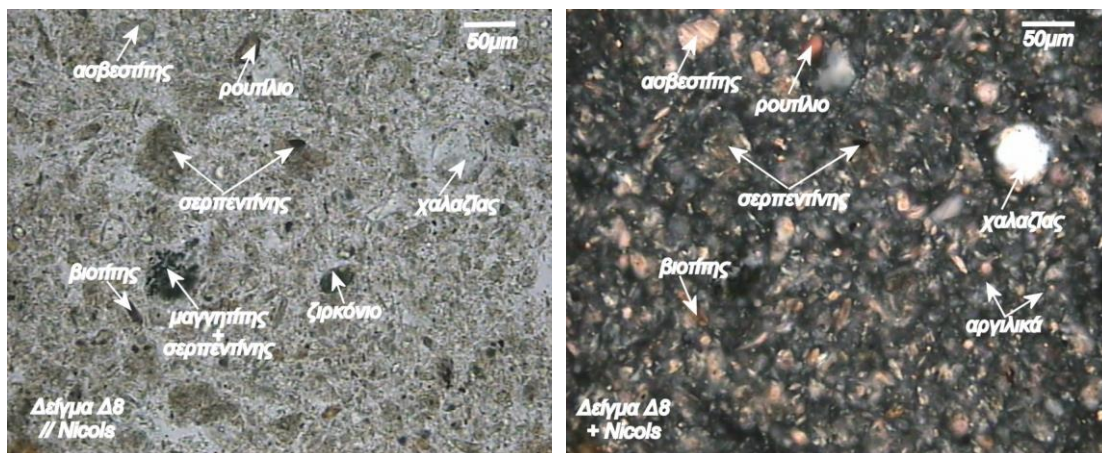


## Δ8 - Μάργα Πατρών



Φωτ. 7. Μάργα τεφροπράσινου χρώματος

### Α. Μικροσκοπικές παρατηρήσεις



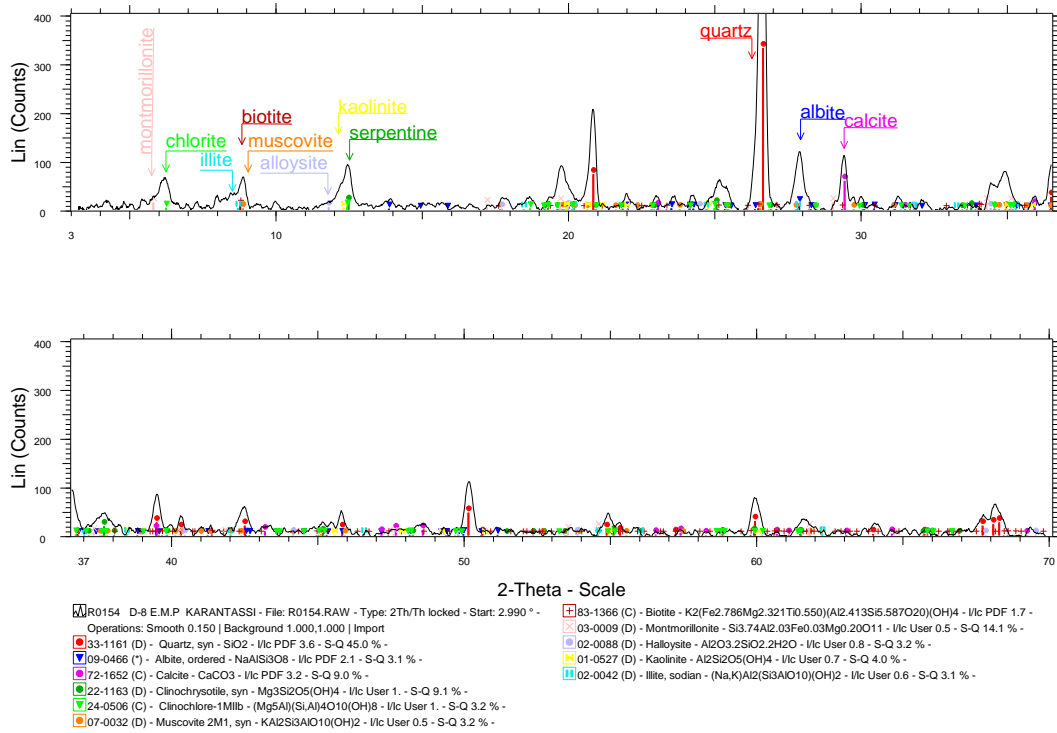
Μικροφωτογραφίες παρασκευασμάτων κόνεως, σε παράλληλα και κάθετα πρίσματα

Χαλαζίας και αργιλικά ορυκτά είναι τα συστατικά που υπεισέρχονται σε σημαντικό ποσοστό στη σύσταση του δείγματος και μάλιστα στην ίδια σχεδόν αναλογία. Αντίθετα η συμμετοχή του ασβεστίτη είναι περιορισμένη (~10%) και ως εκ τούτου το δείγμα αντιστοιχεί μάλλον σε άργιλο με χαλαζία (πηλός) παρά σε μαργαϊκό υλικό.

## B. Ακτινογραφική ανάλυση (περιθλασιμετρία ακτίνων X)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της XRD ανάλυσης το δείγμα περιέχει μεγάλη σχετικά ποικιλία αργιλικών συστατικών, τα είδη των οποίων με τα ποσοστά τους και με τα λοιπά ορυκτά απεικονίζονται στο σχετικό διάγραμμα και στον πίνακα που ακολουθεί.

### D8 / Marga Patron / R0154

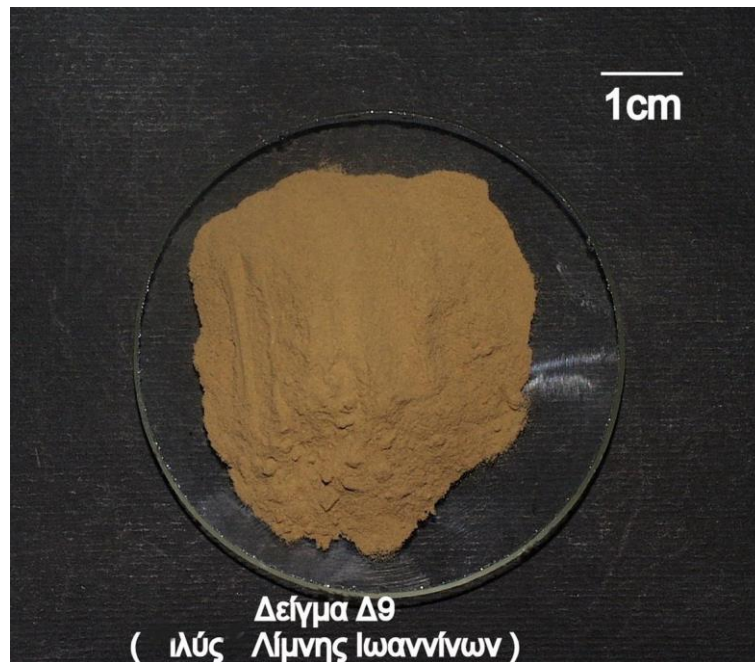


### Πίνακας εκατοστιαίας ορυκτολογικής ανάλυσης

ΟΡΥΚΤΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ Δ-8 ΜΑΡΓΑ ΠΑΤΡΩΝ
χαλαζίας	45
αλβίτης	3
ασβεστίτης	9
σερπεντίνης	9
μοσχοβίτης	3
ιλλίτης	3
καολινίτης	4
μοντμοριλλονίτης	14
αλλοϋσίτης	3
χλωρίτης	3
βιοτίτης	3
*λοιπά ορυκτά	1

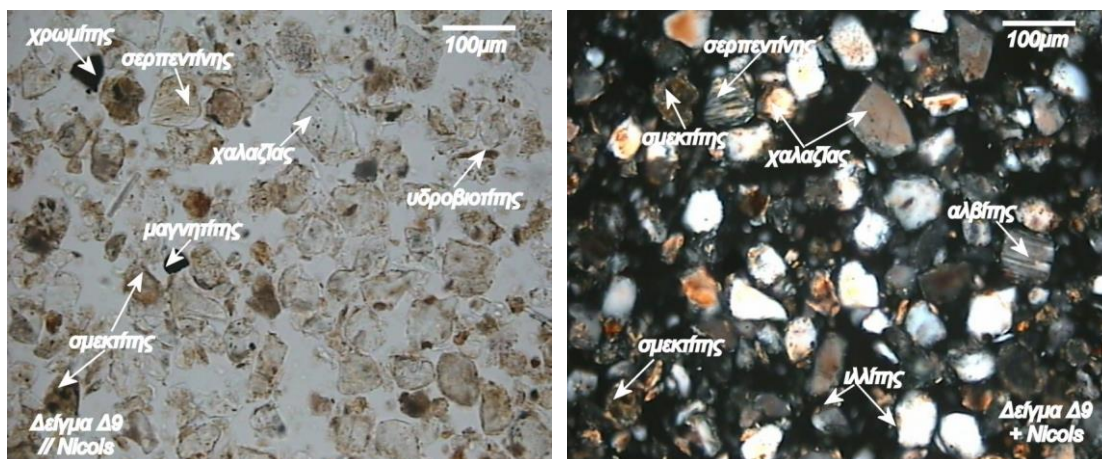
\* ζirkόνιο, ρουτίλιο, μαγνητίτης, χρωμίτης, γκαϊτίτης.

## Δ9 – Ιλύς λίμνης Ιωαννίνων



Φωτ.8. Καστανοπορτοκαλόχρους ιλύς

### Α. Μικροσκοπικές παρατηρήσεις



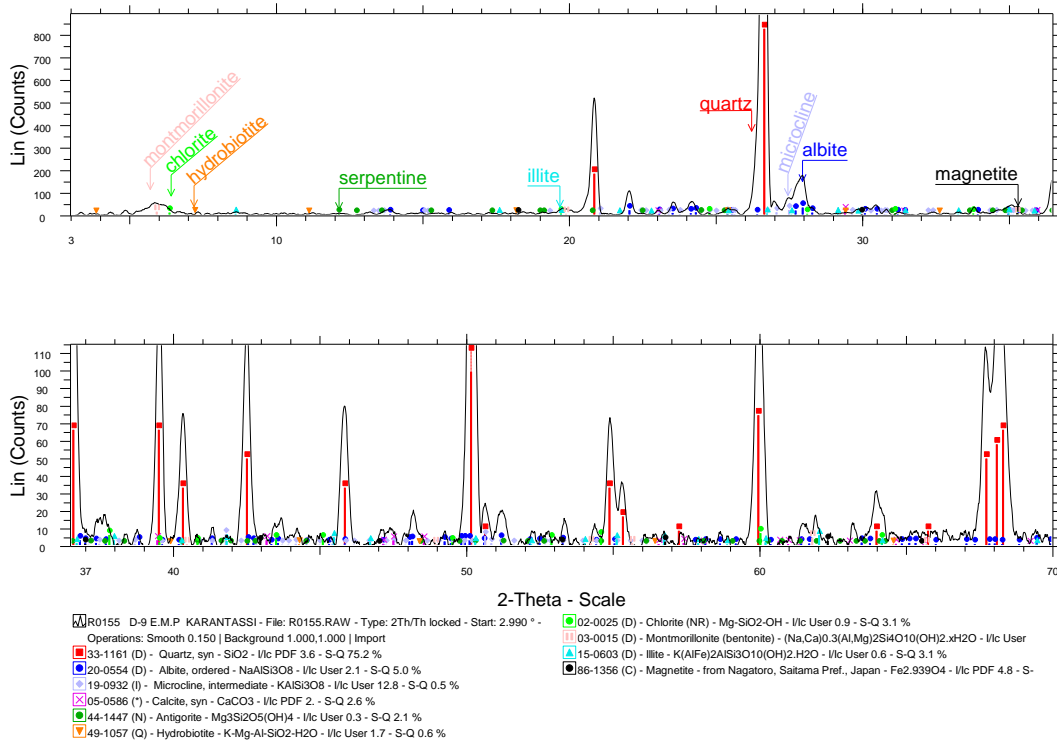
Μικροφωτογραφίες παρασκευασμάτων κόνεως, σε παράλληλα και κάθετα πρίσματα

Το συστατικό που δεσπόζει στη μάζα του δείγματος είναι ο χαλαζίας. Συγχρόνως παρατηρήθηκαν μερικοί λιθικοί κόκκοι κερατολίθου, καθώς και κρυσταλλικά θραύσματα αστρίων. Τα αργιλικά ορυκτά μετέχουν σε ποσοστό ~ 15% , το μισό του οποίου αντιστοιχεί, με βάση τη δοκιμή με κυανούν του μεθυλενίου, σε μοντμοριλλονίτη.

## B. Ακτινογραφική ανάλυση (περιθλασιμετρία ακτίνων X)

Στο παρακάτω διάγραμμα περιθλασιμετρίας ακτίνων X και στον πίνακα που ακολουθεί περιλαμβάνεται το σύνολο των ορυκτολογικών φάσεων του εξετασθέντος δείγματος με τα αντίστοιχα ποσοστά συμμετοχής τους.

### D-9 / Ilys Limnis Ioanninon / R0155



### Πίνακας εκατοστιαίας ορυκτολογικής ανάλυσης

ΟΡΥΚΤΑ	ΚΩΔΙΚΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ Δ-9 ΙΛΥΣ ΛΙΜΝΗΣ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
Χαλαζίας-κερατόλιθος	75
αλβίτης	5
μικροκλινής	0,5
ασβεστίτης	2,5
σερπεντίτης	2
χλωρίτης	3
υδροβιοτίτης	0,5
ιλλίτης	3
μοντμοριλλονίτης	7
μαγνητίτης	0,5
*λοιπά ορυκτά	1

\* επίδοτο, ζιρκόνιο, ρουτίλιο, χρωμίτης, υδροξείδια σιδήρου.