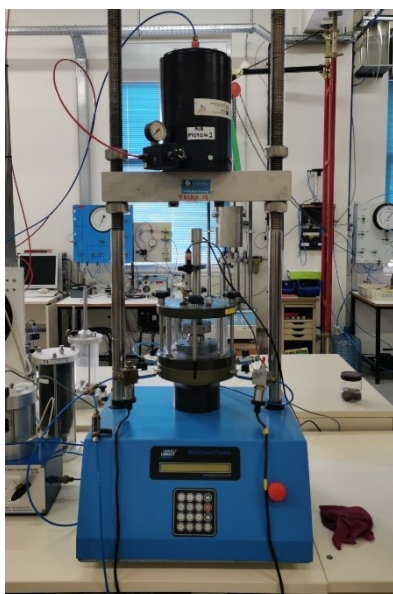




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

**ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ –
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΟΛΙΝΙΤΗ ΥΠΟ ΣΥΝΘΗΚΕΣ
ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ**

**BEHAVIOR OF UNSATURATED SOILS -
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE
MECHANICAL BEHAVIOR OF KAOLINITE UNDER
CONDITIONS OF FREE DRAINAGE**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ
ΕΠΙΒΛΕΨΗ: ΒΑΣΙΛΙΚΗ Ν. ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2024

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία είναι αφιερωμένη στην κόρη μου και στη σύζυγό μου, που μου πρόσφεραν απλόχερα την υποστήριξη τους και δίνουν πάντα αξία σε κάθε μου προσπάθεια.

Ευχαριστώ θερμά την επιβλέπουσα κα Β.Ν. Γεωργιάννου, καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. – Διευθύντρια Τομέα Γεωτεχνικής, που μου επέτρεψε να ασχοληθώ με το υπόψη αντικείμενο και με καθοδήγησε με αστείρευτη υπομονή.

Επιπλέον, ευχαριστώ πολύ την κα Ε.Μ. Παυλοπούλου Δρ. Πολ. Μηχ., ΕΤΕΠ, για την πολύτιμη βοήθεια της σε όλα τα στάδια εκπόνησης της παρούσας καθώς και τον κ. Στυλιανό Τσεντίδη για την τεχνική υποστήριξη.

Περίληψη

Τα μη κορεσμένα εδαφικά υλικά που εξαπλώνονται και στον ελλαδικό χώρο, επηρεάζουν σχεδόν όλες τις κατηγορίες των έργων πολιτικού μηχανικού. Όπου η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα είναι επαρκώς χαμηλότερη από την επιφάνεια, εμφανίζεται μία ζώνη μη κορεσμένου εδάφους. Η σπουδαιότητα περαιτέρω διερεύνησης της συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών έγκειται κυρίως στο ότι δεν ισχύει η βασική αρχή των ενεργών τάσεων, όπως αυτή έχει διατυπωθεί για τις ανάγκες της μηχανικής των κορεσμένων εδαφών.

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία, μελετάται η μηχανική συμπεριφορά ενός αναζυμωμένου καολινίτη υπό διάφορες τιμές μύζησης. Η μύζηση είναι το μέγεθος που εκφράζει τη διαφορά της πίεσης του νερού των πόρων (u_w) από την πίεση του αέρα (u_a) που αυτοί εμπεριέχουν ($u_a - u_w$), στα μη κορεσμένα εδάφη. Αρχικά διερευνήθηκε η επίδραση της μύζησης στη συμπίεστότητα του εδαφικού υλικού, στην πρόσφατα εγκατεστημένη συσκευή συμπίεσομέτρου για μη κορεσμένα εδάφη του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ. Παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης και μείωση της συμπίεστότητας του καολινίτη με την αύξηση της τιμής της μύζησης.

Επιπλέον, εκτελέστηκαν δοκιμές τριαξονικής θλίψης υπό σταθερή μύζηση και σε συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, στην τριαξονική συσκευή για μη κορεσμένα εδάφη, του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν αύξηση της αντοχής του δοκιμίου με την αύξηση της μύζησης. Κατά τη διάρκεια εφαρμογής της επιβαλλόμενης μύζησης, στο στάδιο της εξισορρόπησης των πιέσεων πόρων στο εσωτερικό του δοκιμίου, παρατηρήθηκε μικρή πτώση του βαθμού κορεσμού (20%) ανάλογα με την επιβαλλόμενη τιμή μύζησης και για εύρος 100,150,200,300,400 kPa, με εξαίρεση την τιμή των 50 kPa. Αντίθετα, παρατηρήθηκε αύξηση του βαθμού κορεσμού των δοκιμίων κατά το στάδιο επιβολής της διαμητρικής φόρτισης.

Abstract

Unsaturated soils, which become increasingly spread in Greece, significantly influence nearly all types of civil engineering projects. When the groundwater table is considerably lower than the ground surface, an unsaturated soil zone is created. The importance of further research into the behavior of unsaturated soils primarily is highlighted by the fact that the fundamental principle of effective stress which governs saturated soil behaviour, does not apply in unsaturated soils.

This thesis investigates the mechanical behavior of reconstituted kaolinite under varying matric suction values. Matric suction is a parameter that expresses the difference between the pore water pressure (u_w) and the air pressure (u_a) acting within the pore space ($u_a - u_w$). Initially, the effect of matric suction on the compressibility of the soil was examined using the oedometer apparatus designed for unsaturated soils, recently installed in the Soil Mechanics Laboratory, at NTUA. The results showed a gradual increase in the apparent preconsolidation stress accompanied by a decrease in the compressibility of kaolin, with the increase in matric suction.

Additionally, triaxial drained compression tests, under constant matric suction, were conducted with the aid of a triaxial apparatus for unsaturated soil testing, installed in the Soil Mechanics Laboratory. The test results on kaolin indicate an increase in shear strength with increasing matric suction. A pressure equilibrium stage follows the application of predetermined values of matric suction. During this stage, a decrease in the degree of saturation (up to 20%) was observed increasing with the imposed matric suction value, within a range of 100, 150, 200, 300, 400kPa; there was no change in the degree of saturation at matric suction of the 50kPa. The opposite effect was observed in the shearing stage, with the degree of saturation of the specimens increasing during loading.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγικά στοιχεία	
1.1 Εισαγωγή.....	8
1.2 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας	8
2. Βιβλιογραφική επισκόπηση	
2.1 Βαθμός Κορεσμού.....	10
2.2 Διαχωρισμός μη κορεσμένων και μερικώς κορεσμένων εδαφών.....	10
2.3 Ύπαρξη μη κορεσμένων και μερικώς κορεσμένων εδαφών.....	12
2.4 Μύζηση.....	12
2.4.1 Η φύση της μύζησης.....	13
2.5 Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης.....	19
2.5.1 Μέθοδος μεμβράνης – μετατόπισης άξονα.....	19
2.5.2 Μέθοδος των χάρτινων φίλτρων	22
2.5.3 Μέθοδος τεμαχών πορώδους υλικού.....	23
2.5.4 Μέθοδος με αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας.....	25
2.5.5 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος.....	26
2.5.6 Μέθοδο με ψυχρόμετρα.....	26
2.5.7 Μέθοδοι με τενσιόμετρα (tensiometers).....	29
3. Εργαστηριακές δοκιμές	31
3.1 Πειραματικός προσδιορισμός Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους – Νερού	31
3.2 Διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών.....	33
3.2.1 Το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας MOHR – COULOMB.....	33
3.2.2 Το γενικευμένο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας MOHR – COULOMB.....	34
3.2.3 Συμπιεστότητα – τάση φαινόμενης προστερεοποίησης – πίεση εισόδου αέρα.....	36

4.	Πειραματικά αποτελέσματα	39
4.1	Τρόπος παρασκευής - Χαρακτηριστικά δοκιμίων	39
4.2	Δοκιμές συμπίεσομέτρου.....	41
	4.2.1 Περιγραφή συσκευής συμπίεσομέτρου για ακόρεστα εδαφικά υλικά	41
	4.2.2 Προετοιμασία δοκιμίου και συσκευής για χρήση.....	43
	4.2.3 Στάδια δοκιμής	46
	4.2.4 Δοκιμές συμπίεσομέτρου	47
	4.2.5 Αποτελέσματα δοκιμών.....	48
	4.2.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία.....	50
4.3	Τριαξονικές δοκιμές.....	51
	4.3.1 Περιγραφή τριαξονικής συσκευής για ακόρεστα εδάφη	51
	4.3.2 Προετοιμασία δοκιμίου και συσκευής για χρήση.....	55
	4.3.3 Στάδια δοκιμών.....	60
	4.3.4 Εφαρμοσθέντα στάδια δοκιμών – απλοποίηση διαδικασίας – παραδοχές	61
	4.3.5 Αποτελέσματα.....	61
	4.3.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία.....	68
5.	Συμπεράσματα	72
6.	Προτάσεις για μελλοντικές δοκιμές	74
	Παραρτήματα	77
	Ευρετήριο Φωτογραφιών.....	77
	Ευρετήριο Σχημάτων	79
	Ευρετήριο Πινάκων.....	82
	Βιβλιογραφία	83

1. Εισαγωγικά στοιχεία

1.1 Εισαγωγή

Τα μη κορεσμένα εδαφικά υλικά εξαπλώνονται και στον ελλαδικό χώρο, επηρεάζοντας σχεδόν όλες τις κατηγορίες των έργων πολιτικού μηχανικού. Όπου η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα είναι επαρκώς χαμηλότερη από την επιφάνεια, εμφανίζεται μία ζώνη μη κορεσμένου εδάφους. Σε πολλές περιπτώσεις ανάλογα με την εποχή και την μορφολογία του εδάφους – υπεδάφους, μπορεί να έχουμε εναλλαγή κορεσμένου και μη κορεσμένου εδάφους, άλλοτε πολύ γρήγορα και άλλοτε βαθμιαία. Το αντικείμενο των μη κορεσμένων εδαφών, δεν περιλαμβάνεται στα κλασικά εγχειρίδια εδαφομηχανικής, όπου όλα τα εδάφη θεωρούνται ως κορεσμένα. Η συμπεριφορά τους περιγράφεται από την βασική αρχή των ενεργών τάσεων, όπως αυτή έχει διατυπωθεί από τον Terzaghi στις αρχές του 1920, για τις ανάγκες της μηχανικής των κορεσμένων εδαφών.

Τα μη κορεσμένα εδάφη παρουσιάζουν αυξημένη πολυπλοκότητα σε σχέση με την απλότητα των κορεσμένων, η οποία έγκειται στο ότι ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και την εντατική κατάσταση, η μεταβολή του βαθμού κορεσμού τους οδηγεί σε εντελώς διαφορετική μηχανική συμπεριφορά. Για παράδειγμα και αναφορικά με τις μεταβολές όγκου, ο κορεσμός ενός μη κορεσμένου εδάφους, μπορεί να οδηγήσει σε διόγκωση ή σε συρρίκνωση ανάλογα με την επιβαλλόμενη τάση. Σχετικά με την διατμητική αντοχή, αρχικά η μείωση του βαθμού κορεσμού οδηγεί σε αύξηση της, αλλά περαιτέρω μείωση, μπορεί να οδηγήσει είτε σε περαιτέρω αύξηση είτε σε μείωση ανάλογα με την φύση του εδαφικού υλικού. Η διαπερατότητα των εδαφικών υλικών, αρχικά μειώνεται αρκετές τάξεις μεγέθους, με τη μείωση του βαθμού κορεσμού, αλλά ανάλογα και πάλι με την φύση του υλικού, αν η συρρίκνωση του είναι τέτοια ώστε να ρηγματωθεί, τότε επέρχεται αύξηση της διαπερατότητας κατά αρκετές τάξεις μεγέθους. Λόγω των ιδιομορφιών αυτών, η μελέτη της συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών αποτελεί πρόκληση και είναι επιβεβλημένη για τα Ελληνικά δεδομένα, λόγω της πολύ υψηλής συχνότητας εμφάνισής τους.

1.2 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και ειδικότερα η πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς αναζυμωμένου καολινίτη υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης.

Προς επίτευξη του παραπάνω σκοπού, η διάρθρωση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας έχει όπως παρακάτω:

Κεφάλαιο 1

Σύντομη εισαγωγή και διάρθρωση της εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική επισκόπηση του αντικειμένου, προκειμένου να καθοριστεί το θεωρητικό πλαίσιο και να οριστούν οι κυριότερες παράμετροι που περιγράφουν τη συμπεριφορά μη κορεσμένων εδαφών. Επίσης γίνεται μία συνοπτική αναφορά των κυριότερων μεθόδων μέτρησης της μύζησης.

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή του θεωρητικού υπόβαθρου που αφορά την αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών καθώς και το κριτήριο αστοχίας τους.

Κεφάλαιο 4

Γίνεται πλήρης περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, όπως του τρόπου παρασκευής των δοκιμίων και εκτενής αναφορά των χαρακτηριστικών - τρόπου λειτουργίας των χρησιμοποιούμενων συσκευών. Επιπλέον, αναφέρονται αναλυτικά οι φάσεις - διαδικασίες για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μαζί με μία σύντομη σύγκριση με τις βιβλιογραφικές αναφορές.

Κεφάλαιο 5

Αποτελεί έναν λεπτομερή κατάλογο συμπερασμάτων, τα οποία προέκυψαν από τις δοκιμές και αφορούν τόσο τις διαδικασίες εκτέλεσής τους όσο και τα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 6

Σύντομες προτάσεις για μελλοντικές δοκιμές.

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.1 Βαθμός Κορεσμού

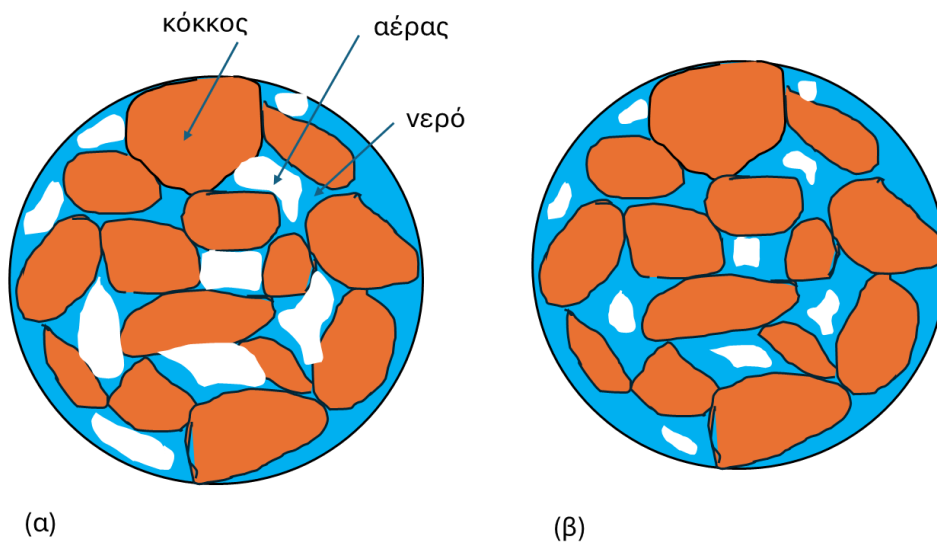
Ως βαθμός κορεσμού S_r (degree of saturation) ορίζεται το ποσοστιαίο μέγεθος που εκφράζει τον λόγο του όγκου των κενών ενός εδαφικού υλικού που είναι γεμάτα με νερό (V_w), προς τον συνολικό όγκο των κενών του (V_k). Λαμβάνει τιμές από 0 έως 100% και υπολογίζεται από την εξίσωση 2.1.1.

$$S_r = V_w / V_k \quad (2.1.1)$$

Όταν ο βαθμός κορεσμού είναι 100% σημαίνει ότι τα κενά του εδαφικού υλικού είναι γεμάτα με νερό (πλήρως κορεσμένο εδαφικό υλικό), ενώ βαθμός ίσος με 0% σημαίνει ότι στα κενά του εδαφικού υλικού δεν υπάρχει καθόλου νερό (πλήρως ξηρό εδαφικό υλικό). Όταν ο βαθμός κορεσμού κυμαίνεται από μεταξύ 0 και 100%, τότε το εδαφικό υλικό ονομάζεται μη κορεσμένο ή ακόρεστο (unsaturated).

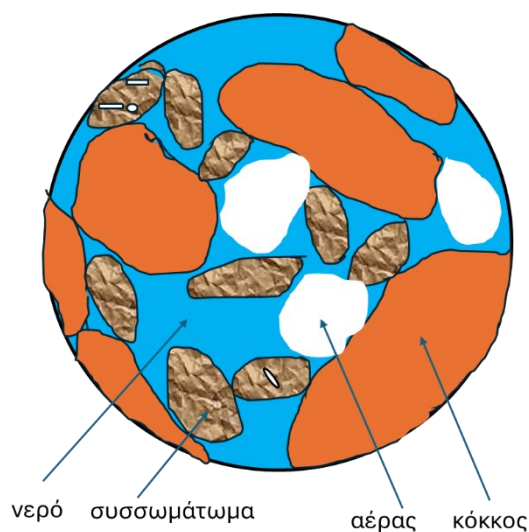
2.2 Διαχωρισμός μη κορεσμένων και μερικώς κορεσμένων εδαφών

Συνήθως ο όρος *μη κορεσμένα εδαφικά υλικά* χρησιμοποιείται για τα εδαφικά υλικά που παρουσιάζουν σχετικά ομοιογενές μέγεθος πόρων, ενώ ο όρος *μερικώς κορεσμένα εδαφικά υλικά*, γι' αυτά που παρουσιάζουν έντονη ανομοιογένεια αναφορικά με το μέγεθος των κόκκων τους (τέτοια υλικά είναι συνήθως τεχνητής κοκκομετρικής διαβάθμισης). Μία τέτοια διαφοροποίηση έγκειται και στο ότι στα μερικώς κορεσμένα εδάφη, για δεδομένο βαθμό κορεσμού (μικρότερο του 100%) ο αέρας συνήθως συγκεντρώνεται στους μεγαλύτερους πόρους ενώ το νερό στους μικρότερους (Σχήμα 2.1). Στην παρούσα εργασία έχει επιλεχθεί ο όρος *μη κορεσμένα (unsaturated)* καθόσον το εδαφικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές, είναι ο αναζυμωμένος καολινίτης, ο οποίος παρουσιάζει σχετική ομοιογένεια. Η ποσότητα του αέρα αυξάνεται με την μείωση του βαθμού κορεσμού [Σχήματα 2.1 (α) και (β)]



Σχήμα 2.1 Ιδεατή απεικόνιση μη κορεσμένου εδάφους: α) χαμηλός βαθμός κορεσμού και β) μη κορεσμένου εδάφους υψηλού βαθμού κορεσμού (πηγή: Γεωργιάννου, 2020)

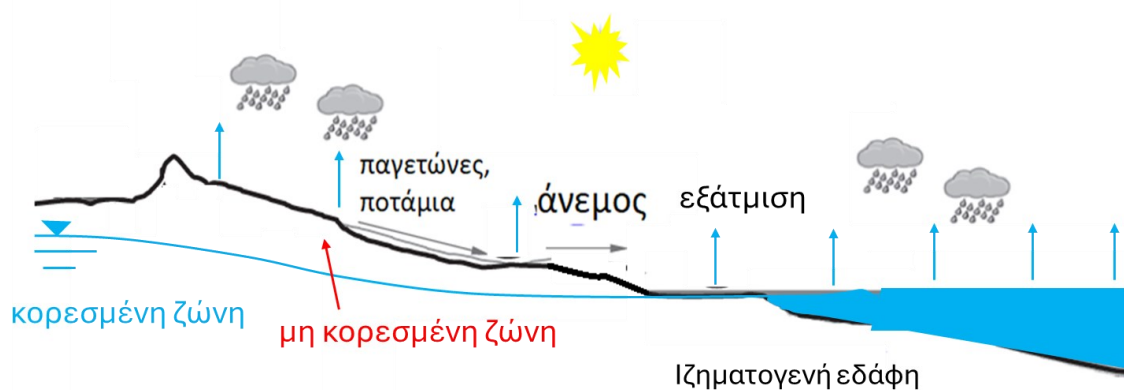
Ένα μερικώς κορεσμένο έδαφος έχει τμήματά του που παραμένουν κορεσμένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Όπως προαναφέρθηκε τα υλικά αυτά εμφανίζουν ποικιλία κόκκων. Στην περίπτωση αυτή δημιουργούνται συσσωματώματα από αργιλικά πλακίδια και κόκκους. Τα συσσωματώματα και οι κόκκοι, π.χ. άμμου, αποτελούν την μακροδομή του εδάφους με νερό και αέρα στους μάκρο-πόρους. Παράλληλα μέσα στα συσσωματώματα υπάρχουν μικρότεροι (μίκρο-πόροι) που μπορεί να έχουν αέρα ή να είναι γεμάτοι με νερό. Στη δεύτερη περίπτωση τα τμήματα αυτά του εδάφους παραμένουν κορεσμένα, ενώ μακροσκοπικά είναι μη κορεσμένα.



Σχήμα 2.2 Ιδεατή απεικόνιση μερικώς κορεσμένου εδάφους (πηγή: Γεωργιάννου, 2020)

2.3 Ύπαρξη μη κορεσμένων και μερικώς κορεσμένων εδαφών

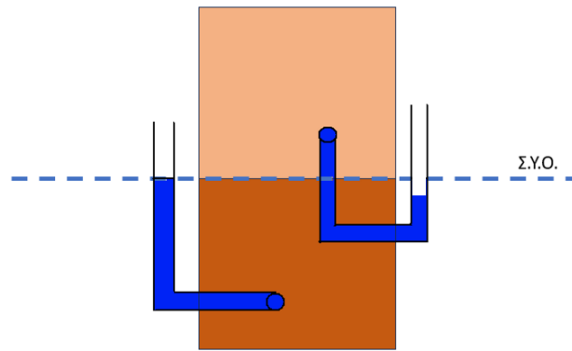
Δεν θα υπήρχε καμία πρακτική σημασία πίσω από την διερεύνηση της συμπεριφοράς των μη κορεσμένων και μερικώς κορεσμένων εδαφών, αν δεν υπήρχε η πιθανότητα να τα συναντήσουμε. Όπου εμφανίζεται στάθμη υπόγειου ορίζοντα σε ικανό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους, π.χ. σε περιοχές που η εξάτμιση και η διαπνοή είναι αθροιστικά μεγαλύτερες από τις κατεισδύσεις (Σχήμα 2.3), σε επαρκές ύψος από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα το έδαφος αποκτά βαθμό κορεσμού μικρότερο του 100%, ενώ σε συγκεκριμένο ύψος πάνω από τη ΣΥΟ, το οποίο σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά του εδάφους, παραμένει κορεσμένο λόγω τριχοειδών φαινομένων όπως θα δούμε στη συνέχεια.



Σχήμα 2.3 Γεωλογικός και Υδρολογικός κύκλος. Κορεσμένη και μη κορεσμένη ζώνη του εδάφους (πηγή: Γεωργιάννου & Ζερβός, 2024)

2.4 Μύζηση (Suction)

Στα εδάφη που βρίσκονται κάτω από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα, τα κενά τους είναι πληρωμένα με νερό (κορεσμένα) και η πίεση του νερού είναι θετική (θλιπτική, κατά τον ορισμό προσήμων της εδαφομηχανικής). Αντιθέτως, στην περίπτωση των κενών που είναι πληρωμένα με νερό, αλλά βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια του υπόγειου ορίζοντα, η πίεση του νερού είναι αρνητική. Το φυσικό νόημα της θετικής πίεσης είναι ότι το νερό θλίβεται και προσπαθεί να διαφύγει, ενώ στην αντίθετη περίπτωση το νερό προσπαθεί να προσροφήσει και άλλο νερό. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η πίεση του νερού πάνω και κάτω από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα.



Σχήμα 2.4 Πίεση νερού στην υγρή φάση πάνω και κάτω από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα

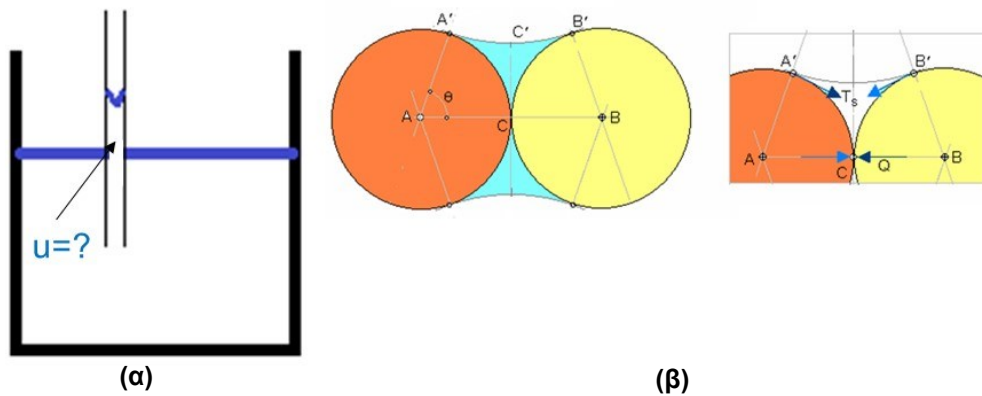
Σε ύψος που εξαρτάται από την φύση του εδάφους, το πάχος της μη κορεσμένης ζώνης και τις συνθήκες που επιδρούν στην επιφάνεια, υπάρχει συνύπαρξη υγρής και αέριας φάσης και η εντατική κατάσταση της υγρής φάσης περιγράφεται από το μέγεθος που ονομάζεται μύζηση (suction).

2.4.1 Η φύση της μύζησης

α. Τριχοειδή φαινόμενα

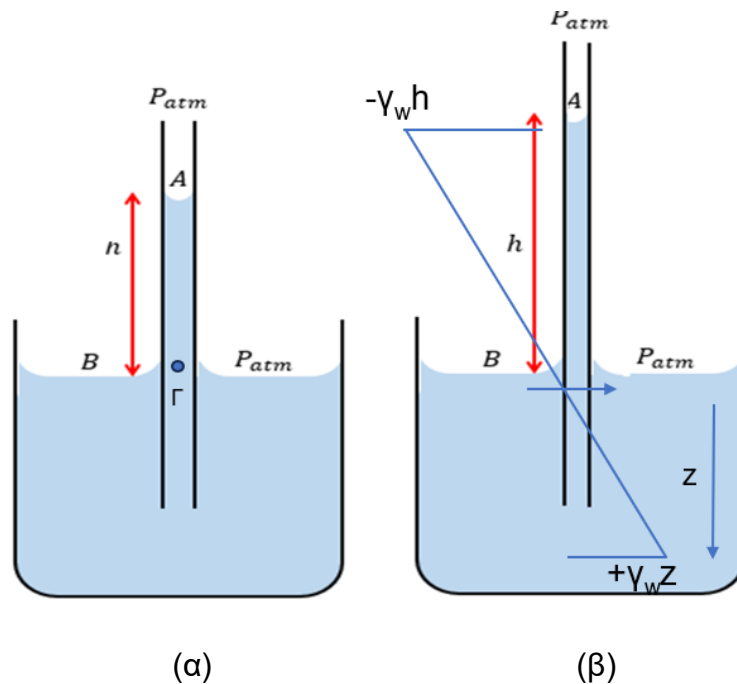
Στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα η υγρή φάση έχει μηδενική πίεση (σύμφωνα με τη θεώρηση των προσήμων της εδαφομηχανικής – πρακτικά έχει την ατμοσφαιρική πίεση περίπου 101 kPa). Πάνω από τη ΣΥΟ η υγρή φάση βρίσκεται υπό μύζηση δηλαδή οι πιέσεις του νερού είναι αρνητικές. Την ανάπτυξη αρνητικών πιέσεων μπορούμε να τη δούμε με μια απλή δοκιμή χρησιμοποιώντας ένα τριχοειδή σωλήνα όπως στο Σχήμα 2.5 (α). Παρατηρούμε ανύψωση του νερού στο σωλήνα και στη συνέχεια θα υπολογίσουμε την πίεση του νερού μέσα του. Το ίδιο φαινόμενο έχει εφαρμογή και στο έδαφος, όπου τον ρόλο του τριχοειδούς σωλήνα παίζουν οι επίσης 'τριχοειδείς' (λόγω του μικρού μεγέθους τους) πόροι, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.(β).

Το φαινόμενο εμφανίζεται μόνο στα μη κορεσμένα εδαφικά υλικά, αφού απαιτεί τη συνύπαρξη της υγρής και της αέριας φάσης στους πόρους του εδάφους. Παρουσιάζεται γιατί η αρνητική πίεση στην υγρή φάση προκαλεί καμπύλωση της διεπιφάνειας υγρής – αέριας φάσης, με την προϋπόθεση ότι η διάμετρος του σωλήνα ή το μέγεθος των πόρων είναι πολύ μικρό 'τριχοειδές'. Κύριο χαρακτηριστικό της διεπιφάνειας αυτής είναι η ισορροπία δυνάμεων που οφείλεται στις μοριακές δυνάμεις που αναπτύσσονται στα μόρια της υγρής φάσης



Σχήμα 2.5 α) Ανύψωση νερού σε τριχοειδή σωλήνα και β) αντίστοιχη αλληλεπίδραση του νερού και των κόκκων στην περίπτωση δημιουργίας μηνίσκων στις επαφές των κόκκων μερικώς κορεσμένης άμμου (πηγή: Γεωργιάννου, 2020)

Η δύναμη T του Σχήματος 2.5(β) ονομάζεται επιφανειακή τάση και οφείλεται στην ιδιότητα του νερού να επιτρέπει στα επιφανειακά μόριά του να φέρουν μια δύναμη εφελκυσμού. Τα μόρια του νερού έλκονται μεταξύ τους και οι δυνάμεις αυτές μεταφέρονται μέσα στη μάζα του νερού. Στην επιφάνεια, ωστόσο, τα μόρια έλκονται μόνο προς το εσωτερικό της μάζας καθώς έλκονται από τα γειτονικά μόρια, γεγονός που δημιουργεί την επιφάνεια του μηνίσκου. Εάν ένας ανοικτού τύπου γυάλινος τριχοειδής σωλήνας τοποθετηθεί σε μια λεκάνη νερού που βρίσκεται υπό ατμοσφαιρική πίεση, όπως στο Σχήμα 2.6, παρατηρείται άνοδος του νερού μέσα στο σωλήνα. Το νερό διαβρέχει το γυαλί και η στήλη νερού μέσα στο σωλήνα φτάνει σε ένα ορισμένο ύψος πάνω από το νερό της λεκάνης.



Σχήμα 2.6 Η διαφορετική άνοδος του νερού μέσα σε ανοικτού τύπου γυάλινο τριχοειδή σωλήνα ανάλογα με το πάχος του (πηγή: Γεωργιάννου, 2020)

Έστω h το ύψος της στήλης του νερού στον σωλήνα, από ισορροπία δυνάμεων ισχύει:

$$2\pi r(\cos\theta)T = \pi r^2(\rho g)h = \text{βάρος στήλης νερού} \quad (\text{εξ. 2.4.1.1})$$

$$h = 2T\cos\theta / r\rho g \quad (\text{εξ. 2.4.1.2})$$

όπου

$T = \text{επιφανειακή τάση (kN/m)}$

$$\theta = 0 \text{ για νερό σε επαφή με γυαλί} \rightarrow 2T = hr(\rho g)$$

Η T ποικίλλει ελαφρώς με τη θερμοκρασία, αλλά αυτή η διακύμανση είναι μικρή και μια μέση τιμή που λαμβάνεται συνήθως για την επιφανειακή τάση του νερού είναι 0.000075 N/mm (0.075 N/m).

Εάν θεωρηθεί ως πίεση αναφοράς η ατμοσφαιρική πίεση, δηλαδή η πίεση του αέρα = 0, μπορούμε να εξισώσουμε τις κατακόρυφες δυνάμεις που δρουν στην κορυφή της στήλης:

$$2T\pi r \cos\theta + u\pi r^2 = 0 \quad (\text{εξ. 2.4.1.3})$$

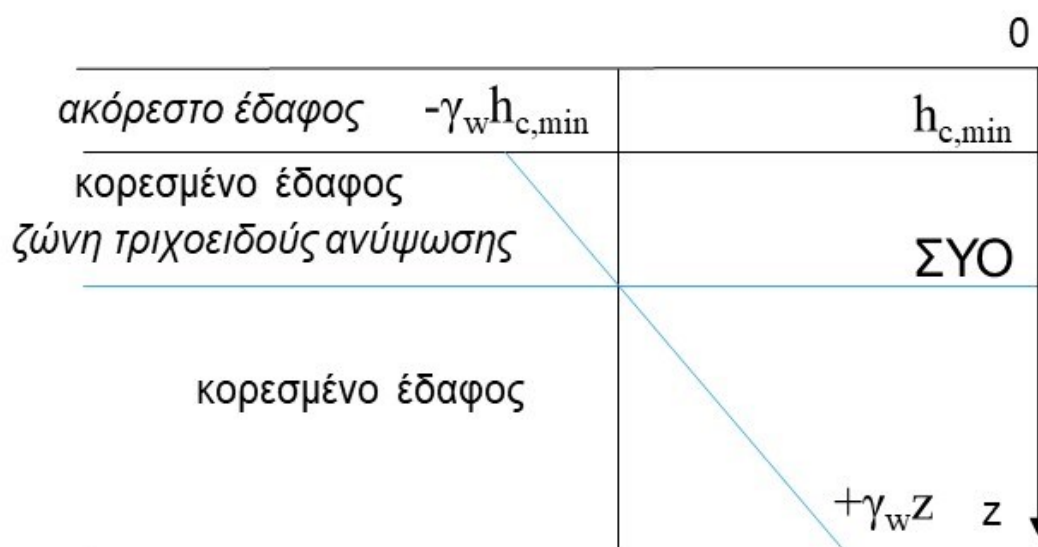
$$\Rightarrow u = -2T\theta / r \quad (\text{εξ. 2.4.1.4})$$

Συνεπώς, βλέπουμε ότι η u είναι αρνητική, το οποίο δείχνει ότι το νερό μέσα στην στήλη είναι σε κατάσταση μύζησης (suction). Η μέγιστη τιμή αυτής της αρνητικής πίεσης είναι $\gamma_w h$ και εμφανίζεται στην κορυφή της στήλης. Η κατανομή της πίεσης κατά μήκος του σωλήνα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6(β). Φαίνεται ότι η πίεση του νερού αλγεβρικά αυξάνεται σταδιακά με μείωση του ύψους και λαμβάνει μηδενική τιμή στη βάση της στήλης. Με τη χρήση της εξίσωσης 2.4.1.2 μπορούμε να κάνουμε μια εκτίμηση της ανύψωσης του νερού που θα συμβεί σε μία αργιλική απόθεση λόγω τριχοειδών φαινομένων.

Στο έδαφος, η περιοχή εντός της οποίας το νερό ανεβαίνει πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, λόγω τριχοειδών φαινομένων, είναι γνωστή ως *ζώνη τριχοειδούς ανύψωσης*. Μια εδαφική μάζα, φυσικά, δεν είναι ένα σύστημα τριχοειδών σωλήνων, ωστόσο η θεωρία τριχοειδών φαινομένων επιτρέπει τον προσδιορισμό της ποιοτικής συμπεριφοράς του νερού στη ζώνη τριχοειδούς

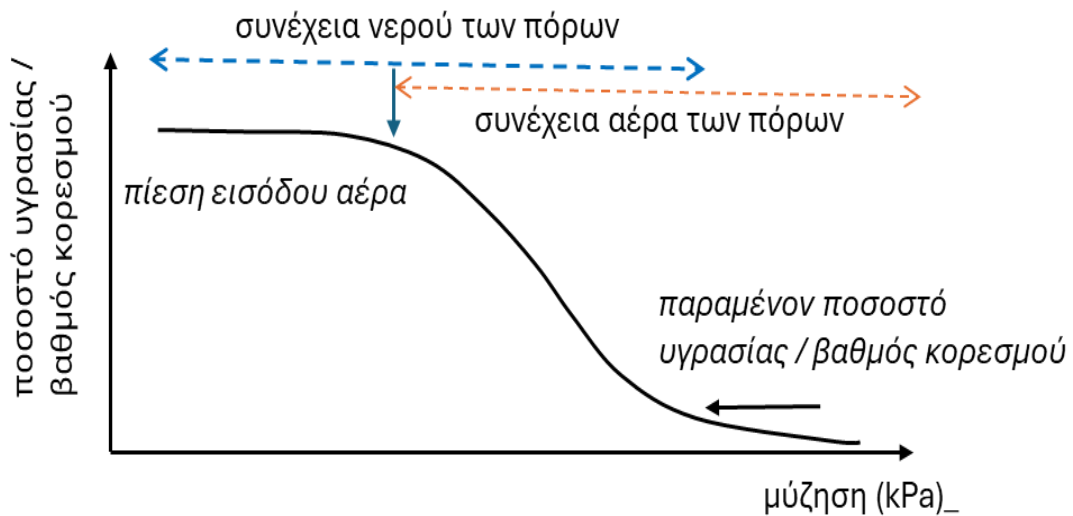
ανύψωσης. Το νερό σε αυτήν την ζώνη μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε κατάσταση αρνητικής πίεσης, δηλαδή σε τιμές πίεσης κάτω από την ατμοσφαιρική. Ένα διάγραμμα της ζώνης τριχοειδούς ανύψωσης δίνεται στο Σχήμα 2.7.

Το ελάχιστο ύψος της ζώνης, $h_{c,min}$, εξαρτάται από το μέγιστο μέγεθος των κενών στο έδαφος. Μέχρι αυτό το ύψος πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, το έδαφος θα είναι αρκετά κοντά σε πλήρη κορεσμό και μπορεί να θεωρηθεί πλήρως κορεσμένο.



Σχήμα 2.7 Τριχοειδή φαινόμενα στο έδαφος, κατανομή πίεσης του νερού των πόρων στην κορεσμένη ζώνη (πηγή: Γεωργιάννου, 2020)

Αν τώρα εφαρμοστεί μια ελαφρά μύζηση σε ένα κορεσμένο έδαφος, δεν προκαλείται καμία εκροή νερού από τους πόρους. Ωστόσο, καθώς η μύζηση αυξάνεται, το νερό αρχίζει να ρέει από τους μεγαλύτερους πόρους ανάμεσα στους κόκκους του εδάφους. Καθώς η μύζηση αυξάνεται περαιτέρω, υπάρχει ένα όριο που επιτρέπει την είσοδο αέρα στους πόρους. Το νερό ρέει και από τους μικρότερους πόρους μέχρι ένα άλλο όριο (που αντιστοιχεί σε πολύ υψηλή μύζηση) όπου μόνο οι πολύ στενοί πόροι εξακολουθούν να παραμένουν γεμάτοι με νερό. Συνεπώς, η αύξηση της μύζησης συνδέεται με τη μείωση της υγρασίας του εδάφους. Η ποσότητα του νερού που παραμένει στο έδαφος είναι συνάρτηση του μεγέθους και του όγκου των πόρων και ταυτόχρονα εξαρτάται από τη μύζηση του εδάφους. Η σχέση αυτή υγρασίας-μύζησης περιγράφεται από την καμπύλη συγκράτησης νερού ή χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους - νερού που δίνεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8 Καμπύλη συγκράτησης νερού ή χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους - νερού (πηγή: Γεωργιάννου, 2020)

Η τιμή της μύζησης που επιτρέπει την είσοδο αέρα στους πόρους ονομάζεται 'πίεση εισόδου αέρα', ενώ για μεγάλες τιμές της μύζησης δεν απομακρύνεται νερό από τους πόρους και το αντίστοιχο ποσοστό υγρασίας ονομάζεται 'παραμένον'.

Επίσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8, για μύζηση μεγαλύτερη της τιμής εισόδου αέρα, στους πόρους συνυπάρχουν νερό και αέρας, υπάρχει δε συνέχεια στον αέρα των πόρων για μύζηση μεγαλύτερη αυτής της τιμής. Η συνέχεια του νερού υπάρχει μέχρι τη μύζηση που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας.

Στην περίπτωση της αρνητικής πίεσης του νερού των πόρων, όπου δεν υφίσταται αέρια φάση, δηλαδή για μύζηση μικρότερη της πίεσης εισόδου αέρα, η μύζηση ταυτίζεται με την αρνητική πίεση του νερού των πόρων (δηλαδή μύζηση με θετικό πρόσημο ($u_a - u_w$), όπου $u_a = 0$ (ατμοσφαιρική)). Χωρίς την ύπαρξη αέρα στα κενά των πόρων έχουμε ολόπλευρη άσκηση της πίεσης στην στερεά φάση, και γι' αυτό ισχύει και η αρχή των ενεργών τάσεων. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν συνυπάρχουν υγρή και αέρια φάση, τότε η πίεση της υγρής φάσης δεν ασκείται ολόπλευρα στην στερεά φάση.

Στην περιοχή πάνω από την ζώνη τριχοειδούς ανύψωσης, όπου συνυπάρχει η υγρή και η αέρια φάση, η διαφορά πίεσης της υγρής φάσης (u_w) από την πίεση της αέριας φάσης (u_a) καλείται μύζηση ($u_a - u_w$). Όπου η πίεση του νερού είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική, η μύζηση λαμβάνει θετικές τιμές.

Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η παρουσία μύζησης δεν σημαίνει πάντοτε αρνητική πίεση του νερού (μικρότερη του 0 – εφελκυσμός) αλλά πίεση νερού μικρότερη από την πίεση του αέρα και για συνήθεις συνθήκες, μικρότερη

από την ατμοσφαιρική πίεση. Δηλαδή, συνθήκες υποπίεσης (μικρότερης της ατμοσφαιρικής) ισοδυναμούν με θετική μύζηση.

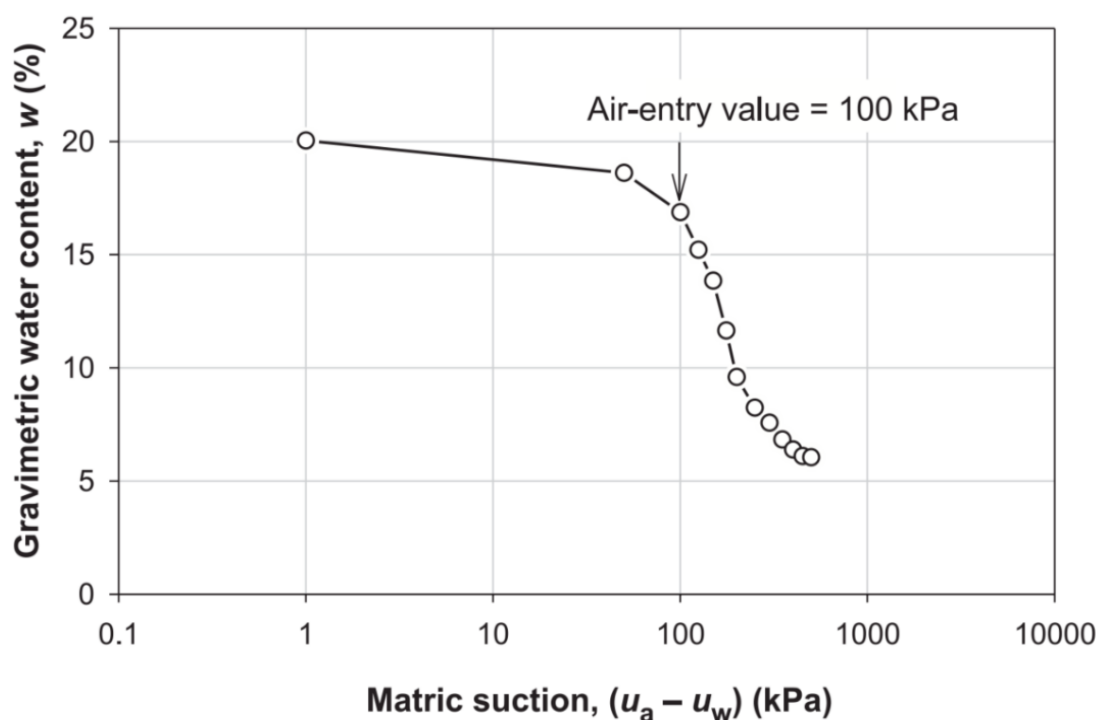
Για τον λόγο αυτόν και επειδή στο εργαστήριο δεν είναι εύκολο να επιβάλλεται υποπίεση, η επιθυμητή τιμή μύζησης επιτυγχάνεται ως η διαφορά πίεσης αέρα μεγαλύτερης της ατμοσφαιρικής και μικρότερης τιμής θετικής πίεσης νερού.

β. Από γεωτεχνική άποψη, υπάρχουν δύο όροι που περιγράφουν την εδαφική μύζηση:

1. μύζηση εδαφικού σκελετού: το κομμάτι της ενέργειας συγκράτησης νερού που καθορίζεται από τον εδαφικό σκελετό (διάταξη πόρων και κόκκων στο χώρο);

2. ωσμωτική μύζηση: το κομμάτι της ενέργειας συγκράτησης νερού που οφείλεται στην παρουσία διαλυμένων αλάτων στο νερό του εδάφους.

Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζονται πειραματικά δεδομένα προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Στο διάγραμμα το ποσοστό υγρασίας σχεδιάζεται ως προς τη μύζηση εδαφικού σκελετού (matric suction).



Σχήμα 2.9 Παράδειγμα χαρακτηριστικής καμπύλης για έδαφος - νερού από τον ιζηματογενή σχηματισμό Jurong (πηγή: Rahardjo et al., 2004)

Από την παραπάνω καμπύλη και χρησιμοποιώντας ως οδηγό τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά σημεία, μπορεί άμεσα να διαπιστωθεί ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας, σε ποια περιοχή της καμπύλης βρίσκεται το εδαφικό δείγμα και από εκεί να εξαχθούν συμπεράσματα και για τη μηχανική συμπεριφορά του.

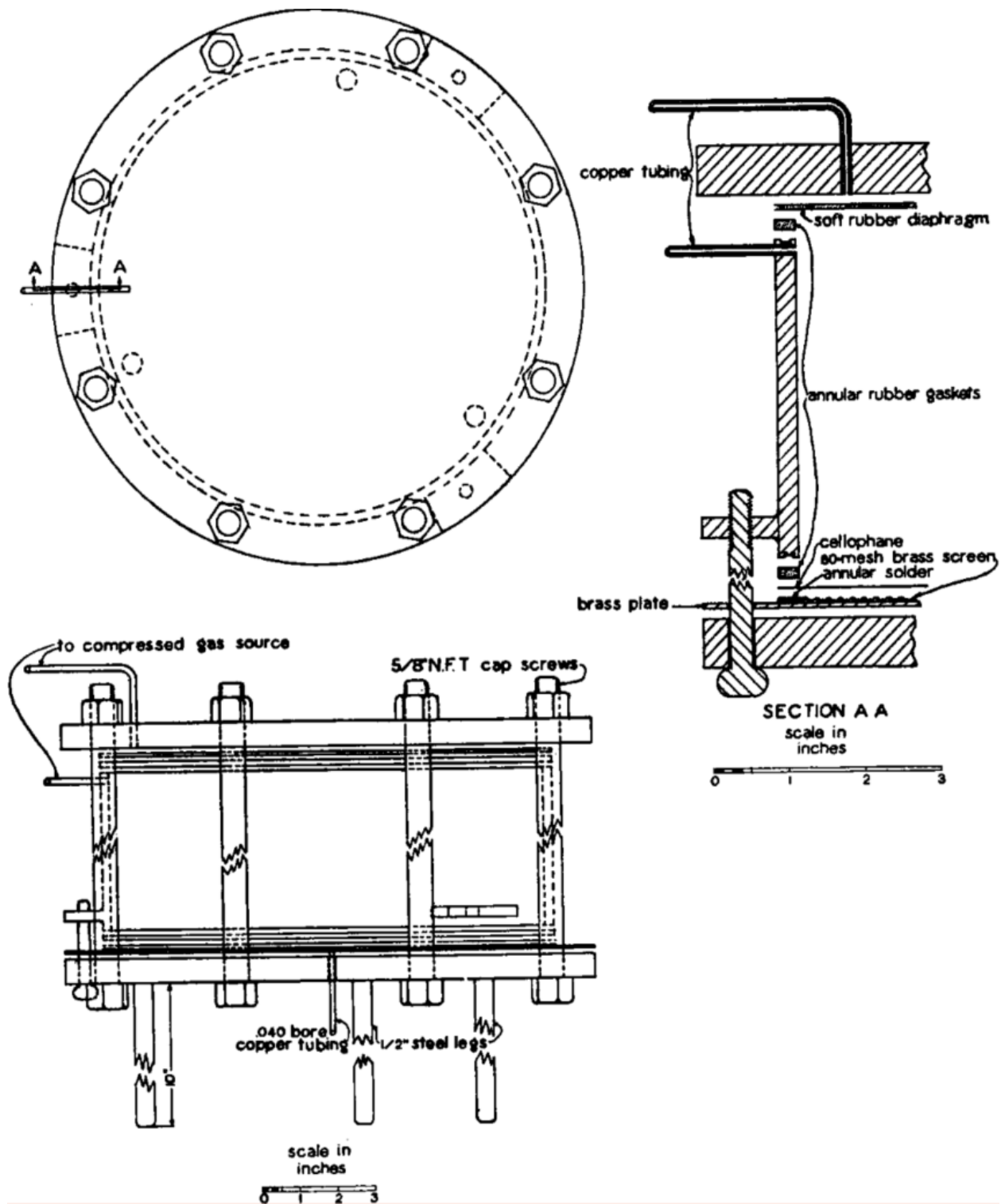
2.5 Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης

Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες της μύζησης καταλαβαίνουμε ότι είναι ένα μέγεθος μεγάλης σημασίας για την κατανόηση των μηχανικών ιδιοτήτων των μη κορεσμένων εδαφών. Για τον λόγο αυτόν, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την μέτρηση της, και θα αναφερθούν συνοπτικά στην παρούσα υποενότητα.

2.5.1 Μέθοδος μεμβράνης – μετατόπισης άξονα

Αυτή η μέθοδος αποτελεί την πρώτη μέθοδο μέτρησης της μύζησης. Η συσκευή περιλαμβάνει ένα πορώδες άκρο, ένα δοχείο υγρού και ένα όργανο μέτρησης πίεσης. Το πορώδες άκρο συνήθως είναι επίπεδο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τοποθέτηση ενός εδαφικού δείγματος. Το υλικό κατασκευής του πορώδους άκρου έχει συνήθως πίεση διείσδυσης αέρα 100 kPa. Το δοχείο του υγρού δημιουργείται συνήθως με την τοποθέτηση μίας πλαστικής μεμβράνης υψηλής αντοχής γύρω από τον πορόλιθο ή με τη σταθερή και στεγανή τοποθέτηση του πωρολίθου πάνω από κοιλότητα εντός μεταλλικής βάσης.

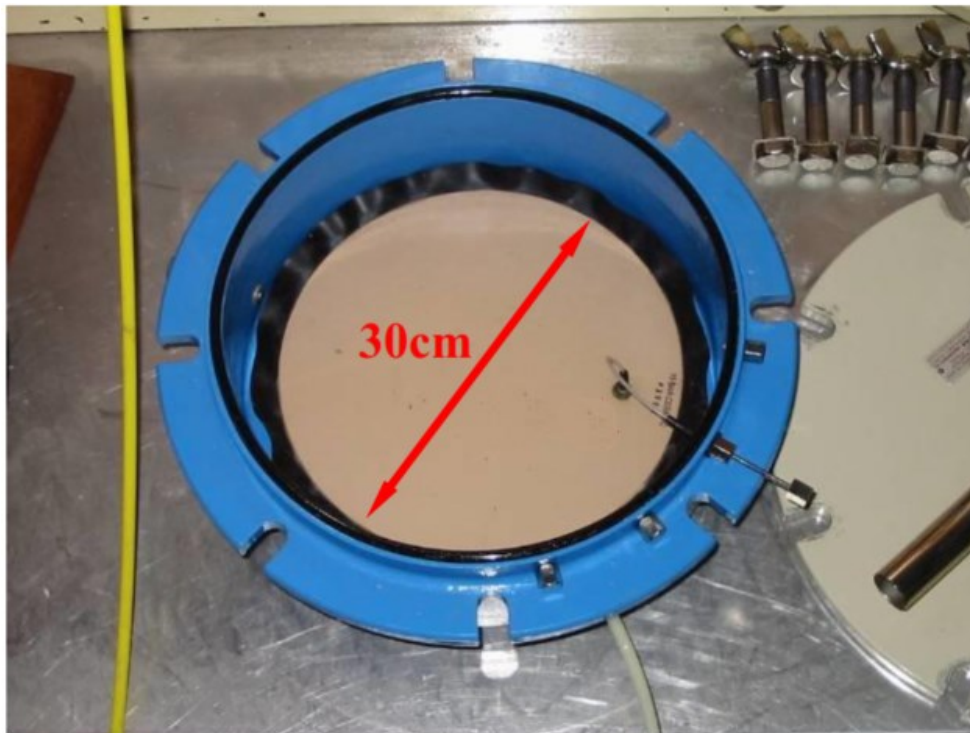
Εξέλιξη της προηγούμενης μεθόδου αποτελεί η μέθοδος μετατόπισης άξονα. Στην υπόψη μέθοδο (Σχήμα 2.10), το εδαφικό υλικό μαζί με την μεμβράνη ή τον κεραμικό πορόλιθο, τοποθετείται μέσα σε έναν αεροστεγώς κλεισμένο θάλαμο, στον οποίο διοχετεύεται αέρας υπό πίεση και μεταξύ της μεμβράνης ή του πωρολίθου τοποθετείται όργανο μέτρησης της πίεσης του νερού. Η πίεση του αέρα που διοχετεύεται (και ελέγχεται) γίνεται σταδιακά ίση με την πίεση του αέρα των πόρων του εδάφους. Το νερό των πόρων, από μία αρχική αρνητική (μικρότερη της ατμοσφαιρικής) πίεση, αποκτά πίεση ίση ή μεγαλύτερη του μηδενός. Έτσι αν από την πίεση του αέρα που διοχετεύτηκε αφαιρεθεί η πίεση του νερού τότε προκύπτει η μύζηση του εδαφικού υλικού.



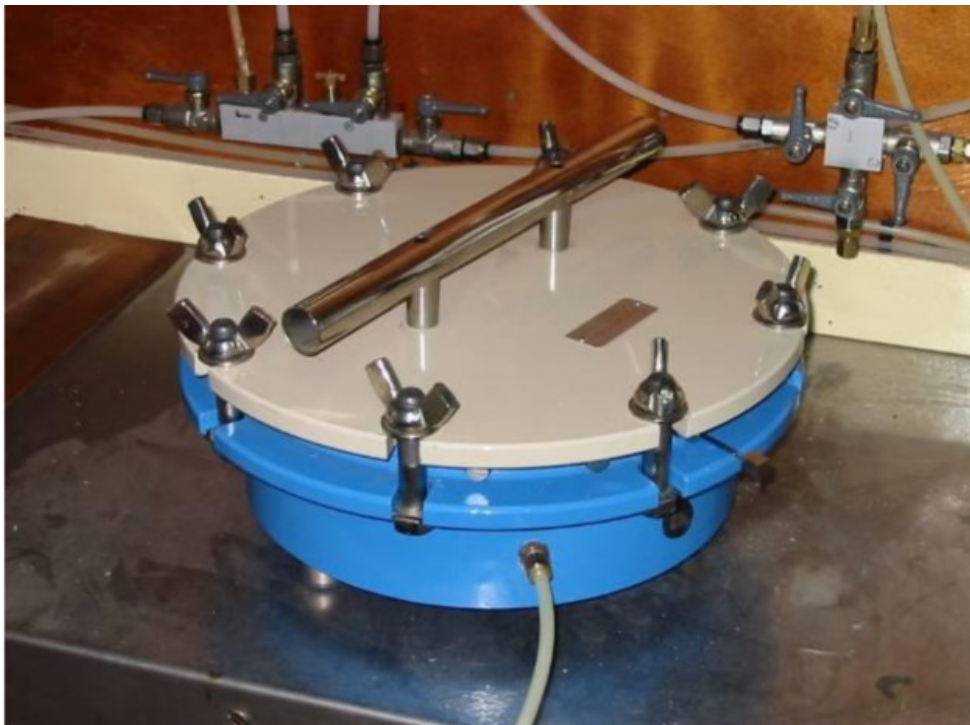
Σχήμα 2.10 Απεικόνιση της μεθόδου μετατόπισης άξονα (πηγή: Richards, 1941)

Στη μέθοδο μετατόπισης άξονα, η μέγιστη πίεση αέρα που μπορεί να ασκηθεί είναι τόση όση η πίεση διείσδυσης αέρα της μεμβράνης ή του κεραμικού πωρόλιθου. Στις Φωτογραφίες 2.1 - 2 παρουσιάζεται ο θάλαμος εφαρμογής της

μεθόδου μετατόπισης άξονα ή θάλαμος μύζησης (όπως έχει επικρατήσει στην αγγλική ορολογία), του εργαστηρίου θεμελιώσεων του Τομέα Γεωτεχνικής.



Φωτογραφία 2.1 Ανοικτός θάλαμος μύζησης με κεραμικό πωρόλιθο με τιμή πίεσης εισόδου αέρα 15 bar



Φωτογραφία 2.2 Κλειστός θάλαμος μύζησης

Η μέθοδος ουσιαστικά περιλαμβάνει την εφαρμογή πίεσης αέρα, προκειμένου η αρνητική πίεση του νερού να αυξηθεί και να μπορεί να γίνει η μέτρηση της με συμβατικές μεθόδους. Ο χρόνος μέτρησης κυμαίνεται από μερικές ώρες, έως μερικά εικοσιτετράωρα, ανάλογα με το εδαφικό υλικό. Κατά τη χρήση της συσκευής είναι καλύτερο να χρησιμοποιούνται κατά το δυνατόν μεγαλύτερα δοκίμια, ώστε η ποσότητα του νερού που πρέπει να μετακινηθεί για να επιτευχθεί υδραυλική ισορροπία, να είναι αναλογικά μικρή για να επηρεάσει την τιμή της μύζησης. Επιπλέον απαιτείται υδατοστεγής επαφή του δοκιμίου με την μεμβράνη.

2.5.2 Μέθοδος των χάρτινων φίλτρων

Η μέθοδος έχει ως αρχή, ότι αν ένα αντικείμενο απορροφητικό έρθει σε επαφή με ένα εδαφικό δείγμα, τότε μεταξύ τους θα επιτευχθεί υδραυλική ισορροπία. Αν το αντικείμενο είναι αρκετά μικρότερο του εδαφικού δείγματος, τότε θεωρητικά δεν θα επηρεάσει το συνολικό ποσοστό της υγρασίας του και άρα η τιμή της μύζησης θα παραμείνει σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο και με κατάλληλη βαθμονόμηση του απορροφητικού αντικειμένου, μπορεί να εξαχθεί με έμμεσο τρόπο η τιμή της μύζησης του εδαφικού δείγματος, μέσω της μετρούμενης υγρασίας. Ένα άμεσα απορροφητικό αντικείμενο με αρκετά μικρή μάζα είναι τα χάρτινα φίλτρα εργαστηρίου. Οι πιο γνωστοί και διαδεδομένοι τύποι χάρτινων φίλτρων είναι το Whatman No. 42 (Φωτογραφία 2.3) και το Schleicher & Schuell No. 589.



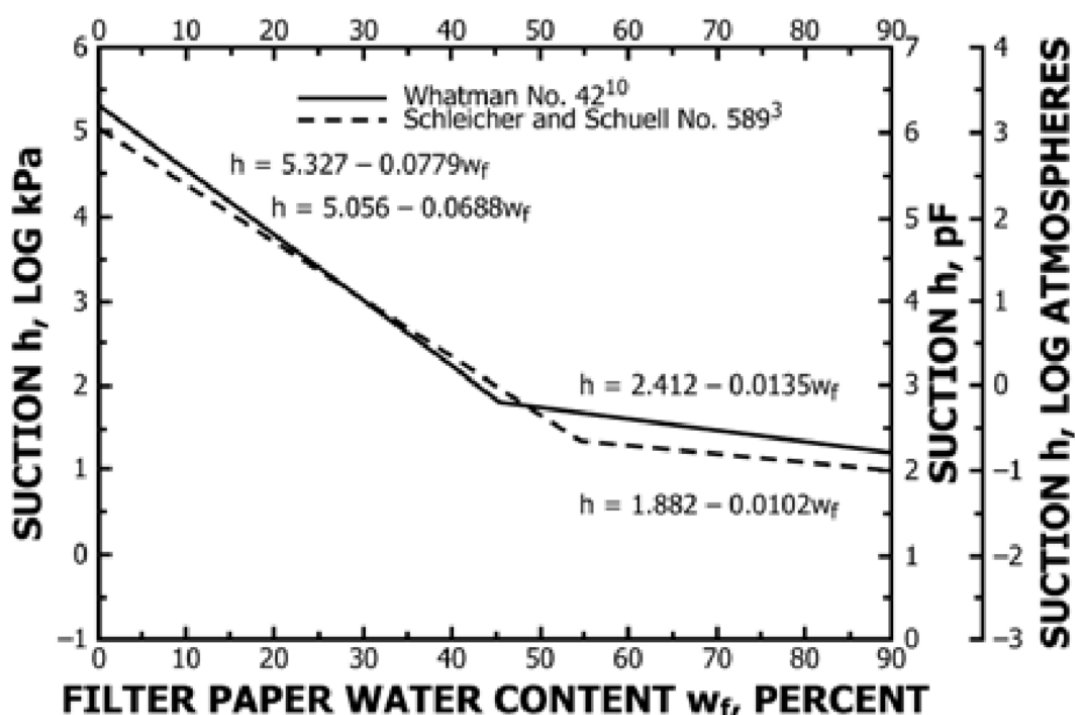
Φωτογραφία 2.3 Συσκευασία χάρτινων φίλτρων Whatman 42

Μία πολύ σύντομη περιγραφή της διαδικασίας μέτρησης με χάρτινο φίλτρο είναι η ακόλουθη (ASTM D5298-16):

α. Το δοκίμιο σφραγίζεται αεροστεγώς μαζί με το χάρτινο φίλτρο, είτε σε επαφή είτε όχι (ανάλογα με το επιδιωκόμενο είδος της μύζησης που απαιτείται να μετρηθεί).

β. Το σφραγισμένο δοκίμιο αφήνεται μαζί με το φίλτρο το απαιτούμενο χρονικό διάστημα προκειμένου να επέλθει εξισορρόπηση της μύζησης μεταξύ των δύο υλικών.

γ. Εκτελείται αποσφράγιση, υπολογίζεται η υγρασία στο χάρτινο φίλτρο, μέσω αυτής και με την βοήθεια των καμπυλών του Σχήματος 2.13 υπολογίζεται η μύζηση του φίλτρου και μετέπειτα η μύζηση του δοκιμίου.



Σχήμα 2.11 Καμπύλες μύζησης – ποσοστού υγρασίας για χάρτινα φίλτρα Whatman No.42 και Schiecher and Schuell No 589 (πηγή: ASTM D5298-16)

Όταν τα χάρτινα φίλτρα είναι σε επαφή με το έδαφος μετρούν τη μύζηση εδαφικού σκελετού, ενώ όταν δεν είναι σε επαφή την ωσμωτική μύζηση.

2.5.3 Μέθοδος τεμαχών πορώδους υλικού

Η μέθοδος βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης ενός πορώδους υλικού με το βαθμό κορεσμού του και συγκαταλέγεται στις έμμεσες μεθόδους προσδιορισμού της μύζησης (Bouyoucos & Mick, 1940). Εάν ένα πορώδες εδαφικό υλικό έχει σταθερή τιμή ηλεκτρικής αντίστασης όταν είναι κορεσμένο,

όταν ο βαθμός κορεσμού του μειώνεται (λόγω της μύζησης του εδαφικού υλικού με το οποίο έρχεται σε επαφή) και λόγω της αρχής της ισορροπίας αποκτά την ίδια μύζηση, τότε η τιμή της αντίστασης θα μεταβληθεί και μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης της μεταβολής (όπως και στη μέθοδο χάρτινων φίλτρων) μπορεί να υπολογιστεί η μύζηση του. Τα πορώδη υλικά που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο αυτή πρέπει να έχουν σημείο εισόδου αέρα σε χαμηλή πίεση, ώστε να δύναται να μετρήσουν και χαμηλές τιμές της μύζησης, ενώ παράλληλα ο αποκορεσμός τους να πραγματοποιείται βαθμιαία, γιατί σε αντίθετη περίπτωση θα ήταν δυνατή η μέτρηση μόνο δύο τιμών ηλεκτρικής αντίστασης, αυτής του κορεσμού και αυτής της παραμένουσας υγρασίας, ενώ δεν θα μπορούσαν να διαπιστωθούν ενδιάμεσες τιμές μύζησης.

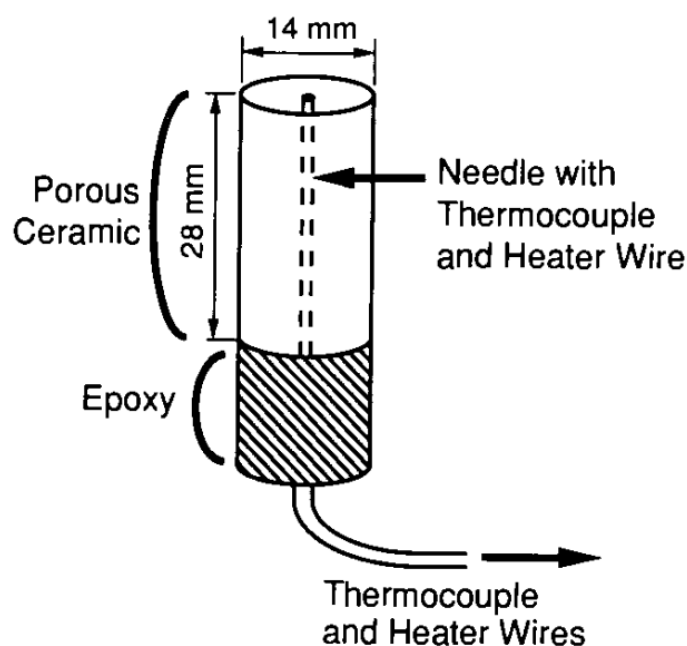
Η μέθοδος είναι γνωστή και με την ονομασία μέθοδος τεμαχών γύψου (gypsum blocs method), αφού η γύψος παρουσιάζει όλα τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά και έχει επικρατήσει η χρησιμοποίησή της. Ειδικά κατασκευασμένα τεμάχια γύψου και καταγραφικό με υποδοχεία βαθμονόμησης, παρουσιάζονται στη Φωτογραφία 2.4.



Φωτογραφία 2.4 Ειδικά τεμάχια γύψου και καταγραφικό με υποδοχεία βαθμονόμησης (πηγή: : <https://ictinternational.com/product/gypsum-block-soil-moisture-measurement>)

2.5.4 Μέθοδος με αισθητήρες θερμικής αγωγιμότητας

Η μέθοδος βασίζεται στην μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας ενός πορώδους υλικού, λόγω της ποσότητας του νερού που βρίσκεται στους πόρους του (Phene, et al. 1971α). Είναι μέθοδος έμμεσου προσδιορισμού της μύζησης, παρόμοια με αυτή των τεμάχων πορώδους υλικού, μόνο που αντί να μεταβάλλεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα, καταγράφεται η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας. Το ειδικό τέμαχος μέτρησης είναι κυλινδρικό πορώδες από κεραμικό υλικό και περιέχει έναν αισθητήρα θερμοκρασίας και μία πηγή θερμότητας (ηλεκτρική αντίσταση). Το ειδικό τέμαχος τοποθετείται σε επαφή με το προς μέτρηση εδαφικό υλικό, είτε ξηρό είτε κορεσμένο (ανάλογα με το τεμάχιο και το εδαφικό υλικό) και λόγω της μύζησης, το ποσοστό υγρασίας του τεμαχίου μεταβάλλεται, επηρεάζοντας την θερμική του αγωγιμότητα. Η πηγή θερμότητας προσδίδει θερμική ενέργεια στο τέμαχος και ανάλογα με τον ρυθμό απορρόφησης προσδιορίζεται η μεταβολή στην θερμική του αγωγιμότητα. Με κατάλληλη βαθμονόμηση, μέσω της μεταβολής αυτής μπορεί να υπολογιστεί η μύζηση. Μία ενδεικτική διάταξη ενός τεμαχίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.12. Το σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, σε σχέση με την προηγούμενη, είναι ότι η θερμική αγωγιμότητα δεν επηρεάζεται από τις διαλυμένες ουσίες του νερού των πόρων, όπως επηρεάζεται η ηλεκτρική.

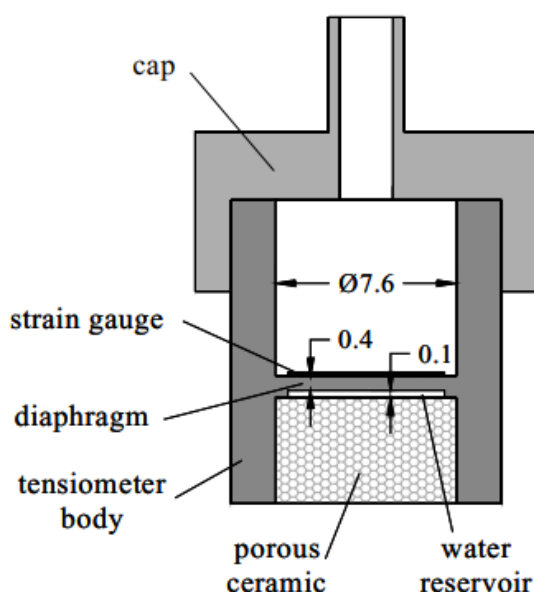


Σχήμα 2.12 Ειδικό τέμαχος μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας (πηγή: Reece, 1996)

Όπως και στα τεμάχια πορώδους υλικού, τα χρησιμοποιούμενα υλικά για την κατασκευή των τεμαχίων μέτρησης, πρέπει να έχουν πίεση είσοδου αέρα μικρότερη από τη μύζηση που καλούνται να μετρήσουν και ο αποκορεσμός τους θα πρέπει να είναι βαθμιαίος, προκειμένου να μπορεί να διαπιστωθεί ένα εύρος τιμών μύζησης.

2.5.5 Ηλεκτρομαγνητική μέθοδος

Αποτελεί πιο πρόσφατη μέθοδο από τις δύο προηγούμενες. Εντός των τεμαχών πορώδους υλικού ενσωματώνεται ένας αισθητήρας ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το εδαφικό υλικό ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας, παρουσιάζει διαφορετική ηλεκτρική σταθερά. Γνωρίζοντας την ηλεκτρική σταθερά και μέσω μίας καμπύλης βαθμονόμησης μπορεί να διαπιστωθεί το ποσοστό υγρασίας και η μύζηση. Για τη μέτρηση της ηλεκτρικής σταθεράς προσδιορίζεται η συχνότητα που δημιουργείται μέσα στο εδαφικό υλικό (frequency domain reflectometry: FDR). Ο αναγνωριστικός ηλεκτρομαγνητικός παλμός δημιουργείται στο εδαφικό υλικό από ηλεκτρόδια που είναι εγκιβωτισμένα στο εσωτερικό πορώδους υλικού, για το οποίο είναι γνωστές οι καμπύλες συσχέτισης ηλεκτρικής σταθεράς – ποσοστού υγρασίας και ποσοστού υγρασίας – μύζησης (Tarantino & Mongioli 2002). Στην Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται μία πλήρης διάταξη. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά πρόσφατη και έχει αποδειχθεί η συμφωνία μέτρησης τιμών μύζησης της μεθόδου με την μέθοδο του χάρτινου φίλτρου (Mahler & Mendes 2003).



Σχήμα 2.13 Διάταξη αισθητήρα μέτρησης της μύζησης με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (πηγή: Tarantino & Mongioli 2002)

2.5.6 Μέθοδοι με ψυχρόμετρα

Αυτές οι μέθοδοι στηρίζονται κατά κύριο λόγο στη μέτρηση της σχετικής υγρασίας του αέρα που περιβάλλει το εδαφικό υλικό, ο οποίος έχει περιέλθει σε ισορροπία με το νερό των πόρων και μέσω μίας καμπύλης βαθμονόμησης υπολογίζεται η μύζηση. Η αρχή λειτουργίας τους είναι ακριβώς ίδια με αυτή των χάρτινων φίλτρων αλλά χρειάζονται πολύ λιγότερο χρόνο εξισορρόπησης σε σχέση με αυτά. Προκειμένου τα αποτελέσματα που προκύπτουν να είναι αξιόπιστα, θα πρέπει οι μετρήσεις να πραγματοποιούνται σε δοχεία που

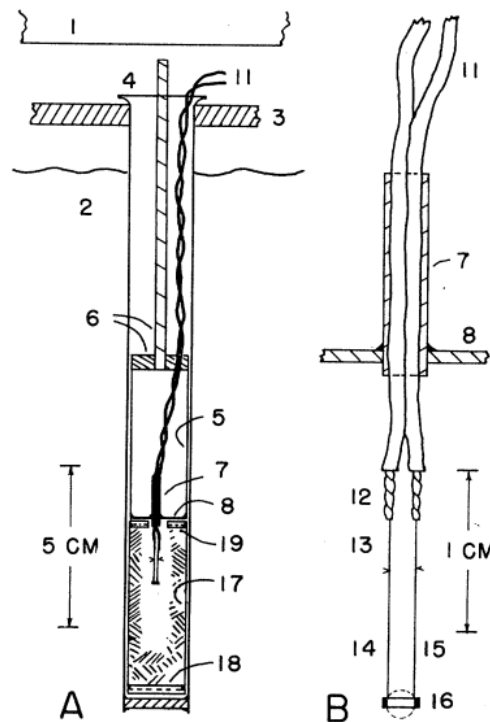
περιέχουν πολύ λίγο αέρα σε σχέση με το δοκίμιο, ώστε να μην επηρεάζεται η μύζηση του δοκιμίου. Επίσης, απαιτείται αυστηρός έλεγχος της θερμοκρασίας. Τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούνται στην μέθοδο ονομάζονται ψυχρόμετρα και χωρίζονται όπως παρακάτω (Μπαρδάνης, 2016):

α. Θερμικά ευαίσθητης αντίστασης

Τα ψυχρόμετρα αυτού του τύπου, μετρούν τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ μίας επιφάνειας που έχει νερό, και άρα υπάρχει εξάτμιση και μίας στεγνής επιφάνειας (Hill, 1930). Από την πτώση της θερμοκρασίας στην υγρή επιφάνεια μπορεί να προσδιοριστεί η σχετική υγρασία και κατ' επέκταση η μύζηση (μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης).

β. Φαινομένου Peltier

Σύμφωνα με το φαινόμενο Seebeck (1821), όταν δύο μέταλλα που βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία είναι σε επαφή, αναπτύσσεται ηλεκτρικό ρεύμα ως διαφορά δυναμικού. Ο Peltier το 1834 παρατήρησε ότι λόγω του ρεύματος που δημιουργείται από την επαφή δύο διαφορετικών μετάλλων, υπάρχει μεταβολή της θερμοκρασίας, ανάλογης με το είδος των μετάλλων (φαινόμενο Peltier). Αξιοποιώντας τα δύο φαινόμενα με κατάλληλες διατάξεις (Σχήμα 2.14) που έρχονται σε επαφή με τα εδαφικά δοκίμια, μπορεί να προσδιοριστεί η σχετική υγρασία, μέσω της μετρούμενης διαφοράς δυναμικού που προκύπτει στις δύο επιφάνειες των μετάλλων.



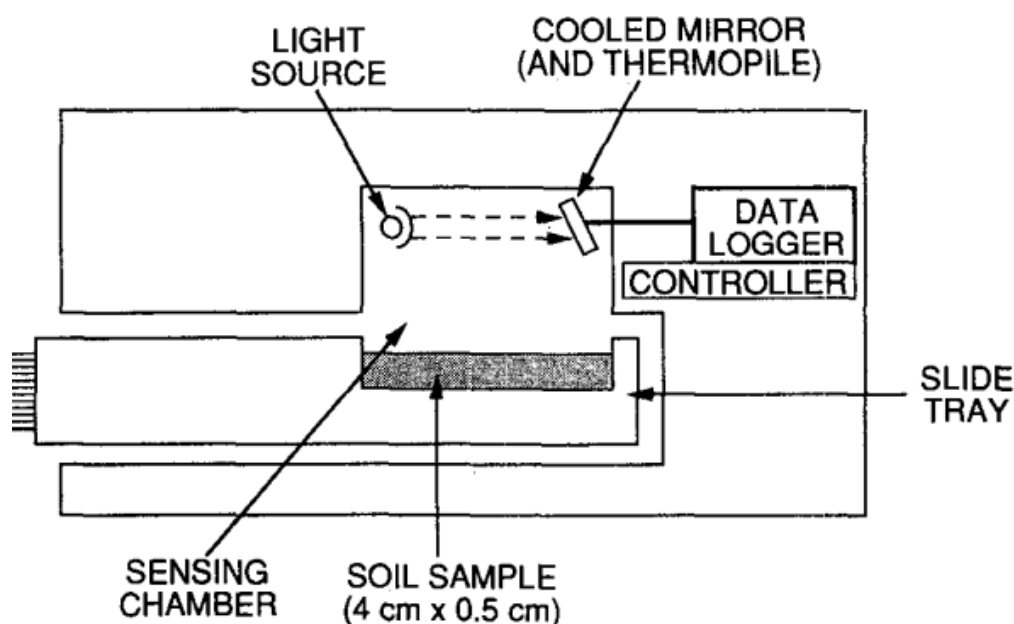
Σχήμα 2.14 Απλουστευμένη τυπική διάταξη ψυχρομέτρου φαινομένου Peltier (πηγή: Richards & Ogata 1958)

γ. Υγρόμετρα σημείου δρόσου

Τα υπόψη ψυχρόμετρα χρησιμοποιούν το φαινόμενο Peltier ώστε να διατηρείται η επαφή στο σημείο δρόσου, στο οποίο δεν υπάρχει ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον. Οι Campbell et al. (1973) σχεδίασαν ένα τέτοιο όργανο, το οποίο επειδή λειτουργεί στο σημείο δρόσου, η αναγραφόμενη διαφορά λόγω του φαινομένου Seebeck, σχετίζεται μόνο με τη σχετική υγρασία (υπό σταθερή θερμοκρασία). Πλεονέκτημα σε σχέση με το ψυχρόμετρο φαινομένου Peltier αποτελεί η μεγαλύτερη παραγόμενη διαφορά δυναμικού, η οποία μένει σταθερή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, έτσι η μέτρηση είναι πιο εύκολη και αξιόπιστη.

δ. Υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου

Οι Gee et al. (1992) ανέπτυξαν μια μέθοδο μέτρησης μύζησης μέσω μίας διάταξης που περιέχει ένα ψυχρό κάτοπτρο (Σχήμα 2.15). Το εδαφικό δείγμα τοποθετείται σε ένα δοχείο το οποίο περιέχει έναν ανεμιστήρα, μία πηγή φωτός, έναν αισθητήρα φωτός και ένα κάτοπτρο. Ο αισθητήρας λαμβάνει το φως που η πηγή ανακλά πάνω στο κάτοπτρο και μετρά την ένταση του. Όταν ο αέρας του δοχείου έλθει σε ισορροπία με το νερό των πόρων του δείγματος, τίθεται σε λειτουργία ο ανεμισστήρας ώστε να ψυχθεί η επιφάνεια του κατόπτρου και να δημιουργηθούν επί αυτού υδρατμοί. Οι παραγόμενοι υδρατμοί διαχέουν το φως και έτσι ο αισθητήρας μετράει μικρότερη ένταση. Μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης η διαφορά της έντασης συσχετίζεται με την σχετική υγρασία και την μύζηση του δείγματος.



Σχήμα 2.15 Ενδεικτική διάταξη συσκευής μέτρησης της μύζησης με υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου (πηγή: Gee et al., 1992)

ε. Αισθητήρες αντίστασης – χωρητικότητας πολυμερών

Ένας αισθητήρας αποτελείται από πορώδες υλικό το οποίο εμπεριέχει δύο ηλεκτρόδια που χωρίζονται από ένα φύλλο πολυμερούς. Ανάλογα με την υγρασία του πολυμερούς, οι ιδιότητες του μεταβάλλονται. Έτσι, όταν ο αισθητήρας είναι αντίστασης, η αντίσταση του δοκιμίου σχετίζεται με την υγρασία – μύζηση του, ενώ όταν είναι χωρητικότητας, η χωρητικότητα του πυκνωτή που δημιουργείται από το σύστημα πολυμερούς- ηλεκτροδίων σχετίζεται αντίστοιχα με την υγρασία – μύζηση (Wiederhold, 1997).

στ. Αισθητήρες οργανικών μέσων

Οι αισθητήρες αποτελούνται από μία χαλύβδινη ράβδο που έχουν προσαρτηθεί μετρητές παραμόρφωσης και περιβάλλεται από κρυστάλλους οργανικής προέλευσης. Οι κρύσταλλοι έχουν ινώδη σύσταση που προέρχεται από ένα φυτό νοτιοαφρικανικής προέλευσης και ο όγκος τους έχει την ιδιότητα να μεταβάλλεται ανάλογα με την σχετική υγρασία του αέρα. Οι αισθητήρες παραμόρφωσης καταγράφουν την προαναφερόμενη παραμόρφωση και μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση υπολογίζεται η σχετική υγρασία και η μύζηση (Simens &Blaz, 2005).

2.5.7 Μέθοδοι με τενσιόμετρα (tensiometers)

Με τη χρήση τενσιομέτρων (πιεσόμετρων) σε κατάλληλες διατάξεις, μπορεί να μετρηθεί απευθείας η αρνητική πίεση του νερού των πόρων ή η μύζηση των εδαφικών υλικών. Στην απλούστερη μορφή τους, εκτός από το τενσιόμετρο, οι συσκευές διαθέτουν ένα πορώδες κεραμικό άκρο, με υψηλή πίεση εισόδου αέρα (οι λόγοι έχουν αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο) και ένα δοχείο νερού, με δυνατότητα απαέρωσης. Το νερό στο κεραμικό άκρο εξασφαλίζει την κίνηση του νερού από το εδαφικό υλικό στο δοχείο του νερού, ενώ ταυτόχρονα αποτρέπεται η είσοδος αέρα και η αλλοίωση της μέτρησης. Η απαίτηση δυνατότητας απαέρωσης προέρχεται κυρίως από τη φαινόμενη σπηλαίωση του νερού (ανάπτυξη φυσαλίδων αέρα λόγω μείωσης της διαλυτότητας του αέρα στο νερό) όταν μειώνεται η πίεση του νερού. Τα τενσιόμετρα χωρίζονται σε:

α. Πορώδους άκρου χαμηλής πίεσης εισόδου αέρα (Φωτογραφία 2.5)

β. Πορώδους άκρου υψηλής πίεσης εισόδου αέρα

γ. Ωσμωτικά

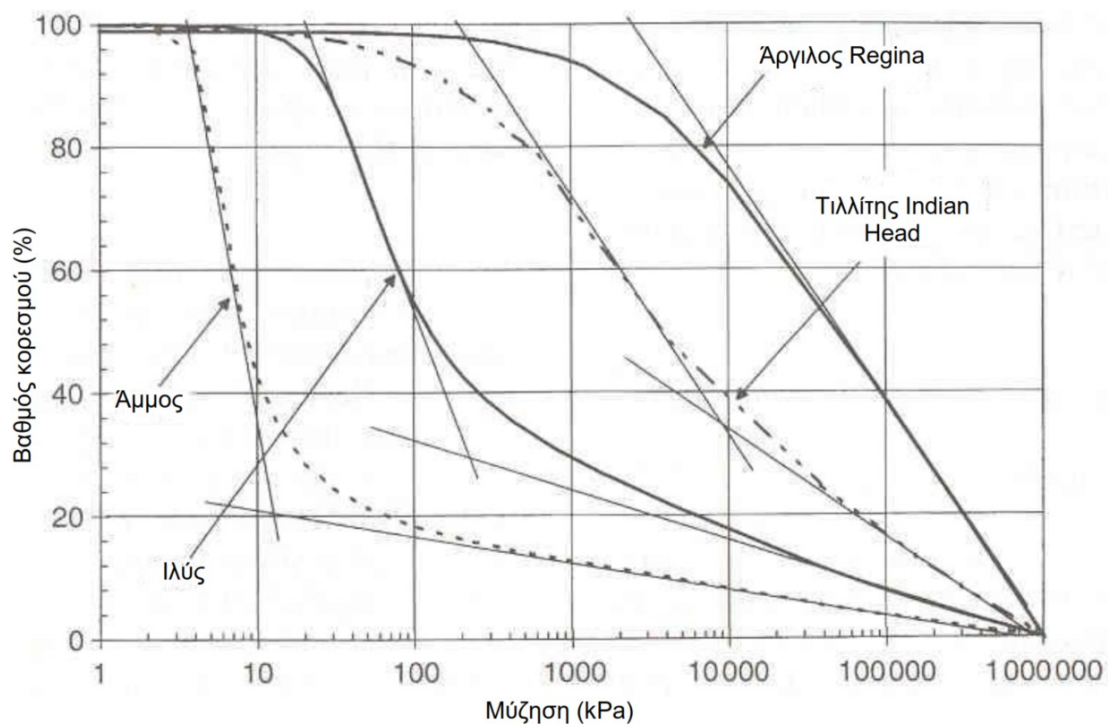


Φωτογραφία 2.5 Φωτογραφία τενσιόμετρου με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης αέρα (πηγή: Μπαρδάνης, 2016)

3. Εργαστηριακές Δοκιμές

3.1 Πειραματικός προσδιορισμός Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους – Νερού

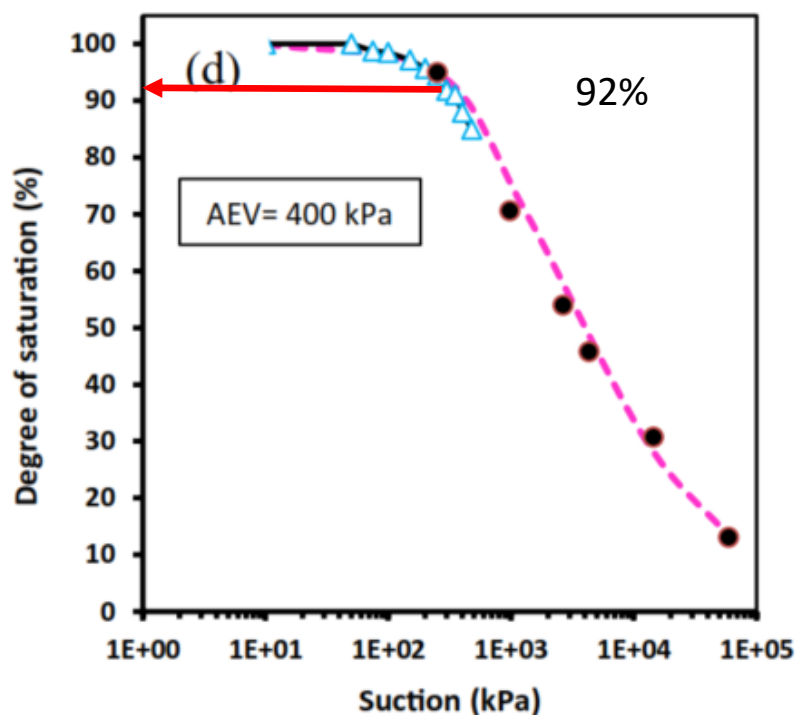
Στα μη κορεσμένα εδάφη, η ύπαρξη μίας επιπλέον παραμέτρου, της μύζησης, επιβάλλει αφενός τη συσχέτιση της με τα κλασικά μεγέθη της εδαφομηχανικής των κορεσμένων εδαφών, αφετέρου τη σύνδεση της με την ποσότητα του νερού στο έδαφος (w ή S_r ή θ). Η συσχέτιση αυτή αποτυπώνεται στην καμπύλη εδάφους – νερού (soil-water characteristic curve) Παράδειγμα χαρακτηριστικών καμπυλών για διάφορα υλικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες για 4 διαφορετικά υλικά (τροποποιημένο σχήμα από τους Vanapalli et al., 1999)

Οι καμπύλες του Σχήματος 3.1 αναφέρονται σε εδαφικά υλικά αρχικά πλήρως κορεσμένα. Στη συνέχεια χάνουν νερό σταδιακά, μέχρι την πλήρη ξήρανση τους, γι' αυτό και ονομάζονται και καμπύλες ξήρανσης. Βλέπουμε την τιμή μύζησης τόσο στην απαιτούμενη πίεση εισόδου αέρα όσο και στο παραμένον ποσοστό υγρασίας/βαθμό κορεσμού να αυξάνεται με την μείωση του μεγέθους των κόκκων και συνεπώς και των πόρων π.χ. κατά τη μετάβαση από την άμμο, στην ιλύ, στην άργιλο.

Όπως προαναφέρθηκε, η πίεση εισόδου αέρα είναι το σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους - νερού, που ξεκινάει να συνυπάρχει η υγρή και η αέρια φάση, συνεπώς ο βαθμός κορεσμού γίνεται μικρότερος από 100%. Το πόσο μικρότερος θα είναι μέχρι το σημείο εισόδου αέρα (ακόμα και το που θα είναι το σημείο εισόδου αέρα) εξαρτάται από την πυκνότητα του υλικού (Mahboobi et al., 2023) και κατ' επέκταση από τον δείκτη πόρων (Rahardjo et al., 2004). Το παραπάνω συμβαίνει λόγω των εξωτερικών μηνίσκων νερού, οι οποίοι έχουν κοίλη διεπιφάνεια, ενώ ταυτόχρονα δεν επιτρέπουν την είσοδο του αέρα. Το Σχήμα 3.2 δείχνει την πίεση εισόδου αέρα και τον βαθμό κορεσμού που πραγματοποιείται η είσοδος του αέρα για δοκίμιο που παρασκευάστηκαν από εμπορική λευκή καολίνη.

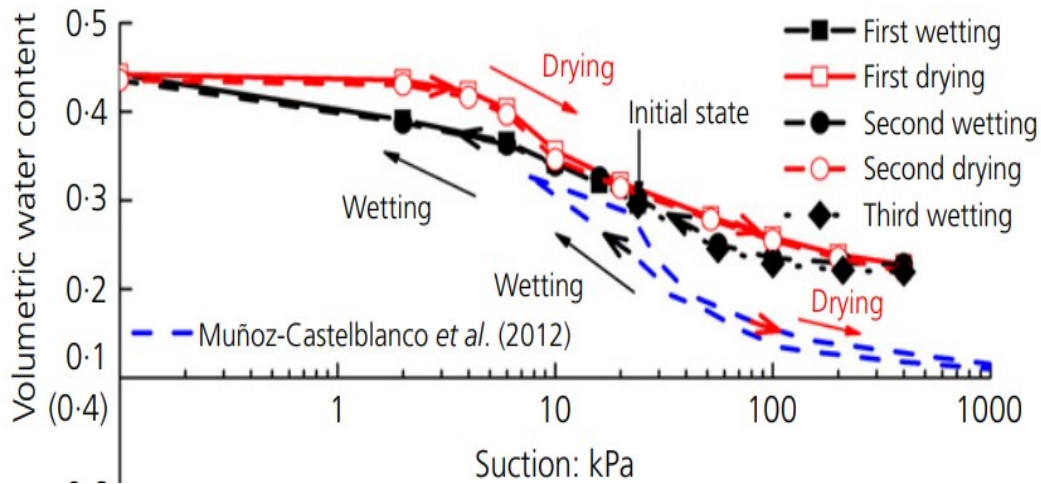


Σχήμα 3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού για καολίνη ξηρής πυκνότητας 15 KN/m³ (τροποποιημένο σχήμα από τους Mahboobi et al., 2023)

Από τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι, η πίεση εισόδου αέρα ισοδυναμεί με εκείνη τη πίεση που προκαλεί την καταστροφή των μηνίσκων, οι οποίοι έχουν δημιουργηθεί μεταξύ της υγρής φάσης και της στερεάς. Η μείωση του βαθμού κορεσμού από το σημείο εκείνο και μετά γίνεται με πολύ πιο απότομη κλίση και αποτελεί την αρχή για τη μείωση απόδοσης της μύζησης, όπως θα αναφερθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Στο Σχήμα 3.3 εμφανίζονται τα αποτελέσματα δοκιμών ξήρανσης και στη συνέχεια ύγρανσης του εδάφους. Το έδαφος δείχνει υστερητική συμπεριφορά. Όμως όσο το υλικό δεν έχει εμφανίσει αέρια φάση, σε περίπτωση αναστροφής

της εξέλιξης της ξήρανσης, το υλικό ακολουθεί τον ίδιο κλάδο. Σε περίπτωση που το υλικό ξεπεράσει την πίεση/μύζηση εισόδου αέρα, κατά την επανύγρανση ακολουθείται μία νέα καμπύλη (ύγρανσης) η οποία παρουσιάζει υστέρηση σε σχέση με την καμπύλη ξήρανσης.



Σχήμα 3.3 Παράδειγμα καμπυλών ξήρανσης και ύγρανσης (με κύκλους ξήρανσης και ύγρανσης) σε υλικό εκσκαφών στην περιοχή Χιαν της Κίνας (MU et al., 2020)

3.2 Διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών

Αφού έγινε αναφορά στη βασική παράμετρο για τη μελέτη της μηχανικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών, που είναι η μύζηση, καθώς και στον τρόπο που τα μη κορεσμένα εδάφη μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, ανάλογα με την περιοχή που βρίσκονται στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού, σε αυτό το υποκεφάλαιο γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά της μηχανικής τους συμπεριφοράς, συναρτήσει του βαθμού κορεσμού τους και της μύζησης.

3.2.1 Το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας MOHR – COULOMB

Ο Terzaghi (1936) διατύπωσε για κορεσμένα εδάφη και σε όρους ενεργού τάσης το γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb (εξίσωση 3.2.1.1):

$$\tau = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad (\text{εξ.3.2.1.1})$$

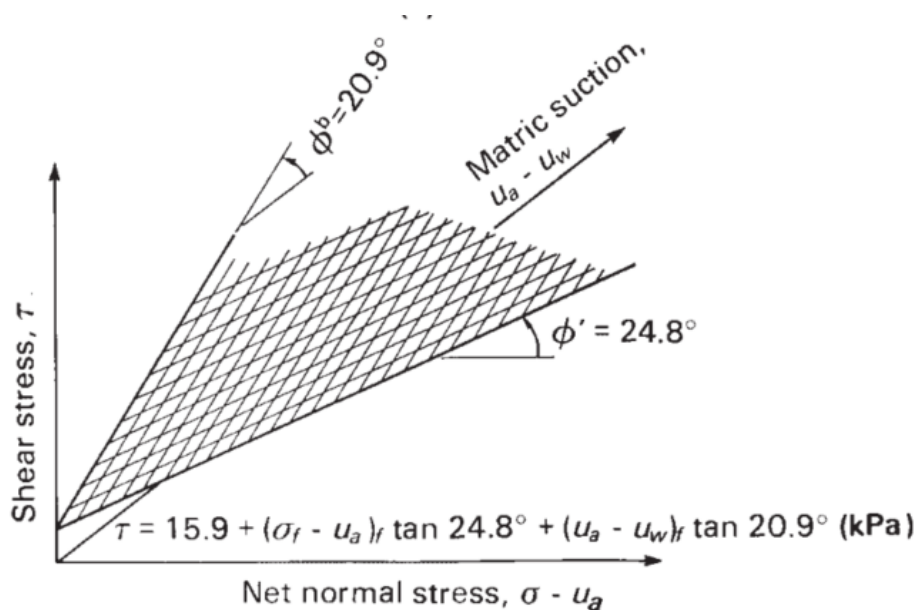
όπου τ είναι η μέγιστη διατμητική αντοχή του κορεσμένου εδάφους, στο οποίο ασκείται ολική τάση σ και πίεση πόρων u_w , έχει ενεργό τιμή συνοχής c' και ενεργό γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' .

Οι Fredlund et al. (1978) εξέλιξαν το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb και το επέκτειναν και για τα μη κορεσμένα εδάφη με την ακόλουθη μορφή (εξίσωση 3.2.2.1):

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad (\text{εξ.3.2.2.1})$$

όπου τ η μέγιστη διατμητική τάση για έδαφος μη κορεσμένο, που διαθέτει ενεργό συνοχή c' , ενεργό γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' , ρυθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής λόγω μύζησης $\tan \phi_b$, υπό ορθή τάση $(\sigma - u_a)$ και μύζηση $(u_a - u_w)$.

Η παραπάνω εξίσωση δεν οδηγεί πλέον σε μία περιβάλλουσα γραμμή αστοχίας, αλλά σε μία περιβάλλουσα επιφάνεια, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



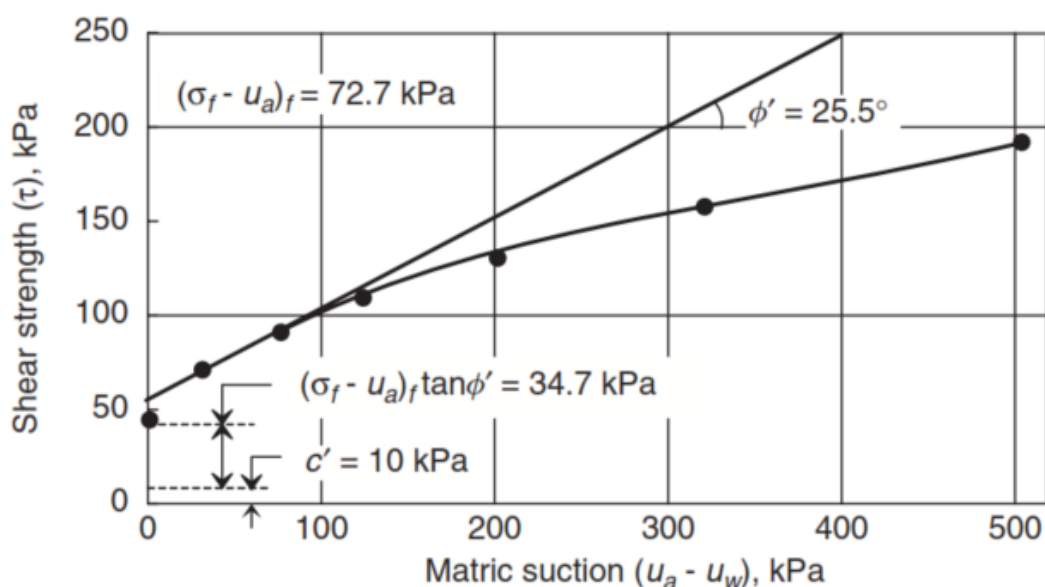
Σχήμα 3.4 Παράδειγμα περιβάλλουσας επιφάνειας αστοχίας, με βάση το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb (πηγή: Fredlund et al., 2012)

3.2.2 Το γενικευμένο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας MOHR – COULOMB

Η δομή της εξίσωσης 3.2.2.1, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συνεχής αύξηση της μύζησης σε ένα εδαφικό υλικό οδηγεί σε συνεχή αύξηση της αντοχής του, υπάρχει δηλαδή γραμμικότητα μεταξύ της διατμητικής αντοχής και της μύζησης. Κάτι τέτοιο ωστόσο δεν ισχύει, αφού έχει παρατηρηθεί ότι υπάρχει ένα όριο

μύζησης πάνω από το οποίο η γραμμικότητα δεν ακολουθείται. Σύμφωνα με τους Fredlund et al. (2012), όταν οι τιμές της μύζησης είναι μικρές, το εδαφικό δοκίμιο είναι ακόμα πλήρως κορεσμένο. Σε αυτή την κατάσταση η διατμητική αντοχή χαρακτηρίζεται από την ενεργό γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' . Η υγρή φάση των πόρων και η συνολική ορθή τάση είναι υπό την ίδια πίεση αέρα, όπως εκφράζεται από τους όρους της εξίσωσης ($u_a - u_w$) και $(\sigma - u_a)$, αντίστοιχα. Η γωνία διατμητικής αντοχής παραμένει όπως στα κορεσμένα εδάφη (αφού ακόμα το έδαφος είναι κορεσμένο). Η διατμητική αντοχή που οφείλεται στη μύζηση έχει μία γωνία ϕ_b ίση με την ϕ' , και αυτή η κατάσταση ισχύει μόνο για όσο το έδαφος παραμένει κορεσμένο.

Το νερό αρχίζει να αντικαθίσταται στους πόρους του δοκιμίου, όταν ξεπεραστεί η πίεση εισόδου αέρα (a_{ev} – air entry value) και το έδαφος αρχίζει να έχει πλέον όλο και μικρότερο βαθμό κορεσμού. Από αυτό το σημείο και μετά, περεταίρω αύξηση της μύζησης δεν επιδρά με τον ίδιο βαθμό στην αύξηση της αντοχής, έχουμε δηλαδή όλο και μικρότερη συνεισφορά της αύξησης της μύζησης στην αύξηση της αντοχής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της γωνίας ϕ_b σε τιμές όλο και μικρότερες από την ϕ' . Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η μείωση της αντοχής σε σχέση με την γραμμική θεώρηση, σε δοκιμή απευθείας διάτμησης.



Σχήμα 3.5 Δοκιμή απευθείας διάτμησης που αποδεικνύει τη μη γραμμική συμπεριφορά της διατμητικής αντοχής σε σχέση με την μύζηση (πηγή: Fredlund et al. 2012)

Ο κάθε τύπος εδάφους, ανάλογα με την φύση – δομή του, παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά στην εξέλιξη της αντοχής του, όταν η μύζηση αυξάνεται, για παράδειγμα:

α. Καθαρά αργιλικό έδαφος πολύ υψηλής πλασιμότητας: παρουσιάζει συνεχόμενη αύξηση της αντοχής ενώ η μύζηση αυξάνεται.

β. Αργιλικό έδαφος μέσης έως υψηλής πλασιμότητας: συνεχόμενη αύξηση της αντοχής ενώ η μύζηση αυξάνεται, αλλά με μειούμενο ρυθμό από ένα σημείο και μετά (πίεση εισόδου αέρα).

γ. Λεπτόκοκκη ιλύς έως άργιλος χαμηλής πλασιμότητας : αύξηση της διατμητικής αντοχής ενώ η μύζηση αυξάνεται, μέχρι την πίεση εισόδου αέρα και μετά σταθεροποίηση της αντοχής.

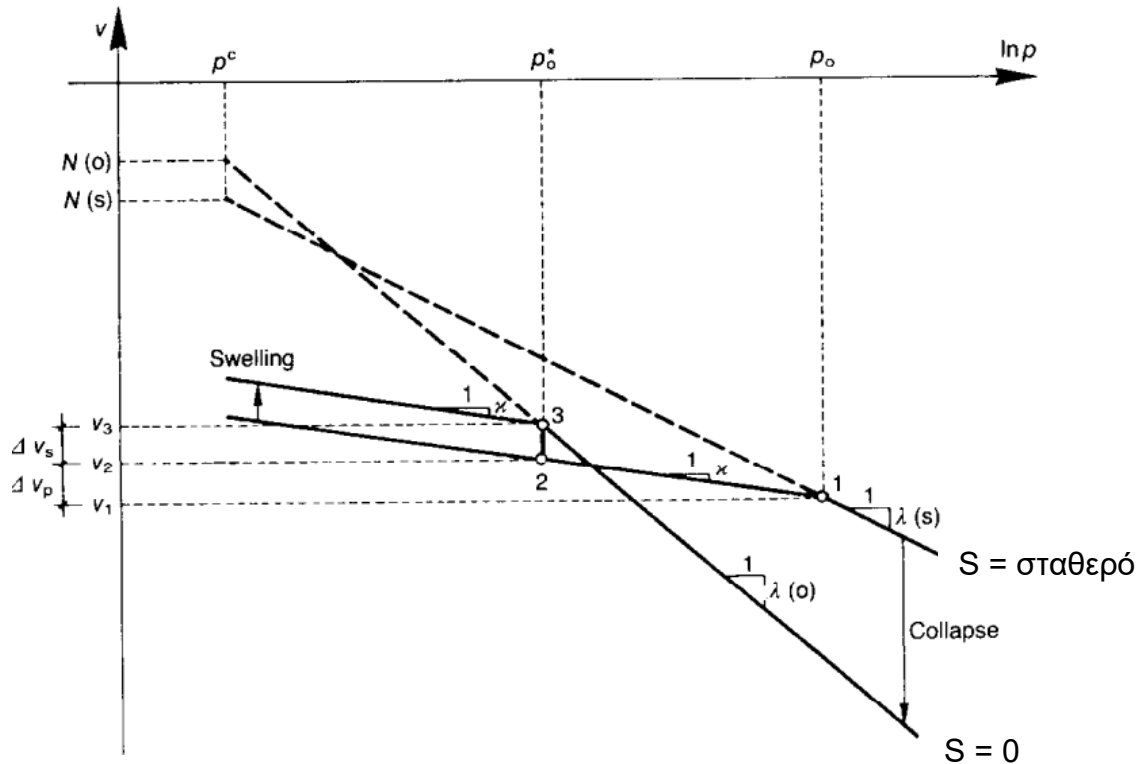
δ. Ιλυώδεις άμμος έως μη πλαστικές ιλύες: αύξηση της διατμητικής αντοχής ενώ η μύζηση αυξάνεται, μέχρι το σημείο εισόδου αέρα και μετά μείωση της αντοχής μέχρι ενός σημείου που επέρχεται σταθεροποίηση.

ε. Χάλικες και άμμοι χωρίς παρουσία λεπτόκοκκων: αύξηση της διατμητικής αντοχής, ενώ η μύζηση αυξάνεται και μετά μείωση της αντοχής μέχρι μηδενισμού της.

3.2.3 Συμπιεστότητα – τάση φαινόμενης προστεροποίησης – πίεση εισόδου αέρα

Έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση της μύζησης οδηγεί σε μείωση της συμπιεστότητας και αύξηση της τάσης φαινόμενης προστεροποίησης. Οι Alonso et al. (1990) παρουσίασαν ένα ολοκληρωμένο καταστατικό προσομοίωμα στο οποίο επιδεικνύεται το πώς μεταβάλλεται ο δείκτης συμπίεσης σε σχέση με την μύζηση. Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζονται καμπύλες ισότροπης συμπίεσης υπό σταθερή μύζηση, με μεταβλητές τον ειδικό όγκο v ($v=1+e$) και την μέση ολική τάση p (σε κλίμακα φυσικών λογαρίθμων). Η πρώτη καμπύλη ($s=0$) αντιστοιχεί σε μηδενική μύζηση και η δεύτερη σε σταθερή μύζηση ($s=σταθερό$). Η δεύτερη καμπύλη παρουσιάζει δείκτη αποφόρτισης/επαναφόρτισης k ίσο με την πρώτη, αλλά δείκτη συμπίεσης λ μικρότερο (αφού το υλικό είναι πιο στιφρό).

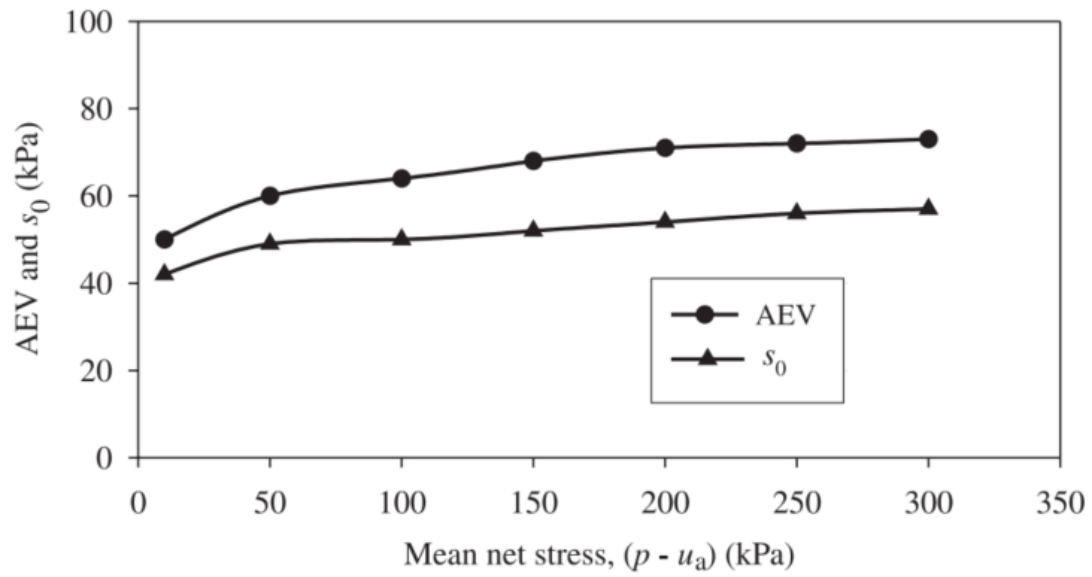
Από το Σχήμα 3.6, προκύπτει ακόμα ότι για αρχικές συνθήκες μέσης ολικής τάσης και μύζησης, για τις οποίες το έδαφος βρίσκεται στον κλάδο επαναφόρτισης, η μείωση της μύζησης (κορεσμός) υπό σταθερή μέση ολική τάση, προκαλεί διόγκωση, ενώ για αρχικές συνθήκες για τη οποίες το έδαφος βρίσκεται στον κλάδο συμπίεσης, η μείωση της μύζησης οδηγεί σε συρρίκνωση (συμπεριφορά κατάρρευσης).



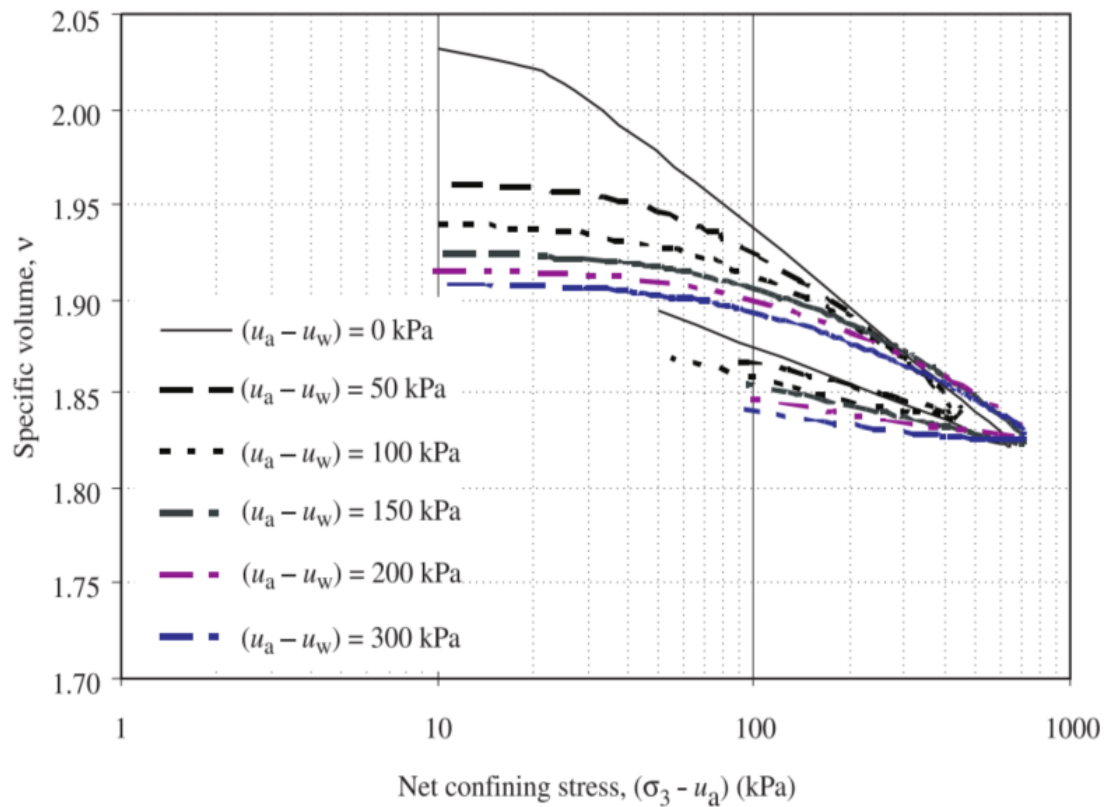
Σχήμα 3.6 Καμπύλες ισότροπης συμπίεσης για κορεσμένο και για μη κορεσμένο έδαφος με σταθερή μύζηση (πηγή: Alonso et al., 1990)

Οι Thu et al. 2007 μέτρησαν τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους – νερού του ίδιο υλικού, υπό σταθερές τιμές τάσης και διαπίστωσαν ότι όταν αυξάνεται η τάση, αυξάνεται και η πίεση εισόδου αέρα στο εδαφικό υλικό. Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η εξέλιξη της πίεσης εισόδου αέρα σε σχέση με την ορθή τάση αφού αφαιρεθεί η πίεση αέρα της αέριας φάσης. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι μεταξύ της πίεσης εισόδου αέρα και της τάσης διαρροής (μεταβολή στην καμπυλότητα της ΧΚΕΝ) υπάρχει μία μικρή διαφορά.

Στις καμπύλες του Σχήματος 3.8, που αντιστοιχούν σε κορεσμένο έδαφος, αλλά και σε έδαφος που ασκείται μύζηση 50,100,150,200, και 300 kPa, διαπιστώνεται η σταδιακή αύξηση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης και η μείωση της συμπίεστότητας, με την αύξηση της μύζησης υπό την οποία πραγματοποιείται η ισότροπη συμπίεση.



Σχήμα 3.7 Μεταβολή της πίεσης εισόδου αέρα και της τάσης διαρροής (πηγή: Thu et al. 2007)



Σχήμα 3.8 Καμπύλες ισότροπης συμπίεσης για πλήρως κορεσμένο καολινίτη και μη κορεσμένο υπό σταθερή μύζηση (πηγή: Thu et al. 2007)

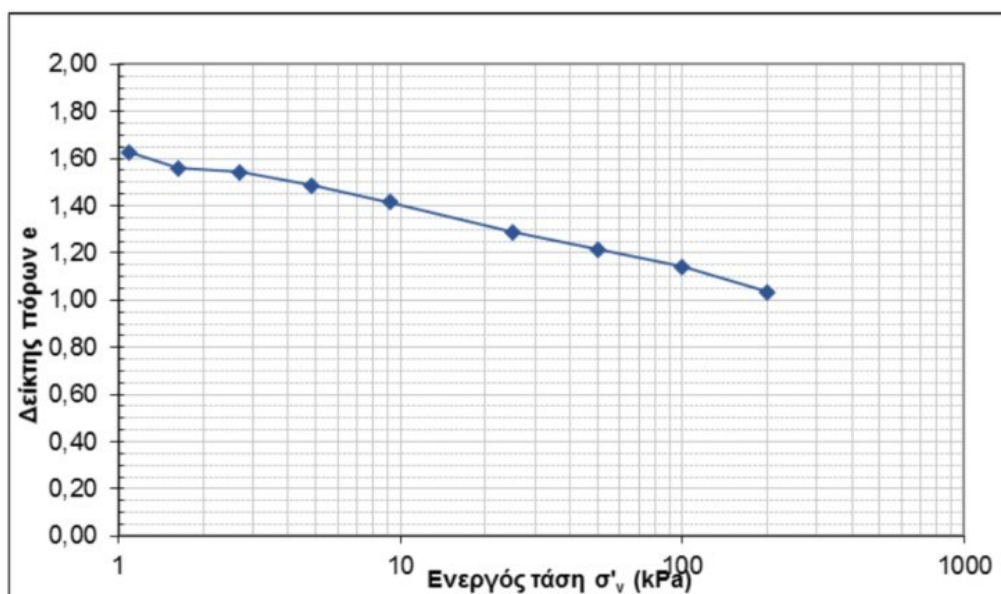
4. Πειραματικά αποτελέσματα

4.1 Τρόπος παρασκευής - Χαρακτηριστικά δοκιμίων

Τα δοκίμια αναζυμωμένου καολινίτη που χρησιμοποιήθηκαν, παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο εδαφομηχανικής του ΕΜΠ. Η παρασκευή έγινε με τη χρήση σκόνης καολίνης συγκεκριμένων προδιαγραφών, η οποία αναμίχθηκε με απεσταγμένο νερό. Το μίγμα (υλικό σε υδαρή μορφή) τοποθετήθηκε στο συμπιεσόμετρο και φορτίστηκε αξονικά υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης, μέχρι τα 200 kPa (τάση προφόρτισης).

Στην υπόψη διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές μήτρες με διαμέτρους 66mm, 101mm και 152 mm. Πριν την εισαγωγή υλικού, οι μήτρες καλύπτονταν με λιπαντικό (γράσο) προκειμένου να είναι δυνατή η αδιατάρακτη εξόλκευση του δοκιμίου, μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης. Η κεφαλή κάθε μήτρας και μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας, πληρώνονταν περιοδικά με απεσταγμένο νερό, προκειμένου να διασφαλιστεί ο κορεσμός του δοκιμίου έναντι τις διαφυγής νερού λόγω εξάτμισης.

Μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης, τα δοκίμια επικαλύπτονται με διάφανη μεμβράνη και φυλάσσονται σε ειδικά δοχεία, παρουσία 100% υγρασίας, προκειμένου να παραμείνουν πλήρως κορεσμένα, μέχρι να χρησιμοποιηθούν στις δοκιμές. Η τυπική καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1



Σχήμα 4.1 Τυπική καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης κατά την παρασκευή των αναζυμωμένων δοκιμίων (πηγή: Κουρελής, 2016)

Τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου καολινίτη, έχουν όπως παρακάτω (Κουρελής, 2016):

- α. Ειδικό βάρος κόκκων (Gs): 2,61
- β. Όριο υδαρότητας (LL): 47%
- γ. Όριο πλασιμότητας (PL): 35%
- δ. Δείκτης πλασιμότητας: 12%
- ε. Ποσοστό αργίλου : 72%
- στ. Ποσοστό ιλύος : 27%



(α)



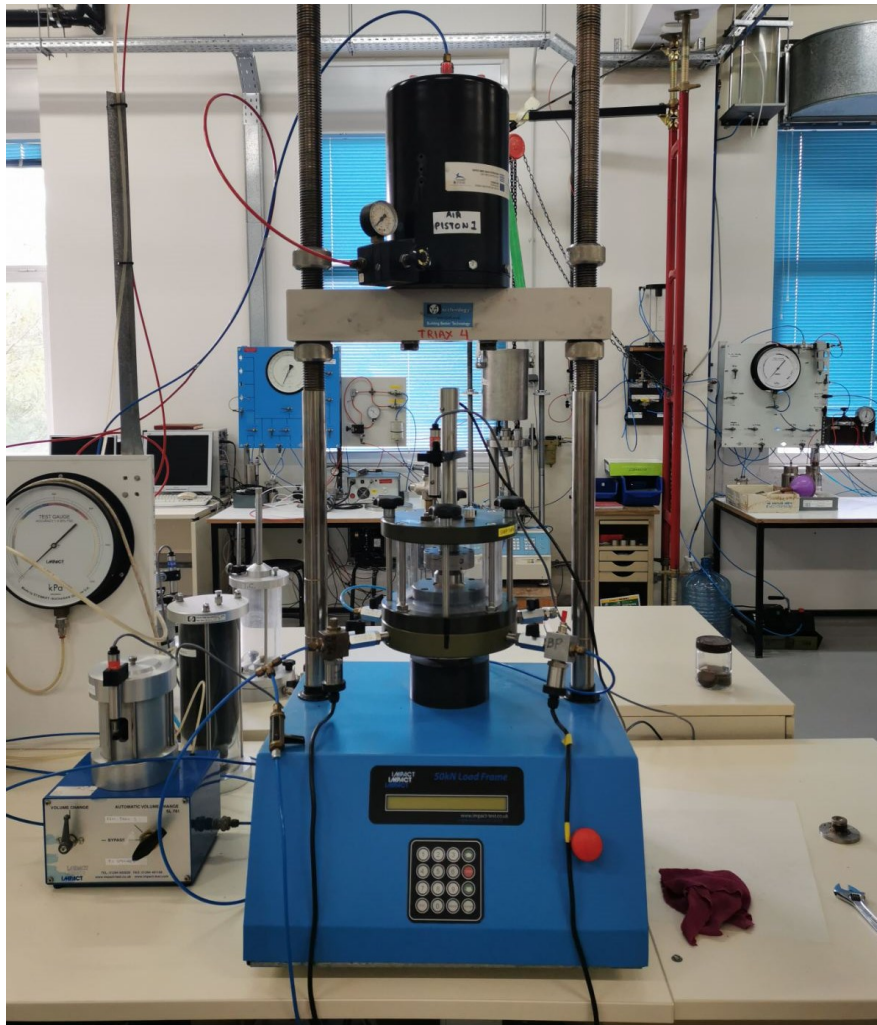
(β)

Φωτογραφίες 4.1 (α) Συσσκευή συμπίεσομέτρου και **(β)** δείγμα δοκιμίου μετά την εξόλκευση (πηγή: Κουρελής, 2016)

4.2 Δοκιμές συμπίεστρο

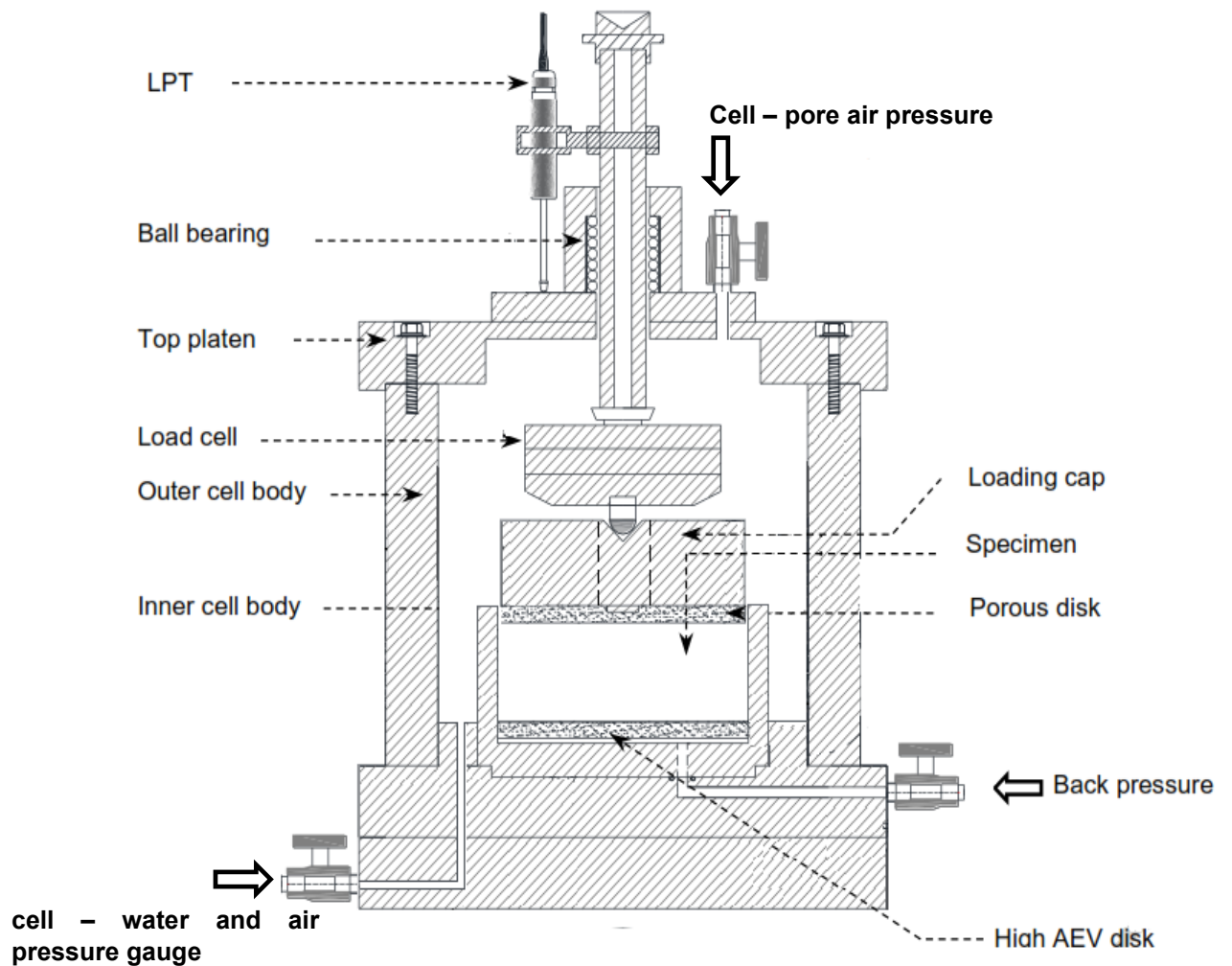
4.2.1 Περιγραφή συσκευής συμπίεστρο για ακόρεστα εδαφικά υλικά

Για τις δοκιμές συμπίεστρο (oedometer), χρησιμοποιήθηκε κυψέλη μονοδιάστατης συμπίεσης της εταιρίας GDS , η οποία προσφέρει τη δυνατότητα επιβολής συγκεκριμένων τιμών μύζησης με ταυτόχρονη παρακολούθηση της μεταβολής του όγκου του δοκιμίου και του όγκου νερού που διαφεύγει ή εισέρχεται εντός αυτού. Η κυψέλη συνδέθηκε με σύστημα επιβολής πιέσεων του εργαστηρίου και η καταγραφή των παραμέτρων του πειράματος γίνεται με καταγραφικό που επίσης αναπτύχθηκε στο εργαστήριο (Φωτογραφία 4.2).



Φωτογραφία 4.2 Συσκευή δοκιμής συμπίεστρο ακόρεστων εδαφών του εργαστηρίου εδαφομηχανικής ΕΜΠ

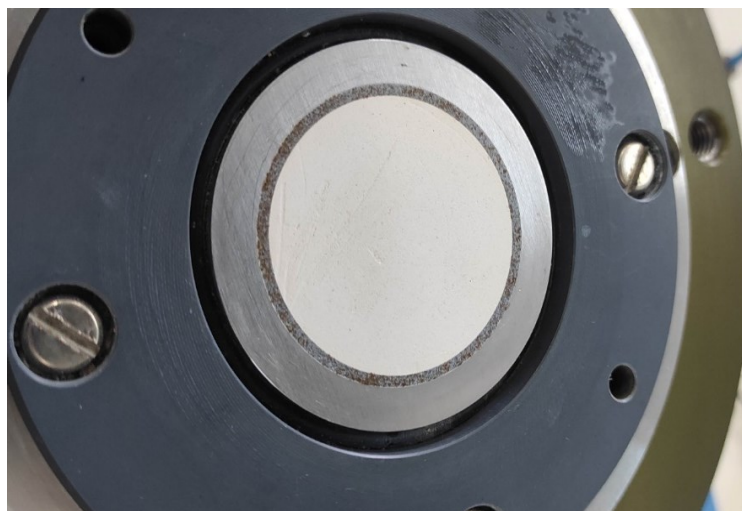
Ο έλεγχος των παραμέτρων γίνεται με αναλογικό τρόπο, μέσω πνευματικών και υδραυλικών διατάξεων. Η μέτρηση των γεωμετρικών ογκομετρικών μεταβολών πραγματοποιείται ψηφιακά μέσω ηλεκτρονικού μηκυσιόμετρου, το οποίο είναι προσαρτημένο στο έμβολο φόρτισης. Η μεταβολής του όγκου του νερού του δοκιμίου γίνεται σε αντίστοιχο μετρητή και καταγράφεται ηλεκτρονικά. Το έμβολο φόρτισης μεταβιβάζει το φορτίο στο δοκίμιο μέσω ημισφαιρικού προσαρμογέα και ταυτόχρονα δέχεται την πίεση του αέρα που εφαρμόζεται στο εσωτερικό της κυψέλης. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η εφαρμογή της πίεσης του αέρα (u_a) στο δοκίμιο. Μεταξύ του εμβόλου και της κεφαλής του δοκιμίου, παρεμβάλλεται ειδικός δίσκος από κορούνδιο (coarse corundum disk). Το δοκίμιο εδράζεται επί κεραμικού πωρόλιθου υψηλής τιμής πίεσης εισόδου αέρα (High-Air-Entry Disk), ο οποίος συνδέεται με το κύκλωμα ελέγχου της πίεσης του νερού των πόρων (u_w) και τη βαλβίδα απαέρωσης. Οι κύριες διατάξεις της συσκευής παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.2 Κύριες διατάξεις της συσκευής συμπιεσομέτρου ακόρεστων εδαφών (τροποποιημένο σχήμα από Bagheri et. al. 2019)

4.2.2 Προετοιμασία δοκιμίου και συσκευής για χρήση

Για την ορθή λειτουργία του κεραμικού πωρόλιθου (Φωτογραφία 4.3), ο οποίος διασφαλίζει τη μη είσοδο αέρα στο κύκλωμα νερού και κατά συνέπεια την ορθή λήψη μετρήσεων του όγκου νερού που διαφεύγει από το δοκίμιο, πρέπει αυτός να είναι πλήρως κορεσμένος. Η διαδικασία κορεσμού είναι ίδια με αυτή της τριαξονικής συσκευής και αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 4.3.2.



Φωτογραφία 4.3 Κεραμικός πωρόλιθος υψηλής τιμής πίεσης εισόδου αέρα (High-Air-Entry Disk)

Από το αναζυμωμένο δείγμα, η παρασκευή του οποίου έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, λαμβάνονται τα δοκίμια. Αυτά αρχικά μορφοποιούνται στο απαιτούμενο σχήμα προκειμένου να εισαχθεί στον δακτύλιο της δοκιμής, με τη βοήθεια ειδικής σέγας (Φωτογραφίες 4.4 και 4.5).

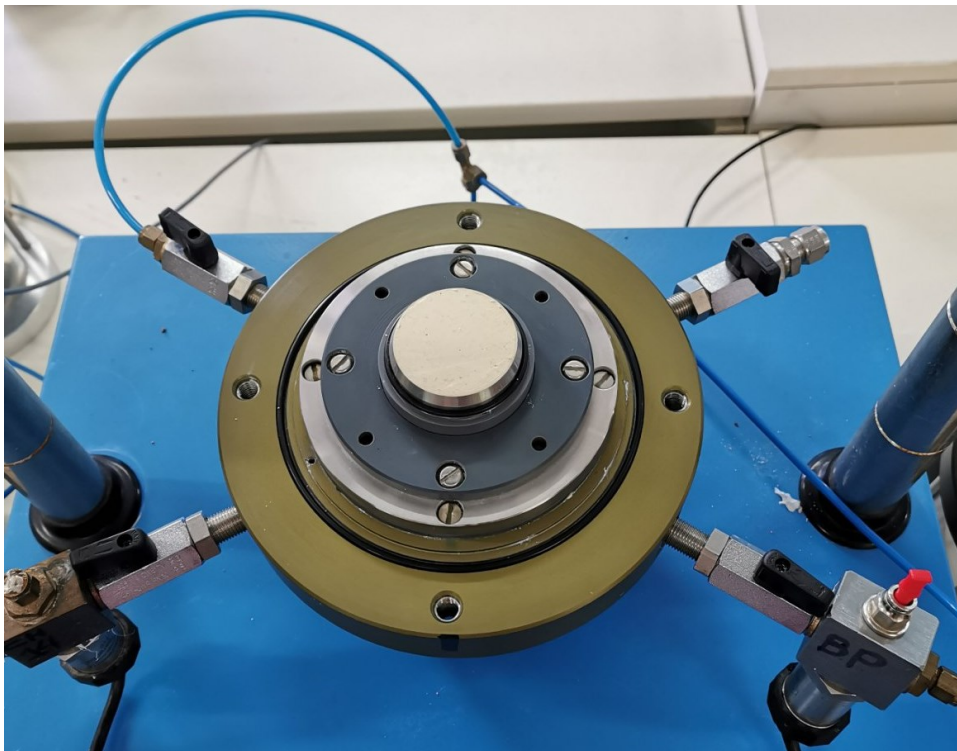


Φωτογραφία 4.4 Κομμάτι δοκιμίου, δακτύλιος δοκιμής και ειδική μεταλλική σέγα διαμόρφωσης του σχήματος του δοκιμίου.



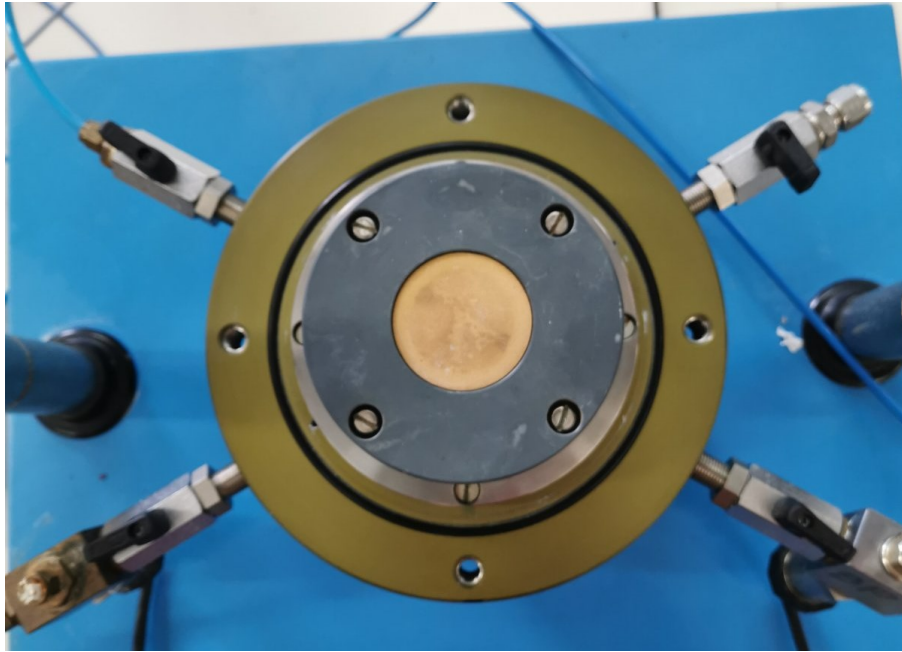
Φωτογραφία 4.5 Κομμάτι δοκιμίου, δακτύλιος δοκιμής και ειδική μεταλλική σέγα διαμόρφωσης του σχήματος του δοκιμίου

Αφού το δοκίμιο εισαχθεί εντός του δακτυλίου, εναποτίθεται επί του κεραμικού πωρόλιθου (Φωτογραφία 4.6)



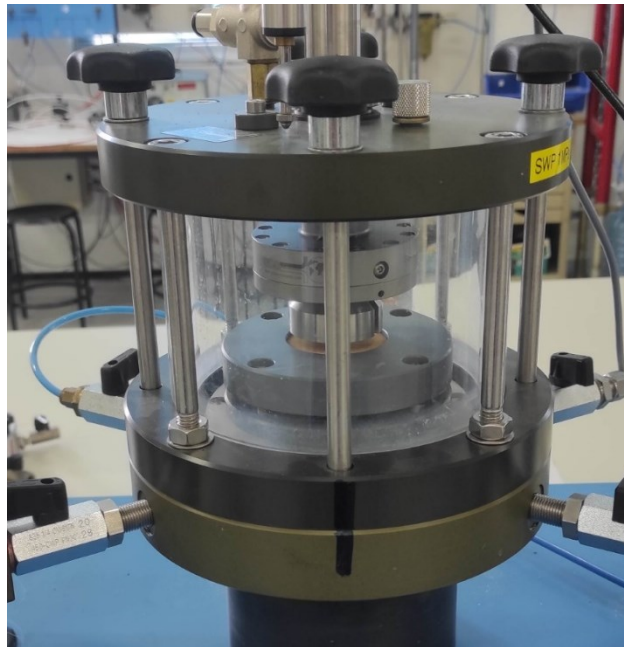
Φωτογραφία 4.6 Δοκίμιο μαζί με τον δακτύλιο, επί του κεραμικού πωρόλιθου

Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι ο δακτύλιος και το δοκίμιο δεν θα μετακινηθούν, καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής, τοποθετείται ειδικός δακτύλιος εγκιβωτισμού, ο οποίος κοχλιώνεται στη βάση του κεραμικού πωρόλιθου. Τέλος, τοποθετείται ο ειδικός δίσκος από κορούνδιο στην κεφαλή του δοκιμίου (Φωτογραφία 4.7).



Φωτογραφία 4.7 Τοποθετημένος δακτύλιος εγκιβωτισμού και ειδικός δίσκος κορουνδίου

Στη συνέχεια τοποθετείται η κυψέλη του συμπιεσομέτρου η οποία κοχλιώνεται στη βάση της συσκευής (Φωτογραφία 4.8). Η στεγανοποίηση της επιτυγχάνεται μέσω ελαστικού δακτυλιδιού.



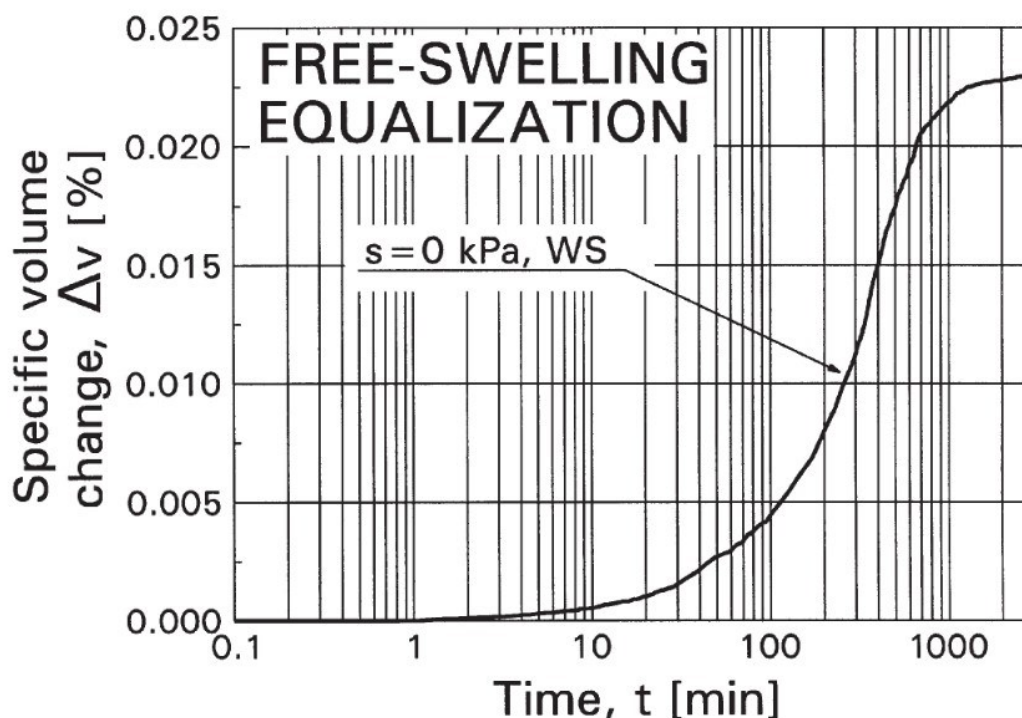
Φωτογραφία 4.8 Τοποθετημένο πώμα κυψέλης

4.2.3 Στάδια δοκιμής

α. Κορεσμός και εφαρμογή της μύζησης

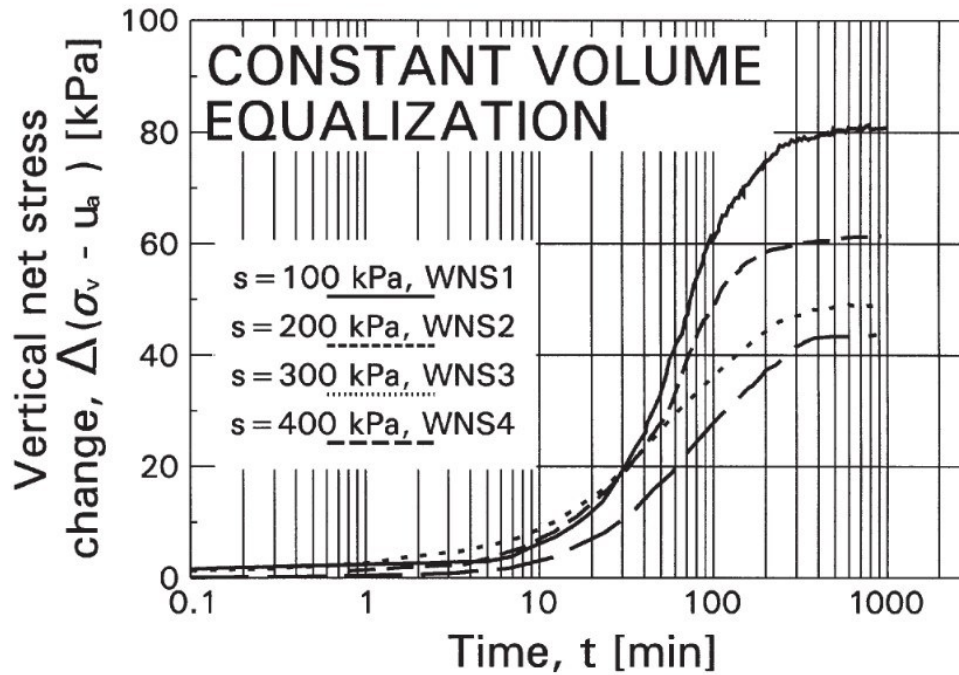
Σύμφωνα με τους Rampino et al. (1999), πριν την εφαρμογή της φόρτισης (συμπίεσης) απαιτείται:

1/ Για τα δοκίμια που θα έχουν κατά τη δοκιμή μηδενική μύζηση, ένα αρχικό στάδιο εξασφάλισης κορεσμού, κατά το οποίο το δοκίμιο αυξάνει τον όγκο του με ελεύθερη διόγκωση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 Καμπύλη μεταβολής του όγκου δοκίμιου αποσυντεθειμένου γρανίτη κατά τη φάση του κορεσμού, πριν τη δοκιμή συμπίεστρο, από $S_r=75\%$ σε $S_r=100\%$ με ελεύθερη διόγκωση (πηγή: Rampino et al., 1999)

2/ Για τα δοκίμια που κατά την δοκιμή θα έχουν σταθερή – μη μηδενική μύζηση, απαιτείται ένα αρχικό στάδιο εφαρμογής της. Στο στάδιο αυτό εφαρμόζεται η επιθυμητή τιμή μύζησης s υπό σταθερό όγκο. Τα δοκίμια διαβρέχονται και ο βαθμός κορεσμού τους αυξάνεται και κατά συνέπεια παρατηρείται ανάπτυξη μίας κατακόρυφης τάσης ($\sigma_v - u_a$) καθώς ο όγκος των δοκιμίων παραμένει σταθερός. Η τελική τιμή της κατακόρυφης τάσης μικραίνει με την αύξηση της μύζησης, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η μύζηση, τόσο πιο δύσκολο είναι για το δοκίμιο να κορεστεί και άρα η τάση να αυξήσει τον όγκο του μικραίνει (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4 Καμπύλη ανάπτυξης ολικής τάσης ($\sigma_v - u_a$) δοκιμών αποσυντεθειμένου γρανίτη κατά τη φάση εφαρμογής μύζησης υπό σταθερό όγκο, πριν τη δοκιμή συμπίεσομέτρου (πηγή: Rampino et al., 1999)

4.2.4 Χαρακτηριστικά δοκιμών συμπίεσομέτρου

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των δοκιμών συμπίεσομέτρου που εκτελέστηκαν:

α/α δοκιμής	Είδος δοκιμής	Σταθερή Μύζηση (s) ή Φορτίο (l) (kPa)	Αρχικό ποσοστό υγρασίας w (%)	Αρχικός δείκτης πόρων e (net)	Τελικός δείκτης πόρων e (net)	Τελικός βαθμός κορεσμού Sr (%)
kaolin 1 cs	σταθερής μύζησης (constant suction – cs)	in* (s)	46,35	1,21	0,59	100
kaolin 2 cs		50 (s)	44,07	1,19	0,85	100
kaolin 3 cs		200 (s)	44,07	1,19	0,82	100
kaolin 4 cs		500 (s)	41,03	1,07	1,03	94,89
* χωρίς έλεγχο της μύζησης, μόνο με την αρχική (initial) μύζηση που έχει το δοκίμιο λόγω προφόρτισης στο απλό συμπίεσομέτρο από την κατασκευή του						

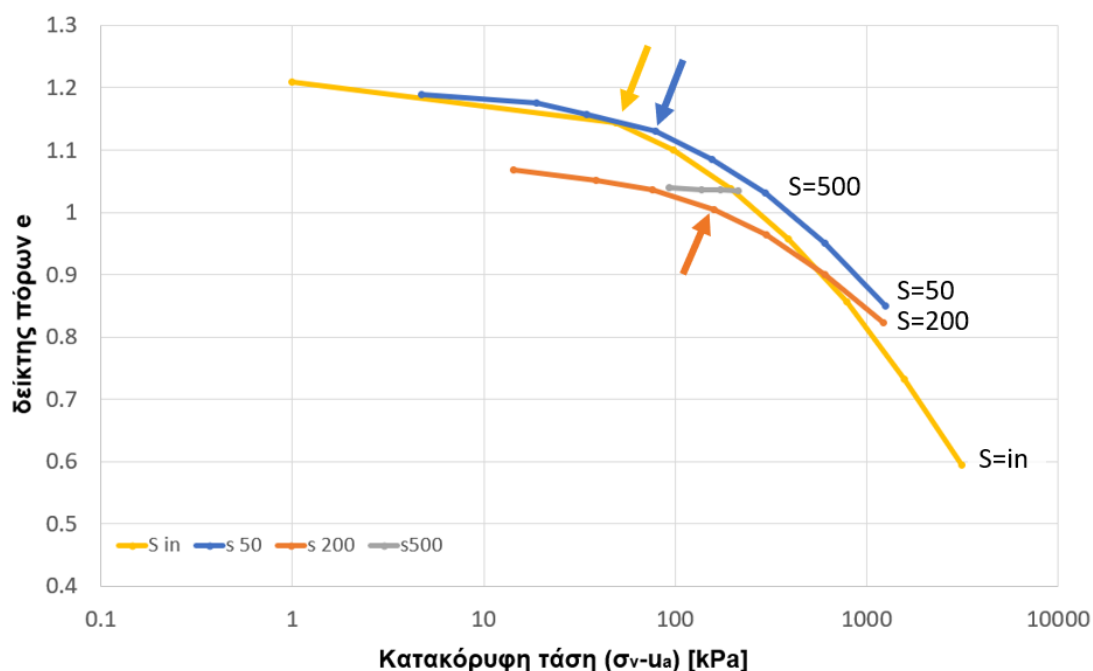
Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά δοκιμών συμπίεσομέτρου

Τα δοκίμια παρασκευάστηκαν με τη διαδικασία που αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η οποία ακολουθήθηκε πιστά για κάθε παρασκευή. Παρόλα αυτά, παρατηρήθηκε μικρή ανομοιομορφία στον αρχικό δείκτη πόρων και στην αρχική υγρασία, μεταβλητές που είναι βέβαια αλληλένδετες,

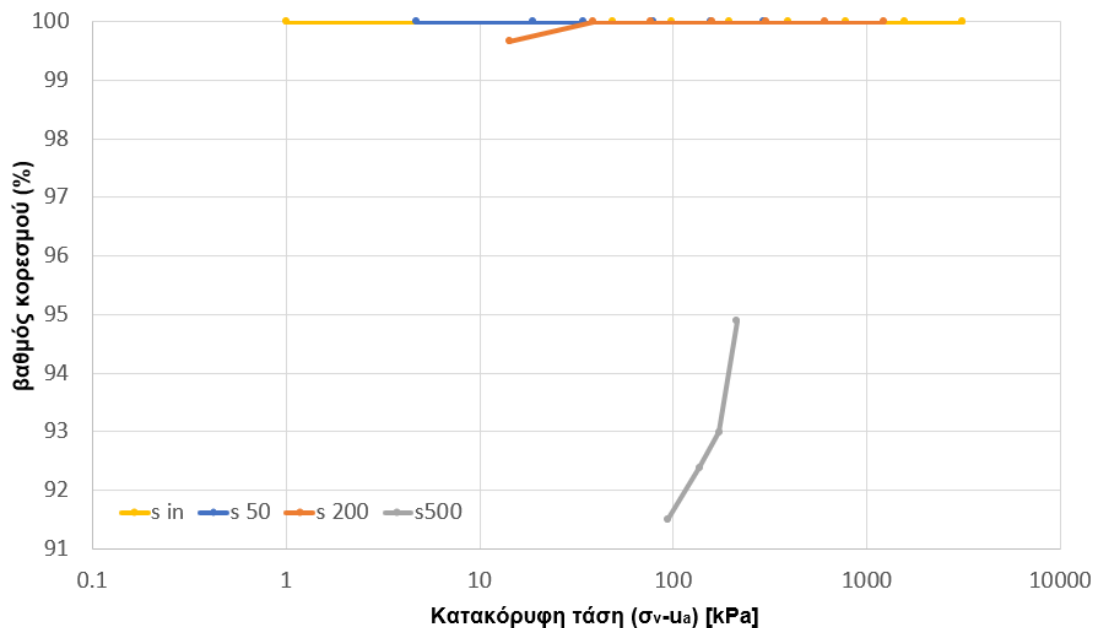
λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι τα δοκίμια θεωρούνται αρχικά ως κορεσμένα και αυτό διασφαλίζεται από τον τρόπο παρασκευής και αποθήκευσης. Δοκίμια που παρουσιάζονται με σχεδόν ίδια αρχικά χαρακτηριστικά, αποσπάστηκαν από το ίδιο αρχικό παρασκευασθέν μεγάλο δοκίμιο.

4.2.5 Αποτελέσματα δοκιμών

Ο σκοπός των δοκιμών ήταν να διαπιστωθεί η συνεισφορά της μύζησης στη συμπίεστικότητα του δοκιμίου. Όπως έχει αναφερθεί τα δοκίμια θεωρούνται ήδη κορεσμένα εκ παρασκευής, οπότε δεν απαιτήθηκε στάδιο κορεσμού. Η δοκιμές ξεκινούν με το στάδιο επιβολής της μύζησης. Η διάρκεια του σταδίου καθορίζεται από τη μεταβολή του όγκου του νερού η οποία θα πρέπει να είναι η κατά το δυνατόν μικρότερη [σύμφωνα με τον Sivakumar (1993) πρέπει να φτάνει στο 0,04%/ημέρα για να θεωρήσουμε ότι σταθεροποιείται ο όγκος του δοκιμίου]. Για τις υπόψη δοκιμές, και μετά από παρατήρηση της συμπεριφοράς του δοκιμίου, ο χρόνος αυτός καθορίστηκε στις 3 ημέρες. Στη συνέχεια, και με σταθερή την τιμή της μύζησης, εφαρμόζεται αύξηση της φόρτισης του δοκιμίου, δηλαδή αύξηση της κατακόρυφης τάσης σ_1 και καταγράφεται η παραμόρφωση του και ο όγκος νερού που διαφεύγει. Η αύξηση της φόρτισης πραγματοποιείται σταδιακά, μετά τη διαπίστωση του μηδενισμού της μεταβολής του όγκου. Στα Σχήματα 4.5 και 4.6, παρουσιάζονται η μεταβολή του δείκτη πόρων και του βαθμού κορεσμού αντίστοιχα, σε σχέση με την κατακόρυφη τάση ($\sigma_v - u_a$).

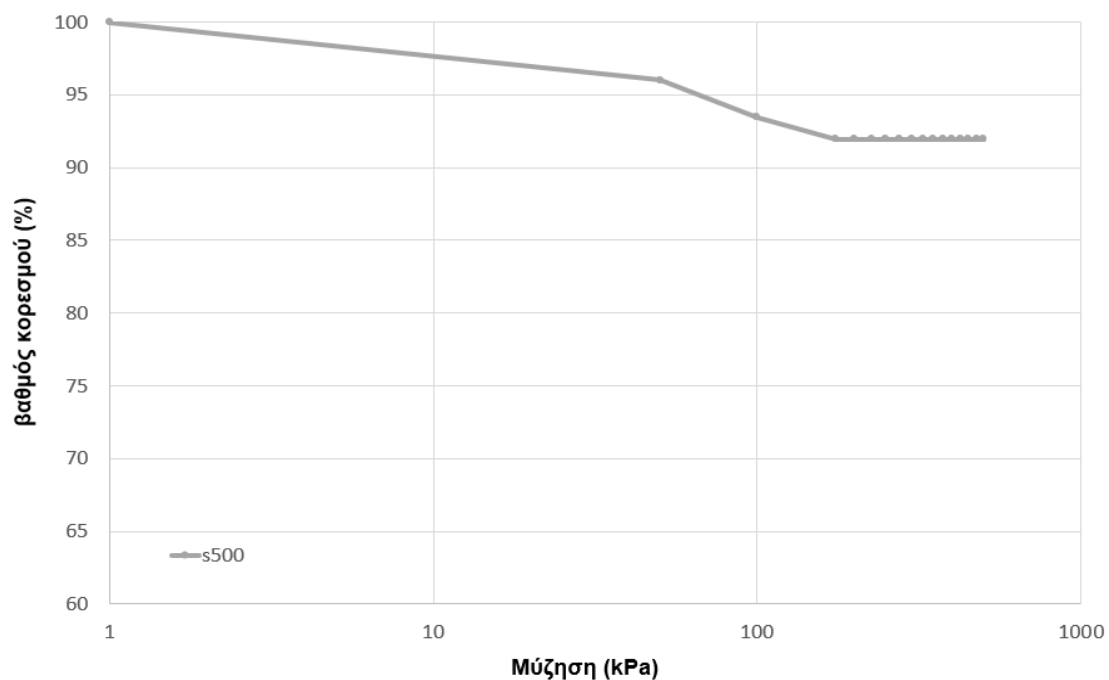


Σχήμα 4.5 Δείκτης πόρων σε σχέση με την κατακόρυφη τάση



Σχήμα 4.6 Βαθμός κορεσμού σε σχέση με την κατακόρυφη τάση

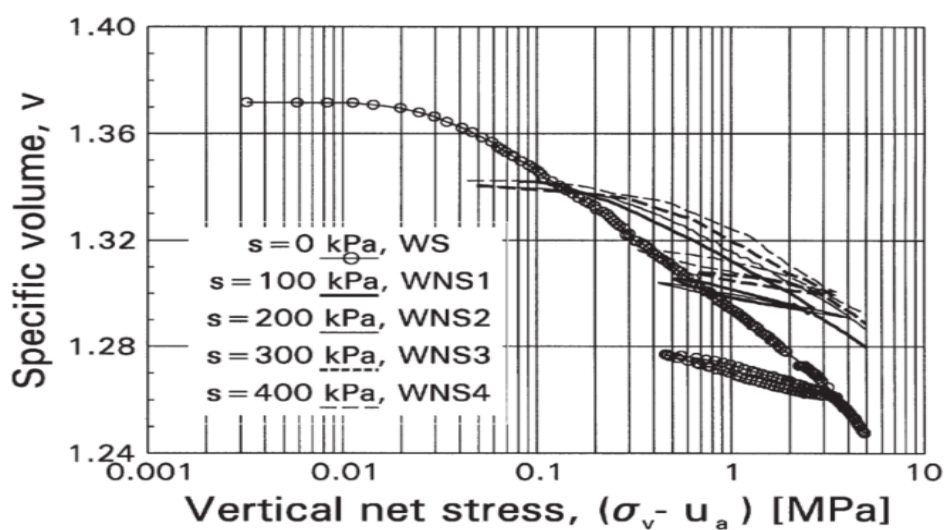
Από το Σχήμα 4.5, διαπιστώνεται η σταδιακή αύξηση της τάσης φαινόμενης προστεροποίησης (τα βέλη δείχνουν την τάση προστεροποίησης) καθώς και η μείωση της συμπίεστοςτητας, με την αύξηση της μύζησης. Παρατηρείται ότι το δοκίμιο kaolin 1 έχει μικρή διαφορά με το kaolin 2, καθώς οσον η μύζηση που απέκτησαν τα δοκίμια εκ κατασκευής τους είναι κοντά στην επιβαλλόμενη μύζηση των 50 kPa. Για το δοκίμιο kaolin 4, αρχικά (πριν την δοκιμή σταθερής μύζησης – αυξανόμενης φόρτισης) εκτελέστηκε σταδιακή επιβολή της μύζησης, πριν την έναρξη της φόρτισης, υπό σταθερό φορτίο 200KN ($\sigma_v - u_a = 101$ kPa), προκειμένου να ελεγχθεί για είσοδο αέρα. Το εν λόγω δοκίμιο, κατά τη διάρκεια επιβολής της μύζησης των 500 kPa παρουσίασε μείωση του βαθμού κορεσμού του από τον αρχικό 100% στο 91,5%, σε αντίθεση με τις χαμηλότερες τιμές μύζησης όπου τα δοκίμια παρέμειναν πλήρως κορεσμένα, αλλά δεν παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη αλλαγή στη κλίση της καμπύλης βαθμού κορεσμού – μύζησης (Σχήμα 4.7) με την οποία διαπιστώνεται η είσοδος αέρα, σύμφωνα με τα προαναφερόμενα στο Κεφάλαιο 2. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της φόρτισης, παρατηρείται μείωση του δείκτη πόρων, που αντιστοιχεί σε μεταβολή όγκου μεγαλύτερη από τον όγκο του νερού που απομακρύνεται, με αποτέλεσμα τη σταδιακή αύξηση του βαθμού κορεσμού του δοκιμίου (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.7 Βαθμός κορεσμού σε σχέση με τη μύζηση

4.2.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η μεταβολή του δείκτη πόρων σε σχέση με την κατακόρυφη τάση ($\sigma_v - u_a$), για εδαφικό δοκίμιο απόδομημένου γρανίτη σε περιοχή της νότιας Ιταλίας.



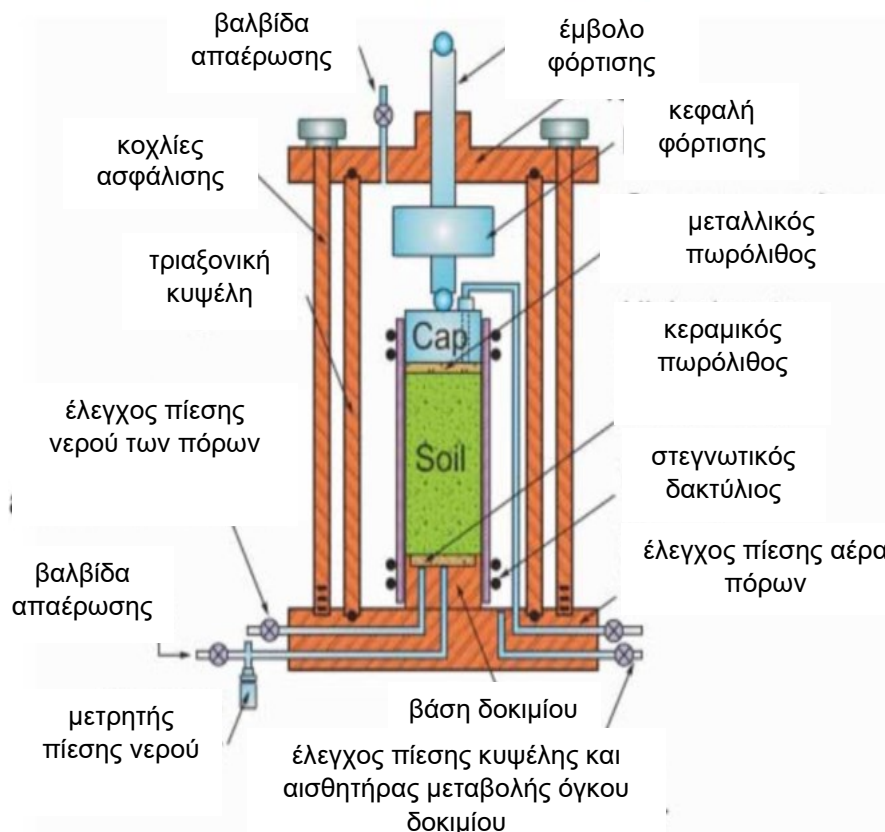
Σχήμα 4.8 Ειδικός όγκος ($1+e$) ως προς την τάση περισφιξης ($\sigma_v - u_a$)

Διαπιστώνεται και εδώ η αύξηση της τάσης φαινόμενης προστεροποίησης καθώς και η μείωση της συμπιεστότητας, με την αύξηση της μύζησης, με αρκετά μεγάλη επίδραση μέχρι τα 100 kPa μύζησης, ενώ για μεγαλύτερες τιμές η επίδραση της είναι πολύ μικρότερη σε αντίθεση με τα δοκίμια καολινίτη των δοκιμών. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαφορετικής φύσης του υλικού και συγκεκριμένα, τα παραπάνω εδαφικά δοκίμια έχουν 60 % άμμο – 24% ιλύ και 16% άργιλο, σε σχέση με τα εδαφικά δοκίμια των δοκιμών της παρούσας εργασίας που περιέχουν 0% άμμο – 27% ιλύ και 72% άργιλο.

4.3 Τριαξονικές δοκιμές

4.3.1 Περιγραφή τριαξονικής συσκευής για ακόρεστα εδάφη

Προκειμένου να είναι δυνατή η επιβολή συγκεκριμένων τιμών μύζησης στο δοκίμιο και ταυτόχρονα να παρακολουθείται η μεταβολή του όγκου του αλλά και του όγκου του νερού που εισέρχεται ή διαφεύγει από αυτό, στο εργαστήριο εδαφομηχανικής του ΕΜΠ, τροποποιήθηκε μία συμβατική συσκευή τριαξονικής δοκιμής (Φωτογραφία 4.9), σύμφωνα με το πρότυπο της τροποποιημένης τριαξονικής συσκευής των Fredlund και Raharjo (1993), διάταξη της οποίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9.



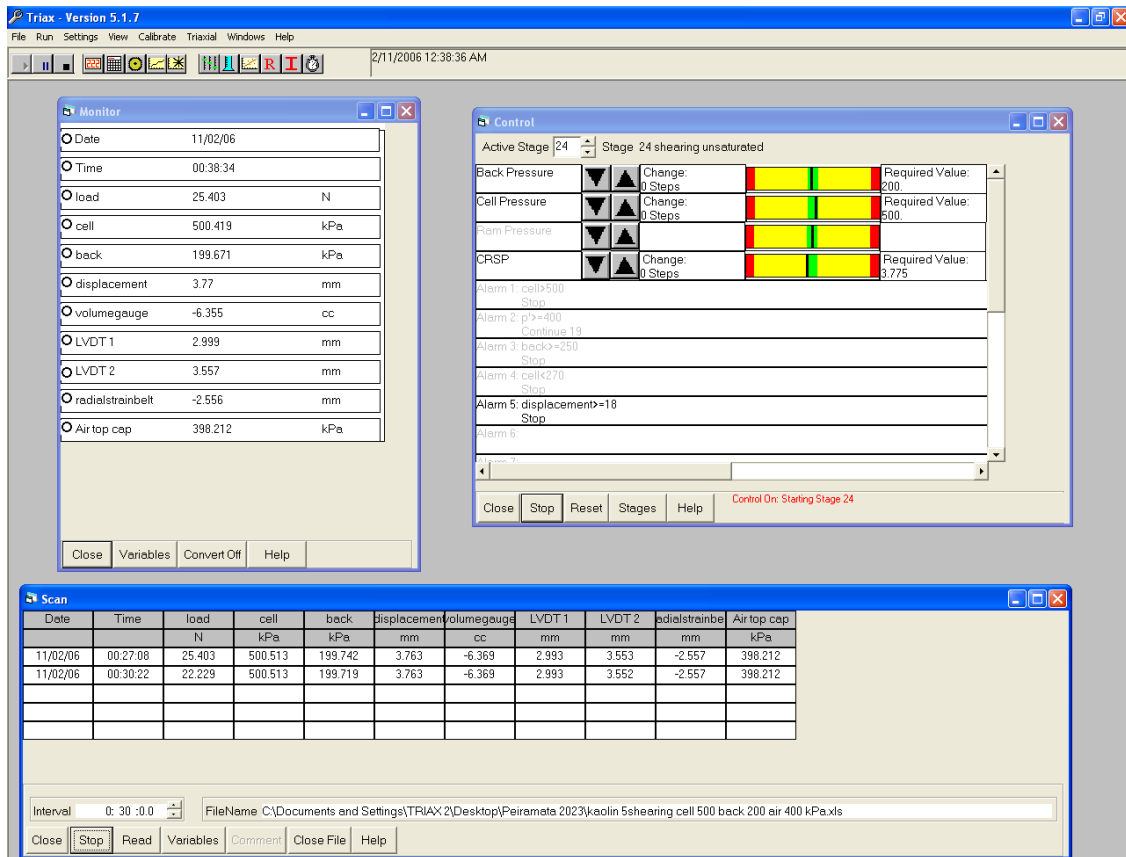
Σχήμα 4.9 Τροποποιημένη συσκευή τριαξονικής δοκιμής για ακόρεστα εδάφη (εικόνα τροποποιημένη από Fredlund and Raharjo, 1993)



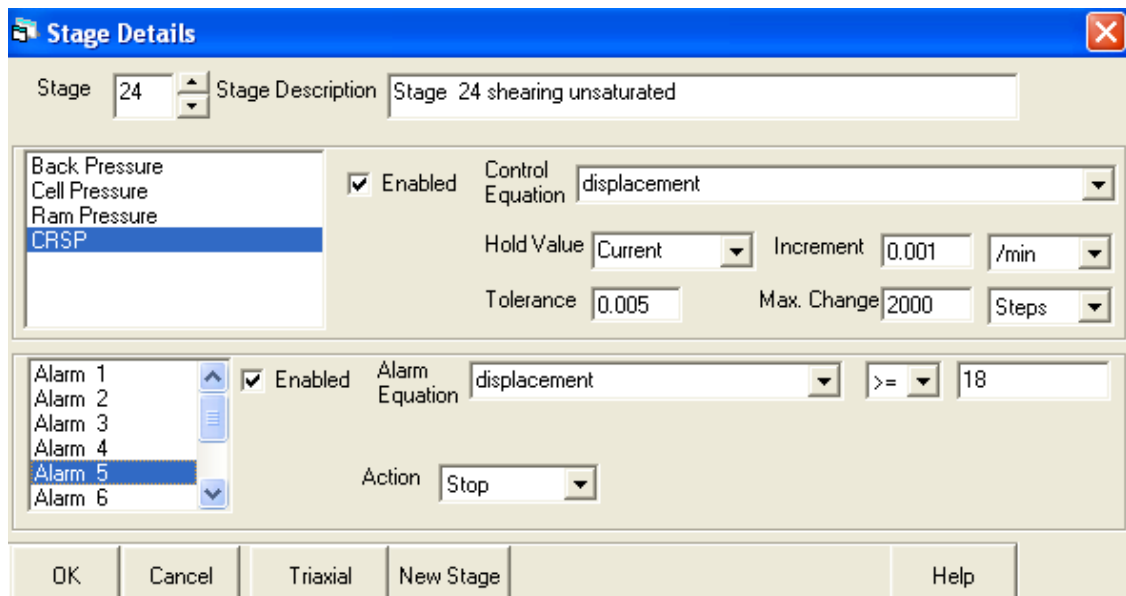
Φωτογραφία 4.9 Συσκευή τριαξονικής δοκιμής ακόρεστων εδαφών του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ

Η συσκευή διαθέτει ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου (μεταβολής – διατήρησης) και καταγραφής της πίεσης του νερού των πόρων (u_w). Η μεταβολή πραγματοποιείται μέσω αυξομείωσης της πίεσης νερού που εφαρμόζεται στον ειδικό πωρόλιθο (High-Air-Entry Disk), που βρίσκεται στο κάτω μέρος του δοκιμίου στη βάση της κυψέλης. Επιπλέον, παρόμοιο είναι και το σύστημα μεταβολής της πίεσης αέρα μέσω του εμβόλου φόρτισης.

Όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο οποίος διαθέτει εξειδικευμένο πρόγραμμα καταγραφής (Triax 5.1.7), ανά προκαθορισμένη μονάδα χρόνου, αλλά διαθέτει και πίνακα ελέγχου διαχείρισης - μεταβολής των προαναφερόμενων πιέσεων (Φωτογραφία 4.10), μέσω του οποίου μπορεί να καθοριστεί και το βήμα φόρτισης (Φωτογραφία 4.11).



Φωτογραφία 4.10 Περιβάλλον προγράμματος Triax – Version 5.1.7



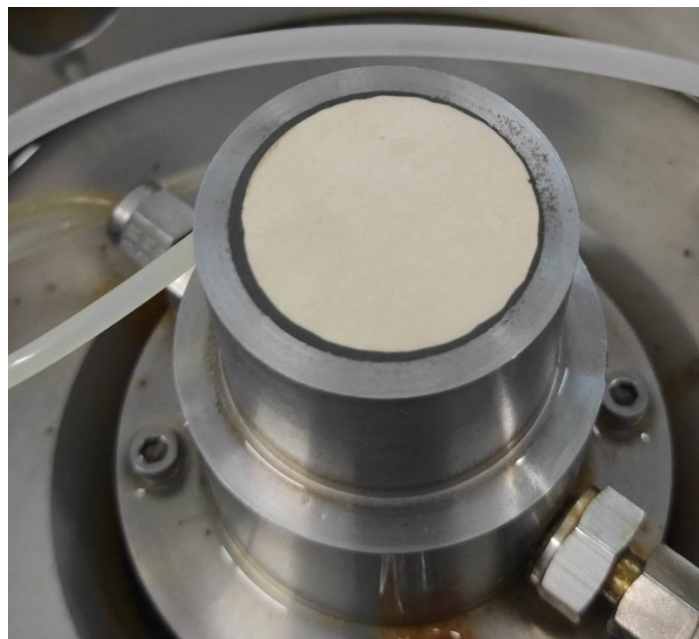
Φωτογραφία 4.11 Ρυθμίσεις βήματος φόρτισης

Στο επάνω μέρος του δοκιμίου, τοποθετείται μεταλλικό πώμα κεφαλής, το οποίο συνδέεται με το κύκλωμα ελέγχου της πίεσης του αέρα των πώρων (u_a). Μεταξύ του πώματος και του δοκιμίου παρεμβάλλεται ειδικός δίσκος από κορούνδιο (coarse corundum disk - Φωτογραφία 4.12).



Φωτογραφία 4.12 Κεφαλή επιβολής πίεσης αέρα στους πώρους του δοκιμίου και μεταλλικός δίσκος από κορούνδιο

Το δοκίμιο εδράζεται επί κεραμικού πωρόλιθου υψηλής πίεσης εισόδου αέρα (High-Air-Entry Disk - Φωτογραφία 4.13 ο οποίος συνδέεται με το κύκλωμα ελέγχου της πίεσης του νερού των πόρων (u_w) και την βαλβίδα απαέρωσης.



Φωτογραφία 4.13 Κεραμικός πωρόλιθος υψηλής τιμής πίεσης εισόδου αέρα

Η είσοδος νερού στο κύκλωμα του αέρα αποτρέπεται από τη διατήρηση υψηλότερης πίεσης αέρα σε σχέση με αυτή του νερού. Η είσοδος αέρα στο κύκλωμα του νερού εξασφαλίζεται από τον κορεσμό του ειδικού πωρόλιθου, ο οποίος στην προκειμένη περίπτωση αντέχει μέχρι 500 kPa διαφορά πίεσης μεταξύ αέρα και νερού χωρίς να επιτρέπει τη διέλευση του αέρα από τους πόρους του

4.3.2 Προετοιμασία δοκιμίου και συσκευής για χρήση

Ένα από τα κυριότερα τμήματα της συσκευής είναι ο κεραμικός πωρόλιθος υψηλής πίεσης εισόδου αέρα (High-Air-Entry Disk). Για την ορθή λειτουργία του, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι είναι πλήρως κορεσμένος. Σύμφωνα με τους Fredlund et al. (2012), είναι προτιμητέο να μην γίνεται απόπειρα κορεσμού του πωρόλιθου διά βρασμού, γιατί μπορεί να προκληθούν ρωγμές, λόγω των διαφορετικών θερμικών χαρακτηριστικών των υλικών που τον αποτελούν, ενώ ειδικά για την περίπτωση της διατμητικής καταπόνησης στην τροποποιημένη τριαξονική συσκευή, προτείνεται η παρακάτω διαδικασία κορεσμού:

α. Ο πωρόλιθος πρέπει αρχικά να τοποθετηθεί κατάλληλά στην τριαξονική συσκευή.

β. Προστίθεται απεσταγμένο νερό δοκιμών εντός της κυψέλης (cell), μέχρι το ύψος των 25mm πάνω από τον κεραμικό δίσκο και η κυψέλη συναρμολογείται προκειμένου να μπορεί να εφαρμοστεί πίεση αέρα στο εσωτερικό της.

γ. Το νερό στο εσωτερικό της κυψέλης, στο οποίο είναι εμβαπτισμένος ο τοποθετημένος κεραμικός πωρόλιθος, υπόκειται σε πίεση αέρα περίπου 600 kPa που πιέζει το νερό στην επιφάνεια του πωρόλιθου. Το νερό αφήνεται να διέλθει από τον δίσκο για περίπου για μία ώρα. Στο διάστημα αυτό, το νερό στην πάνω και στην κάτω επιφάνεια του δίσκου αποκτά την πίεση του αέρα που εφαρμόζεται στο εσωτερικό της κυψέλης και ο αέρας που υπάρχει στο εσωτερικό του δίσκου διαλύεται στο εισερχόμενο νερό.

δ. Μετά την παραπάνω διαδικασία, η βαλβίδα ελέγχου πίεσης του νερού ανοίγει για 10 λεπτά, προκειμένου να επιτραπεί η διέλευση του νερού που βρίσκονταν στο εσωτερικό του δίσκου, προς το δοχείο του νερού. Κατά το υπόψη βήμα, οι φυσαλίδες αέρα που δημιουργήθηκαν στην κάτω επιφάνεια του δίσκου απομακρύνονται. Το παραπάνω βήμα πρέπει να επαναληφθεί αρκετές φορές ώστε ο πωρόλιθος να κορεστεί πλήρως.

ε. Μετά την παραπάνω διαδικασία, ο δίσκος θεωρείται ότι παραμένει πλήρως κορεσμένος, για όσο χρόνο βρίσκεται εμβαπτισμένος σε νερό.

Το δοκίμιο, η παρασκευή του οποίου έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, αρχικά λαμβάνει το απαιτούμενο σχήμα Γ για την δοκιμή (Φωτογραφίες 4.14 και 4.15)



Φωτογραφία 4.14 Παρασκευή δοκιμίου – σύγκριση με το πρότυπο καλούπι (μεταλλικός κύλινδρος)



Φωτογραφία 4.15 Παρασκευή δοκιμίου – αφαίρεση πλεονάζοντος υλικού

Αφού ζυγιστεί το δοκίμιο, τοποθετείται εντός ειδικής μεμβράνης, με τη βοήθεια εργαλείου που διαθέτει χειροκίνητη αντλία κενού. Η μεμβράνη έλκεται στα τοιχώματα του καλουπιού και έτσι τοποθετείται εντός της το δοκίμιο χωρίς να διαταραχθεί (Φωτογραφία 4.16)



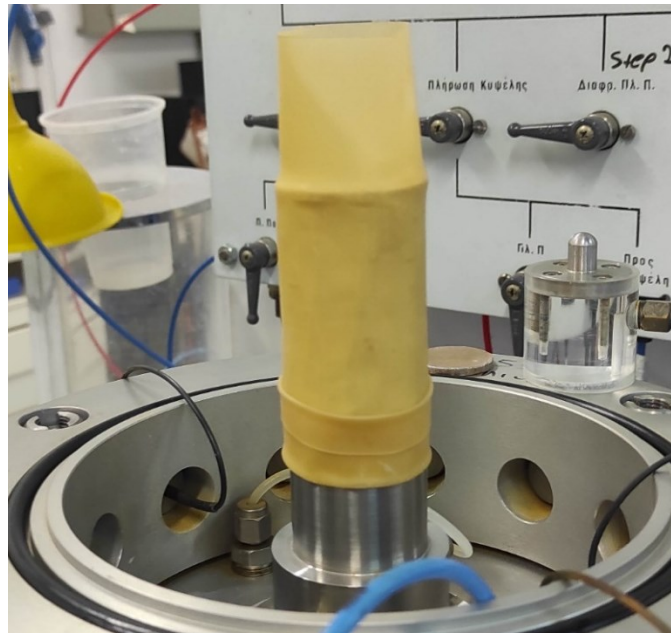
Φωτογραφία 4.16 Τοποθέτηση του δοκιμίου εντός μεμβράνης

Πριν την τοποθέτηση του δοκιμίου στην συσκευή, έχει εξασφαλιστεί ότι ο κεραμικός πωρόλιθος παραμένει κορεσμένος. Για τον λόγο αυτόν, ασκείται μικρή πίεση νερού στο κάτω μέρος του, ενώ έχει τοποθετηθεί μεμβράνη με νερό στο πάνω μέρος, όπως παρουσιάζεται και στην Φωτογραφία 4.17.



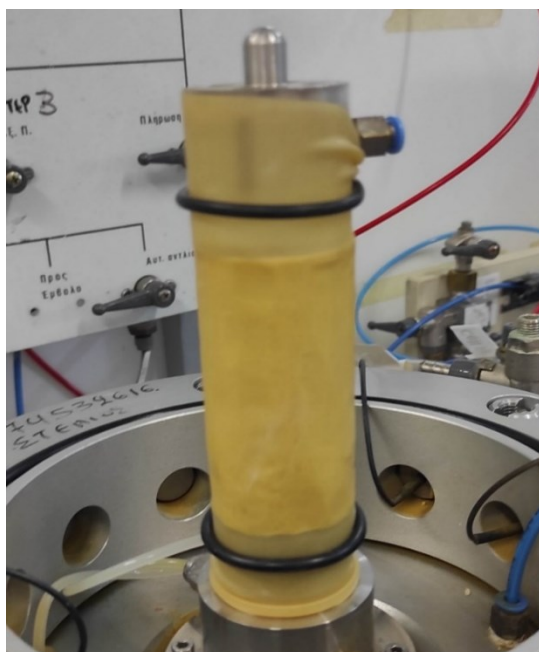
Φωτογραφία 4.17 Διατήρηση του κεραμικού πωρόλιθου πλήρως κορεσμένου

Μετά την εφαρμογή της μεμβράνης, το δοκίμιο τοποθετείται στην τριαξονική συσκευή, επί του ειδικού πωρόλιθου (Φωτογραφία 4.18).



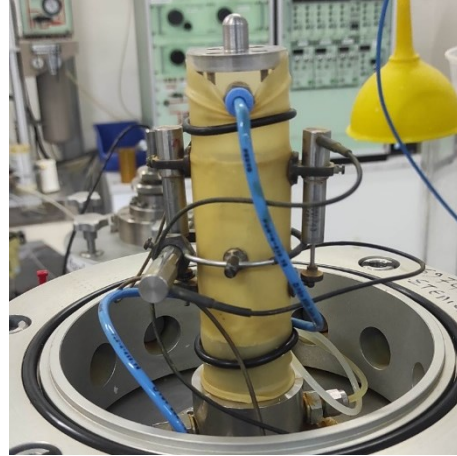
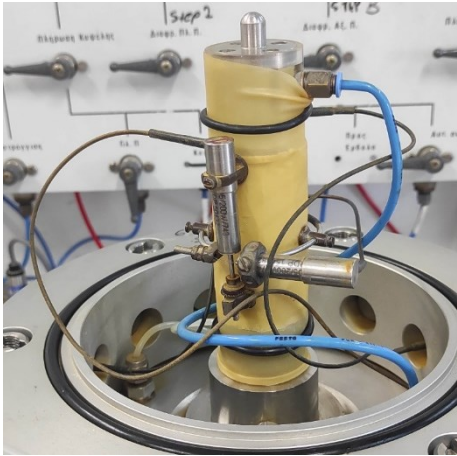
Φωτογραφία 4.18 Τοποθέτηση του δοκιμίου στη συσκευή

Το μήκος της μεμβράνης έχει υπολογιστεί, ώστε να εκτείνεται και επί της βάσης έδρασης του ειδικού πωρόλιθου στη βάση της κυψέλης αλλά και επί του καλύματος στην κεφαλή του δοκιμίου. Για την πλήρη στεγανοποίηση του δοκιμίου, επί της βάσης έδρασης και του καλύματος κεφαλής, τοποθετούνται δακτύλιοι στεγανοποίησης (O-rings), όπως φαίνεται και την Φωτογραφία 4.19.



Φωτογραφία 4.19 Στεγανοποίηση δοκιμίου – τοποθέτηση δαχτυλιδιών

Επί της μεμβράνης προσφύονται δύο τοπικά ηλεκτρονικά μηκυσιόμετρα (LVDT 1 – 2) και ένας διαμετρικός μετρητής, με την βοήθεια κυανοακρυλικής κόλλας (Φωτογραφίες 4.20 και 4.21)



Φωτογραφίες 4.20 - 4.21 Τοποθέτηση τοπικών μετρητών επί του δοκιμίου

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω, τοποθετείτε η κυψέλη, ενώ τα καλώδια των μετρητών έχουν διευθετηθεί με προσοχή, ώστε να μην επηρεάζεται η λειτουργία τους (Φωτογραφία 4.22).



Φωτογραφία 4.22 Τοποθέτηση κυψέλης τριαξονικής συσκευής

4.3.3 Στάδια δοκιμών

Σύμφωνα με τους Fredlund and Raharjo (1993), όπως αναλύεται και από τους Thu et al. (2007), ακολουθούνται τα παρακάτω στάδια των δοκιμών:

α. Κορεσμός

Το δοκίμιο θα κορεστεί πλήρως προκειμένου να έχει συντελεστή Skempton B κοντά στη μονάδα >0.95 . Κατά το στάδιο αυτό το κύκλωμα παροχής αέρα αντικαθίσταται από κύκλωμα παροχής νερού υπό πίεση $u_w=10\text{kPa}$, το οποίο κυκλοφορεί στο δοκίμιο, ενώ ταυτόχρονα εφαρμόζεται ίση πίεση κυψέλης (σ_3), προκειμένου να αποφευχθεί η διόγκωση του.

β. Στερεοποίηση

Μετά το στάδιο κορεσμού, το δοκίμιο στερεοποιείται ισότροπα στην επιθυμητή ενεργό τάση (σ_3-u_w). Η βαλβίδα διαφυγής του νερού είναι ανοιχτή (ελεύθερη στράγγιση). Η ποσότητα του νερού που διαφεύγει από το δοκίμιο καταγράφεται και το στάδιο αυτό θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί όταν σταθεροποιηθεί η μεταβολή όγκου του δοκιμίου.

γ. Εφαρμογή της μύζησης

Κατά το στάδιο αυτό, η παροχή του αέρα στο πάνω μέρος του δοκιμίου αποκαθίσταται και στο δοκίμιο εφαρμόζεται η επιθυμητή εδαφική μύζηση (u_a-u_w). Η μεταβολή του όγκου νερού καταγράφεται, ενώ από τους εσωτερικούς μετρητές υπολογίζεται η μεταβολή του όγκου του δοκιμίου, η οποία δεν είναι κατ' ανάγκη ίδια με αυτή του νερού. Στην περίπτωση που η εφαρμοζόμενη εδαφική μύζηση ξεπερνάει την τιμή εισόδου αέρα, τότε η ποσότητα του νερού που εξέρχεται είναι μεγαλύτερη από την μείωση του όγκου του δοκιμίου και έτσι ο βαθμός κορεσμού μειώνεται. Το στάδιο αυτό θεωρείται ότι ολοκληρώθηκε όταν η μεταβολή του όγκου του νερού έχει μειωθεί στο 0,04%.

δ. Διατμητική καταπόνηση

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω σταδίων, το δοκίμιο υπόκειται σε διατμητική καταπόνηση με σταθερό βήμα παραμόρφωσης (strain rate), υπό συνθήκες ελεύθερης στράγγισης (Consolidated Drained – CD).

Αναφορικά με το βήμα παραμόρφωσης, ο Ong (1999), όπως αναφέρεται από τους Rehardjo et al. (2004) και Thu et al. (2007), εκτέλεσε πιλοτικές εργαστηριακές δοκιμές υπό συνθήκες σταθερού όγκου (Constant Water – CW), προκειμένου να διερευνηθεί η σχέση μεταξύ του ρυθμού παραμόρφωσης, της μύζησης εδαφικού σκελετού (matric suction) και της διατμητικής αντοχής. Οι δοκιμές διεξήχθησαν για ένα εύρος ρυθμών παραμόρφωσης από 0,009 έως 0,081mm/min. Η μέγιστη διατμητική τάση, σε όλο το εύρος των δοκιμών, διαπιστώθηκε ότι συμπίπτει. Η εδαφική μύζηση κατά την αστοχία αυξήθηκε κατά 2% όταν ο ρυθμός παραμόρφωσης αυξήθηκε από 0,009 mm/min σε 0,018mm/min και κατά 10% όταν ο ρυθμός αυξήθηκε από 0,018mm/min σε 0,081mm/min. Σε παρόμοιες δοκιμές που εκτέλεσαν οι Rehardjo et al. (2004) αλλά και οι Thu et al. (2007), το βήμα παραμόρφωσης επιλέχτηκε σε 0,0009

mm/min τόσο σε δοκιμές υπό συνθήκες εμποδιζόμενης (CW) όσο και ελεύθερης στράγγισης (CD).

Σε αυτό το στάδιο, οι βαλβίδες διαφυγής του αέρα των πόρων και του νερού παραμένουν ανοιχτές ενώ οι αντίστοιχες πιέσεις (u_a και u_w) παραμένουν σταθερές, ώστε να διατηρείται αμετάβλητη η τιμή της εφαρμοζόμενης μύζησης ($u_a - u_w$). Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν παρατηρηθεί σταθερή τιμή διατμητικής τάσης (deviator stress) ή γίνει διακριτή επιφάνεια αστοχίας. Η μέγιστη αξονική παραμόρφωση έχει οριστεί στο 20%.

4.3.4 Εφαρμοσθέντα στάδια δοκιμών – απλοποίηση διαδικασίας – παραδοχές

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το αναζυμωμένο δοκίμιο από τον τρόπο προετοιμασίας και αποθήκευσης του δείγματος, θεωρείται εξ αρχής κορεσμένο, η διαδικασία κορεσμού παραλείπεται. Επιπλέον, για λόγους ταχύτητας εξέλιξης και ολοκλήρωσης των δοκιμών, τελικά αυτές διενεργήθηκαν σε διακριτά στάδια όπως παρακάτω:

α. Στερεοποίηση – εφαρμογή μύζησης

Η διαδικασία γίνεται σε ένα στάδιο κατά το οποίο, το δοκίμιο στερεοποιείται ισότροπα στην πίεση της κυψέλης ($\sigma_3 - u_a$), ενώ ταυτόχρονα εφαρμόζεται η επιθυμητή εδαφική μύζηση ($u_a - u_w$). Μετά από παρατηρήσεις, για τα χρησιμοποιούμενα δοκίμια καολινίτη, ο απαιτούμενος χρόνος στερεοποίησης (σταθεροποίησης της μεταβολής του όγκου) εκτιμήθηκε στη 1 ημέρα, ενώ ο χρόνος εξισορρόπησης της επιβαλλόμενης μύζησης, στις 3 ημέρες [χρόνος κατά τον οποίο παρατηρήθηκε ότι δεν υφίσταται αυξομείωση του όγκου του νερού μεγαλύτερη από 0,04%/ημέρα, σύμφωνα με τον Sivakumar (1993), όπως αναφέρεται και στους Thu et al. (2007)].

β. Διατμητική καταπόνηση

Μετά την στερεοποίηση και την εφαρμογή της επιθυμητής εδαφικής μύζησης, το δοκίμιο υποβάλλεται σε διατμητική καταπόνηση με σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης. Ο ρυθμός ορίστηκε στα 0,001 mm/min, καθόσον αφενός το εργαστήριο εδαφομηχανικής του ΕΜΠ διαθέτει ήδη βάση δεδομένων με αντίστοιχες δοκιμές, αφετέρου, παρόμοιος ρυθμός (0,0009 mm/min) χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία, για αντίστοιχες δοκιμές σε υλικό με παρόμοια χαρακτηριστικά (Rihardjo et al. (2004), Thu et al. (2007) κ.α.).

4.3.5 Αποτελέσματα

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 8 τριαξονικές δοκιμές, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Ο σκοπός των δοκιμών ήταν να διαπιστωθούν, η συμβολή της μύζησης στην αύξηση της μέγιστης διατμητικής αντοχής του δοκιμίου, το όριο αυτής της συμβολής και το πως επηρεάζεται ο βαθμός κορεσμού. Οι δοκιμές τερματίζονται όταν είναι πλέον διακριτή η επιφάνεια αστοχίας του δοκιμίου (Φωτογραφία 4.23).

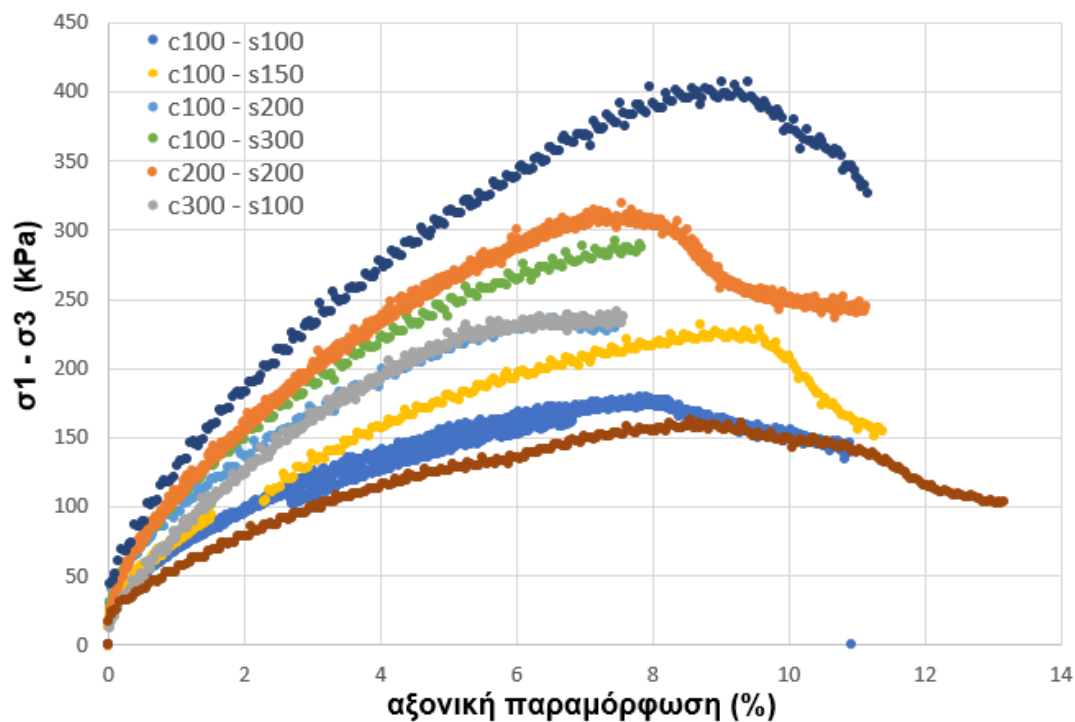


Φωτογραφία 4.23 Δοκίμιο με εμφανή επιφάνεια αστοχίας

α/α δοκιμής	Είδος δοκιμής	$\sigma_3 - u_a$ (kPa)	Μύζηση $u_a - u_w$ (kPa)	Αρχικό ποσοστό υγρασίας w (%)	Αρχικός δείκτης πόρων e (net)	Δείκτης πόρων στο τέλος της στερεοποίησης e (net)	Τελικός δείκτης πόρων e (net)	Αρχικός βαθμός κορεσμού* Sr (%)	Τελικός βαθμός κορεσμού Sr (%)
kaolin 1 cd (c100 – s100)	σταθερής μύζησης – ελεύθερα στραγγιζόμενη (Consolidated Drained – CD)	100	100	41,31	1,08	1,05	0,87	94,23	100
kaolin 2 cd (c200 – s200)		200	200	41,31	1,08	1,02	0,78	88,49	100
kaolin 3 cd (c300 – s100)		300	100	42,90	1,12	1,07	0,92	91,18	97,47
kaolin 4 cd (c100 – s150)		100	150	42,51	1,11	1,05	0,88	85,54	94,30
kaolin 5 cd (c100 – s200)		100	200	43,69	1,14	1,06	0,94	88,72	92,97
kaolin 6 cd (c100 – s300)		100	300	44,65	1,17	1,10	0,93	85,47	91,34
kaolin 7 cd (c100 – s400)		100	400	46,15	1,20	1,06	1,06	82,83	93,25
kaolin 8 cd (c100 – s50)		100	50	46,15	1,20	1,12	0,98	100	100
* Αφορά στον βαθμό κορεσμού που είχε το δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης									

Πίνακας 4.2 Πίνακας με το σύνολο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στην τριαξονική συσκευή για τα ακόρεστα εδάφη

Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται η εξέλιξη των τάσεων (σ_1 - σ_3) με την αξονική παραμόρφωση. Από το διάγραμμα αποδεικνύεται η συμβολή της μύζησης στην ανάπτυξη υψηλότερης αντοχής. Ο Πίνακας 4.3 δείχνει τις μέγιστες διατμητικές τάσεις κατά την αστοχία των δοκιμίων.



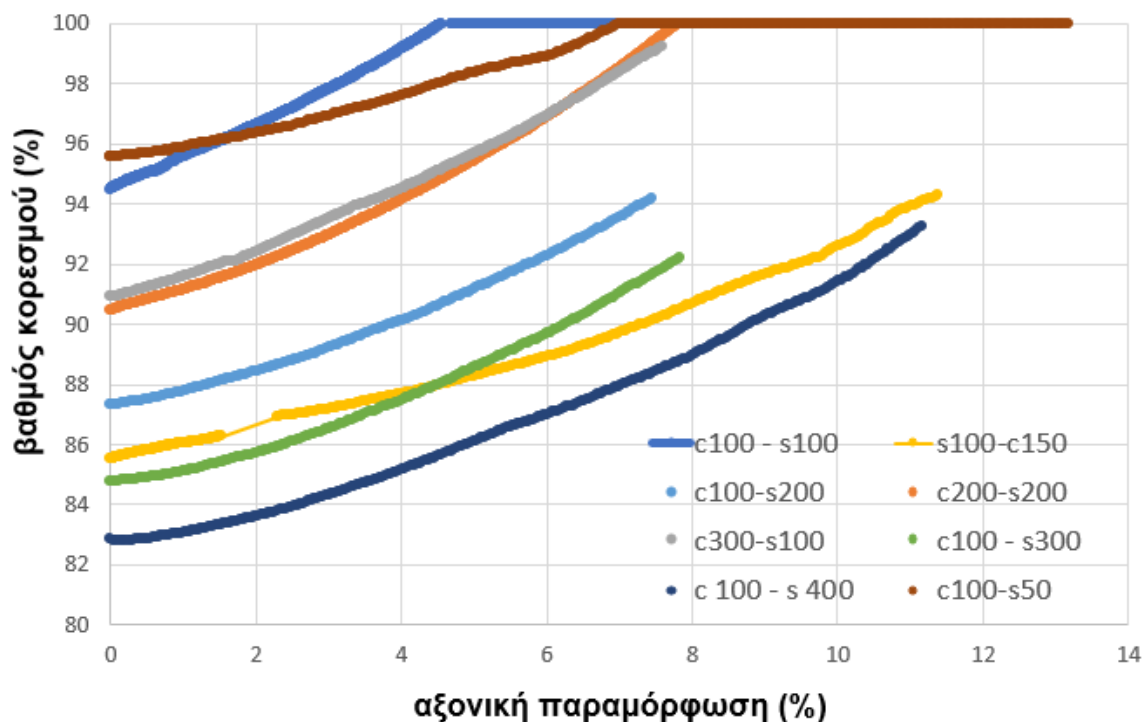
Σχήμα 4.10 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση

α/α δοκιμής	$\sigma_3 - u_a$ (kPa)	Μύζηση $u_a - u_w$ (kPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (kPa)	Ποσοστό αύξησης* (%)
kaolin 1 cd (c100 - s100)	100	100	179,25	11
kaolin 2 cd (c200 - s200)	200	200	319,47	98
kaolin 3 cd (c300 - s100)	300	100	241,17	49
kaolin 4 cd (c100 - s150)	100	150	231,52	43
kaolin 5 cd (c100 - s200)	100	200	238,26	47
kaolin 6 cd (c100 - s300)	100	300	292,32	81
kaolin 7 cd (c100 - s400)	100	400	406,64	152
kaolin 8 cd (c100 - s50)	100	50	161,68	0

*Ποσοστό αύξησης σε σχέση με το c100 - s50

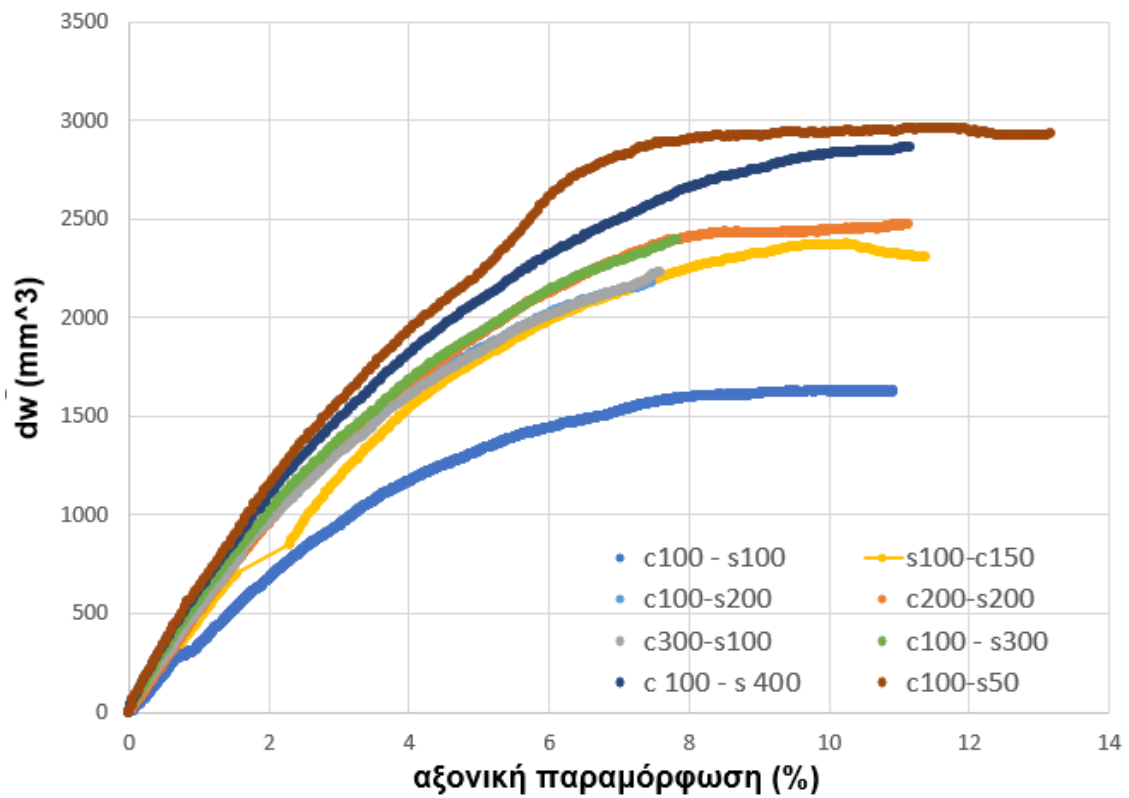
Πίνακας 4.3 Αναπτυσσόμενες μέγιστες διατμητικές τάσεις

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μύζηση συμβάλει σημαντικά στην αύξηση της μέγιστης αντοχής. Ενδεικτικά, η αύξηση της μύζησης κατά 8 φορές, συνέβαλε στην αύξηση κατά 2,5 φορές της μέγιστης αντοχής. Επιπλέον, η μύζηση διαπιστώνεται ότι είναι αποδοτικότερη της τάσης περισφιξης μειωμένης κατά την πίεση της αέριας φάσης ($\sigma_3 - u_a$, confining stress), καθότι ο τριπλασιασμός της επιφέρει περίπου ίδια αύξηση αντοχής με όση ο διπλασιασμός της μύζησης. Τα παραπάνω συμπεράσματα ισχύουν μόνο για το εύρος μύζησης που εκτελέστηκαν οι δοκιμές (50 – 400 kPa). Σε υψηλότερες τιμές, η ενδεχόμενη ταπείνωση του βαθμού κορεσμού θα μειώσει σημαντικά την απόδοση της μύζησης, για τους λόγους που έχουν αναφερθεί στο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb για ακόρεστα εδάφη. Στο Σχήμα 4.11 απεικονίζεται η εξέλιξη του βαθμού κορεσμού σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση.

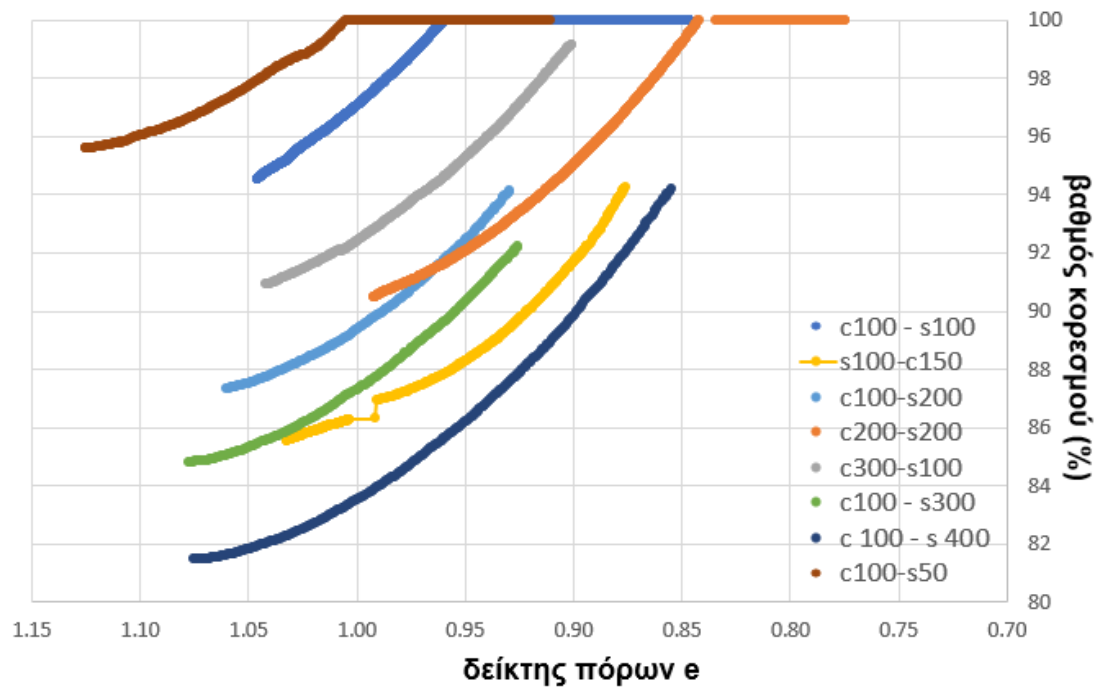


Διάγραμμα 4.11 Βαθμός κορεσμού σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση

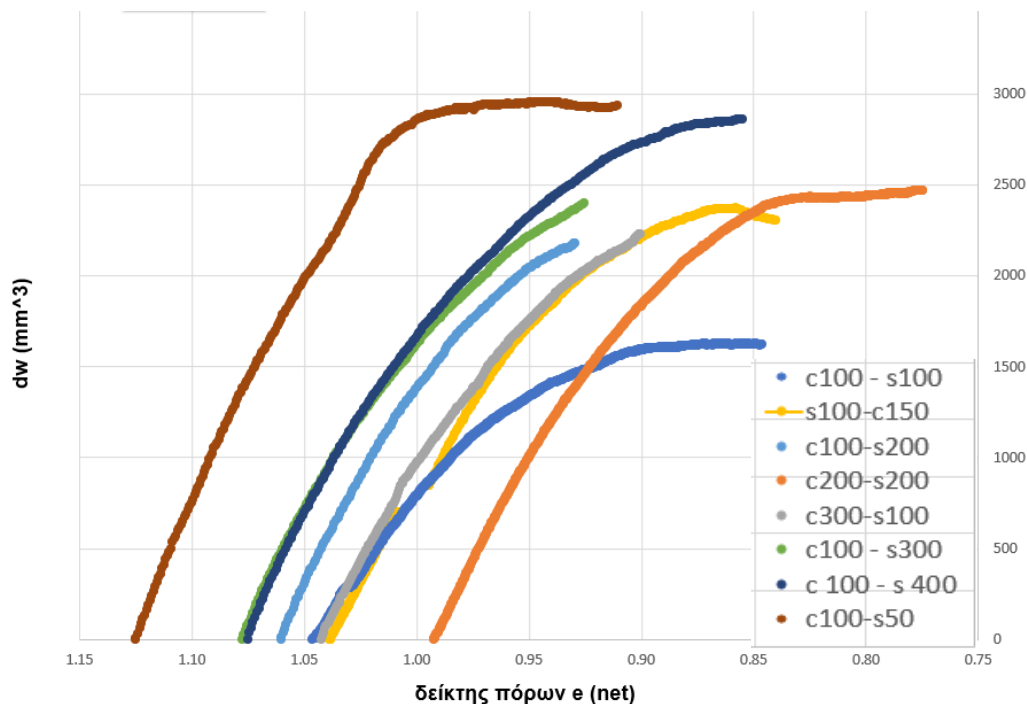
Από το υπόψη διάγραμμα, προκύπτει ότι όλα τα δοκίμια, είναι μη κορεσμένα στο τέλος του σταδίου στερεοποίησης – επιβολής της μύζησης. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, επειδή υπάρχει μείωση του δείκτη πόρων, ενώ τα δοκίμια χάνουν όλο και δυσκολότερα νερό, για τους λόγους που έχουν αναφερθεί στην περιγραφή των τριχοειδών φαινομένων, παρατηρείται σταδιακή αύξηση του βαθμού κορεσμού. Το ίδιο συμπέρασμα εξάγεται και από τα διαγράμματα διαφυγής νερού – αξονικής παραμόρφωσης (Σχήμα 4.12), βαθμού κορεσμού – δείκτη πόρων (Σχήμα 4.13) και διαφυγής νερού- δείκτη πόρων (Σχήμα 4.14).



Διάγραμμα 4.12 Διαφυγή νερού σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση



Διάγραμμα 4.13 Βαθμός κορεσμού σε σχέση με τον δείκτη πόρων



Σχήμα 4.14 Διαφυγή νερού σε σχέση με τον δείκτη πόρων

Επιπλέον, διαπιστώθηκαν τα παρακάτω:

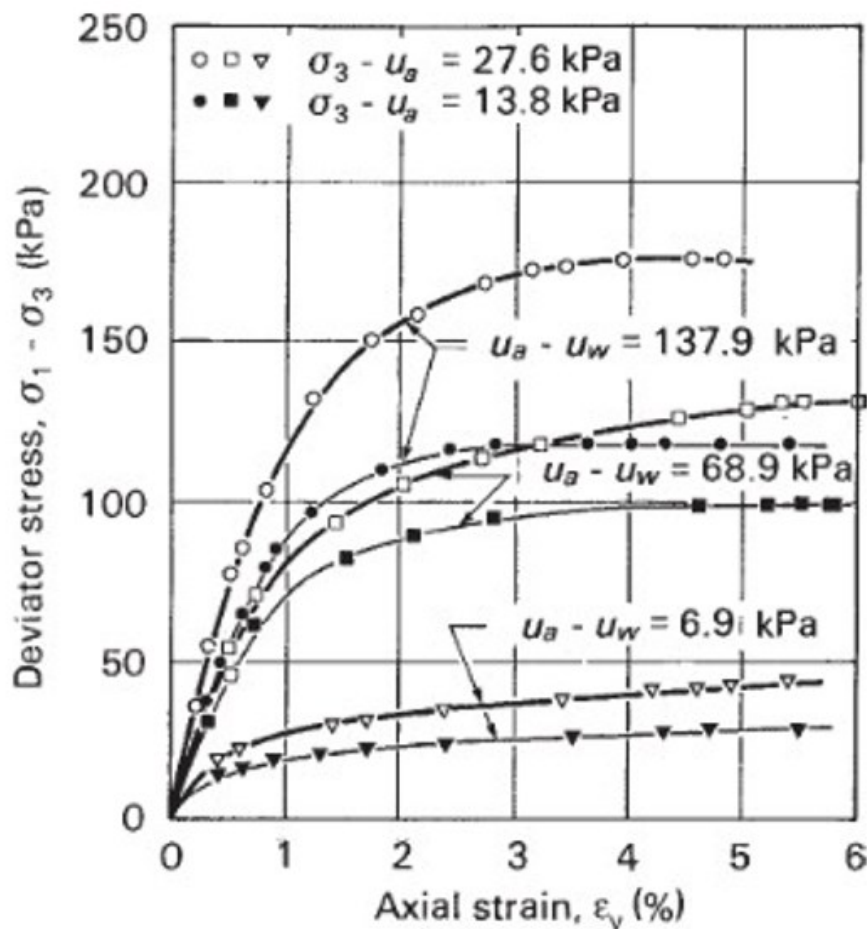
α. Για το εύρος της μύζησης των δοκιμών, η μεγαλύτερη μύζηση οδήγησε σε μικρότερο βαθμό κορεσμού στο τέλος του σταδίου της στερεοποίησης – επιβολής της μύζησης, αλλά ο ρυθμός αύξησης του βαθμού κορεσμού κατά το στάδιο της φόρτισης είναι ίδιος και σχετίζεται με τον ρυθμό παραμόρφωσης, όπως καλύτερα αποτυπώνεται στο διάγραμμα βαθμού κορεσμού – δείκτη πόρων (Σχήμα 4.13).

β. Ο βαθμός κορεσμού στο τέλος της στερεοποίησης – επιβολής της μύζησης, εξαρτάται από την επιβαλλόμενη μύζηση αλλά και από τον αρχικό δείκτη πόρων. Το δοκίμιο ανάλογα με τον αρχικό δείκτη πόρων, διαθέτει μία πίεση εισόδου αέρα, η οποία αν ξεπεραστεί, γίνεται μη κορεσμένο, και μάλιστα ο βαθμός κορεσμού του ταπεινώνεται πολύ γρήγορα. Ανάλογα, με το πόσο μακριά ή κοντά από αυτό το σημείο βρίσκεται η επιβαλλόμενη μύζηση, λαμβάνοντας υπόψη βέβαια και την μεταβολή του δείκτη πόρων κατά το στάδιο της επιβολής της μύζησης – στερεοποίησης, μεταβάλλεται και ο τελικός βαθμός κορεσμού, που έχει το εδαφικό δοκίμιο κατά την ολοκλήρωση του σταδίου επιβολής της μύζησης – στερεοποίησης. Εξειδικεύοντας το παραπάνω συμπέρασμα, για δοκίμια με σχεδόν ίδιο δείκτη πόρων κατά το τέλος της στερεοποίησης και (α) ίδια τάση περίσφιξης μειωμένη κατά την πίεση της αέριας φάσης ($\sigma_3 - u_a$), όσο αυξάνεται η επιβαλλόμενη μύζηση, ο βαθμός κορεσμού κατά το τέλος της στερεοποίησης – επιβολής της μύζησης είναι μικρότερος (βλ. δοκίμια c100-s300 – c100-s400, Σχήμα 4.13). Για δοκίμια με σχεδόν ίδιο δείκτη πόρων κατά το τέλος της στερεοποίησης και (β) ίδια επιβαλλόμενη μύζηση, όσο

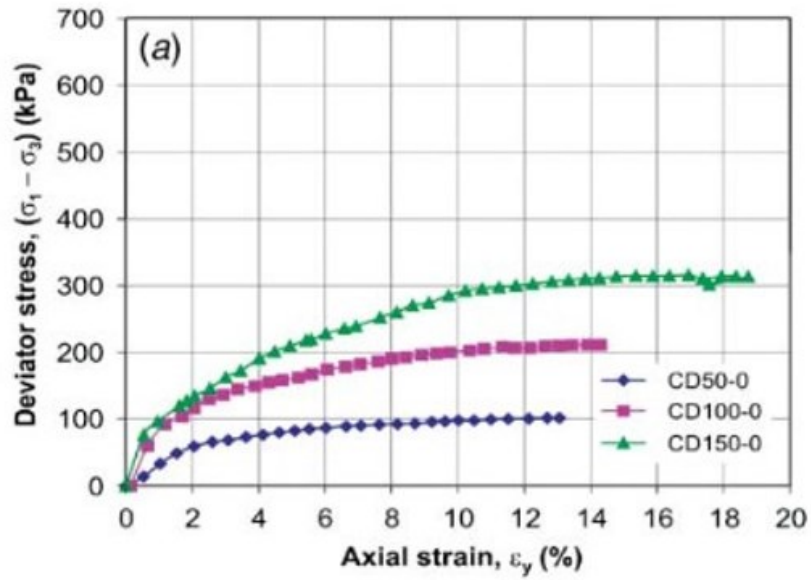
μεγαλύτερη είναι η τάση περίσφιξης μειωμένη κατά την πίεση της αέριας φάσης, ο βαθμός κορεσμού κατά το τέλος της στερεοποίησης – επιβολής της μύζησης θα είναι μικρότερος (βλ. δοκίμια c100-s100 – c300-s100 Σχήμα 4.13). Τα παραπάνω είναι απόρροια του γεγονότος ότι, προκειμένου τα δύο δοκίμια να προκύψουν με ίδιο δείκτη πόρων κατά το τέλος του σταδίου στερεοποίησης/μύζησης, πρέπει αρχικά το δοκίμιο με τη μεγαλύτερη τάση περίσφιξης (μύζηση έχουν ίδια) να έχει ικανά μεγαλύτερο αρχικό δείκτη πόρων, άρα και χαμηλότερη πίεση εισόδου αέρα, οπότε μετά το τέλος του σταδίου, παρόλο ότι θα φτάσουν στον ίδιο δείκτη πόρων, θα έχουν διαφορετικό βαθμό κορεσμού.

4.3.6 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία

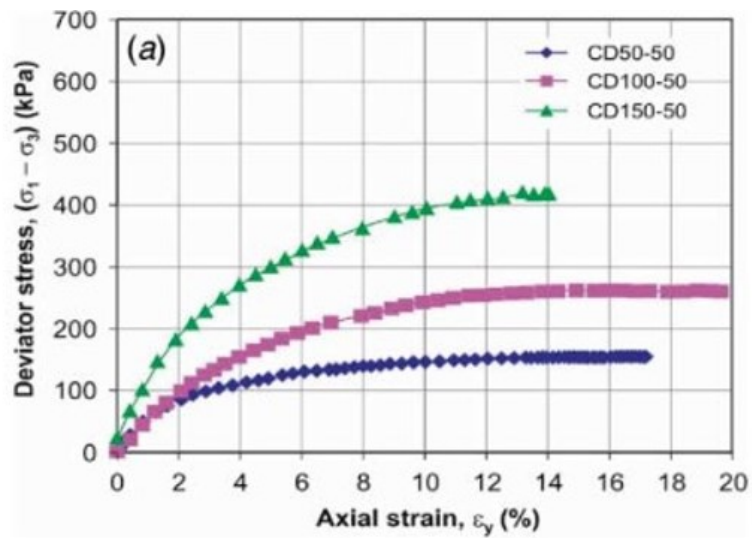
Στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζεται η ανάπτυξη των διατμητικών τάσεων ($\sigma_1 - \sigma_3$) σε σχέση με τις αξονικές παραμορφώσεις μη κορεσμένης ιλύος (Fredlund et al. 2012) ενώ αντίστοιχα τα Σχήματα 4.16 έως 4.19 αφορούν στον ιζηματογενή σχηματισμό Jurong (Rahardjo et al. 2004)



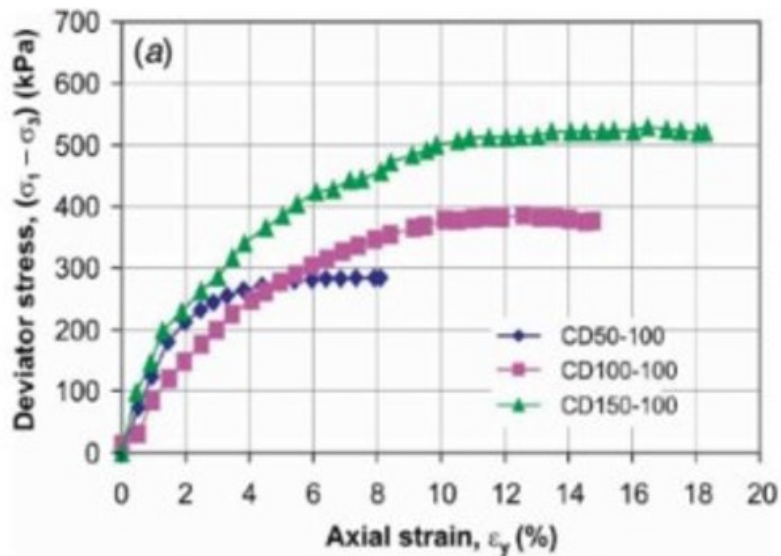
Σχήμα 4.15 Αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε μη κορεσμένη ιλύ (Fredlund et al. 2012)



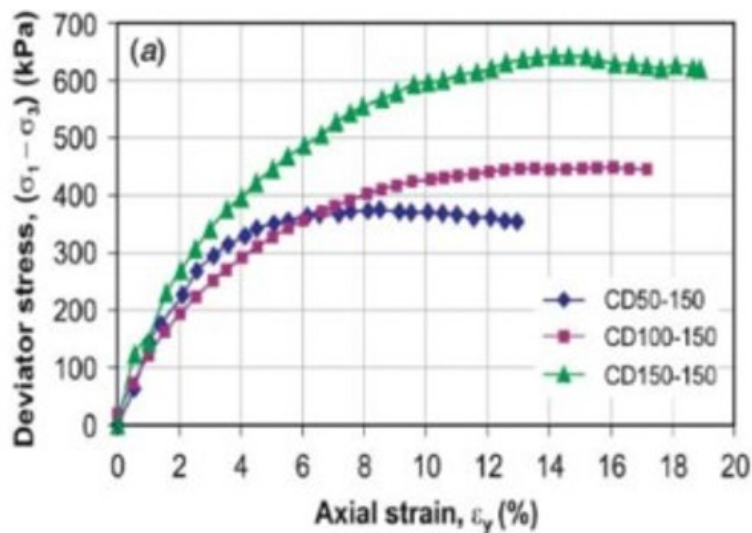
Σχήμα 4.16 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε δοκίμο του ιζηματογενή σχηματισμό Jurong για μηδενική μύζηση (Rahardjo et al. 2004)



Σχήμα 4.17 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε δοκίμο του ιζηματογενή σχηματισμό Jurong για μύζηση 50kPa (Rahardjo et al. 2004)



Σχήμα 4.18 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε δοκίμο του ιζηματογενή σχηματισμό Jurong για μύζηση 100kPa (Rahardjo et al. 2004)



Σχήμα 4.19 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε δοκίμο του ιζηματογενή σχηματισμό Jurong για μύζηση 150kPa (Rahardjo et al. 2004)

Από τα παραπάνω Σχήματα διαπιστώνεται παρόμοια συμπεριφορά στην αύξηση των μέγιστων διατμητικών τάσεων με την αύξηση της μύζησης. Ταυτόχρονα για την ίδια μύζηση μεγαλύτερη διατμητική αντοχή παρατηρείται για μεγαλύτερη τάση περίσφιξης (ανοικτά και συμπαγή σημεία αντίστοιχα στο Σχήμα 4.15)

Παρατηρείται όμως διαφορά στην απόδοση της μύζησης έναντι της τάσης περίσφιξης, καθόσον για τον σχηματισμό Jurong και για τη δοκιμή υπό τάση περίσφιξης 150kPa και μύζηση 50kPa (cd 150 – 50) προκύπτει λίγο μεγαλύτερη διατμητική αντοχή (410 kPa) σε σχέση με την cd 50 – 150 (390 kPa), η μύζηση δηλαδή έχει μικρότερη επιρροή από την τάση περίσφιξης. Αυτό

συμβαίνει λόγω της διαφορετικής φύσης του υλικού και συγκεκριμένα, τα εδαφικά δοκίμια του σχηματισμού Jugosa έχουν 34 % άμμο – 24% ιλύ και 42% άργιλο, σε σχέση με τα εδαφικά δοκίμια των δοκιμών της παρούσας εργασίας που περιέχουν 0% άμμο – 27% ιλύ και 72% άργιλο.

5. Συμπεράσματα

Από της εργαστηριακές δοκιμές στο συμπιεσόμετρο για μη κορεσμένα εδάφη (δοκιμές σταθερής μύζησης – αυξανόμενου φορτίου) και στην Τριαξονική συσκευή (δοκιμές σταθερής μύζησης και τάσης περίσφιξης και ελεύθερης στράγγισης), προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

α. Διαπιστώθηκε η συμβολή της μύζησης στην ανάπτυξη μεγαλύτερων διατμητικών αντοχών. Ενδεικτικά, η αύξηση της μύζησης στην τριαξονική δοκιμή κατά τέσσερις φορές, συνέβαλε στον διπλασιασμό της μέγιστης αντοχής.

β. Διαπιστώθηκε με την αύξηση της μύζησης, η σταδιακή αύξηση της τάσης φαινόμενης προστερεοποίησης και η μείωση της συμπιεστότητας των δοκιμών.

γ. Για το εδαφικό υλικό των δοκιμών, η μύζηση έχει μεγαλύτερη επιρροή στην αύξηση μέγιστης διατμητικής αντοχής, σε σχέση με την τάση περίσφιξης (πλευρική τάση μειωμένη κατά τη πίεση της αέριας φάσης, $\sigma_3 - u_a$), καθότι ο τριπλασιασμός της τάσης περίσφιξης επιφέρει περίπου ίδια αύξηση αντοχής με τον διπλασιασμό της μύζησης. Τα παραπάνω συμπεράσματα ισχύουν μόνο για το εύρος μύζησης που εκτελέστηκαν οι δοκιμές (50 – 400 kPa). Σε υψηλότερες τιμές, η ενδεχόμενη ταπείνωση του βαθμού κορεσμού θα μειώσει σημαντικά την απόδοση της μύζησης, για τους λόγους που έχουν αναφερθεί στο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb για ακόρεστα εδάφη.

δ. Η μεγαλύτερη μύζηση οδηγεί σε μικρότερο βαθμό κορεσμού στο τέλος του σταδίου της στερεοποίησης – επιβολής της μύζησης, αλλά ο ρυθμός αύξησης του βαθμού κορεσμού κατά το στάδιο της φόρτισης είναι ίδιος και σχετίζεται με τον ρυθμό παραμόρφωσης.

ε. Ο βαθμός κορεσμού στο τέλος της στερεοποίησης – επιβολής της μύζησης, εξαρτάται και από τον αρχικό δείκτη πόρων. Το δοκίμιο ανάλογα με τον αρχικό δείκτη πόρων, διαθέτει μια πίεση εισόδου αέρα, η όποια αν ξεπεραστεί, ο βαθμός κορεσμού του ταπεινώνεται πολύ γρήγορα. Ανάλογα με το πόσο μακριά ή κοντά από αυτό το σημείο βρίσκεται η επιβαλλόμενη μύζηση, λαμβάνοντας υπόψη και την μεταβολή του δείκτη πόρων κατά το στάδιο της επιβολής της μύζησης – στερεοποίησης, μεταβάλλεται και ο τελικός βαθμός κορεσμού, που έχει το εδαφικό δοκίμιο κατά την ολοκλήρωση του προαναφερόμενου σταδίου. Εξειδικεύοντας το παραπάνω συμπέρασμα, για δοκίμια με σχεδόν ίδιο δείκτη πόρων κατά το τέλος της στερεοποίησης:

(1) για ίδια τάση περίσφιξης, όσο μεγαλύτερη είναι η επιβαλλόμενη μύζηση, ο βαθμός κορεσμού κατά το τέλος της στερεοποίησης – επιβολής της μύζησης θα είναι μικρότερος.

(2) για ίδια επιβαλλόμενη μύζηση, όσο μεγαλύτερη είναι η τάση περίσφιξης, ο βαθμός κορεσμού κατά το τέλος της στερεοποίησης – επιβολής της μύζησης θα είναι μικρότερος. Το παραπάνω είναι απόρροια του γεγονότος ότι, προκειμένου τα δύο δοκίμια να προκύψουν με ίδιο δείκτη πόρων κατά το τέλος του σταδίου στερεοποίησης-επιβολής μύζησης, πρέπει αρχικά το δοκίμιο με τη μεγαλύτερη τάση περίσφιξης (μύζηση έχουν ίδια) να έχει ικανά μεγαλύτερο αρχικό δείκτη πόρων από το άλλο, άρα και μικρότερη πίεση εισόδου αέρα. Οπότε, μετά το τέλος του σταδίου, παρότι θα φτάσουν στον ίδιο δείκτη πόρων, θα έχουν διαφορετικό βαθμό κορεσμού.

στ. Οι κλασικές χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους νερού (soil-water characteristic curve – SWCC), οι οποίες προκύπτουν συνήθως από τους θαλάμους μύζησης (pressure plate test), μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για την αναγνώριση ενός κατώτατου ορίου της πίεσης εισόδου αέρα αφού έχουν προκύψει για τιμές του αρχικού δείκτη πόρων (μηδενική τάση περίσφιξης). Όπως έχει αναφερθεί, η πίεση εισόδου αέρα μετατοπίζεται σε υψηλότερες πιέσεις, όσο ο δείκτης πόρων μικραίνει. Επομένως, στις δοκιμές που είτε αυξάνεται το φορτίο, είτε προηγείται στάδιο στερεοποίησης - επιβολής μύζησης, η πίεση εισόδου αέρα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται κατά την εξέλιξη των δοκιμών. Έτσι, αν προηγούνται στάδια που μειώνουν τον δείκτη πόρων, το δοκίμιο διασφαλίζεται περισσότερο στο να αντέξει (να μην έχουμε είσοδο αέρα) την επιβαλλόμενη μύζηση και να ολοκληρωθεί η επιβολή της με υψηλό βαθμό κορεσμού. Κατ' επέκταση επηρεάζονται και οι μέγιστες διατμητικές αντοχές του σταδίου φόρτισης, καθόσον υψηλότερος βαθμός κορεσμού συνεπάγεται και αποδοτικότερη μύζηση στη συνεισφορά αντοχής (βλέπε γενικευμένο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας MOHR – COULOMB).

6 Προτάσεις για μελλοντικές δοκιμές

Τριαξονικές δοκιμές σταθερού όγκου νερού (constant water content – CW)

Σε ένα φυσικό πρανές, όταν προκαλούνται κατολισθήσεις λόγω έντονων βροχοπτώσεων, αυτές μπορούν είτε να συμβούν αργά, κάτι που μπορεί να προσομοιωθεί με τις δοκιμές ελεύθερης στράγγισης, είτε να συμβούν σχετικά γρήγορα, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, που προσομοιώνονται με τις δοκιμές σταθερού όγκου νερού. Σύμφωνα με τους Rahardjo et al. (2004), όταν η μύζηση που επιβάλλεται σε ένα εδαφικό δοκίμιο δεν έχει ξεπεράσει την πίεση εισόδου αέρα, τα αποτελέσματα μέγιστων διατμητικών αντοχών είναι κοντά και για τα δύο είδη δοκιμών. Τα αποτελέσματα αρχίζουν να διαφέρουν, όταν οι τιμές της μύζησης είναι μεγαλύτερες από την πίεση εισόδου αέρα. Επιπλέον, αποτελέσματα από δοκιμές σταθερού όγκου, καταδεικνύουν ότι η σχέση ανταπόκρισης της πίεσης της υγρής φάσης στη συνολική μεταβολή του όγκου του δοκιμίου, είναι πολύ πιο πολύπλοκη από ότι είναι στις τριαξονικές δοκιμές κορεσμένων εδαφών και συγκεκριμένα, η μεταβολή στην πίεση του νερού των πόρων κατά την φόρτιση, δεν σχετίζεται άμεσα με τη συνολική μεταβολή του όγκου του δοκιμίου. Για τους παραπάνω λόγους, προτείνεται μία σειρά δοκιμών σταθερού όγκου, με τιμές μύζησης μεγαλύτερες και μικρότερες του σημείου εισόδου αέρα, προκειμένου να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών ελεύθερης στράγγισης.

Δοκιμές συμπίεσομέτρου σταθερού φορτίου και αυξανόμενης μύζησης

Προκειμένου να διαπιστωθεί η πίεση εισόδου αέρα, απαιτείται η εξεύρεση του σημείου αλλαγής κλίσης, στη καμπύλη βαθμού κορεσμού – μύζησης. Επιπρόσθετα, έχει αναφερθεί η μετατόπιση του σημείου εισόδου αέρα σε υψηλότερες πιέσεις, με τη μείωση του δείκτη πόρων. Για έλεγχο των ανωτέρω προτείνονται δοκιμές συμπίεσομέτρου σταθερού φορτίου και αυξανόμενης μύζησης, αντί των σταθερής μύζησης αυξανόμενου φορτίου που εκτελέστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

Δοκιμές ελέγχου διόγκωσης και συρρίκνωσης

Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρθηκε ότι για αρχικές συνθήκες μέσης ολικής τάσης και μύζησης, στις οποίες το έδαφος βρίσκεται στον κλάδο επαναφόρτισης, η μείωση της μύζησης (κορεσμός) υπό σταθερή μέση ολική τάση, προκαλεί διόγκωση, ενώ για αρχικές συνθήκες για τη οποίες το έδαφος βρίσκεται στον

κλάδο συμπίεσης, η μείωση της μύζησης οδηγεί σε συρρίκνωση (συμπεριφορά κατάρρευσης). Προτείνεται η εκτέλεση δοκιμών συμπιεσομέτρου στις οποίες θα υπάρχει εναλλαγή αυξανόμενης φόρτισης – σταθερής μύζησης και σταθερής φόρτισης με αυξομείωση της μύζησης, προκειμένου να διαπιστωθεί η παραπάνω συμπεριφορά.

Παραρτήματα

Ευρετήριο Φωτογραφιών

Φωτογραφία 2.1 Ανοικτός θάλαμος μύζησης με κεραμικό πωρόλιθο με τιμή πίεσης εισόδου αέρα 15 bar.....	22
Φωτογραφία 2.2 Κλειστός θάλαμος μύζησης.....	22
Φωτογραφία 2.3 Συσκευασία χάρτινων φίλτρων Whatman 42.....	23
Φωτογραφία 2.4 Ειδικά τεμάχια γύψου και καταγραφικό με υποδοχέα βαθμονόμησης.....	24
Φωτογραφία 2.5 Φωτογραφία τενσιόμετρου με πορώδες άκρο χαμηλής πίεσης αέρα (πηγή: Μπαρδάνης, 2016).....	30
Φωτογραφίες 4.1 (α) Συσκευή συμπιεσομέτρου και (β) δείγμα δοκιμίου μετά την εξόλκευση (πηγή: Κουρελής, 2016).....	40
Φωτογραφία 4.2 Συσκευή δοκιμής συμπιεσομέτρου ακόρεστων εδαφών του εργαστηρίου εδαφομηχανικής ΕΜΠ.....	41
Φωτογραφία 4.3 Κεραμικός πωρόλιθος υψηλής τιμής πίεσης εισόδου αέρα (High-Air-Entry Disk).....	43
Φωτογραφία 4.4 Κομμάτι δοκιμίου, δακτύλιος δοκιμής και ειδική μεταλλική σέγα διαμόρφωσης του σχήματος του δοκιμίου.....	43
Φωτογραφία 4.5 Κομμάτι δοκιμίου, δακτύλιος δοκιμής και ειδική μεταλλική σέγα διαμόρφωσης του σχήματος του δοκιμίου.....	44
Φωτογραφία 4.6 Δοκίμιο μαζί με τον δακτύλιο, επί του κεραμικού πωρόλιθου.....	44
Φωτογραφία 4.7 Τοποθετημένος δακτύλιος εγκιβωτισμού και ειδικός δίσκος κορουνδίου.....	45
Φωτογραφία 4.8 Τοποθετημένο πώμα κυψέλης.....	45
Φωτογραφία 4.9 Συσκευή τριαξονικής δοκιμής ακόρεστων εδαφών του εργαστηρίου Εδαφομηχανικής ΕΜΠ.....	52

Φωτογραφία 4.10 Περιβάλλον προγράμματος Triax – Version 5.1.7.....	53
Φωτογραφία 4.11 Ρυθμίσεις βήματος φόρτισης.....	54
Φωτογραφία 4.12 Κεφαλή επιβολής πίεσης αέρα στους πώρους του δοκιμίου και μεταλλικός δίσκος από κορούνδιο.....	54
Φωτογραφία 4.13 Κεραμικός πωρόλιθος υψηλής τιμής πίεσης εισόδου αέρα.....	54
Φωτογραφία 4.14 Παρασκευή δοκιμίου – σύγκριση με το πρότυπο καλούπι (μεταλλικός κύλινδρος).....	56
Φωτογραφία 4.15 Παρασκευή δοκιμίου – αφαίρεση πλεονάζοντος υλικού...56	
Φωτογραφία 4.16 Τοποθέτηση του δοκιμίου εντός μεμβράνης.....	57
Φωτογραφία 4.17 Διατήρηση του κεραμικού πωρόλιθου πλήρως κορεσμένου.....	57
Φωτογραφία 4.18 Τοποθέτηση του δοκιμίου στη συσκευή	58
Φωτογραφία 4.19 Στεγανοποίηση δοκιμίου – τοποθέτηση δακτυλίων	58
Φωτογραφίες 4.20 - 4.21 Τοποθέτηση τοπικών μετρητών επί του δοκιμίου...59	
Φωτογραφία 4.22 Τοποθέτηση κυψέλης τριαξονικής συσκευής.....	59
Φωτογραφία 4.23 Δοκίμιο με εμφανή επιφάνεια αστοχίας.....	62

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Ιδεατή απεικόνιση μη κορεσμένου εδάφους: α) χαμηλός βαθμός κορεσμού και β) μη κορεσμένου εδάφους υψηλού βαθμού κορεσμού (πηγή: Γεωργιάννου, 2020).....	11
Σχήμα 2.2 Ιδεατή απεικόνιση μερικώς κορεσμένου εδάφους.....	11
Σχήμα 2.3 Γεωλογικός και Υδρολογικός κύκλος. Κορεσμένη και μη κορεσμένη ζώνη του εδάφους (πηγή: Γεωργιάννου, Ζερβός, 2024).....	12
Σχήμα 2.4 Πίεση νερού στην υγρή φάση πάνω και κάτω από την στάθμη του υπόγειου ορίζοντα.....	13
Σχήμα 2.5 α) Ανύψωση νερού σε τριχοειδή σωλήνα και β)αντίστοιχη αλληλεπίδραση του νερού και των κόκκων στην περίπτωση δημιουργίας μηνίσκων στις επαφές των κόκκων μερικώς κορεσμένης άμμου (πηγή: Γεωργιάννου, 2020).....	14
Σχήμα 2.6 Η διαφορετική άνοδος του νερού μέσα σε ανοικτού τύπου γυάλινο τριχοειδή σωλήνα ανάλογα με το πάχος του (πηγή: Γεωργιάννου, 2020).....	14
Σχήμα 2.7 Τριχοειδή φαινόμενα στο έδαφος, κατανομή πίεσης του νερού των πόρων στην κορεσμένη ζώνη (πηγή: Γεωργιάννου , 2020).....	16
Σχήμα 2.8 Καμπύλη συγκράτησης νερού ή χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους - νερού (πηγή: Γεωργιάννου, 2020).....	17
Σχήμα 2.9 Παράδειγμα χαρακτηριστικής καμπύλης για έδαφος - νερού από τον ιζηματογενή σχηματισμό Jurong (πηγή: Rahardjo et al., 2004).....	18
Σχήμα 2.10 Απεικόνιση της μεθόδου μετατόπισης άξονα (πηγή: Richards, 1941).....	20
Σχήμα 2.11 Καμπύλες μύζησης – ποσοστού υγρασίας για χάρτινα φίλτρα Whatman No.42 και Schiecher and Schuell No 589 (πηγή: ASTM D5298-16).....	23

Σχήμα 2.12 Ειδικό τέμαχος μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας (πηγή: Reece, 1996).....	25
Σχήμα 2.13 Διάταξη αισθητήρα μέτρησης της μύζησης με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο (πηγή: Tarantino & Mongioni 2002).....	26
Σχήμα 2.14 Απλουστευμένη τυπική διάταξη ψυχρομέτρου φαινομένου Peltier (πηγή: Richards & Ogata 1958).....	27
Σχήμα 2.15 Ενδεικτική διάταξη συσκευής μέτρησης της μύζησης με υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου (πηγή: Gee et al., 1992).....	28
Σχήμα 3.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες για 4 διαφορετικά υλικά (τροποποιημένο σχήμα από τους Vanapalli et al., 1999).....	31
Διάγραμμα 3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού για καολίνη ξηρής πυκνότητας 15 KN/m ³ (τροποποιημένο σχήμα από τους Mahboobi et al., 2023).....	32
Σχήμα 3.3 Παράδειγμα καμπυλών ξήρανσης και ύγρυνσης (με κύκλους ξήρανσης και ύγρυνσης) σε υλικό εκσκαφών στην περιοχή Xian της Κίνας (MU et al., 2020).....	33
Σχήμα 3.4 Παράδειγμα περιβάλλουσας επιφάνειας αστοχίας, με βάση το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο Mohr-Coulomb (πηγή: Fredlund et al., 2012)	34
Σχήμα 3.5 Δοκιμή απευθείας διάτμησης που αποδεικνύει τη μη γραμμική συμπεριφορά της διατμητικής αντοχής σε σχέση με την μύζηση (πηγή: Fredlund et al. 2012).....	35
Σχήμα 3.6 Καμπύλες ισότροπης συμπίεσης για κορεσμένο και για μη κορεσμένο έδαφος με σταθερή μύζηση (πηγή: Alonso et al., 1990).....	37
Σχήμα 3.7 Μεταβολή της πίεσης εισόδου αέρα και της τάσης διαρροής (πηγή: Thu et al. 2007).....	38
Σχήμα 3.8 Καμπύλες ισότροπης συμπίεσης για πλήρως κορεσμένο καολινίτη και μη κορεσμένο υπό σταθερή μύζηση (πηγή: Thu et al. 2007)...	38
Σχήμα 4.1 Τυπική καμπύλη μονοδιάστατης συμπίεσης κατά την παρασκευή των αναζυμωμένων δοκιμίων (πηγή: Κουρελής, 2016).....	39

Σχήμα 4.2 Κύριες διατάξεις της συσκευής συμπιεσομέτρου ακόρεστων εδαφών (τροποποιημένο σχήμα από Bagheri et. al. 2019).....	42
Σχήμα 4.3 Καμπύλη μεταβολής του όγκου δοκιμίου αποσυντεθειμένου γρανίτη κατά την φάση του κορεσμού, πριν τη δοκιμή συμπιεσομέτρου, από Sr=75% σε Sr=100% με ελεύθερη διόγκωση (πηγή: Rampino et al., 1999).....	46
Σχήμα 4.4 Καμπύλη ανάπτυξης ολικής τάσης ($\sigma_v - u_a$) δοκιμίων αποσυντεθειμένου γρανίτη κατά τη φάση εφαρμογής μύζησης υπό σταθερό όγκο, πριν τη δοκιμή συμπιεσομέτρου (πηγή: Rampino et al., 1999).....	47
Σχήμα 4.5 Δείκτης πόρων σε σχέση με την κατακόρυφη τάση.....	48
Σχήμα 4.6 Βαθμός κορεσμού σε σχέση με την κατακόρυφη τάση.....	49
Σχήμα 4.7 ο βαθμός κορεσμού σε σχέση με τη μύζηση.....	50
Σχήμα 4.8 Ειδικός όγκος ($1+e$) ως προς την τάση περίσφιξης (σ_v-u_a) (πηγή: Rampino et al., 1999).....	50
Σχήμα 4.9 Τροποποιημένη συσκευή τριαξονικής δοκιμής για ακόρεστα εδάφη (εικόνα τροποποιημένη από Fredlund and Raharjo, 1993).....	51
Σχήμα 4.10 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση.....	64
Σχήμα 4.11 Βαθμός κορεσμού σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση.....	65
Σχήμα 4.12 Διαφυγή νερού σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση.....	66
Σχήμα 4.13 Βαθμός κορεσμού σε σχέση με τον δείκτη πόρων.....	66
Σχήμα 4.14 Διαφυγή νερού σε σχέση με τον δείκτη πόρων.....	67
Σχήμα 4.15 Αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε μη κορεσμένη ιλύ (Fredlund et al. 2012).....	68
Σχήμα 4.16 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε δοκίμο του ιζηματογενή σχηματισμό Jurong για μηδενική μύζηση (Rahardjo et al. 2004).....	69
Σχήμα 4.17 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε δοκίμο του ιζηματογενή σχηματισμό	

Jurong για μύζηση 50kPa (Rahardjo et al. 2004).....	69
Σχήμα 4.18 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε δοκίμο του ιζηματογενή σχηματισμό Jurong για μύζηση 100kPa (Rahardjo et al. 2004).....	70
Σχήμα 4.19 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση σε δοκίμο του ιζηματογενή σχηματισμό Jurong για μύζηση 150kPa (Rahardjo et al. 2004).....	71

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά δοκιμών συμπίεσομέτρου.....	47
Πίνακας 4.2 Πίνακας με το σύνολο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στην τριαξονική συσκευή για τα ακόρεστα εδάφη.....	63
Πίνακας 4.3 Αναπτυσσόμενες μέγιστες διατμητικές τάσεις	64

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alonso, E. E., Gens, A., Josa, A., 1990, *A constitutive model for partially saturated soils*, *Geotechnique*, 40, 3, pp. 405-430.

ASTM International, 2016, Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Designation: D5298-16. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Bagheri, M., Mousavi Nezhad, M., & Rezania, M., 2018. A CRS oedometer cell for unsaturated and non-isothermal tests. *Geotechnical Testing Journal*, 43(1), 20180204. <https://doi.org/10.1520/GTJ20180204>

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.

Campbell, E. C., Campbell, G. S., & Barlow, W. K., 1973. A dewpoint hygrometer for water potential measurement. *Agricultural Meteorology*.

Γεωργιάννου Β.Ν. 2016, Ειδικά Θέματα Εδαφομηχανικής, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Γεωργιάννου Β.Ν. 2020, Πειραματική Εδαφομηχανική, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Γεωργιάννου, Β.Ν. και Ζερβός, Α. 2024. Σημειώσεις Εδαφομηχανικής Ι, Αθήνα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Fredlund, D. G., Morgenstern, R., & Widger, R. A., 1978. Critical state behavior of a compacted silt specimen. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(2), 313-321.

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D., 2012. *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. Wiley.

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.

Gee, G.W.; Campbell, M.D.; Campbell, G.S.; Campbell, J.H. Rapid Measurement of Low Soil Water Potentials Using a Water Activity Meter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1992, 56, 1068-1070.

Κουρέλης, Ι., 2017, Τριαξονικές δοκιμές σε ανισότροπα στερεοποιημένη καολίνη, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Li, J., Yin, Z. Y., Cui, Y. J., Liu, K., & Yin, J. H., 2019. An elasto-plastic model of unsaturated soil with an explicit degree of saturation-dependent CSL. *Engineering Geology*, 260, 105240.

Mahboobi, A., Bagherieh, A. R., & Heydari, F., 2023. Experimental Study and Prediction of Water Retention Curves of an Unsaturated Kaolin. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 11, 90-109. <https://doi.org/10.1007/s40515-022-00269-9>

Μπαρδάνης, Μ., 2016. Εργαστηριακή και αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών (Doctoral dissertation), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Τομέας Γεωτεχνικής.

Mu, Q. Y., Dong, H., Liao, H. J., Dang, Y. J., & Zhou, C., 2020. Water-retention curves of loess under wetting–drying cycles. *Géotechnique Letters*, 10(1), 1–6. doi:10.1680/jgele.19.00025

Phene, C. J., Hoffman, G. J., Rawlins, S. L., 1971α, 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.

Rahardjo, H., Ong, B.H., & Leong, E.C., 2004. Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 41(3), 421-436.

Rampino, C., Mancuso, C., & Vinale, F. (1999). Laboratory testing on an unsaturated soil: equipment, procedures, and first experimental results. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(1), 112.

Reece, C. F. (1996). Evaluation of a Line Heat Dissipation Sensor for Measuring Soil Matric Potential. *Soil Science Society of America Journal*, 60(4), 1022. doi:10.2136/sssaj1996.03615995006

Richards, L. A., 1941, A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution, *Soil Science*, 51, pp. 377-386.

Richards, L. A., Ogata, G., 1958, Thermocouple for vapour pressure measurement in biological and soil systems at high humidity, *Science*, 128, pp. 1089-1090.

Schanz, T. (Ed.), 2003. *Unsaturated Soils: Experimental Studies: Proceedings of the International Conference "From Experimental Evidence towards Numerical Modeling of Unsaturated Soils"*, Weimar, Germany, September 18-19, 2003. Springer Proceedings in Physics.

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.

Sivakumar, V. (1993). A critical state framework for unsaturated soil. PhD thesis, University of Sheffield.

Terzaghi, K., 1936, *The shearing resistance of saturated soils*, Proc. 1st Int. Conf. on Soil Mech. Found. Engng, Cambridge, MA, Vol. 1, pp. 54-56.

Thu, T. M., Rahardjo, H., & Leong, E. C. (2007). Soil-water characteristic curve and consolidation behavior of a compacted silt. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(3), 266-275

Trinh, M. T., Rahardjo, H., & Leong, E. C. (2007). Critical state behavior of a compacted silt specimen. *Soils and Foundations*, 47(4), 749–755. Japanese Geotechnical Society.

Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., & Pufahl, D. E. (1999). The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till. *Geotechnique*, 49, 143-159.

Wheeler, S. J., & Sivakumar, V. (1995). An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil. *Geotechnique*, 45(1), 35-53.

Wiederhold, P.R. (1997). *Water Vapor Measurement: Methods and Instrumentation*. New York, NY, USA: Marcel Dekker. ISBN 0-8247-9319-6.