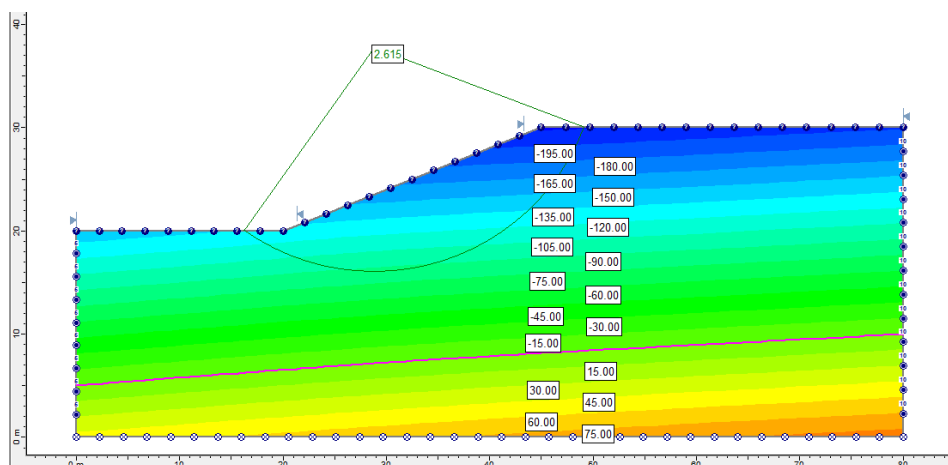




Διπλωματική Εργασία
Δημήτριος Κοκοβιάδης

Επιβλέποντες
Αχ. Παπαδημητρίου & Μ. Καββαδάς
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ & Ομ. Καθηγητής ΕΜΠ

**Πρόσθετη αντοχή εδαφικών υλικών λόγω μερικού κορεσμού:
Εργαστηριακή διερεύνηση και επιρροή στην ευστάθεια πρανών**



Diploma Thesis
Dimitrios Kokoviadis

Supervised by
Ach. Papadimitriou & M. Kavvas
Associate Professor NTUA & Emeritus Professor NTUA

**Extra strength of soil materials due to partial saturation:
Laboratory investigation and effect on slope stability**

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τους επιβλέποντες καθηγητές μου Μιχάλη Καββαδά και Αχιλλέα Παπαδημητρίου. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επικεφαλής του εργαστηρίου της Έδαφος Α.Ε., Μιχάλη Μπαρδάνη για την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας όπως και τους εργαζόμενους του εργαστηρίου, Μάριο Τσουκαλαδάκη, Σοφία Γρίφιζα και Χάρη Βαγενά για την βοήθεια τους. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου που με στήριξαν όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μη κορεσμένο ονομάζεται το εδαφικό εκείνο υλικό του οποίου ο βαθμός κορεσμού, δηλαδή ο λόγος του όγκου των κενών του εδαφικού υλικού που πληρούνται με νερό προς τον συνολικό όγκο των κενών του, είναι μικρότερος της μονάδας και μεγαλύτερος του μηδενός. Η μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών αυτών υλικών έχει αποτελέσει αντικείμενο διερεύνησης σχετικά πρόσφατα. Ειδικά η πρόσθετη αντοχή των εδαφικών υλικών όταν είναι μη κορεσμένα αποτελεί αντικείμενο με ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς η παρουσία της είναι σε όφελος της οικονομίας των έργων, αλλά τυχόν απώλειά της αν ο σχεδιασμός έχει βασιστεί σε αυτήν οδηγεί σε αστοχία και για αυτόν τον λόγο αγνοείται υπέρ της ασφαλείας.

Στην διπλωματική εργασία παρουσιάζεται με συντομία η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών, όπως αυτή εξετάζεται στη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία. Κυρίαρχο μέγεθος στη μηχανική συμπεριφορά αποτελεί η μύζηση, δηλαδή η διαφορά πίεσης μεταξύ του νερού και του αέρα στους πόρους του εδάφους. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εργαστηριακή διερεύνηση των ιδιοτήτων μίας αργιλοϊλύος όταν αυτή είναι μη κορεσμένη που κατέληξε, μεταξύ άλλων, σε εκτίμηση για την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής του συγκεκριμένου υλικού με την αύξηση της μύζησης, με βάση δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα. Η εν λόγω αύξηση της αντοχής συγκρίνεται με αντίστοιχες εκτιμήσεις από άλλα υλικά της βιβλιογραφίας. Ακολούθως παρουσιάζεται η μέθοδος οριακής ισορροπίας όπως αυτή εφαρμόζεται σε προβλήματα ευστάθειας πρανών σε δύο διαστάσεις με ανασκόπηση των συνηθέστερων μεθόδων που χρησιμοποιούνται. Τέλος παρουσιάζονται οι 2Δ παραμετρικές αναλύσεις ευσταθείας που πραγματοποιήθηκαν. Σε αυτές διερευνήθηκε το βάθος του υπογείου ορίζοντα, δηλαδή το μέγεθος της μύζησης και των αρνητικών πιέσεων που αναπτύσσονταν στο πρανές, το ύψος του πρανού, ο λόγος $\tan\phi_b/\tan\phi'$ (εφαπτομένη της γωνίας αύξησης της αντοχής με την μύζηση προς την εφαπτομένη της γωνίας διατμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού όταν είναι πλήρως κορεσμένο) και η πίεση διείδυσης αέρα των εδαφικών υλικών. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν συστηματικά τη σημαντική αύξηση του συντελεστή ασφαλείας του πρανού όσο βαθαίνει η ΣΥΟ, ειδικά σε λεπτόκοκκα εδάφη, καθώς και την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας με την αύξηση πίεσης διείδυσης του αέρα.

ABSTRACT

An unsaturated soil is a soil which has a degree of saturation (i.e. the ratio of the volume of the soil voids filled with water over the total volume of the soil voids) that is less than one and over zero. The mechanical behavior of unsaturated soils has been the subject of extensive study relatively recently. Especially the extra strength of soils because of their partial saturation is a subject of great interest as its presence benefits project economy, but its possible loss, if design has been based on it, leads to failure and this is why it is neglected in favor of safety.

The nature and mechanical behavior of unsaturated soils as presented in geotechnical literature is initially presented in the thesis. The predominant value in mechanical behavior is suction (i.e. the pressure difference between water and air in the pores of the soil). The laboratory investigation performed (with the use of Brazilian and unconfined compression tests) on a clayey silt and its properties measured when found unsaturated are then presented, ending with a collection of similar parameters measured on other soils and found in the literature. The limit equilibrium method in general is then presented along with a review of the most frequently used slope stability methods based on it. Finally, the 2D slope stability analyses performed as part of a parametric study are presented. This parametric study investigated the depth of the water table causing different suction values along a slope, the height of the slope, the ratio $\tan\phi_b/\tan\phi'$ (tangent of the angle of strength increase due to suction over the tangent of the angle of shearing resistance of the soil when fully saturated) and the air-entry pressure of the soil. The results systematically indicate the significant increase of the safety factor of the slope as the water table deepens, especially in fine-grained soils, as well as the increase of the safety factor with the increase of the air-entry pressure.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
1.3 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	7
Η ΦΥΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	7
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
2.2 ΒΑΘΜΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ. Ορισμός και ονομασία εδαφών ως προς τις τιμές του	8
2.3 ΜΥΖΗΣΗ. Ορισμός και κατηγορίες	10
2.4 ΠΙΕΣΕΙΣ ΠΟΡΩΝ	11
2.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΕΙΩΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ	13
2.5.1 Γενικά	13
2.5.2 Τριχοειδή Φαινόμενα	13
2.5.3 Ωσμωτικά Φαινόμενα	14
2.5.4 Φαινόμενα Προσρόφησης	14
2.5.5 Είδη Μύζησης	14
2.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ	15
2.7 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	17
2.7.1 Διατμητική αντοχή μη κορεσμένων εδαφών	17
2.7.2 Μεταβολές όγκου μη κορεσμένων εδαφών	25
2.7.3 Διαπερατότητα μη κορεσμένων εδαφών	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	31
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	31
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	31
3.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	33
3.2.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση εδαφικών υλικών	33
3.2.2 Πλαστικότητα εδαφικών υλικών	37
3.2.3 Δοκιμή Γραμμικής Συρρίκνωσης	40
3.2.3 Ειδικό Βάρος της Στερεάς Φάσης	42

3.2.4 Σύστημα κατάταξης	45
3.3 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	47
3.3.1 Δοκιμή απευθείας διάτμησης	47
3.4 ΑΝΤΟΧΗ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ	50
3.4.1 Εισαγωγή.....	50
3.4.2 Μέθοδος Μετατόπισης Άξονα	51
3.4.3 Θάλαμος Μύζησης.....	51
3.4.4 Έλεγχος Μύζησης με χρήση Κορεσμένων Υδατικών Διαλυμάτων Αλάτων	54
3.4.5 Ξήρανση στην ατμόσφαιρα	56
3.4.6 Υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου	57
3.4.7 Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα.....	57
3.4.8 Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους-Νερού	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	79
ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΟΠΙΑΣ – ΕΥΘΕΙΕΣ & ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ	79
4.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΟΠΙΑΣ	79
4.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΛΩΡΙΔΩΝ ΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ.....	81
4.2.1 Συνήθης Μέθοδος Λωρίδων.....	82
4.2.2 Απλοποιημένη Μέθοδος Bishop (1955)	82
4.2.3 Αναλύσεις μόνο με Ισορροπία Δυνάμεων	83
4.2.4 Μέθοδοι που ικανοποιούν όλες τις συνθήκες ισορροπίας.....	86
4.3 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΓΩΝΙΑ.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	97
ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ	97
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	97
5.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	98
5.3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ	101
5.4 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ	104
5.5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΕΡΑ	110
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	113
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	113
6.1 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	113

6.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΜΕΡΙΚΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ	117
6.3 ΣΥΝΟΨΙΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	118
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	121

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 2.2.1 Ιδεατή απεικόνιση α) μη κορεσμένου και β) μερικώς κορεσμένου εδάφους (Μπαρδάνης, 2016).	8
Σχήμα 2.2.2. Καμπύλες ξηρού φαινομένου βάρους-ποσοστού υγρασίας από δοκιμές συμπύκνωσης Proctor με την πρότυπη και τροποποιημένη ενέργεια συμπύκνωσης στο ίδιο εδαφικό υλικό (το συγκεκριμένο υλικό ήταν αργιλοίλυς χαμηλής πλαστικότητας -CL- με λεπτόκοκκη και μεσόκοκκη άμμο) -πηγή: Αρχείο δοκιμών ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.	10
Σχήμα 2.4.1 Στήλη εδάφους με την εξέλιξη της συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης (β), την κατανομή της πίεσης πόρων (α) και την εξέλιξη του ποσοστού υγρασίας ή του βαθμού κορεσμού (γ) με την απόσταση από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα (Μπαρδάνης, 2016)	12
Σχήμα 2.5.1 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος καμπυλωμένης διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης α) σε δύο διαστάσεις, και β) σε τρεις διαστάσεις με διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας σε δύο επίπεδα (Μπαρδάνης, 2016).	13
Σχήμα 2.6.1 Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού με τα ονομαστικά όρια πλήρους και μερικού κορεσμού, τα όρια της συνέχειας της κάθε ρευστής φάσης και την ποιοτική απεικόνιση της συνύπαρξης στερεάς, υγρής και αέριας φάσης: (α) πλήρους κορεσμός (Περιοχή I), (β) μερικός κορεσμός με την αέρια φάση σε μορφή φυσαλίδων (οριακή περιοχή μεταξύ Περιοχής I και II), (γ) μερικός κορεσμός με την υγρή και την αέρια φάση να είναι ταυτόχρονα συνεχείς (Περιοχή II) και (δ) μερικός κορεσμός με την υγρή φάση να μην είναι πια συνεχής (Περιοχή III) (Μπαρδάνης, 2016).....	16
Σχήμα 2.7.1 Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών με βάση το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Μπαρδάνης, 2016).....	18
Σχήμα 2.7.2 Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών με βάση το γενικευμένο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Μπαρδάνης, 2016).....	19
Σχήμα 2.7.3 Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής από δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης ($\varphi'_{res}=26.5^\circ$) και δοκιμή άμεσης διάτμησης σε δοκίμια από αδιατάρακτα δείγματα του ίδιου υλικού (Μπαρδάνης, 2019).	22
Σχήμα 2.7.4 Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής από δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης ($\varphi'_{res}=26.5^\circ$), κορυφαίες τιμές αντοχής μετά την ανάπτυξη μύζησης ($c'=22$ kPa, $\varphi'=39.5^\circ$), τιμές αντοχής μετά από μεγάλη παραμόρφωση παρουσία μύζησης ($\varphi'_{res}=37.0^\circ$) και μετά από μεγάλη παραμόρφωση και υδρεμπτισμό έως πλήρη κορεσμό ($\varphi'_{res}=27.5^\circ$) (Μπαρδάνης, 2019).	23
Σχήμα 2.7.5 Καμπύλες διατμητικής τάσης-οριζόντιας παραμόρφωσης για τις 3 κατακόρυφες τάσεις με τα χαρακτηριστικά σημεία ξήρανσης και υδρεμπτισμού (Μπαρδάνης, 2019).....	23

Σχήμα 2.7.6. Επιρροή της μύζησης επί της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής από δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα: α) γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής με την μύζηση, και β) ο λόγος $\tan \varphi_{res}(s) / \tan \varphi_{res}(s=0)$ με την μύζηση.	25
Σχήμα 2.7.7 α) Εξέλιξη του λόγου κενών με την μύζηση, β) η αντίστοιχη εξέλιξη του λόγου κενών με το ποσοστό υγρασίας (καμπύλη συρρίκνωσης), γ) η αντίστοιχη εξέλιξη του βαθμού κορεσμού με τοποσοστό υγρασίας, και δ) η αντίστοιχη καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης. Παρατίθεται σχηματικά η αντιστοιχία των χαρακτηριστικών σημείων της κάθε καμπύλης επί των άλλων καμπυλών, καθώς και κλίσεις χαρακτηριστικών τμημάτων τους (Μπαρδάνης, 2016).	27
Σχήμα 2.7.8 Ποιοτική απεικόνιση της συσχέτισης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό k_w με την μύζηση και αντιστοίχιση της με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (Μπαρδάνης, 2016).	29
Σχήμα 3.2.1 Συρμάτινα κόσκινα (ASTM).....Σχήμα 3.2.2 Κοσκινιέρα.....	34
Σχήμα 3.2.3 Τυπικές καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης για άμμο (μαύρο), γαρμπίλι (κόκκινο), χάλικες (πράσινο) (Μπαρδάνης, 2019).	34
Σχήμα 3.2.4 Ογκομετρικοί σωλήνες και αραιόμετρα (πυκνόμετρα) που χρησιμοποιήθηκαν.	35
Σχήμα 3.2.5 Παράδειγμα καμπύλης κοκκομέτρησης χωρίς αραιόμετρο (Μπαρδάνης, 2019).....	35
Σχήμα 3.2.6 Ολοκληρωμένη καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης μετά την δοκιμή του αραιόμετρου (Μπαρδάνης, 2019).	36
Σχήμα 3.2.7 Καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης, Μαζαράκι	37
Σχήμα 3.2.8 Συσκευή Casagrande (Μπαρδάνης, 2019).	39
Σχήμα 3.2.9 Παράδειγμα πειραματικής διαδικασίας (Μπαρδάνης, 2019).....	40
Σχήμα 3.2.10 Αρχικά ράβδος πάχους 6mm που στη συνέχεια πλάθεται με γυμνό χέρι ώσπου να φτάσει στα 3mm και να θρυματιστεί. Οι βίδες στις εικόνες είναι 6 και 3mm αντίστοιχα (Μπαρδάνης, 2019).....	40
Σχήμα 3.2.11 Ογκομετρική φιάλη 250ml για τη μέτρηση του ειδικού βάρους της στερεάς φάσης (Μπαρδάνης, 2019).	44
Σχήμα 3.2.12 Διάταξη για υπολογισμό ειδικού βάρους της στερεάς φάσης. Θάλαμοι απαέρωσης συνδεδεμένοι με αντλία κενού (Μπαρδάνης, 2019).....	44
Σχήμα 3.2.13 Πίνακας ταξινόμησης εδαφών κατά USCS (Μπαρδάνης, 2019).....	45
Σχήμα 3.3.1 Εργαστηριακή διάταξη δοκιμής απευθείας διάτμησης (Μπαρδάνης, 2019).....	48
Σχήμα 3.3.2 Διάγραμμα οριζόντιας τάσης με τη παραμόρφωση στο εδαφικό υλικό από το Μαζαράκι και για τα τέσσερα δοκίμια της άμεσης διάτμησης.....	49
Σχήμα 3.3.3 Διάγραμμα κατακόρυφης τάσης με την οριζόντια παραμόρφωση στο εδαφικό υλικό από το Μαζαράκι και για τα τέσσερα δοκίμια της άμεσης διάτμησης (ακολουθείται η σύμβαση προσήμων της εδαφομηχανικής: θετικές παραμορφώσεις είναι οι θλιπτικές).....	49

Σχήμα 3.3.4 Διάγραμμα διατμητικής τάσης με την κατακόρυφη τάση όπως προέκυψε από τη δοκιμή απευθείας διάτμησης στο αναζυμωμένο εδαφικό υλικό από το Μαζαράκι.....	50
Σχήμα 3.4.1 Εργαστηριακή διάταξη θαλάμου μύζησης (Μπαρδάνης, 2019).....	52
Σχήμα 3.4.2 Διαμορφωμένη διάταξη για αναζυμωμένα εδάφη (Μπαρδάνης, 2019).....	52
Σχήμα 3.4.3 Εργαστηριακή διάταξη ζύγισης των παραφινωμένων δοκιμίων.	53
Σχήμα 3.4.4 Θάλαμοι με υγρά διαλύματα KCl_2 και $MgCl_2$	54
Σχήμα 3.4.5 Διάταξη υγρόμετρου ψυχρού κατόπτρου για τον υπολογισμό της ολικής μύζησης (Μπαρδάνης, 2019).	57
Σχήμα 3.4.6 Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb με τον ορισμό των εξής χαρακτηριστικών εντατικών καταστάσεων: α) ιστροπικός εφελκυσμός, β) ανεμπόδιστος εφελκυσμός, γ) θλίψη κατά γενέτειρα, δ) ανεμπόδιστη θλίψη, και ε) τριαξονική θλίψη (Μπαρδάνης, 2019).....	59
Σχήμα 3.4.7 Η διάταξη της συσκευής ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα.	60
Σχήμα 3.4.8 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για όλες τις τιμές μύζησης, Μαζαράκι.	61
Σχήμα 3.4.9 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης αντίστοιχα χωρίς τις δύο μεγαλύτερες τιμές της μύζησης για την πιο λεπτομερή όψη των υπολοίπων καμπύλων, Μαζαράκι.	62
Σχήμα 3.4.10 Κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης ως προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη και τη παραμόρφωση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη αντίστοιχα, Μαζαράκι.	63
Σχήμα 3.4.11 Εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση, χωρίς λογαριθμική (α) και με λογαριθμική κλίμακα (β) για τις τιμές της μύζησης, Μαζαράκι.....	64
Σχήμα 3.4.12 Εξέλιξη της αξονικής παραμόρφωσης στην αστοχία με τη μύζηση, Μαζαράκι.....	65
Σχήμα 3.4.13 Εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας με τη μύζηση, Μαζαράκι.....	65
Σχήμα 3.4.14 Εξέλιξη της αντοχής σε θλίψη κατά γενέτειρα με τη μύζηση, χωρίς λογαριθμική (α) και με λογαριθμική κλίμακα (β) για τις τιμές της μύζησης ,Μαζαράκι.....	67
Σχήμα 3.4.15 Κύκλοι Mohr για την θλίψη κατά γενέτειρα (συνεχής γραμμή) και την ανεμπόδιστη θλίψη (διακεκομμένη γραμμή) για τιμές μύζησης 50-600 kPa. Οι τιμές των αξόνων ενώ θα βοηθούσε να είναι όμοιες για όλες τις τιμές της μύζησης για λόγους σύγκρισης, επιλέχθηκαν για την καλύτερη ευκρίνεια των σχημάτων διαφορετικές τιμές για κάθε τιμή της μύζησης.	69
Σχήμα 3.4.16 Κύκλοι Mohr για την θλίψη κατά γενέτειρα (συνεχής γραμμή) και την ανεμπόδιστη θλίψη (διακεκομμένη γραμμή) για τιμές μύζησης 800-1200 kPa και ξήρανσης στην ατμόσφαιρα. Οι τιμές των αξόνων ενώ θα βοηθούσε να είναι όμοιες για όλες τις τιμές της μύζησης για λόγους σύγκρισης, επιλέχθηκαν για την καλύτερη ευκρίνεια των σχημάτων διαφορετικές τιμές για κάθε τιμή της μύζησης.....	70
Σχήμα 3.4.17 Εξέλιξη της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση, Μαζαράκι.	71
Σχήμα 3.4.18 Εξέλιξη της γωνίας διατμητικής αντοχής με τη μύζηση στο (α) σε μοίρες και στο (β) σε επαπτομένη της γωνίας και ακόμα σε συσχέτιση με το $\varphi=22^\circ$ που είναι	

η γωνία διατμητικής αντοχής που υπολογίστηκε από την δοκιμή άμεσης διάτμησης και είναι σταθερή ασχέτως μύζησης βάση του κριτηρίου Mohr-Coulomb.	72
Σχήμα 3.4.19 Εξέλιξη (α) της γωνίας διατμητικής αντοχής και (β) της αντοχής σε ανεμπόδιστη και θλίψη κατά γενέτειρα με τη μύζηση που φανερώνει την εκάστοτε υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση της γωνίας διατμητικής αντοχής λόγω υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη ενώ η εξέλιξη της αντοχής σε θλίψη κατά γενέτειρα μοιάζει να είναι ομαλή.	73
Σχήμα 3.4.20. Εξέλιξη της γωνία μεταβολής της αντοχής με τη μύζηση ϕ_b με την γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' του αντίστοιχου εδαφικού υλικού πλήρως κορεσμένου.	75
Σχήμα 3.4.9 Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού του αναζυμωμένου υλικού από το Μαζαράκι.	78
Σχήμα 4.1.1 Κυκλική επιφάνεια αστοχίας εδάφους (Ιωάννου, 2020).	81
Σχήμα 4.2.1 Τυπική λωρίδα με φορτία στη συνήθη μέθοδο λωρίδων (Duncan, et al.,2014).	82
Σχήμα 4.2.2 Τυπική λωρίδα με φορτία για την απλοποιημένη μέθοδο Bishop (Duncan, et al.,2014).	83
Σχήμα 4.2.3 Τυπική λωρίδα με δυνάμεις για τις μεθόδους ανάλυσης μόνο με ισορροπία δυνάμεων (Duncan, et al.,2014).	84
Σχήμα 4.2.4 Διορθωτικοί συντελεστές για την απλοποιημένη μέθοδο Janbu (Duncan, et al., 2014).	85
Σχήμα 4.2.5 Τρεις βασικές υποθέσεις για την θεώρηση της κλίσης των δυνάμεων μεταξύ λωρίδων για τη μέθοδο U.S. Army Corps of Engineers' Modified Swedish (Duncan, et al.,2014).	86
Σχήμα 4.2.6 Συντεταγμένες για χρήση σε μη κυκλικές επιφάνειες με τη μέθοδο Spencer (1967) (Duncan, et al.,2014).	87
Σχήμα 4.2.7 Τυπική λωρίδα για τη μέθοδο Spencer (1967) με γνωστές δυνάμεις και με F_x = άθροισμα όλων των γνωστών οριζόντιων δυνάμεων και F_y = άθροισμα όλων των γνωστών κατακόρυφων δυνάμεων (Duncan, et al.,2014).	87
Σχήμα 4.2.8 Ζώνες τιμών για τη συνάρτηση $f(x)$ λαμβάνοντας υπόψη τις πιέσεις που ασκούνται από το έδαφος (Duncan, et al.,2014).	89
Σχήμα 4.3.1 Ενδεικτική απεικόνιση συνθηκών υπόγειου ορίζοντα σε εκδηλωθείσες κατολισθήσεις: α) με τον υπόγειο ορίζοντα «ψηλά», δηλαδή με ελάχιστο τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης να υπόκειται σε αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση, και β) με τον υπόγειο ορίζοντα «χαμηλά», δηλαδή με σημαντικό τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης να υπόκειται σε αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση (Μπαρδάνης, 2019).	94
Σχήμα 5.2.1 Γεωμετρικό μοντέλο για $H=5m$	99
Σχήμα 5.2.2 Γεωμετρικό μοντέλο για $H=10m$	100

Σχήμα 5.2.3 Γεωμετρικό μοντέλο για $H=15m$	100
Σχήμα 5.2.4 Γεωμετρικό μοντέλο για $H=20m$	100
Σχήμα 5.3.1 Αρνητικές πιέσεις πόρων για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 20m στο μοντέλο με $H=10m$	101
Σχήμα 5.3.2 Αρνητικές πιέσεις πόρων για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 15m στο μοντέλο με $H=10m$	102
Σχήμα 5.3.3 Αρνητικές πιέσεις πόρων για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 10m στο μοντέλο με $H=10m$	102
Σχήμα 5.3.4 Αρνητικές πιέσεις πόρων για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 5m στο μοντέλο με $H=10m$	103
Σχήμα 5.3.5 Συνθήκες (steady state) μόνιμης ροής (αλλαγή κλίσης στην τιμή πίεσης διείσδυσης αέρα).	104
Σχήμα 5.4.1 Συντελεστής και επιφάνεια αστοχίας για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 20m στο μοντέλο με $H=10m$ και $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,461$	105
Σχήμα 5.4.2 Συντελεστής και επιφάνεια αστοχίας για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 15m στο μοντέλο με $H=10m$ και $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,461$	106
Σχήμα 5.4.3 Συντελεστής και επιφάνεια αστοχίας για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 10m στο μοντέλο με $H=10m$ και $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,461$	106
Σχήμα 5.4.4 Συντελεστής και επιφάνεια αστοχίας για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 5m στο μοντέλο με $H=10m$ και $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,461$	107
Σχήμα 5.4.5 Συντελεστής ασφαλείας προς το βάθος υπόγειου ορίζοντα σε όλα τα μοντέλα με $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,461$ και σε σύγκριση με την περίπτωση, χωρίς υδροφόρο ορίζοντα και με τον υδροφόρο ορίζοντα στην επιφάνεια του πρανούς.	108
Σχήμα 5.4.6 Συντελεστής ασφαλείας προς το βάθος υπόγειου ορίζοντα σε όλα τα μοντέλα με $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,26$ και σε σύγκριση με την περίπτωση, χωρίς υδροφόρο ορίζοντα και με τον υδροφόρο ορίζοντα στην επιφάνεια του πρανούς.	108
Σχήμα 5.4.7 Συντελεστής ασφαλείας προς το βάθος υπόγειου ορίζοντα σε όλα τα μοντέλα με $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,086$ και σε σύγκριση με την περίπτωση, χωρίς υδροφόρο ορίζοντα και με τον υδροφόρο ορίζοντα στην επιφάνεια του πρανούς.	109
Σχήμα 5.5.1 Συντελεστής ασφαλείας προς την πίεση διείσδυσης αέρα για βάθος υπογείου ορίζοντα ίσο με 5m για το μοντέλο με ύψος πρανούς $H=10m$ και $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,461$	111

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ

Φωτογραφία 3.2.1 Φόρμες γραμμικής συρρίκνωσης μετά από ξήρανση στην ατμόσφαιρα.....	41
Φωτογραφία 3.2.2 Φόρμες γραμμικής συρρίκνωσης μετά από ξήρανση στους 60°C.	42
Φωτογραφία 3.2.3 Φόρμες γραμμικής συρρίκνωσης μετά από ξήρανση στους 110°C. ...	42

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πιν. 3.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών κατάταξης και προσδιορισμού εξέλιξης αντοχής με την μύζηση από Μπαρδάνη (2016), αρχείο ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. και παρούσα διπλωματική.	74
Πιν. 3.2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών που αφορούν τη διερεύνηση της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους-Νερού όπου s είναι η μύζηση, w το ποσοστό υγρασίας, e ο λόγος κενών, Sr ο βαθμός κορεσμού και θ το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, Μαζαράκι.	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ευστάθεια πρανών είναι ένα από τα βασικά προβλήματα που αφορούν τους γεωτεχνικούς μηχανικούς. Η μικρή ή και μεγάλη αστοχία ενός πρανούς συχνά αποτελεί μεγάλης τάξης ζημιά είτε αυτή αφορά οικονομικούς παράγοντες είτε κοινωνικούς. Είναι πολλά τα παραδείγματα που σε υπάρχουσες κατασκευές η αστοχία εδαφικού πρανούς έχει επιφέρει καταστροφικά αποτελέσματα για τον άνθρωπο.

Εκτός από τη σχέση δυνάμεων βαρύτητας και διατμητικής αντοχής, υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες που καθορίζουν την ευστάθεια των πρανών όπως είναι οι σεισμοί, οι έντονες βροχοπτώσεις, τα διάφορα αναπτυξιακά έργα για τα οποία ο άνθρωπος προβαίνει σε εκσκαφές-επιχωματώσεις-υδροδοτήσεις-αρδεύσεις που προκαλούν την αλλοίωση στο φυσικό καθεστώς μιας περιοχής.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική ωστόσο εξετάστηκε η επιρροή του μερικού κορεσμού των εδαφών και πως εξελίσσονται τα χαρακτηριστικά διατμητικής αντοχής τους με τον βαθμό κορεσμού τους. Μη κορεσμένα εδάφη, δηλαδή εδάφη με βαθμό κορεσμού (τον λόγο του όγκου των κενών τους που καταλαμβάνεται από νερό προς τον συνολικό όγκο των κενών τους) μικρότερο από 100% επιδεικνύουν μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με τα ίδια εδάφη όταν είναι πλήρως κορεσμένα με νερό. Στη φύση εμφανίζονται ως αποτέλεσμα θερμών και ξηρών κλιματολογικών συνθηκών που δρουν στην επιφάνεια του εδάφους αλλά μπορεί να κορεστούν πλήρως όταν οι κλιματολογικές συνθήκες (συνηθέστερη η βροχόπτωση) επιβάλλουν τέτοιες συνθήκες. Αντικειμενικός σκοπός της παρούσας

διπλωματικής εργασίας ήταν να επιδειχθεί η επιρροή που έχει ο βαθμός κορεσμού (και η αρνητική πίεση πόρων/μύζηση που αναπτύσσεται στα εδάφη ως αποτέλεσμα του) στην ευστάθεια πρανών. Για να επιδειχθεί αυτή η επιρροή στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική διερεύνηση, εργαστηριακές δοκιμές μέτρησης της μεταβολής της διατμητικής αντοχής ενός εδαφικού υλικού λόγω μερικού κορεσμού και παραμετρικές διερευνήσεις μέσω αναλύσεων ευσταθείας με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας στις οποίες εισήχθη η επιρροή του βαθμού κορεσμού.

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

1.2 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικειμενικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν να επιδειχθεί η επιρροή που έχει ο βαθμός κορεσμού (και η αρνητική πίεση πόρων/μύζηση που αναπτύσσεται στα εδάφη ως αποτέλεσμα του) στην ευστάθεια πρηνών. Για να μπορέσει να γίνει αυτό αρχικά απαιτήθηκε η κατανόηση της φύσης των μη κορεσμένων εδαφών και της μηχανικής τους συμπεριφοράς όπως αυτή είναι αποτυπωμένη στη διεθνή βιβλιογραφία. Στη συνέχεια διενεργήθηκε εκτενής πειραματική διερεύνηση σε αργιλοϊλύ από το Μαζαράκι του Νομού Ιωαννίνων με τον εργαστηριακό εξοπλισμό που διατέθηκε για αυτή τη μελέτη από το Εργαστήριο της Έδαφος Α.Ε.. Στη συνέχεια για την κατανόηση των αναλύσεων ευστάθειας με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας απαιτήθηκε ομοίως μελέτη για τις διάφορες μεθοδολογίες που αξιοποιούνται για αυτές τις αναλύσεις, τις διάφορες μεθόδους λωρίδων και τέλος πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές διερευνήσεις μέσω αναλύσεων ευσταθείας με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας στις οποίες εισήχθη η επιρροή του βαθμού κορεσμού. Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω παρατίθενται στη συνέχεια.

1.3 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ακολουθεί περιγραφή των περιεχομένων της διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο.

Στο Κεφάλαιο 2, περιγράφεται η φύση και οι ιδιαιτερότητες των μη κορεσμένων εδαφών. Παρουσιάζεται και επεξηγείται η εμφάνιση της μύζησης στα εδάφη αυτά, η συνύπαρξη της υγρής με την αέρια φάση, όπως και οι πιέσεις πόρων και πως αυτές αλλάζουν. Ακόμα, παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού η οποία αποτελεί την κεντρική έννοια για την κατανόηση αλλά και τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και η μορφή της καθορίζει την εξέλιξη των μεταβολών όγκου, της διατμητικής αντοχής και του συντελεστή διαπερατότητας ως προς την υγρή και την αέρια φάση συναρτήσει της μύζησης. Τέλος, γίνεται αναφορά στα μηχανικά χαρακτηριστικά των μη κορεσμένων εδαφών

και πως αυτά επηρεάζονται από τον βαθμό κορεσμού όπως καταγράφεται στην ελληνική και τη διεθνή βιβλιογραφία.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργαστηριακής διερεύνησης που πραγματοποιήθηκε. Έγιναν εργαστηριακές δοκιμές πλήρους κατάταξης για το εδαφικό υλικό από το Μαζαράκι με στόχο την κατηγοριοποίησή του βάσει αυτών. Ακόμα εκτελέστηκε δοκιμή απευθείας διάτμησης σε αντίστοιχο αναζυμωμένο υλικό για τον υπολογισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του σε συνθήκες πλήρους κορεσμού. Στη συνέχεια επεξηγείται η μέθοδος μετατόπισης άξονα ως μέθοδος ελέγχου της μύζησης. Με το συνδυασμό δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε δοκίμια υποβεβλημένα στην ίδια τιμή μύζησης και τη χρήση των περιβαλλουσών αστοχίας τους κατά Mohr-Coulomb, διαπιστώθηκε η εξέλιξη της αντοχής και συγκεκριμένα της συνοχής του εδάφους με την αύξηση της μύζησης. Τέλος, παρουσιάζεται η πλήρης χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού για το υλικό της διερεύνησης.

Στο Κεφάλαιο 4, επεξηγείται η μέθοδος οριακής ισορροπίας και γίνεται εκτενής αναφορά στις διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης με λωρίδες. Στο τέλος χάριν πληρότητας παρουσιάζεται και η σχέση που έχει η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής με τον βαθμό κορεσμού και τη σημασία που έχει αυτό στις αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας.

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται οι αναλύσεις ευστάθειας που έγιναν με τη χρήση σχετικού λογισμικού (Slide 5.02 της RocScience) και για τις οποίες αξιοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα της εργαστηριακής διερεύνησης για την επιλογή των χαρακτηριστικών του εδάφους που διερευνήθηκαν. Η σχετική παραμετρική διερεύνηση περιελάμβανε τη διερεύνηση του μεγέθους της μύζησης μέσω του βάθους του υπόγειου ορίζοντα από την επιφάνεια του εδάφους, του ύψους των πρανών, του λόγου της εφαπτομένης της γωνίας αύξησης της μύζησης προς την εφαπτομένη της γωνίας διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου εδάφους και της πίεσης διείσδυσης αέρα των εδαφικών υλικών. Τα γεωμετρικά προσομοιώματα δημιουργήθηκαν με λογικές θεωρήσεις για την ευστάθεια των πρανών σε συνθήκες μη ύπαρξης υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και στη συνέχεια σε τέτοια ποικιλία ώστε να μπορεί να εξεταστεί και να καταγραφεί η επιρροή του ύψους των πρανών και του βάθους του υπόγειου ορίζοντα. Προκειμένου το βάθος

του υπόγειου ορίζοντα να μεταφραστεί σε ένα πεδίο τιμών μύζησης που να μπορεί να εισαχθεί στο πρόγραμμα αναλύσεων ευσταθείας με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας, χρησιμοποιήθηκε η διαμόρφωση προσδιορισμού καθεστώτος πιέσεων πόρων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που ενσωματώνει το πρόγραμμα Slide 5.02 εισάγοντας διάφορους συνδυασμούς οριακών συνθηκών σε σχέση με την υπόγεια ροή για την περιγραφή υπογείων οριζόντων σε διαφορετικά βάθη.

Στο Κεφάλαιο 6 τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας σε ό,τι αφορά την επιρροή της μύζησης των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών στην διατμητική αντοχή και στην ευστάθεια πρανών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η ΦΥΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

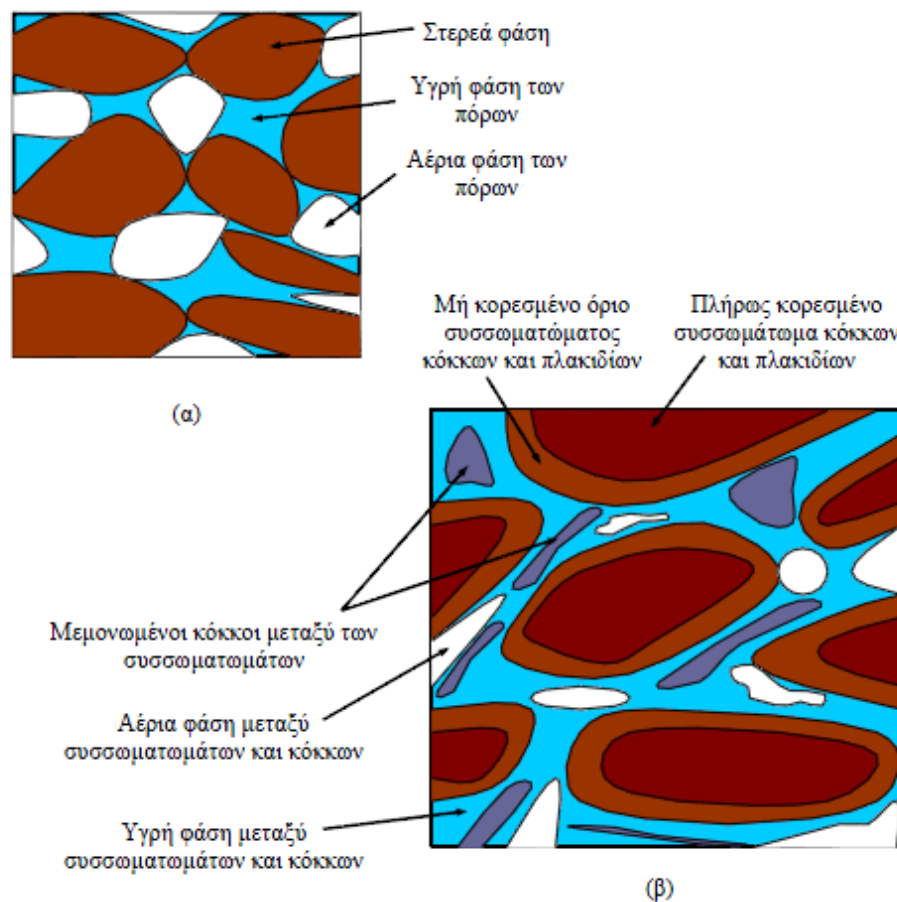
Μη κορεσμένο ονομάζεται το έδαφος για το οποίο ο βαθμός κορεσμού, δηλαδή ο λόγος του όγκου των κενών του που πληρούνται με νερό προς τον συνολικό όγκο των κενών του, είναι μεταξύ της μονάδας και του μηδενός. Στον ελλαδικό χώρο η διερεύνηση τους είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς κατά κύριο λόγο είναι μη κορεσμένα τα εδάφη που συναντώνται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Η ελλιπής διερεύνηση τους σήμερα προκύπτει από το γεγονός ότι :

- η επιστήμη της εδαφομηχανικής αναπτύχθηκε σε περιοχές (Βόρεια Ευρώπη , Βόρεια Αμερική) στις οποίες οι κλιματικές συνθήκες διατηρούν τα εδάφη πλήρως κορεσμένα
- η φύση και η μελέτη της μη κορεσμένης φάσης των εδαφών είναι πολύ πιο δύσκολη στην κατανόηση, πιο χρονοβόρα και αντιοικονομική καθώς και
- ότι η αρχική θεώρηση του πλήρως κορεσμένου εδάφους είναι σε γενικές γραμμές υπέρ της ασφάλειας με χαρακτηριστικό παράδειγμα την μείωση της διατμητικής αντοχής με την παράλληλη αύξηση του βαθμού κορεσμού του εδάφους.

Ωστόσο η, με τα χρόνια, εμβάθυνση στην επιστήμη της εδαφομηχανικής και σε χώρες που τα μη κορεσμένα εδάφη υπάρχουν σε μεγάλο βαθμό, είτε σε έργα τα οποία καθιστούν τα υποκείμενα εδάφη μη κορεσμένα (αρχικά μη κορεσμένες συμπυκνωμένες επιχώσεις, σχεδιαζόμενοι υπόγειοι χώροι ταφής πυρηνικών αποβλήτων με την εκπομπή θερμότητας που προκαλούν), έχει προκύψει η ανάγκη μελέτης και έρευνας των ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών. Και η ανάγκη αυτή προκύπτει καθώς η βέλτιστη σχεδιαστική λύση από πλευράς οικονομίας και χρόνου γίνεται όλο και πιο σημαντική σήμερα. Υπάρχει όμως και ένας ακόμα λόγος που αυτή η έρευνα είναι σημαντική. Η θεώρηση των εδαφών ως πλήρως κορεσμένων, και στην περίπτωση που δεν είναι, ως θεώρηση υπέρ της ασφάλειας οδηγεί στο ακριβώς αντίθετο αποτέλεσμα όταν κάνουμε αντίστροφες αναλύσεις με αποτέλεσμα την υποδιαστασιολόγηση ενός έργου, γεγονός με το οποίο θα ασχοληθούμε και σε επόμενο κεφάλαιο.

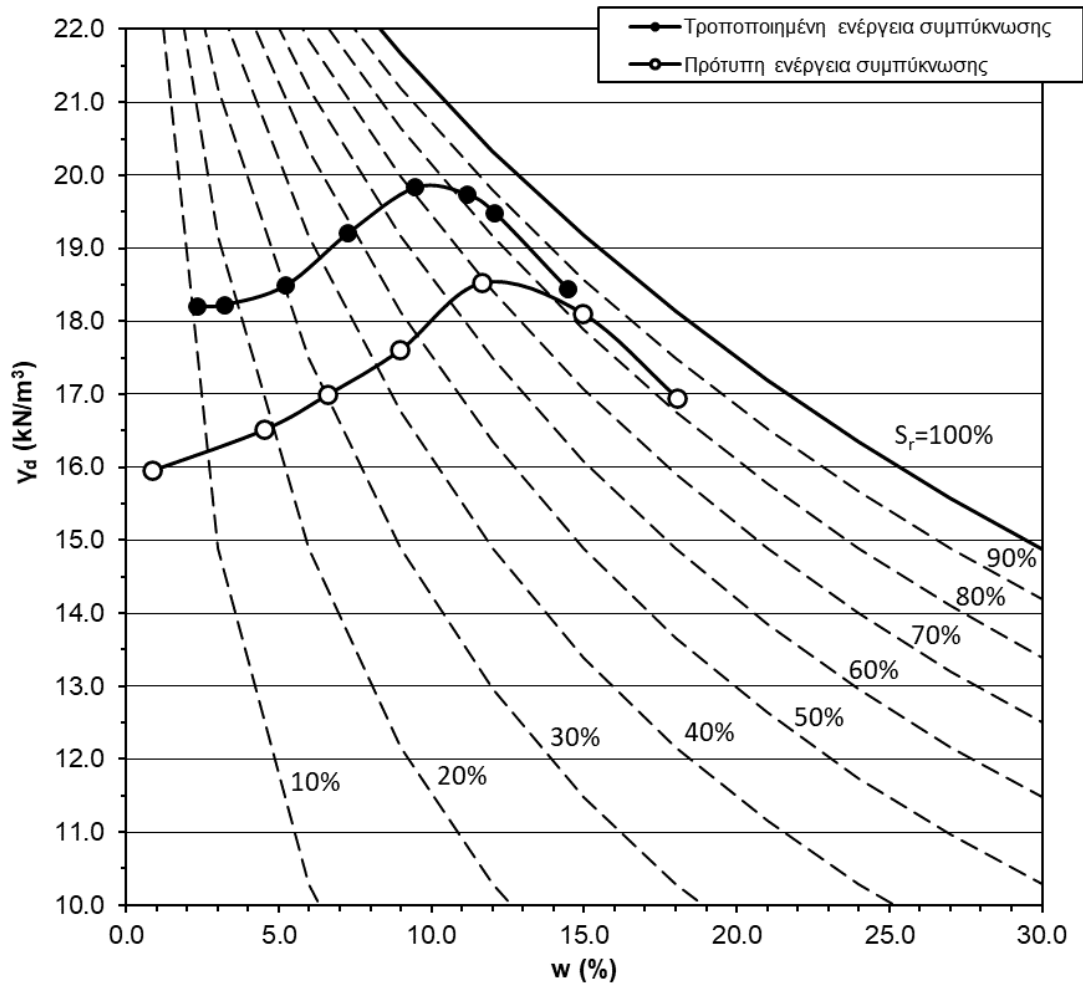
2.2 ΒΑΘΜΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ. Ορισμός και ονομασία εδαφών ως προς τις τιμές του

Βαθμός κορεσμού S_r ονομάζεται ο λόγος του όγκου των κενών που είναι γεμάτα με νερό V_w προς τον συνολικό όγκο των κενών του εδαφικού υλικού V_k και έχει τιμές από 0% για πλήρως ξηρό υλικό έως 100% για πλήρως κορεσμένο. Για οποιαδήποτε άλλη ενδιάμεση τιμή το έδαφος είναι γενικά μη κορεσμένο και διαχωρίζεται σε δύο διαφορετικές ομάδες. Τα μη κορεσμένα ή ακόρεστα εδάφη τα οποία είναι ομοιογενή ως προς τον βαθμό κορεσμού τους. Τέτοια είναι συνήθως εδαφικά υλικά με ομοιογενές μέγεθος πόρων. Η δεύτερη ομάδα είναι τα μερικώς κορεσμένα στα οποία υπάρχει ανομοιογένεια ως προς την τιμή του βαθμού κορεσμού τους δηλαδή υπάρχουν σημεία που μπορεί να είναι πλήρως κορεσμένα, μερικώς ή και εντελώς ξηρά. Αυτά τα χαρακτηριστικά συναντώνται σε εδάφη με αντίστοιχα ανομοιογενές μέγεθος πόρων τα οποία συνήθως είναι τεχνητά κατασκευασμένα όπως τα συμπυκνωμένα εδάφη (σπάνια συναντώνται σε φυσικά εδάφη).



Σχήμα 2.2.1 Ιδεατή απεικόνιση α) μη κορεσμένου και β) μερικώς κορεσμένου εδάφους (Μπαρδάνης, 2016).

Στη φύση τα εδάφη συναντώνται κορεσμένα ή μη κορεσμένα ανάλογα με την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτά που υπόκεινται του υδροφόρου ορίζοντα είναι προφανώς τα πλήρως κορεσμένα. Στην επιφανειακή ζώνη που είναι άνω του υδροφόρου ορίζοντα, όπου εκεί τα φαινόμενα της διαπνοής και της εξάτμισης υπερτερούν της κατείσδυσης, συναντούμε τα μη κορεσμένα εδάφη. Μία βασική κατηγορία ακόμα που συναντούμε μη κορεσμένα εδάφη είναι τα συμπυκνωμένα εδάφη, τα οποία είναι πάντα μη κορεσμένα μέχρι την εφαρμογή σημαντικών υπερκειμένων από πάνω τους ή την κατείσδυση υδάτων (τυπική περίπτωση τα συμπυκνωμένα υλικά χωμάτων φραγμάτων). Ενδεικτικά παρατίθενται στο Σχ. 2.2.2 οι καμπύλες ξηρού φαινόμενου βάρους-ποσοστού υγρασίας από δοκιμές συμπύκνωσης Proctor με την πρότυπη και τροποποιημένη ενέργεια συμπύκνωσης στο ίδιο εδαφικό υλικό (το συγκεκριμένο υλικό ήταν αργιλοϊλύς χαμηλής πλαστικότητας -CL- με λεπτόκοκκη και μεσόκοκκη άμμο). Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, ακόμα και για ποσοστά υγρασίας μεγαλύτερα από το ποσοστό βέλτιστης υγρασίας διατηρείται και για τις δύο ενέργειες συμπύκνωσης βαθμός κορεσμού μικρότερος από 100%, όπως φαίνεται από την σύγκριση των καμπυλών ξηρού φαινόμενου βάρους-ποσοστού υγρασίας και των ισοβαρών ίσου βαθμού κορεσμού για το ειδικό βάρος στερεών του συγκεκριμένου υλικού που παρατίθενται στο σχήμα.



Σχήμα 2.2.2. Καμπύλες ξηρού φαινομένου βάρους-ποσοστού υγρασίας από δοκιμές συμπίκνωσης Proctor με την πρότυπη και τροποποιημένη ενέργεια συμπίκνωσης στο ίδιο εδαφικό υλικό (το συγκεκριμένο υλικό ήταν αργιλοίλυσ χαμηλής πλαστικότητας -CL- με λεπτόκοκκη και μεσόκοκκη άμμο) -πηγή: Αρχείο δοκιμών ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.

2.3 ΜΥΖΗΣΗ. Ορισμός και κατηγορίες

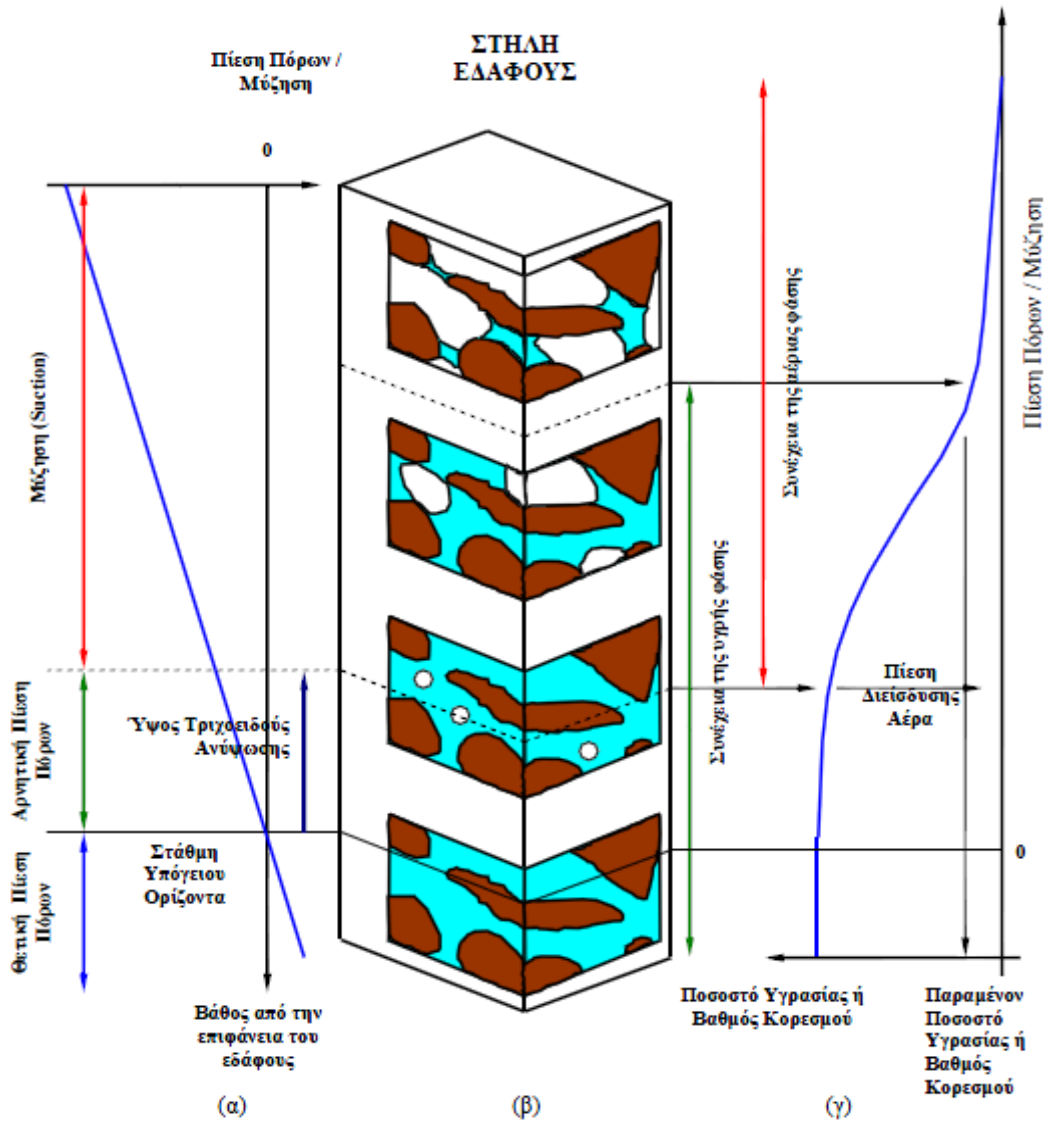
Η ιδιαιτερότητα των μη κορεσμένων εδαφών αφορά τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, δηλαδή την διατμητική αντοχή τους, τις μεταβολές όγκου τους και τη διαπερατότητά τους και πως αυτά μεταβάλλονται ανάλογα με τον βαθμό κορεσμού του εδάφους σε σχέση και με τα φυσικά χαρακτηριστικά των εδαφών. Το φαινόμενο που εμφανίζεται και είναι υπαίτιο για όλες αυτές τις μεταβολές στη συμπεριφορά των εδαφών είναι η μύζηση. Όταν έχουμε συνθήκες μερικού κορεσμού αυτό που συμβαίνει είναι ότι στο εδαφικό μας υλικό συνυπάρχει η υγρή με την αέρια φάση στους πόρους τους και αυτές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αν ονομάσουμε τη πίεση που ασκεί η αέρια φάση u_a και τη πίεση που ασκεί

η υγρή φάση u_w , η διαφορά τους $u_a - u_w$ ονομάζεται μύζηση και συμβολίζεται με s , ή ψ . Αυτό που εκφράζει φυσικά η μύζηση είναι η αντίσταση ενός μη κορεσμένου εδάφους στην περαιτέρω αφαίρεση νερού από τους πόρους του και διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: α) την μύζηση εδαφικού σκελετού που εκφράζει την αντίσταση ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού στην περαιτέρω απώλεια νερού από τους πόρους του λόγω τριχοειδών φαινομένων εντός αυτών, β) την ωσμωτική μύζηση που εκφράζει την αντίσταση ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού στην περαιτέρω απώλεια νερού από τους πόρους του λόγω ώσμωσης του νερού των πόρων εξαιτίας της διάλυσης ιόντων σε αυτό. Ο συνδυασμός των δύο αυτών ονομάζεται -ολική μύζηση που εκφράζει το σύνολο της αντίστασης ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού στην περαιτέρω απώλεια νερού από τους πόρους του λόγω ωσμωτικών και τριχοειδών φαινομένων. Τα παραπάνω επεξηγούνται στη συνέχεια.

2.4 ΠΙΕΣΕΙΣ ΠΟΡΩΝ

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να δοθεί μια καλύτερη εικόνα για το τι συμβαίνει μέσα στους εδαφικούς πόρους, τι πιέσεις ασκούνται και πως αυτές αλλάζουν με την αλλαγή των συνθηκών στο οποίο βρίσκεται το έδαφος. Το βασικό χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα μη κορεσμένα εδάφη λοιπόν είναι η εντατική κατάσταση στη υγρή φάση των πόρων η οποία προκαλείται από το μερικό αυτό κορεσμό. Στα πλήρως κορεσμένα εδάφη, κάτω από την επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα, η μοναδική ρευστή φάση είναι η υγρή και σε αυτήν αναπτύσσεται θετική (θλιπτική) πίεση πόρων. Στα εδάφη που βρίσκονται πάνω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα όπως είπαμε και προηγουμένως μπορεί να υπάρχει μόνο υγρή φάση στους πόρους ή να συνυπάρχει υγρή με αέρια. Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο η υγρή φάση η πίεση πόρων που αναπτύσσεται είναι αρνητική.

Στην ύπαρξη λοιπόν μόνο υγρής φάσης η αρνητική πίεση πόρων προστίθεται στην ολική τάση για την εύρεση της ενεργού τάσης (αυξημένης ενεργού τάσης). Από εκεί και πέρα ανάλογα με τη φύση του εδάφους, το πάχος της μη κορεσμένης ζώνης και τις συνθήκες που επιδρούν στην επιφάνεια του εδάφους αρχίζει να συνυπάρχει, σε ορισμένο ύψος πάνω από τη στάθμη του υπογείου ορίζοντα, η υγρή με την αέρια φάση στην οποία περίπτωση την εντατική κατάσταση περιγράφει το φαινόμενο η μύζηση (Σχ. 2.4.1).



Σχήμα 2.4.1 Στήλη εδάφους με την εξέλιξη της συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης (β), την κατανομή της πίεσης πόρων (α) και την εξέλιξη του ποσοστού υγρασίας ή του βαθμού κορεσμού (γ) με την απόσταση από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα (Μπαρδάνης, 2016) .

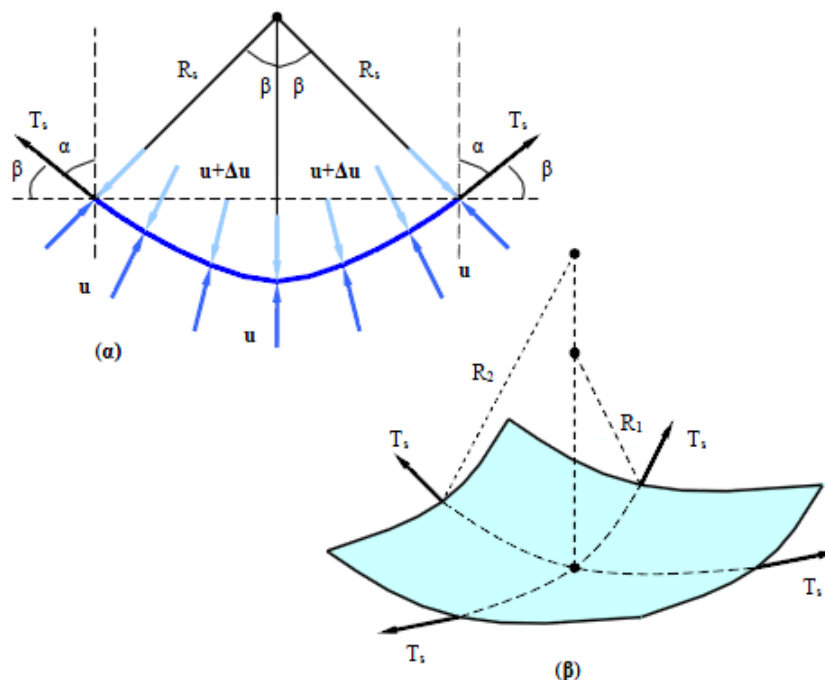
2.5 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΜΕΙΩΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ

2.5.1 Γενικά

Εάν αγνοήσουμε τα αδρανειακά φαινόμενα, τη βαρύτητα και τη θερμοκρασία οι κύριοι μηχανισμοί που μειώνουν το δυναμικό του νερού (την ενέργεια του νερού) είναι τα τριχοειδή φαινόμενα, τα ωσμωτικά φαινόμενα και τα φαινόμενα προσρόφησης (δυνάμεις μεταξύ σωματιδίων στερεής και υγρής φάσης). Τριχοειδή φαινόμενα συναντάμε μόνο σε μη κορεσμένα εδάφη ενώ τα άλλα δύο και στις δύο περιπτώσεις.

2.5.2 Τριχοειδή Φαινόμενα

Πιο συγκεκριμένα τα τριχοειδή φαινόμενα περιλαμβάνουν την καμπύλωση που δημιουργείται στην διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης λόγω των αρνητικών πιέσεων πόρων στην υγρή φάση των μη κορεσμένων εδαφών. Οφείλεται στην συνύπαρξη υγρής και αέριας φάσης και ποικίλει ανάλογα με την κοκκομετρία των εδαφικών υλικών (Σχ. 2.5.1).



Σχήμα 2.5.1 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος καμπυλωμένης διεπιφάνειας υγρής-αέριας φάσης α) σε δύο διαστάσεις, και β) σε τρεις διαστάσεις με διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας σε δύο επίπεδα (Μπαρδάνης, 2016).

2.5.3 Ωσμωτικά Φαινόμενα

Τα ωσμωτικά φαινόμενα οφείλονται στην παρουσία διαλυμένων ουσιών στην υγρή φάση των πόρων. Οι ουσίες αυτές μπορούν να προκύψουν είτε από την εξωτερική παροχή διαλυμένων ουσιών με φυσική διαδικασία όπως τη διήθηση είτε με εσωτερική παροχή τους από τη διαδικασία ανταλλαγής ιόντων από την κρυσταλλική δομή των αργίλων με τα μόρια του νερού στους πόρους. Η παρουσία αυτών των διαλυμένων ουσιών μειώνει περαιτέρω το δυναμικό της υγρής φάσης σε σχέση με αυτό του ελεύθερου νερού (χημική συνιστώσα).

2.5.4 Φαινόμενα Προσρόφησης

Τα φαινόμενα προσρόφησης οφείλονται κυρίως στα πεδία δυνάμεων που δημιουργούνται λόγω ηλεκτρικών φορτίων και δυνάμεων van der Waals σε πολύ μικρή απόσταση από τη διεπιφάνεια υγρής-στερεάς φάσης και έχουν μεγαλύτερη σημασία για λεπτόκοκκα εδάφη. Τα ηλεκτρικά φορτία αναπτύσσονται από τα ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται μεταξύ της επιφάνειας των αρνητικά φορτισμένων αργιλικών πλακιδίων. Οι δυνάμεις van der Waals από την άλλη δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση, σε ατομικό επίπεδο, δυνάμεων των μορίων που απαρτίζουν την επιφάνεια της στερεής και της υγρής φάσης και εμφανίζονται σε όλα τα εδαφικά υλικά. Τα φαινόμενα αυτά τα συναντάμε πιο έντονα σε αργιλικά εδάφη που τα κενά είναι μικρά μεταξύ των πλακιδίων και ειδικά σε χαμηλά ποσοστά κορεσμού, όπως θα δούμε, όπου η υγρή φάση συναντάται σε λεπτές στρώσεις. Αντίθετα μειώνονται τα φαινόμενα προσρόφησης σε εδαφικά υλικά μεγάλης κοκκομετρικής διαβάθμισης που τα κενά (αποστάσεις στερεών σωματιδίων) είναι μεγάλα.

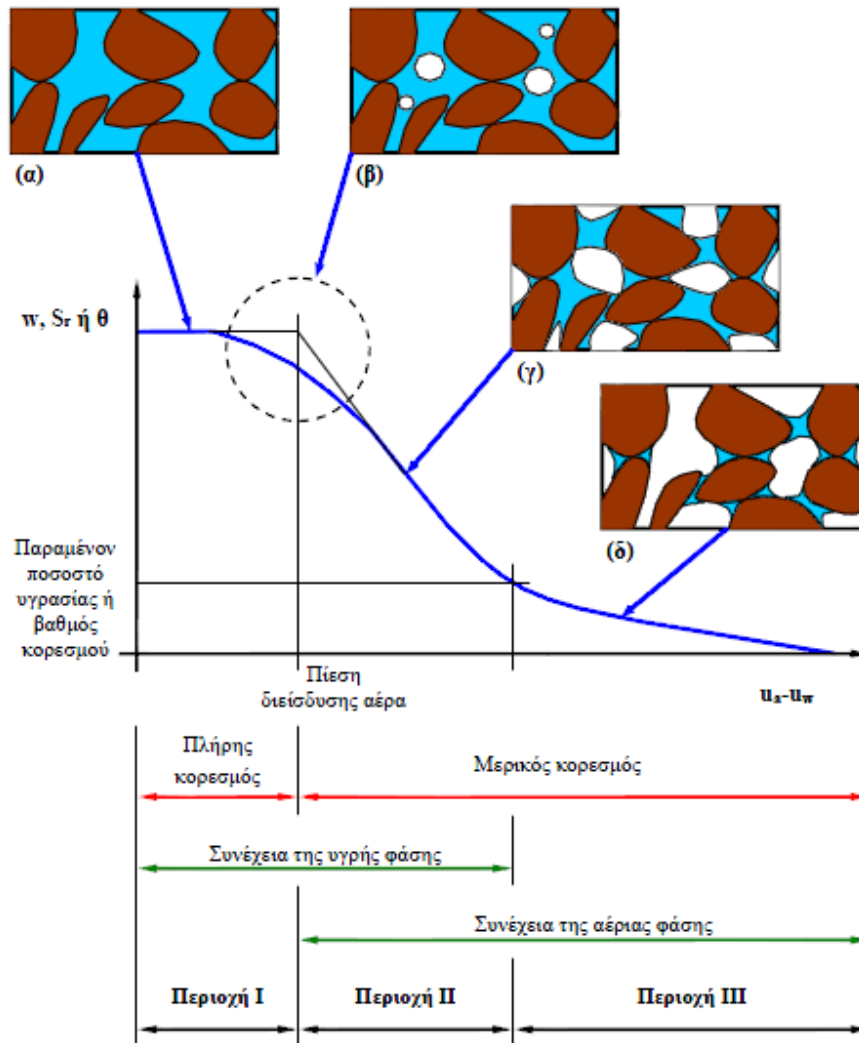
2.5.5 Είδη Μύζησης

Η μύζηση που οφείλεται σε φαινόμενα τριχοειδή και προσρόφησης είναι η μύζηση του εδαφικού σκελετού ενώ η μύζηση που οφείλεται σε ωσμωτικά φαινόμενα ονομάζεται ωσμωτική μύζηση. Το σύνολο της μύζησης ενός εδαφικού υλικού από όλα τα παραπάνω φαινόμενα είναι η ολική μύζηση.

2.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ

Για την περαιτέρω κατανόηση της εξέλιξης της συνύπαρξης της υγρής με την αέρια φάση και της καλύτερης κατανόησης των προαναφερθέντων φαινομένων, βασική έννοια αποτελεί η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Η καμπύλη αυτή έχει στον οριζόντιο άξονα την αρνητική πίεση των πόρων/μύζηση και στον κατακόρυφο τον βαθμό κορεσμού. Αρχικά υπό τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα το εδαφικό υλικό είναι πλήρως κορεσμένο και όπως προαναφέρθηκε θα έχει θετική πίεση πόρων στην υγρή φάση. Στη συνέχεια συναντάει το πρώτο σημείο καμπής της καμπύλης το οποίο αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή του ύψους της τριχοειδούς ανύψωσης. Μέχρι εκείνο το σημείο η υγρή φάση είναι η μόνη συνεχής φάση και δεν υπάρχει αέρας. Η πίεση πόρων του νερού παραμένει αρνητική και γενικά το εδαφικό δοκίμιο παραμένει πλήρως κορεσμένο. Από εκεί και μετά ξεκινά η προοδευτική στραγγίση του δοκιμίου ξεκινώντας από τους μεγαλύτερους πόρους. Η υγρή φάση παραμένει αρχικά συνεχής, ενώ προοδευτικά γίνεται συνεχής και η αέρια φάση. Καθώς στραγγίζουν όλο και περισσότερο οι πόροι, οι κόκκοι και τα πλακίδια του εδαφικού υλικού έρχονται πιο κοντά και ακολουθούν μια διαδικασία που εξηγείται από τις προβλέψεις του ωσμωτικού προσομοιώματος καταλήγοντας σε ένα ποσοστό παραμένουσας υγρασίας (Σχ. 2.6.1). Το νερό που είναι εγκλωβισμένο στα τοιχώματα των μικρών πόρων σε αυτή την κατάσταση δεν μπορεί να απομακρυνθεί από φυσική ξήρανση. Χρειάζεται είτε να εξασκήσουμε μεγάλες δυνάμεις στο νερό των πόρων για να το στραγγίσουμε είτε να το τοποθετήσουμε σε φούρνο ξήρανσης. Αυτό λοιπόν είναι το δεύτερο σημείο καμπής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού.

Η σπουδαιότητα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού έγκειται στο ότι μας επιτρέπει να ομαδοποιήσουμε τα χαρακτηριστικά των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών, αφού μη κορεσμένο είναι και το υλικό που έχει βαθμό κορεσμού 99% και εκείνο που έχει 1%, για τις οποίες τιμές όπως θα δούμε έχουμε και μεγάλες αλλαγές στα χαρακτηριστικά του υλικού, αλλά μπορούν αυτές οι καταστάσεις από πλευράς βαθμού κορεσμού να απεικονιστούν στην ίδια καμπύλη.



Σχήμα 2.6.1 Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού με τα ονομαστικά όρια πλήρους και μερικού κορεσμού, τα όρια της συνέχειας της κάθε ρευστής φάσης και την ποιοτική απεικόνιση της συνύπαρξης στερεάς, υγρής και αέριας φάσης: (α) πλήρους κορεσμός (Περιοχή I), (β) μερικός κορεσμός με την αέρια φάση σε μορφή φυσαλίδων (οριακή περιοχή μεταξύ Περιοχής I και II), (γ) μερικός κορεσμός με την υγρή και την αέρια φάση να είναι ταυτόχρονα συνεχείς (Περιοχή II) και (δ) μερικός κορεσμός με την υγρή φάση να μην είναι πια συνεχής (Περιοχή III) (Μπαρδάνης, 2016).

2.7 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

2.7.1 Διατμητική αντοχή μη κορεσμένων εδαφών

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής ενδιαφέρει κυρίως η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών με τη μύζηση.

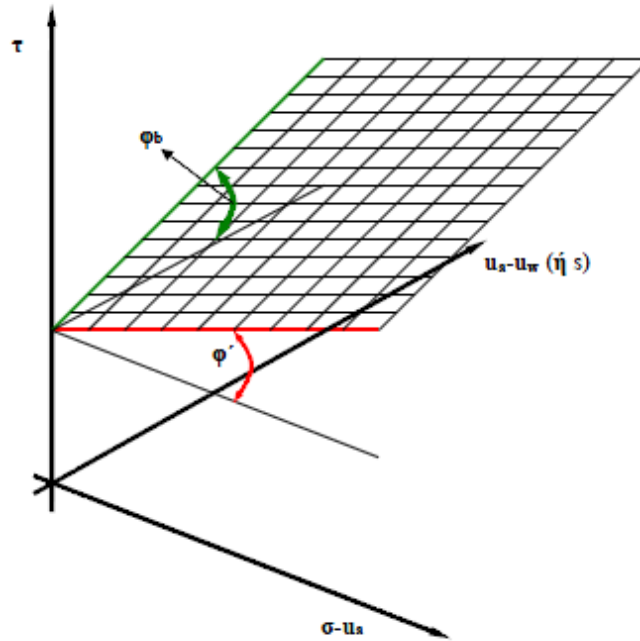
Γενικά βασιζόμενοι στις προβλέψεις του γενικευμένου γραμμικού κριτηρίου διατμητικής αντοχής των Fredlund, et al. (1978) με την αύξηση της μύζησης των μη κορεσμένων εδαφών αυξάνεται και η διατμητική τους αντοχή. Η διατύπωση αυτή έχει ως εξής:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad \text{Εξ. 2.1}$$

Σύμφωνα με τον Jaksa (2020), υπάρχει και η εναλλακτική διατύπωση του Bishop (1959), η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$\tau = c' + [(\sigma - u_a) + \chi (u_a - u_w)] \tan \phi' \quad \text{Εξ. 2.2}$$

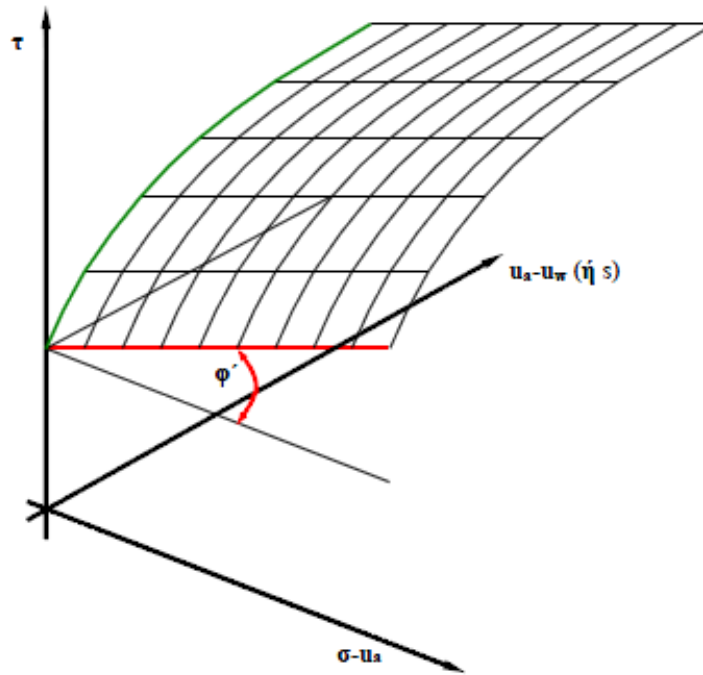
όπου τ είναι η μέγιστη διατμητική τάση την οποία μπορεί να παραλάβει ένα εδαφικό υλικό με ενεργό τιμή συνοχής c' , χ είναι η παράμετρος ενεργούς τάσης, ενεργό τιμή γωνίας διατμητικής αντοχής ϕ' και ρυθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής με την μύζηση $\tan \phi_b$, ευρισκόμενο υπό ορθή ολική τάση $(\sigma - u_a)$ και μύζηση $(u_a - u_w)$. Όσον αφορά τη συγκεκριμένη διπλωματική αξιοποιήθηκε η Εξ. 2.1 καθώς ήταν και αυτή που χρησιμοποιεί το λογισμικό που αξιοποιήθηκε. Η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών με βάση την Εξ. 2.1 σε τρεις διαστάσεις $(\tau - \sigma - u_a - u_a - u_w)$ απεικονίζεται στο Σχ. 2.7.1. Για ένα πλήρως κορεσμένο έδαφος, $u_a = 0$ και $\phi_b = \phi'$ οπότε η Εξ. 2.1 εκφυλίζεται στο γραμμικό κριτήριο διατμητικής αντοχής των πλήρως κορεσμένων εδαφών. Η διατύπωση της Εξ. 2.1 αποτελεί το *γενικευμένο* –και για μη κορεσμένα εδάφη πλέον– γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb.



Σχήμα 2.7.1 Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών με βάση το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Μπαρδάνης, 2016).

Πολλά πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι αυτή η αύξηση δεν είναι γραμμική αλλά ότι προοδευτικά μειώνεται (π.χ. Escario & Sáez, (1986), Krahn, et al., (1989)). Οι Escario et al. (1989) πρότειναν ότι σε υψηλές τιμές μύζησης η τιμή ϕ_b γίνεται αρνητική, αναφέροντας ότι σε τέτοιες τιμές μύζησης η φαινόμενη συνοχή λόγω της μύζησης τείνει προς το μηδέν, καθώς το έδαφος ξηραίνεται τελείως.

Ακόμα αυτή η συμπεριφορά έχει αποδειχθεί ότι αλλάζει ανάλογα με την σύσταση του εδαφικού υλικού. Διαφέρει η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής ενός αργιλικού-ιλυώδους εδαφικού υλικού, που αναμένεται να έχει την παραπάνω εξέλιξη, σε σχέση με ένα πιο χονδρόκοκκο εδαφικό υλικό.



Σχήμα 2.7.2 Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών με βάση το γενικευμένο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Μπαρδάνης, 2016).

Αυτό που έχουν κοινό ως χαρακτηριστικό είναι ότι η διατμητική αντοχή θα αυξάνεται μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα, του καθενός, κατά την γωνία διατμητικής αντοχής του αντίστοιχου πλήρως κορεσμένου υλικού (αρχή ενεργών τάσεων). Πιο αναλυτικά από κει και πέρα περιμένουμε ότι τα αμιγώς χονδρόκοκκα υλικά θα έχουν μείωση της διατμητικής αντοχής μέχρι το μηδέν, τα χονδρόκοκκα με μικρό ποσοστό ιλύος μείωση μέχρι τη σταθεροποίηση σε μία ελάχιστη τιμή, τα πιο ιλυώδη σταθεροποιούνται στην αντοχή που αποκτάται μέχρι την τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα, τα αργιλώδη επιδεικνύουν αύξηση με μικρότερο ρυθμό. Τέλος τα αμιγώς αργιλικά εδαφικά υλικά (υψηλής πλαστικότητας) αυξάνονται μονοτονικά, ακόμα και με το ρυθμό που καθορίζει η γωνία διατμητικής αντοχής του ίδιου υλικού πλήρως κορεσμένου.

Ο υπολογισμός της διατμητικής αντοχής ενός ακόρεστου εδάφους είναι δυνατόν να γίνει με τον προσδιορισμό των παραγόντων ϕ_b και $(u_a - u_w)$. Ο όρος ϕ_b θεωρείται πως έχει χαρακτηριστική τιμή για κάθε εδαφικό σχηματισμό, η οποία είναι σταθερή μόνο για ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών της μύζησης, που καλύπτει όμως τα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα και μπορεί να υπολογιστεί πειραματικά.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα όμως που αντιμετωπίζουμε στα μη κορεσμένα εδάφη είναι ότι για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών τους απαιτείται μεγάλος χρόνος

που χρειάζεται για να εκτελεστούν οι εργαστηριακές δοκιμές όπως αντίστοιχα και το κόστος τους. Για παράδειγμα στη συσκευή της τριαξονικής θλίψης αν συνυπολογίσουμε τα στάδια στερεοποίησης για την επίτευξη της επιθυμητής μύζησης συν τον ελάχιστο χρόνο για αξονική παραμόρφωση της τάξης του 15% καταλήγουμε σε σύνολο μηνών για τα επιθυμητά αποτελέσματα (για όλους τους ζητούμενους συνδυασμούς μύζησης και πλευρικής τάσης). Κάπως μειωμένα αλλά όχι σημαντικά είναι αντίστοιχα και για τη δοκιμή απευθείας διάτμησης με ελεγχόμενη μύζηση (για όλους τους ζητούμενους συνδυασμούς μύζησης και κατακόρυφης τάσης). Ο Μπαρδάνης (2016) πρότεινε ότι θα μπορούσαμε να καταλήγουμε σε εκτίμηση της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών με τη μύζηση (για αρχικά αναζυμωμένα εδαφικά υλικά) μέσω του συνδυασμού των κύκλων Mohr από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε δοκίμια που έχουν υποβληθεί πρώτα στην ίδια τιμή της μύζησης και παρουσίασε και σχετικά αποτελέσματα σε πέντε (5) διαφορετικά εδαφικά υλικά. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής μετρήθηκε η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής ενός εδαφικού υλικού με τη μύζηση για ένα εδαφικό υλικό με την προαναφερθείσα μέθοδο και τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Κεφ. 3.

Με τη μέθοδο αυτή στον αρχικό εδαφικό πολτό που ετοιμάζουμε επιβάλλουμε την μύζηση που θέλουμε και στη συνέχεια για κάθε τιμή μύζησης που επιλέγουμε έχουμε ένα ζευγάρι κύκλων Mohr από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα. Από αυτές τις δοκιμές προκύπτουν δύο κύκλοι Mohr τους οποίους αν συνδυάσουμε έχουμε την αντίστοιχη τιμή της φαινόμενης συνοχής του υλικού για την εκάστοτε τιμή της μύζησης. Σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα (1 μήνα) μπορούμε να έχουμε την εξέλιξη της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση για σημαντικό εύρος της μύζησης, και την αναμενόμενη εξέλιξη της αντοχής με τη μύζηση. Η σχετική διάταξη είναι πολύ πιο οικονομική όπως και πολύ πιο εύκολη στη λειτουργία σε σχέση με τις αντίστοιχες συσκευές τριαξονικής θλίψης και απευθείας διάτμησης με εφαρμογή κάποιας από τις υφιστάμενες μεθόδους ελέγχου της μύζησης.

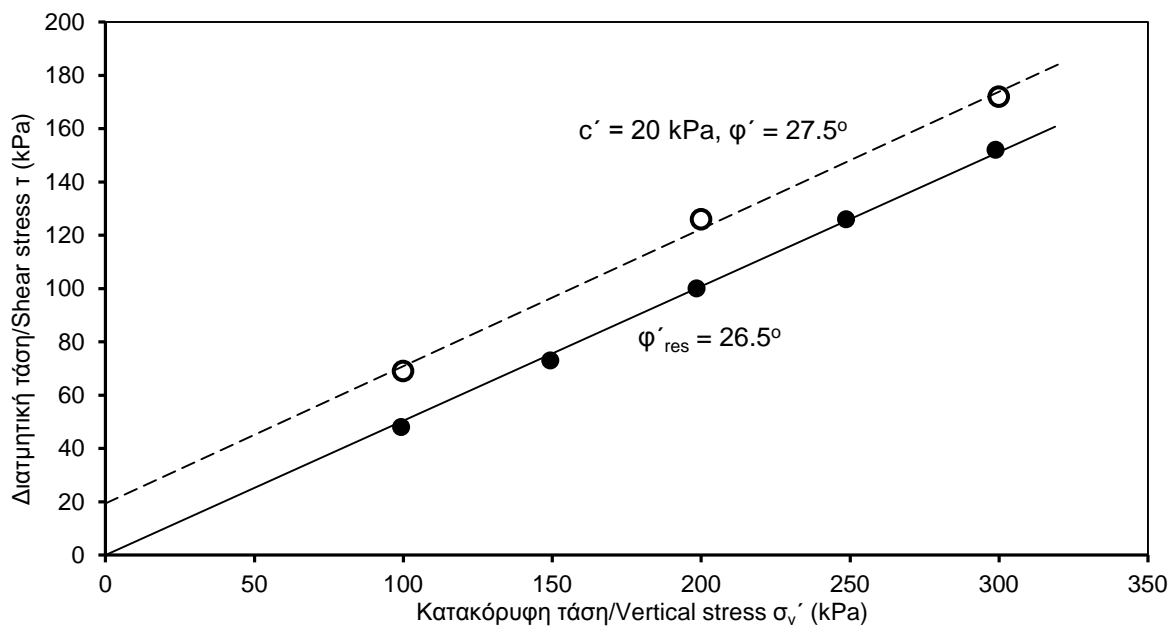
Η αναμενόμενη αυτή αύξηση της αντοχής των μη κορεσμένων εδαφών είναι και ο λόγος που η θεώρηση των εδαφών ως πλήρως κορεσμένων είναι υπέρ της ασφάλειας. Ωστόσο η παράλειψη της μύζησης στην ευστάθεια πρανών μπορεί να έχει και το αντίστροφο αποτέλεσμα, υποεκτίμησης των συντελεστών ασφαλείας, σε αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν μελετάμε την ευστάθεια πρανών με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας σε αντίστροφες αναλύσεις. Για την περαιτέρω κατανόηση αυτής της διαπίστωσης χρειάζεται και η επεξήγηση της παραμένουσας διατμητικής αντοχής και της αντίστοιχης συνοχής και γωνίας στα οποία θα αναφερθούμε και πιο ολοκληρωμένα στα

παρακάτω κεφάλαια όπου θα ασχοληθούμε με την ευστάθεια πρανών με τη μέθοδο της οριακής ισορροπίας.

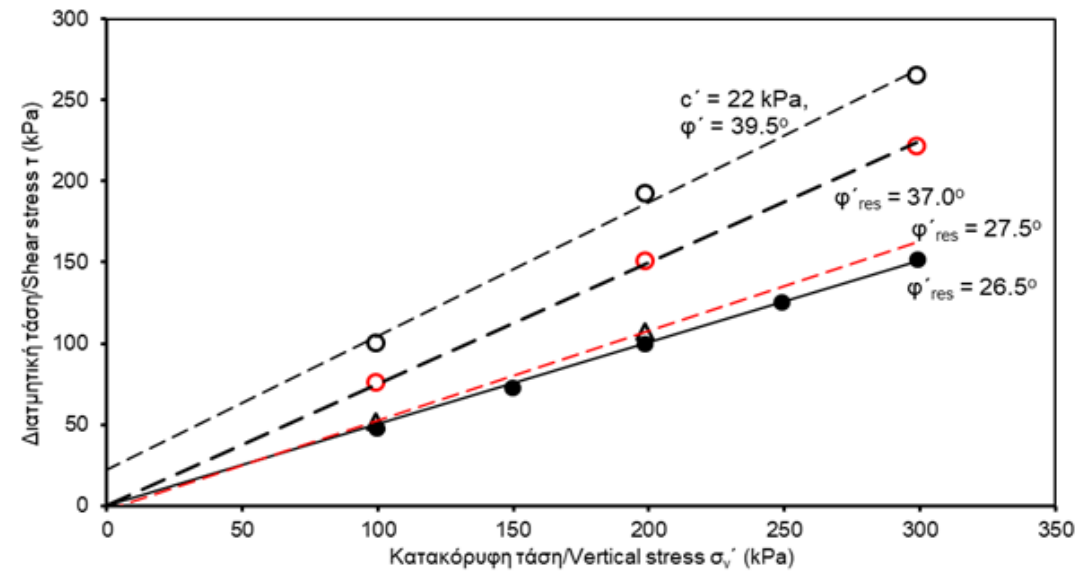
Προκειμένου για επιβολή διατμητικών παραμορφώσεων μέχρι τη θραύση των δοκιμίων ένα πλήρως κορεσμένο αργιλικό έδαφος έχει γενικά συνοχή και γωνία διατμητικής αντοχής σε όρους ενεργών τάσεων, c' και ϕ' αντίστοιχα. Με την αύξηση της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης η διατμητική αντοχή μειώνεται σε τιμές τέτοιες που τα αργιλικά εδάφη χάνουν τη συνοχή τους και η γωνία διατμητικής αντοχής τους παραμένει όση και αυτή στην αστοχία. Εάν τέλος η επιβαλλόμενη παραμόρφωση αυξηθεί ακόμα περισσότερο, τότε και η γωνία διατμητικής αντοχής μειώνεται μέχρι την τελική τιμή της που είναι η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής, ϕ'_{res} (residual angle of shearing resistance). Η τόσο χαμηλή τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής οφείλεται στην προοδευτική ευθυγράμμιση των αργιλικών πλακιδίων παράλληλα με το επίπεδο αστοχίας, γεγονός το οποίο μειώνει στο ελάχιστο την αναπτυσσόμενη αντίσταση στην περαιτέρω ολίσθηση μεταξύ τους (Skempton, 1964). Η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής εξαρτάται από το εύρος τιμών της κατακόρυφης τάσης στο οποίο μετρείται (Bishop, 1971, Skempton, 1985, Maksimović, 1989, Stark & Eid, 1994), την κοκκομετρική διαβάθμιση (Skempton, 1964, Kenney, 1967, Lupini, et al., 1981, Skempton, 1985, Kalteziotis, 1993), την πλαστικότητα (Kalteziotis, 1993, Wesley, 2003) και την ορυκτολογική σύσταση των εδαφικών υλικών (Mitchell, 1976, Brandl, 1987, Kalteziotis, 1993), τον ρυθμό επιβολής της διατμητικής παραμόρφωσης (Tika, et al., 1996), και τη χημική σύσταση του νερού των πόρων των εδαφικών υλικών (Di Maio, 1996a & 1996b).

Εκτός όμως από τους παραπάνω παράγοντες, η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής επηρεάζεται και από τον βαθμό κορεσμού και την αντίστοιχη μύζηση. Ο Μπαρδάνης (2019) παρουσίασε αποτελέσματα για μία ιλυώδη άργιλο χαμηλής πλαστικότητας (με όριο υδαρότητας 45%, δείκτη πλαστικότητας 23, λεπτόκοκκα 77% και σωματίδια μεγέθους άργιλου 12%), στα οποία επιδείχθηκαν οι μεταβολές της παραμένουσας διατμητικής αντοχής με την παρουσία μύζησης. Μείωση του βαθμού κορεσμού συνεπάγεται αύξηση της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής λόγω σχηματισμού πολύ ισχυρά συνδεδεμένων συσσωματωμάτων των αργιλικών πλακιδίων λόγω της ξήρανσης. Επιδείχθηκε λοιπόν σε δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης με ξήρανση του δοκιμίου εντός της συσκευής η πολύ μεγάλη αύξηση της αντοχής με τη μύζηση που αναπτύχθηκε. Για μικρό επίπεδο παραμορφώσεων η αντοχή αυτή αντιστοιχούσε σε περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής και με συνοχή, για μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης σε περιβάλλουσα με μηδενική συνοχή αλλά πολύ μεγαλύτερη γωνία διατμητικής αντοχής (39.5° αντί για 26.5°) και τέλος η περιβάλλουσα μετά από υδρεμποτισμό βρέθηκε να καταλήγει πρακτικά στην ίδια τιμή γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής με εκείνη

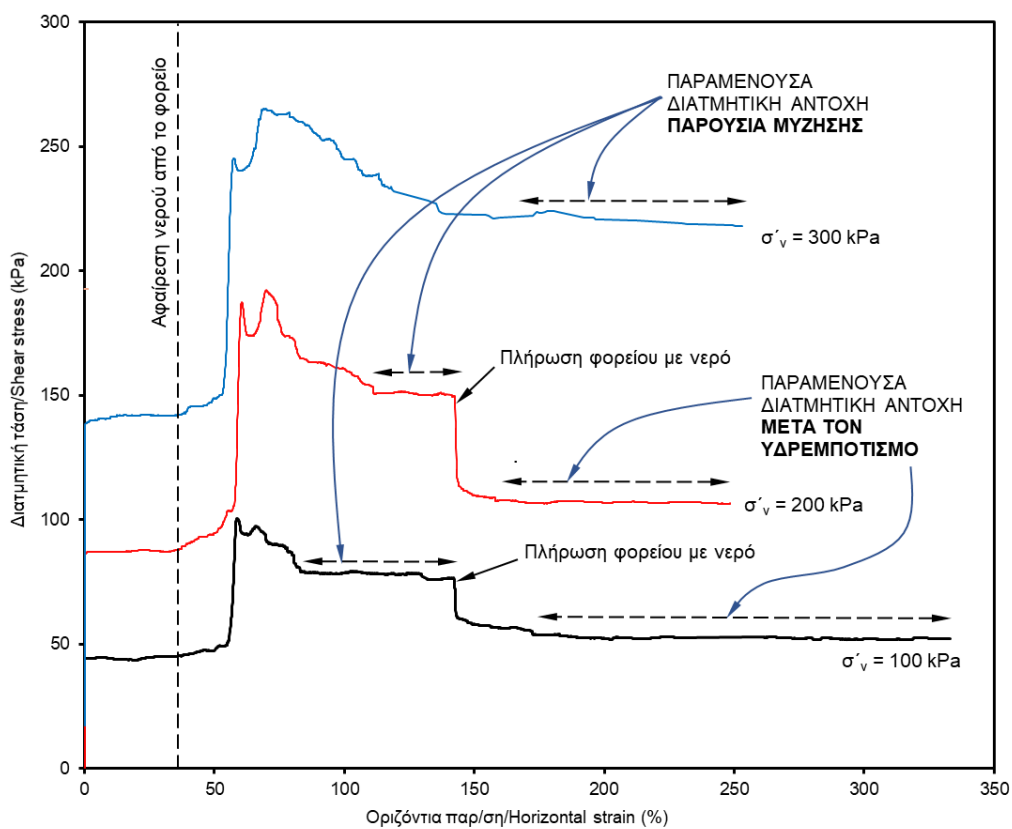
του εξαρχής πλήρως κορεσμένου εδάφους. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στα παρακάτω Σχήματα 2.7.3 και 2.7.4. Στο πρώτο παρουσιάζεται η διαφορά της περιβάλλουσας διατμητικής αντοχής από δοκιμές απευθείας διάτμησης και από δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης και στο δεύτερο οι διαφορές στην περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής από τις δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης μετά από ξήρανση των δοκιμών εντός της συσκευής και για διάφορα επίπεδα πρόσθετης οριζόντιας παραμόρφωσης. Η αντιστοίχιση των περιβαλλουσών αστοχίας με τα επίπεδα οριζόντιων παραμορφώσεων φαίνεται στο Σχ. 2.7.5. Η μύζηση που αναπτύχθηκε κατά την ξήρανση των δοκιμών μέσα στη συσκευή και διατηρήθηκε σε αυτήν ήταν 17 MPa.



Σχήμα 2.7.3 Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής από δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης ($\phi'_{res}=26.5^\circ$) και δοκιμή άμεσης διάτμησης σε δοκίμια από αδιατάρακτα δείγματα του ίδιου υλικού (Μπαρδάνης, 2019).

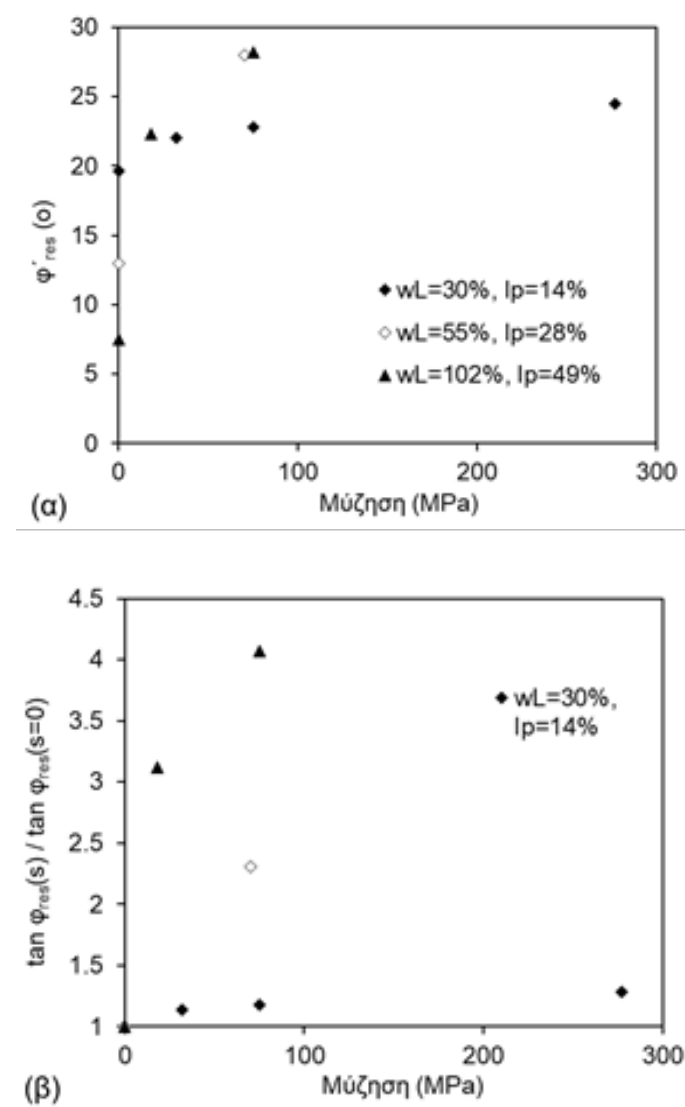


Σχήμα 2.7.4 Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής από δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης ($\phi'_{res}=26.5^\circ$), κορυφαίες τιμές αντοχής μετά την ανάπτυξη μύζησης ($c'=22$ kPa, $\phi'=39.5^\circ$), τιμές αντοχής μετά από μεγάλη παραμόρφωση παρουσία μύζησης ($\phi'_{res}=37.0^\circ$) και μετά από μεγάλη παραμόρφωση και υδρεμπότισμό έως πλήρη κορεσμό ($\phi'_{res}=27.5^\circ$) (Μπαρδάνης, 2019).



Σχήμα 2.7.5 Καμπύλες διατμητικής τάσης-οριζόντιας παραμόρφωσης για τις 3 κατακόρυφες τάσεις με τα χαρακτηριστικά σημεία ξήρανσης και υδρεμπότισμού (Μπαρδάνης, 2019).

Παρόμοια αποτελέσματα έχουν παρουσιαστεί και από ερευνητές που χρησιμοποίησαν συσκευές δακτυλιοειδούς διάτμησης με ελεγχόμενη μύζηση. Οι Vaunat, et al. (2006) πραγματοποίησαν δοκιμές δακτυλιοειδούς διάτμησης σε μια ιλυώδη άργιλο χαμηλής πλαστικότητας ($w_L=30\%$, $I_p=14\%$, $G_s=2.71$) χρησιμοποιώντας μία συσκευή δακτυλιοειδούς διάτμησης τύπου Bromhead (Bromhead, 1979) στην οποία είχαν ενσωματώσει σύστημα ελέγχου της ολικής μύζησης μέσω ελεγχόμενης σχετικής υγρασίας. Η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής του υλικού αυξήθηκε από 19.6° για το πλήρως κορεσμένο εδαφικό υλικό, σε 22.0° για μύζηση 32 MPa, 22.8° για μύζηση 75 MPa, και 24.5° για μύζηση 277 MPa. Η πίεση διείδυσης αέρα του υλικού ήταν περί το 1 MPa και η μύζηση επίτευξης παραμένοντος ποσοστού υγρασίας περί τα 70 MPa. Δεδομένου ότι η κατακόρυφη τάση που εφαρμόστηκε περιορίστηκε μέχρι τα 300 kPa, δεν παρατηρήθηκαν μεταβολές της γωνίας ϕ'_{res} με την κατακόρυφη τάση. Χρησιμοποιώντας την ίδια συσκευή οι Vaunat, et al. (2007) μέτρησαν γωνία ϕ'_{res} 28° στην άργιλο Boom από το Βέλγιο ($w_L=55\%$, $I_p=28\%$) για μύζηση 70 MPa, όταν η γωνία ϕ'_{res} του ίδιου υλικού πλήρως κορεσμένου είναι μόνο 13° , και οι Merchán, et al. (2008) μέτρησαν γωνία ϕ'_{res} 28.2° σε μπεντονίτη FEBEX ($w_L=102\%$, $I_p=49\%$, $G_s=2.70$) για μύζηση 75 MPa και 22.3° για μύζηση 18 MPa, όταν η γωνία ϕ'_{res} του ίδιου υλικού πλήρως κορεσμένου είναι μόνο 7.5° . Τα αποτελέσματα αυτά συγκεντρώνονται στο Σχ. 2.7.6. Στο Σχ. 2.7.6α συσχετίζεται η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής με τη μύζηση, και στο Σχ. 2.7.6β τα αποτελέσματα κανονικοποιούνται ως προς τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής κάθε εδαφικού υλικού όταν είναι πλήρως κορεσμένο, $\phi_{res}(s=0)$, συσχετίζοντας τον λόγο $\tan \phi_{res}(s) / \tan \phi_{res}(s=0)$ με τη μύζηση, όπου $\phi_{res}(s)$ η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής υπό μύζηση s . Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής αυξάνεται με τη μύζηση και μάλιστα τόσο περισσότερο, όσο μεγαλύτερη είναι η πλαστικότητα των εδαφικών υλικών, με την αύξηση αυτή να επιδεικνύεται για τιμές της μύζησης μέχρι τη μύζηση επίτευξης του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας, από την οποία και πάνω η γωνία ϕ'_{res} πρακτικά σταθεροποιείται. Η μεταβολή αυτή της γωνίας ϕ_{res} αποδίδεται στον σχηματισμό πολύ ισχυρά συνδεδεμένων συσσωματωμάτων των αργιλικών πλακιδίων λόγω της ξήρανσης που προκαλεί η αύξηση της μύζησης και τα οποία δεν μπορούν να διασπαστούν από την επιβαλλόμενη διατμητική παραμόρφωση. Η εξήγηση αυτή τεκμηριώθηκε από τους Merchán, et al. (2008) μέσω της φωτογράφισης των δοκιμών τους σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.



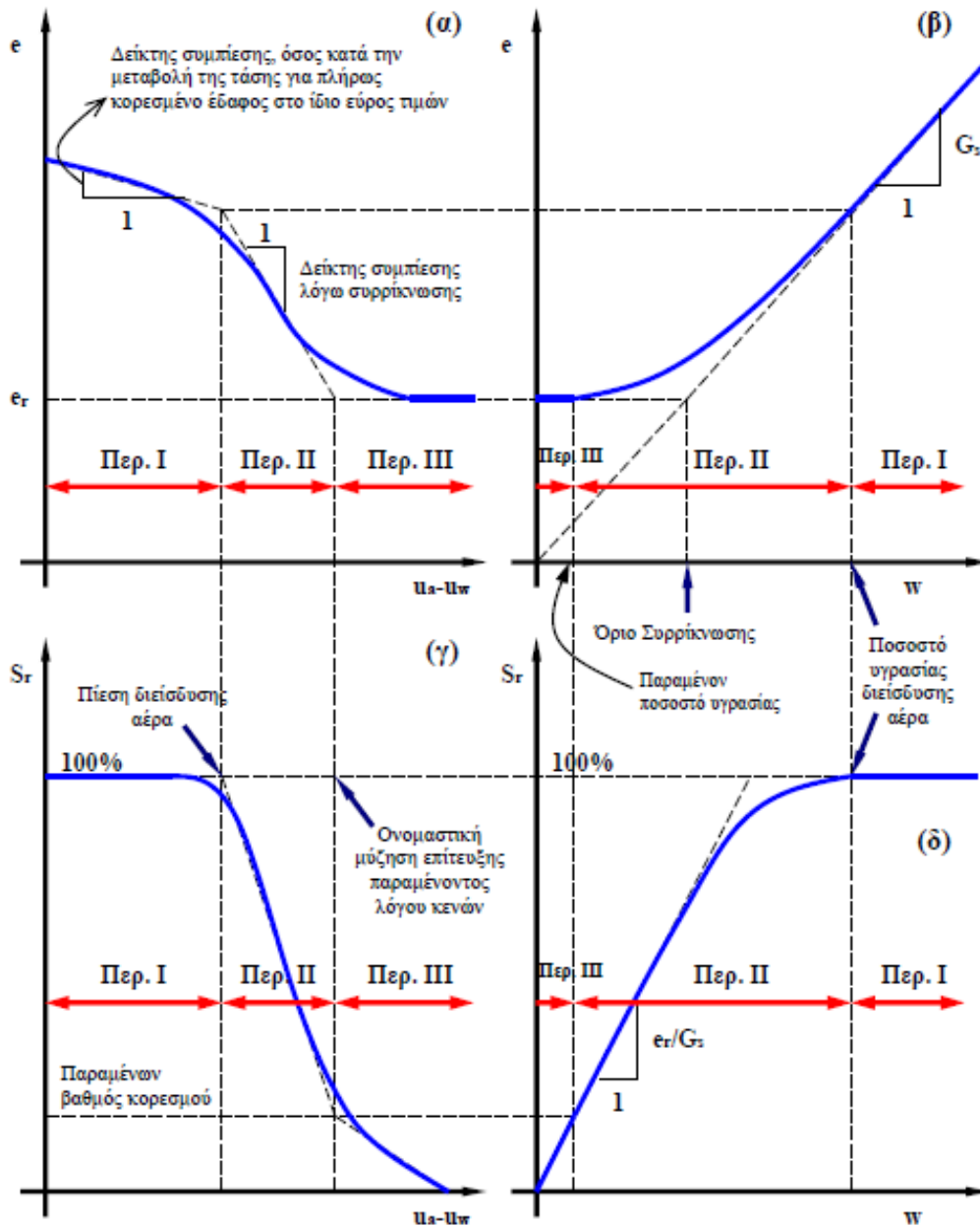
Σχήμα 2.7.6. Επιρροή της μύζησης επί της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής από δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα: α) γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής με την μύζηση, και β) ο λόγος $\tan \phi_{res}(s) / \tan \phi_{res}(s=0)$ με την μύζηση.

2.7.2 Μεταβολές όγκου μη κορεσμένων εδαφών

Ακόμα ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό των μη κορεσμένων εδαφών που τα διαφοροποιεί από τα πλήρως κορεσμένα είναι οι διαφορές στις μεταβολές του όγκου τους. Είναι σύνηθες -ενίοτε καταστροφικό- φαινόμενο η διόγκωση μη κορεσμένων εδαφών στο έδαφος θεμελίωσης πολλών κατασκευών λόγω μετάπτωσης από μερικό κορεσμό σε πλήρη, είτε αυτές αποτελούν μεγάλα κατασκευαστικά έργα, είτε θεμελιώσεις κτιρίων πιο απλής χρήσης, με κοινό τους χαρακτηριστικό την χαμηλή επιβαλλόμενη τάση στο έδαφος θεμελίωσης. Αντίστοιχα μεγάλης σημασίας είναι και το αντίστροφο φαινόμενο των βλαβών λόγω διόγκωσης που είναι τα προβλήματα κατάρρευσης λόγω υδρεμποτισμού (soil

collapse) ξανά λόγω μετάπτωσης από μερικό κορεσμό σε πλήρη. Τα μη κορεσμένα εδάφη που βρίσκονται υπό υψηλή πυκνότητα και υπό χαμηλές τάσεις διογκώνονται όταν τους παρέχεται περίσσεια νερού για να γίνουν πλήρως κορεσμένα, ενώ τα μη κορεσμένα εδάφη υπό χαμηλή πυκνότητα και υπό υψηλές τάσεις (για πολύ χαμηλή πυκνότητα ακόμα και υπό χαμηλές τάσεις) συρρικνώνονται («καταρρέουν») όταν τους παρέχεται περίσσεια νερού για να γίνουν πλήρως κορεσμένα. Τα δύο αυτά παραδείγματα είναι ένα ακόμα στοιχείο της αξίας της περαιτέρω μελέτης των μη κορεσμένων εδαφών καθώς τα φαινόμενα αυτά δεν μπορούν να περιγραφούν στο πλαίσιο της μηχανικής συμπεριφοράς των πλήρως κορεσμένων εδαφών και η αγνόησή τους καταλήγει σε σημαντικές τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις στα τεχνικά έργα.

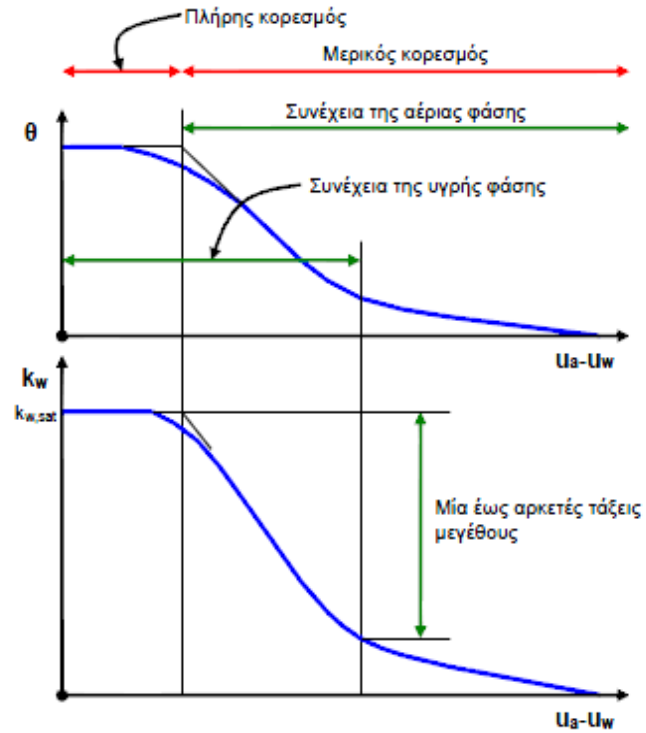
Χάριν πληρότητας μόνο, στο Σχήμα 2.7.7 παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο εξέλιξης της παραμόρφωσης των μη κορεσμένων εδαφών με την αύξηση της μύζησης από αρχική κατάσταση πλήρους κορεσμού.



Σχήμα 2.7.7 α) Εξέλιξη του λόγου κενών με την μύζηση, β) η αντίστοιχη εξέλιξη του λόγου κενών με το ποσοστό υγρασίας (καμπύλη συρρίκνωσης), γ) η αντίστοιχη εξέλιξη του βαθμού κορεσμού με τοποσοστό υγρασίας, και δ) η αντίστοιχη καμπύλη βαθμού κορεσμού-μύζησης. Παρατίθεται σχηματικά η αντιστοιχία των χαρακτηριστικών σημείων της κάθε καμπύλης επί των άλλων καμπυλών, καθώς και κλίσεις χαρακτηριστικών τμημάτων τους (Μπαρδάνης, 2016).

2.7.3 Διαπερατότητα μη κορεσμένων εδαφών

Επίσης σημαντικό πεδίο μελέτης είναι η διαπερατότητα ως προς την υγρή φάση των μη κορεσμένων εδαφών. Σε ένα πλήρως κορεσμένο εδαφικό δοκίμιο η ροή του υγρού γίνεται μέσα από τους, γεμάτους νερό, πόρους. Βάσει των νόμων της ρευστομηχανικής όσος όγκος νερού εισέρχεται στους πόρους ενός πλήρως κορεσμένου υλικού ο ίδιος επίσης όγκος θα εξέρχεται και η διαδρομή που θα ακολουθεί θα είναι μέσω της υγρής φάσης αυτών των πόρων. Στα μη κορεσμένα εδάφη τα πράγματα αλλάζουν. Διότι πλέον εκτός της υγρής φάσης συνυπάρχει πλέον και αέρια. Εκτός από νερό πλέον εισέρχεται και αέρας στο εδαφικό υλικό. Επίσης διαφέρει και σε ποια αναλογία θα εξέρχεται αντίστοιχα η υγρή και αέρια φάση από τους πόρους. Αυτό που έχει παρατηρηθεί είναι ότι ο συντελεστής διαπερατότητας μειώνεται με την αύξηση της μύζησης. Η εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας συσχετίζεται με την αντίστοιχη εξέλιξη της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού (Σχ. 2.7.8). Είναι λογικό να συμβαίνει αυτό διότι με την αύξηση της μύζησης και δηλαδή της αέριας φάσης στο έδαφος μειώνονται οι ελεύθερες δίοδοι από τις οποίες το νερό μπορεί να περάσει. Ωστόσο σε επίπεδο μακροδιαπερατότητας παρατηρούμε φαινόμενα αύξησης της δυνατότητας κίνησης του νερού λόγω εμφάνισης ρωγμών στο ξηρότερο εδαφικό υλικό (στα αργιλικά εδάφη). Η ανάγκη μελέτης της συσχέτισης του συντελεστή διαπερατότητας με την μύζηση είναι ιδιαίτερα σημαντική για την σωστή εκτίμηση της μεταβολής των αρνητικών πιέσεων πόρων.



Σχήμα 2.7.8 Ποιοτική απεικόνιση της συσχέτισης του συντελεστή διαπερατότητας ως προς το νερό k_w με την μύζηση και αντιστοίχισή της με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού (Μπαρδάνης, 2016).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκαν μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών σε αναζυμωμένη άργιλο από το Μαζαράκι του Νομού Ιωαννίνων. Σκοπός των δοκιμών ήταν να μελετηθεί η συμπεριφορά του προαναφερθέντος υλικού υπό συνθήκες μερικού κορεσμού. Το υλικό υπήρχε σε περίσσεια και μάλιστα ομογενοποιημένο στο εργαστήριο ως περίσσειμα παλαιότερου προγράμματος εργαστηριακών δοκιμών οπότε μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τους σκοπούς της Διπλωματικής Εργασίας.

Αρχικά έγιναν οι δοκιμές για την πλήρη κατάταξη του υλικού και στη συνέχεια δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Η βασική σειρά δοκιμών που ενδιέφερε αφορούσε στην προετοιμασία δοκιμών σε θάλαμο μύζησης για διάφορες τιμές της μύζησης ώστε τελικά να δημιουργηθεί μία χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού και ταυτόχρονα να μελετηθεί η εξέλιξη της συνοχής και της γωνίας διατμητικής αντοχής με τη μεταβολή της μύζησης. Δοκίμια παρασκευάστηκαν επίσης και μετά από ξήρανση μέχρι ισορροπίας βάρους στις ατμοσφαιρικές συνθήκες του εργαστηρίου και σε ατμοσφαιρικές συνθήκες εντός θαλάμων με πλήρως κορεσμένα υδατικά διαλύματα αλάτων για να προκύψουν και δοκίμια με μεγαλύτερες τιμές της μύζησης από αυτές που μπορούν να υλοποιηθούν με τη μέθοδο μετατόπισης άξονα εντός θαλάμων μύζησης με κεραμικούς πορολίθους διείδυσης αέρα (όριο 1500 kPa).

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εργαστηριακές δοκιμές που εκτελέστηκαν, οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν και τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι όλες οι εργαστηριακές δοκιμές (πλην υγρής κοσκίνισης υλικού κατά την κοκκομέτρηση με κόσκινα) εκτελέστηκαν με χρήση απιονισμένου νερού για την αποφυγή επίδρασης της χημικής σύστασης του νερού στα αποτελέσματα.

3.2 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

3.2.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση εδαφικών υλικών

Τα εδάφη διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Τα χονδρόκοκκα τα οποία προέρχονται από τη μηχανική αποσάθρωση των πετρωμάτων και τα λεπτόκοκκα που προέρχονται κυρίως από χημική αποσάθρωση. Οι αντίστοιχες ονομασίες που τα συναντάμε είναι για την πρώτη κατηγορία άμμοι και χάλικες και για τη δεύτερη ιλύς και άργιλοι. Η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ποσοτικής διαβάθμισης στα εδαφικά υλικά για τα διάφορα μεγέθη των κόκκων με τη χρήση ειδικών κοσκίνων σε σειρά ονομαστικών διαμέτρων για το χονδρόκοκκο μέρος. Στη συνέχεια με τη συμπληρωματική δοκιμή του αραιόμετρου για το λεπτόκοκκο μέρος του εδαφικού υλικού προκύπτει η πλήρης κοκκομετρική διαβάθμιση του εδαφικού υλικού, από το μέρος του που είναι λεπτότερο και από το όριο των αργίλων (0.002mm) έως και το πιο χονδρόκοκκο μέρος του που είναι δυνατόν να μετρηθεί με κόσκινα στο εργαστήριο (συνήθως τα κόσκινα μέγιστου ανοίγματος στο εργαστήριο είναι αυτά των 100mm ή 4’’).

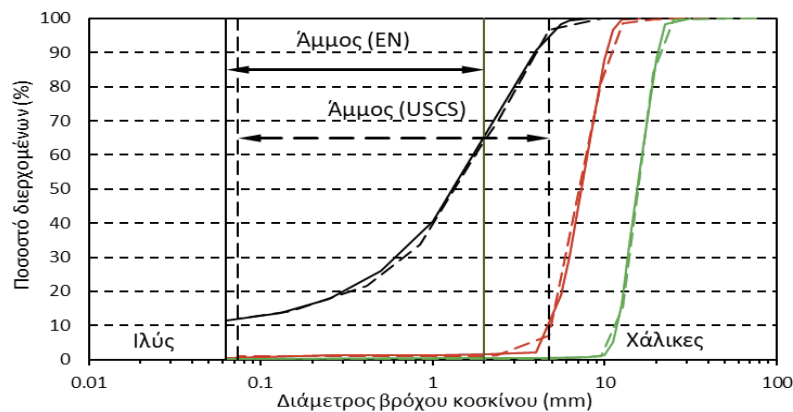
Η πειραματική διαδικασία ξεκινά με την ζύγιση του δείγματος του εδαφικού υλικού αφού τοποθετηθεί σε φούρνο ξήρανσης θερμοκρασίας 110 °C και είναι απολύτως ξηρό. Στη συνέχεια ξεπλένεται με νερό επί του κοσκίνου Νο200 (ονομαστικό άνοιγμα βροχίδων κοσκίνου 0.074mm) του οποίου το διερχόμενο είναι το λεπτόκοκκο που θα προσδιορίσουμε την κοκκομετρική του διαβάθμιση με τη δοκιμή του αραιόμετρου στη συνέχεια. Αμέσως μετά επανατοποθετείται το πλέον χονδρόκοκκο υλικό ξανά στο φούρνο ξήρανσης. Όταν πλέον αυτό είναι στεγνό εκτελείται η δοκιμή κοκκομετρικής διαβάθμισης με κόσκινα στην οποία τοποθετούνται τα κόσκινα σε φθίνον ονομαστικό άνοιγμα. Ζυγίζοντας το συγκρατούμενο υλικό σε κάθε κόσκινο και τοποθετώντας τα αντίστοιχα ποσοστά σε διάγραμμα που στον κατακόρυφο του άξονα υπάρχει το αθροιστικό ποσοστό διερχόμενου υλικού και στον οριζόντιο άξονα οι ονομαστικές τιμές των ανοιγμάτων των κοσκίνων αντίστοιχα (σε λογαριθμική κλίμακα) προκύπτει η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης για το συγκρατούμενο στο κόσκινο Νο 200 υλικό.



Σχήμα 3.2.1 Συρμάτινα κόσκινα (ASTM).



Σχήμα 3.2.2 Κοσκινιέρα.



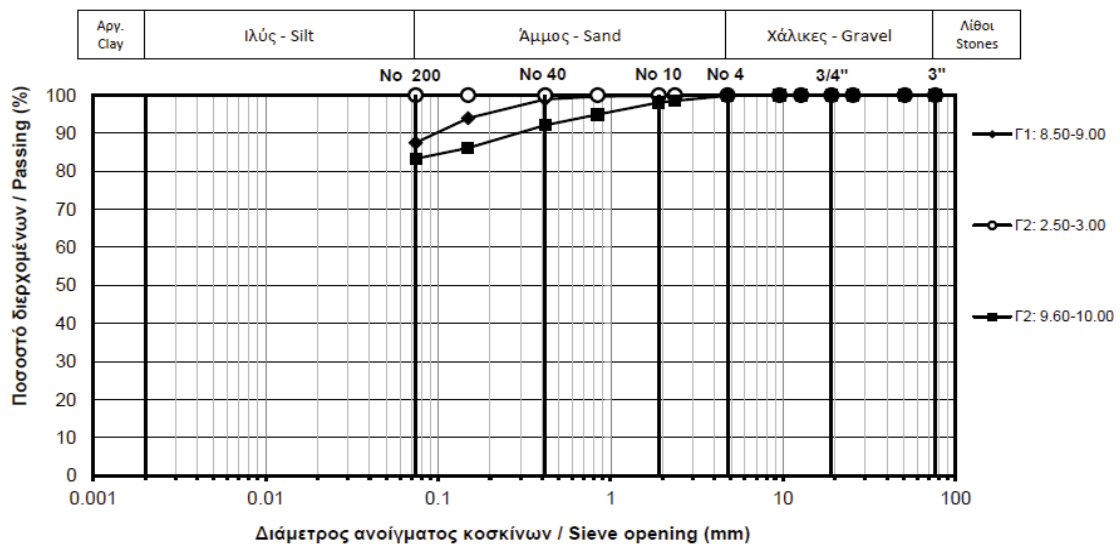
Σχήμα 3.2.3 Τυπικές καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης για άμμο (μαύρο), γαρμπίλι (κόκκινο), χάλικες (πράσινο) (Μπαρδάνης, 2019).

Με τη δοκιμή του αραιόμετρου προσδιορίζεται και το τμήμα της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισης και για το λεπτόκοκκο μέρος. Αφού στεγνώσουμε το δείγμα μας με τον ίδιο τρόπο, το θρυμματίζουμε και το περνάμε από το κόσκινο No4 (ονομαστικού ανοίγματος 4.75mm). Στη συνέχεια ζυγίζουμε 50gr από το υλικό και το τοποθετούμε σε γυάλινο δοχείο με απιονισμένο νερό. Μετά πλένουμε αυτό το υλικό σε κόσκινο No200 μόνο που αυτή τη φορά κρατάμε το διερχόμενο. Αφού αναδεύσουμε καλά, τοποθετούμε το υλικό σε γυάλινο ογκομετρικό σωλήνα και με τη χρήση αραιόμετρου (πυκνομέτρου) παίρνουμε μετρήσεις από το πυκνόμετρο για 24 ώρες ακολουθώντας χρονικά διαστήματα που επιτρέπουν ίσες αποστάσεις σε λογαριθμική κλίμακα. Οι ενδείξεις της πυκνότητας του αιωρήματος λεπτόκοκκου εδάφους-νερού με τον χρόνο επιτρέπουν μέσω της διαδικασίας που προβλέπει το

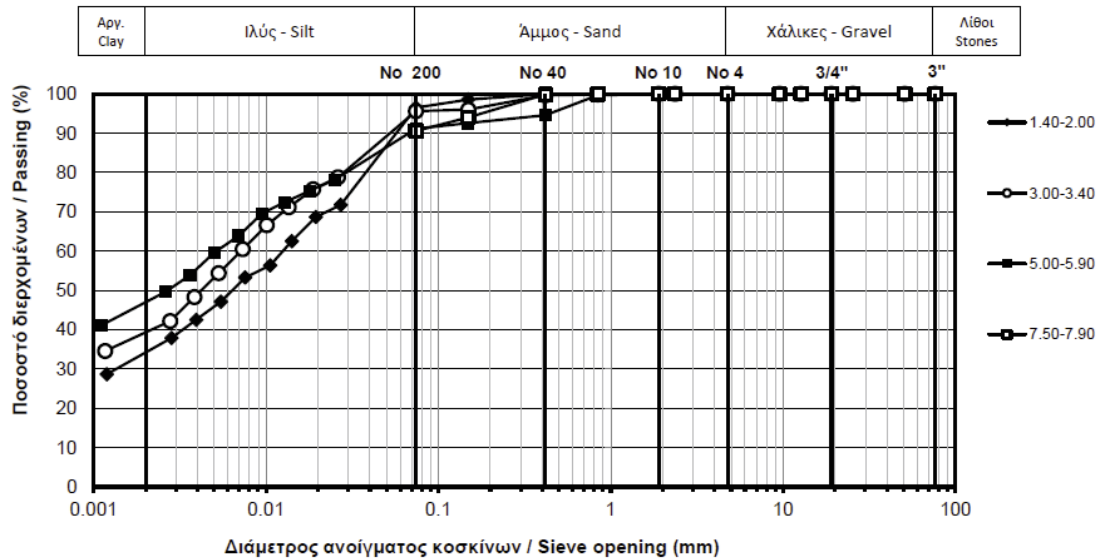
πρότυπο E105-86 την μετάφρασή τους σε ενδείξεις ονομαστικού μεγέθους κόκκων και αντίστοιχο ποσοστό διερχομένων οπότε συμπληρώνεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού και για το λεπτόκοκκό του μέρος.



Σχήμα 3.2.4 Ογκομετρικοί σωλήνες και αραιόμετρα (πυκνόμετρα) που χρησιμοποιήθηκαν.



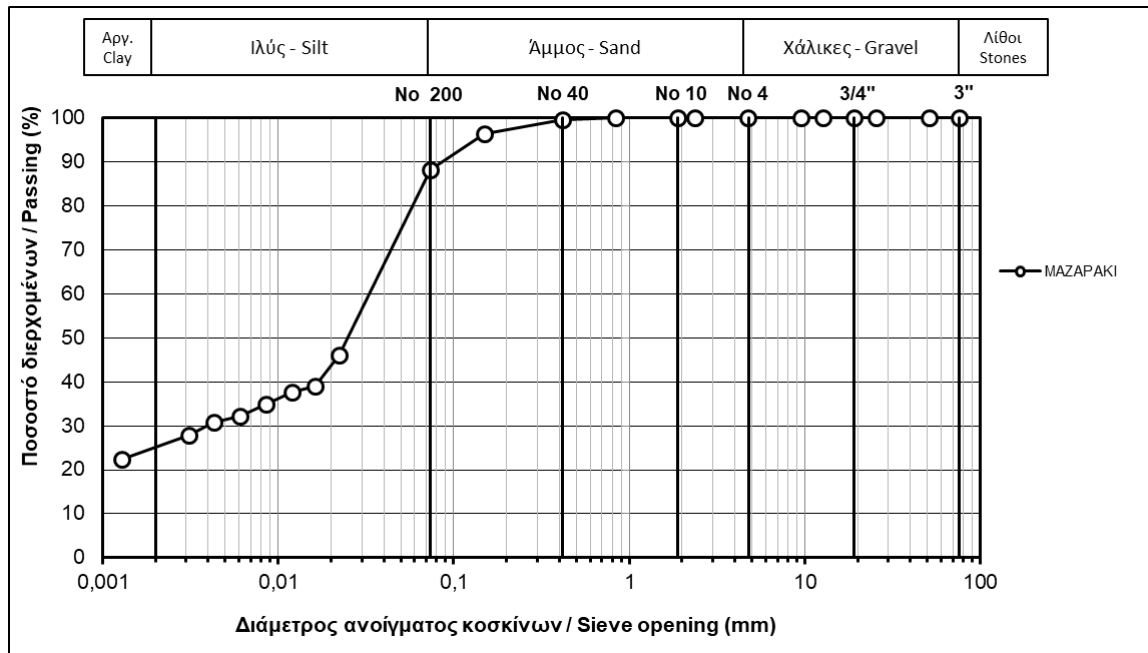
Σχήμα 3.2.5 Παράδειγμα καμπύλης κοκκομέτρησης χωρίς αραιόμετρο (Μπαρδάνης, 2019).



Σχήμα 3.2.6 Ολοκληρωμένη καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης μετά την δοκιμή του αραιόμετρου (Μπαρδάνης, 2019).

Η μορφή της καμπύλης μας δίνει χρήσιμες πληροφορίες για τις ιδιότητες του εδάφους. Μας δείχνει αν το υλικό είναι ομοιόμορφο, καλά, κακά ή βαθμιδωτά διαβαθμισμένο. Ανάλογα με τη διαβάθμιση μπορούμε να εξάγουμε τα πρώτα συμπεράσματα τα οποία είναι για παράδειγμα ότι σε ένα καλής διαβάθμισης υλικό οι μικροί κόκκοι εισχωρούν στα κενά μειώνοντας τα και δημιουργώντας ένα συμπαγές υλικό με μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση, μικρότερη παραμορφωσιμότητα, μεγαλύτερη διατμητική αντοχή και συνήθως επίτευξη μεγαλύτερης πυκνότητας κατά τη συμπύκνωσή του. Σε κακής διαβάθμισης υλικά αντίστοιχα δημιουργούνται κενά μεταξύ κόκκων τα οποία μεταβάλλουν προς το χειρότερο όλες τις παραπάνω ιδιότητες. Στην περίπτωση που τα εδαφικά υλικά είναι κυρίως λεπτόκοκκα (δηλαδή έχουν ποσοστό διερχομένων από το κόσκινο Νο200 μεγαλύτερο από 50%), ο καθορισμός αυτών των ιδιοτήτων γίνεται κυρίως από την πλαστικότητα του λεπτόκοκκου μέρους των υλικών.

Στο Σχ. 3.2.7 παρουσιάζεται η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης που προέκυψε για το υλικό στο οποίο πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Από το σχήμα προκύπτει πολύ υψηλό ποσοστό διερχόμενων από το κόσκινο Νο200 (88,2%) και το ποσοστό της αργίλου από τη δοκιμή του αραιόμετρου 24,6% και της ιλύος αντίστοιχα 63,6%. Το υπόλοιπο ποσοστό (11,8%) απαρτίζεται κατά κύριο λόγο από λεπτόκοκκη άμμο.



Σχήμα 3.2.7 Καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης, Μαζαράκι

3.2.2 Πλαστικότητα εδαφικών υλικών

Η επίδραση του νερού των πόρων είναι ιδιαίτερη σημαντική για την μηχανική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών. Σε στερεή μορφή το υλικό θεωρείται ελαστικό και αντέχει μέχρι το φορτίο αστοχίας του. Σε ρευστή μορφή από την άλλη δε μπορεί να παραλάβει φορτίο. Όταν είναι σε πλάσιμη μορφή δηλαδή σε ενδιάμεση υγρασία το εδαφικό υλικό μπορεί και παραμορφώνεται συνεχώς πλαστικά χωρίς να επανέρχεται στην αρχική του μορφή μετά την αφαίρεση του φορτίου που επιβάλλουμε. Τα περισσότερα λεπτόκοκκα εδάφη βρίσκονται σε πλαστική κατάσταση ή ημιστερεή. Στην Ελλάδα στους καλοκαιρινούς μήνες πολλές φορές τα συναντάμε και σε πλήρως στερεή μορφή επειδή είναι πολύ ξηρά λόγω μερικού κορεσμού.

Οι περιεκτικότητες σε νερό που αντιστοιχούν στα όρια μεταξύ των διαφόρων καταστάσεων ονομάζονται όρια Atterberg και ορίζονται ως:

- Όριο υδαρότητας w_L : Το ποσοστό υγρασίας που οριοθετεί τη μετάβαση από μία ημιστερεή σε μία υδαρή κατάσταση.
- Όριο πλαστικότητας w_P : Το ποσοστό υγρασίας που οριοθετεί τη μετάβαση από μία ημιστερεή σε μία στερεή κατάσταση.

- Όριο συρρίκνωσης w_s : Το ποσοστό υγρασίας που για μικρότερες τιμές του δεν μειώνεται άλλο ο όγκος του εδάφους.

Η διαφορά του ορίου υδαρότητας με το όριο πλαστικότητας ονομάζεται δείκτης πλαστικότητας και συμβολίζεται με $I_p = w_L - w_p$.

Στα αργιλικά εδαφικά υλικά η ύπαρξη νερού παίζει μεγάλη σημασία λόγω των ηλεκτρικών φορτίων που δημιουργούνται μεταξύ των αργιλικών πλακιδίων. Αντίθετα στα χονδρόκοκκα υλικά δεν παίζει κάποιο ουσιαστικό ρόλο. Στα αργιλικά εδαφικά υλικά για αυτό το λόγο είναι και ιδιαίτερα δύσκολη η απομάκρυνση του νερού από τους πόρους.

Προκειμένου να μετρηθεί η πλαστικότητα του λεπτόκοκκου μέρους των εδαφικών υλικών ακολουθείται η εξής πειραματική διαδικασία: Λαμβάνεται αρχικά στεγνό δείγμα διερχόμενο από το κόσκινο Νο40 (μετά από ξήρανση στους $60\text{ }^\circ\text{C}^1$) και στην συνέχεια με την βαθμιαία προσθήκη νερού για την επίτευξη της πλάσιμης κατάστασης που αναφέρουμε παραπάνω ακολουθήσαμε τη πειραματική διαδικασία στη συσκευή Casagrande για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας του υλικού (Σχ. 3.2.8 & 3.2.9). Τοποθετείται υγρό υλικό εντός της «κάψας» της συσκευής Casagrande και αφού χαραχθεί με το ειδικό εργαλείο χάραξης που συνοδεύει τη συσκευή η «κάψα» με το υλικό μέσα της ανεβοκατεβαίνει μέχρι το άνοιγμα που δημιουργήθηκε με το εργαλείο να κλείσει σε μήκος 12.7mm (ή αλλιώς μισής ίντσας), διακρινόμενο ευχερώς με το μήκος τμήματος επί του εργαλείου χάραξης που επιτρέπει την άμεση σύγκριση. Όταν κλείσει το άνοιγμα σε αυτό το μήκος λαμβάνεται δείγμα του υλικού για υπολογισμό υγρασίας και στη συνέχεια το υπόλοιπο υλικό αναμιγνύεται με πρόσθετο νερό και επαναλαμβάνεται η δοκιμή, στην οποία αυτή τη φορά το άνοιγμα κλείνει στο ίδιο μήκος με μικρότερο αριθμό κτύπων της κάψας κ.ο.κ. Σχεδιάζοντας τα προσδιοριζόμενα ποσοστά υγρασίας με τον αριθμό των κτύπων που έκλεισε το άνοιγμα κατά το πρότυπο μήκος για κάθε υγρασία (άξονας του αριθμού κτύπων σε λογαριθμική κλίμακα) προσδιορίζεται το

¹ Ειδικά για την περίπτωση των λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών που περιέχουν πολύ δραστικά αργιλικά ορυκτά (π.χ. μοντοριλλονίτη) ξήρανση στους $110\text{ }^\circ\text{C}$ οδηγεί στην απώλεια νερού που είναι της κρυσταλλικής δομής των ορυκτών και όχι ελεύθερου μεταξύ των αργιλικών πλακιδίων νερού. Για αυτό, τα πρότυπα υπολογισμού των ορίων Atterberg (π.χ. E105-86, ASTM D 4318) προβλέπουν είτε την ξήρανση των υλικών στις ατμοσφαιρικές συνθήκες του εργαστηρίου αν υπάρχει ο χρόνος για αυτό, ή, αν δεν υπάρχει, την ξήρανσή τους σε φούρνο θερμοκρασίας $60\text{ }^\circ\text{C}$, όπως και έγινε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής. Σε περίπτωση που η ξήρανση γίνει σε φούρνο θερμοκρασίας $110\text{ }^\circ\text{C}$ συνήθως τα όρια Atterberg αργιλικών εδαφών πλούσιων σε δραστικά αργιλικά ορυκτά προκύπτουν υποτιμημένα.

ποσοστό υγρασίας στο οποίο αντιστοιχούν 25 κτύποι. Αυτό αποτελεί και το όριο υδαρότητας του υλικού. Στην συνέχεια για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας φτιάχτηκαν τα λεγόμενα 'μακαρονάκια', επιμήκη δηλαδή κυλινδρικά τμήματα υγρού εδάφους αρχικής διαμέτρου 6mm τα οποία κατά την κύλισή τους υπό το ανθρώπινο χέρι πρέπει στον χρόνο που η διάμετρός τους φτάνει τα 3mm να έχουν την μορφή που φαίνεται στο Σχ. 3.2.10. Εφόσον φτάσουν σε αυτή τη μορφή ζυγίζονται και τοποθετούνται στο φούρνο για υπολογισμό της υγρασίας τους, η οποία και αντιστοιχεί στο όριο πλαστικότητας του υλικού.

Για το εδαφικό υλικό από το Μαζαράκι, από τις δοκιμές αυτές προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

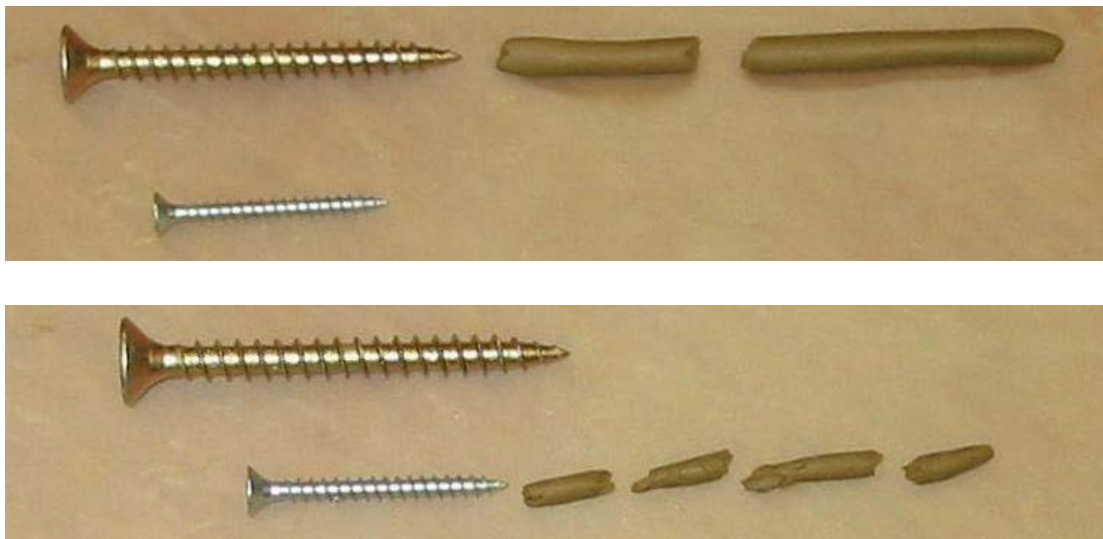
- Όριο υδαρότητας : $w_L = 34\%$
- Όριο πλαστικότητας: $w_P = 16\%$
- Δείκτη πλαστικότητας: $I_P = 18\%$



Σχήμα 3.2.8 Συσκευή Casagrande (Μπαρδάνης, 2019).



Σχήμα 3.2.9 Παράδειγμα πειραματικής διαδικασίας (Μπαρδάνης, 2019).



Σχήμα 3.2.10 Αρχικά ράβδος πάχους 6mm που στη συνέχεια πλάθεται με γυμνό χέρι ώσπου να φτάσει στα 3mm και να θρυματιστεί. Οι βίδες στις εικόνες είναι 6 και 3mm αντίστοιχα (Μπαρδάνης, 2019).

3.2.3 Δοκιμή Γραμμικής Συρρίκνωσης

Σε όμοιο πολτό που χρησιμοποιήσαμε για την δοκιμή της άμεσης διάτμησης και του συμπιεσόμετρου, υγρασίας 50% (περίπου ίσης με 1.5 φορές το όριο υδαρότητας του υλικού), εκτελέστηκε και η δοκιμή γραμμικής συρρίκνωσης. Τοποθετήθηκε υλικό σε τρεις ειδικές μεταλλικές φόρμες, αφού τοποθετήθηκε σε αυτές προσεκτικά βαζελίνη σε όλη την επιφάνεια ώστε να μην επηρεάζεται η μεταβολή του όγκου λόγω τριβής με την μεταλλική επιφάνεια. Στη συνέχεια

αφέθηκαν στην ατμόσφαιρα για ξήρανση. Μία μέρα μετά τοποθετήθηκαν στο φούρνο ξήρανσης στους 60°C για μία ημέρα. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν και σε φούρνο στους 110°C. Κατά όλα τα στάδια τραβήχτηκαν φωτογραφίες για την παρακολούθηση της μεταβολής των όγκων των δοκιμίων. Στο τέλος της δοκιμής μετρήθηκε το αρχικό μήκος και το τελικό της ράβδου και από εκεί υπολογίστηκε η ποσοστιαία συρρίκνωση του δείγματος. Τα δοκίμια που μορφώθηκαν ήταν τρία και **ο μέσος όρος του ποσοστού της γραμμικής συρρίκνωσης ήταν 9,4%**. Το ποσοστό γραμμικής συρρίκνωσης είναι ενδεικτικό της διογκωσιμότητας των εδαφικών υλικών. Εδαφικά υλικά με ποσοστό γραμμικής συρρίκνωσης <5% είναι μικρής διογκωσιμότητας, μεταξύ 5 και 10% μέτριας διογκωσιμότητας και πάνω από 10% μεγάλης διογκωσιμότητας. Το συγκεκριμένο υλικό λοιπόν προέκυψε μέτριας διογκωσιμότητας. Σημειώνεται ότι τέτοιες κατατάξεις είναι μόνο ενδεικτικές και αποκτούν πραγματικά νόημα για τεχνικά προβλήματα μόνο εφόσον το υλικό που ενδιαφέρει βρεθεί στη φύση υπό συνδυασμό πυκνότητας και υγρασίας, στον οποίο εάν παρασχεθεί η απαιτούμενη περίσσεια νερού θα συμβεί πράγματι διόγκωση.



Φωτογραφία 3.2.1 Φόρμες γραμμικής συρρίκνωσης μετά από ξήρανση στην ατμόσφαιρα.



Φωτογραφία 3.2.2 Φόρμες γραμμικής συρρίκνωσης μετά από ξήρανση στους 60°C.



Φωτογραφία 3.2.3 Φόρμες γραμμικής συρρίκνωσης μετά από ξήρανση στους 110°C.

3.2.3 Ειδικό Βάρος της Στερεάς Φάσης

Το ειδικό ή φαινόμενο βάρος είναι ο λόγος του βάρους προς τον όγκο ενός υλικού,
 $\gamma = B / V$.

Δεν μας ενδιαφέρει εάν το υλικό για το οποίο μιλάμε είναι συνεχές ή ασυνεχές. Π.χ. ένα εδαφικό υλικό έχει και στερεά, και υγρή και αέρια φάση. Το ειδικό βάρος που αντιστοιχεί στο σύνολο όλων αυτών των φάσεων είναι το βάρος τους στην μονάδα του όγκου που καταλαμβάνουν (υγρό ειδικό βάρος, γ_t , στα αγγλικά unit weight).

Ο λόγος του βάρους της στερεάς φάσης μόνο (B_d) προς τον όγκο που καταλαμβάνει το σύνολο του εδάφους ονομάζεται ξηρό ειδικό ή φαινόμενο βάρος, γ_d .

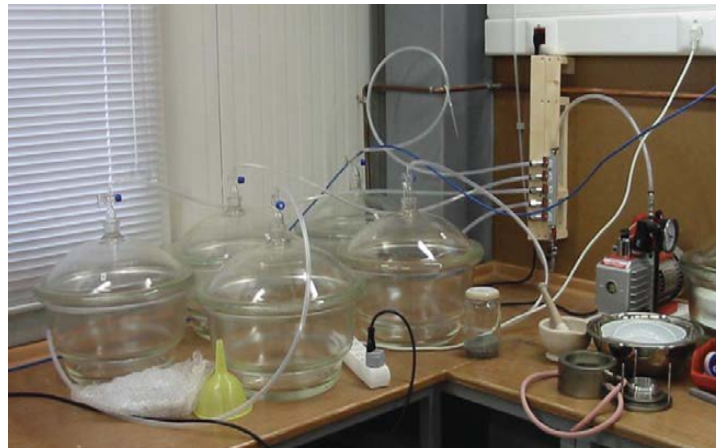
Ο όρος φαινόμενο βάρος χρησιμοποιείται για να αποδώσει τον αγγλικό όρο unit weight. Η χρήση του καθιερώθηκε για να αποδώσει το γεγονός ότι το ειδικό βάρος του εδάφους δεν είναι όπως το ειδικό βάρος ενός συμπαγούς υλικού. Μάλιστα ο όρος ειδικό βάρος διατηρήθηκε για να περιγράψει το ειδικό βάρος της στερεάς φάσης μόνο. Το ορθό είναι να χρησιμοποιούμε τον όρο ειδικό βάρος και όχι φαινόμενο βάρος, διατηρώντας την εξειδίκευση ειδικό βάρος της στερεάς φάσης για την στερεά φάση μόνο του εδάφους. Ο λόγος του ειδικού βάρους της στερεάς φάσης γ_s προς το ειδικό βάρος του νερού γ_w συμβολίζεται με G_s και είναι αδιάστατο μέγεθος.

Η πειραματική διαδικασία είναι η εξής: αρχικά κρατήσαμε περίπου 70gr ξηρού εδαφικού υλικού από το Μαζαράκι διερχόμενο από κόσκινο Νο4. Στη συνέχεια σε ένα ζευγάρι από τις ειδικές ογκομετρικές φιάλες (ληκύθους, Σχ. 3.2.11) τοποθετούμε από 35 gr του υλικού αφού έχουμε ζυγίσει το βάρος της φιάλης χωρίς και μετά και με το υλικό. Προσθέτουμε απιονισμένο νερό μέχρι να καλυφθεί το υλικό και περιμένουμε να κορεστεί. Αμέσως μετά τοποθετούμε τις φιάλες σε ειδικούς θαλάμους και με τη μέθοδο της απαέρωσης με αντλία κενού (Σχ. 3.2.12) περιμένουμε μέχρι να φύγει όλο ο αέρας μέσα από το υλικό μας. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή βγάζουμε τις φιάλες από το θάλαμο και γεμίζουμε με απιονισμένο νερό μέχρι το ειδικό σημάδι της κάθε φιάλης. Τέλος ζυγίζουμε τις φιάλες και μετράμε τις θερμοκρασίες έκαστης. Με γνωστή και την πυκνότητα του νερού και όλων των παραπάνω στοιχείων μπορούμε και υπολογίζουμε το ειδικό βάρος του εδαφικού μας υλικού.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία για τον υπολογισμό ειδικού βάρους στερεών του εδαφικού υλικού από το Μαζαράκι βρήκαμε ότι το **$G_s=2,73$** .



Σχήμα 3.2.11 Ογκομετρική φιάλη 250ml για τη μέτρηση του ειδικού βάρους της στερεάς φάσης (Μπαρδάνης, 2019).



Σχήμα 3.2.12 Διάταξη για υπολογισμό ειδικού βάρους της στερεάς φάσης. Θάλαμοι απαέρωσης συνδεδεμένοι με αντλία κενού (Μπαρδάνης, 2019).

Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών στο εδαφικό υλικό από το Μαζαράκι δίνουν στοιχεία κοκκομετρικής διαβάθμισης και πλαστικότητας που το κατατάσσουν σε **λεπτόκοκκο εδαφικό υλικό της κατηγορίας CL** (άργιλος και αργιλοϊλύς χαμηλής και μέσης πλαστικότητας). Το όριο υδαρότητας και ο δείκτης πλαστικότητας του υλικού το τοποθετούν επί του διαγράμματος πλαστικότητας του Casagrande πάνω από την γραμμή A και πάνω από τη διαγραμμισμένη ζώνη.

3.3 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Εκτός από τις εργαστηριακές δοκιμές για την εύρεση των φυσικών ιδιοτήτων του εδαφικού υλικού εκτελέστηκαν δοκιμές και για την εύρεση των μηχανικών χαρακτηριστικών του και πώς αυτά επηρεάζονται από την μύζηση που μπορεί να εφαρμοστεί στο υλικό.

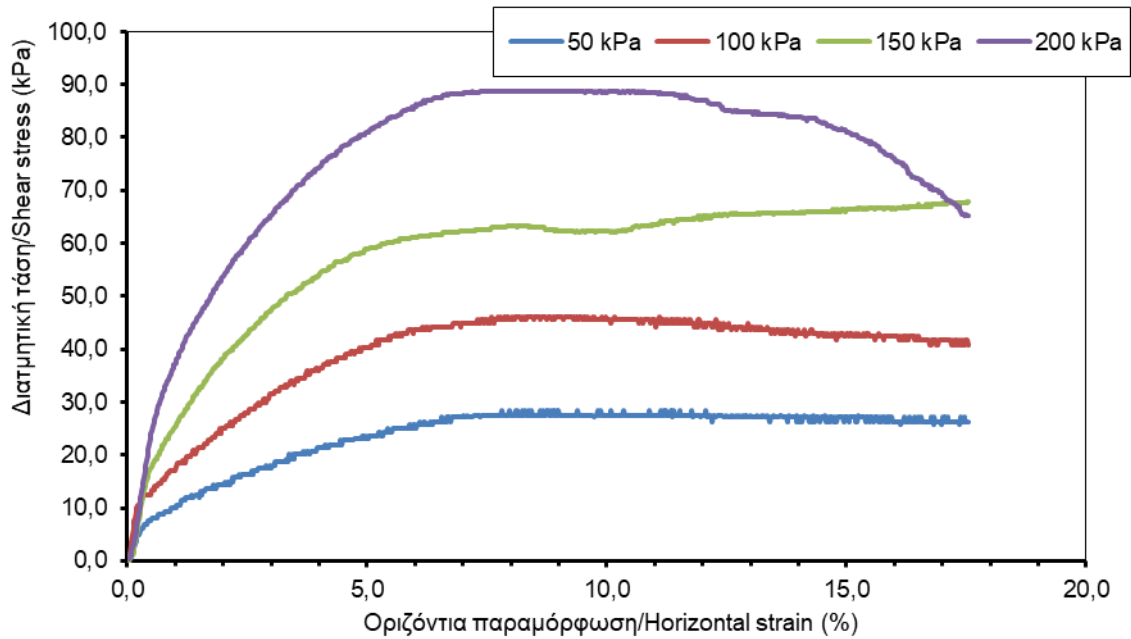
3.3.1 Δοκιμή απευθείας διάτμησης

Η δοκιμή απευθείας διάτμησης (Σχ. 3.3.1) έγινε σε αναζυμωμένο εδαφικό υλικό από το Μαζαράκι σε υγρασία 50%. Το ποσοστό υγρασίας αυτό αποτελεί μιάμιση φορά το όριο υδαρότητας w_L το οποίο είναι 34%. Το υλικό σε αυτή την υγρασία ήταν σε ρευστή μορφή. Αφού τοποθετήθηκε βαζελίνη στα τοιχώματα των τεσσάρων κυψελών απευθείας διάτμησης που χρησιμοποιήθηκαν τοποθετήθηκε μέσα το εδαφικό υλικό. Με προσοχή τοποθετήθηκαν στη συνέχεια τα καπάκια διότι ήταν πολύ εύκολο να διαφύγει υλικό από τα κενά μεταξύ χειλέων κυψέλης και πορολίθων δεδομένης της ρευστής του κατάστασης. Με τη βοήθεια μηκυνσιόμετρων μετρήθηκε το ύψος του κάθε δοκιμίου, η διάμετρος ήταν γνωστή και το βάρος υπολογίστηκε από τη διαφορά του βάρους της κυψέλης χωρίς και με το υλικό. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν οι τέσσερις κυψέλες στη συσκευή με κατακόρυφο φορτίο 12,5kPa και αφέθηκαν με αυτό το φορτίο τέσσερις μέρες. Μετά πάρθηκε μέτρηση από το μηκυνσιόμετρο και ανέβηκε το φορτίο στα 25kPa σε όλα πάλι τα δοκίμια. Πάρθηκαν μετρήσεις και μετά από τρεις ώρες το φορτίο αυξήθηκε εκ νέου στα 50kPa. Μετά από δύο ημέρες στα τρία πλέον δοκίμια αυξήθηκε το φορτίο στα 100kPa ενώ το ένα παρέμεινε στα 50kPa και μετά από μισή ώρα στο ένα αυξήθηκε το φορτίο στα 150kPa και στο άλλο στα 200kPa. Άρα επιβλήθηκε τελικά μια σειρά φορτίων 50, 100, 150, 200 kPa για τα τέσσερα δοκίμια. Κατά την διάρκεια των φορτίσεων λαμβάνονταν μετρήσεις από τι ενδείξεις των μηκυνσιόμετρων μέχρι και την έναρξη της επιβολής διάτμησης (όταν πια οι καθιζήσεις μετά την επιβολή και του τελικού φορτίου είχαν ισορροπήσει).

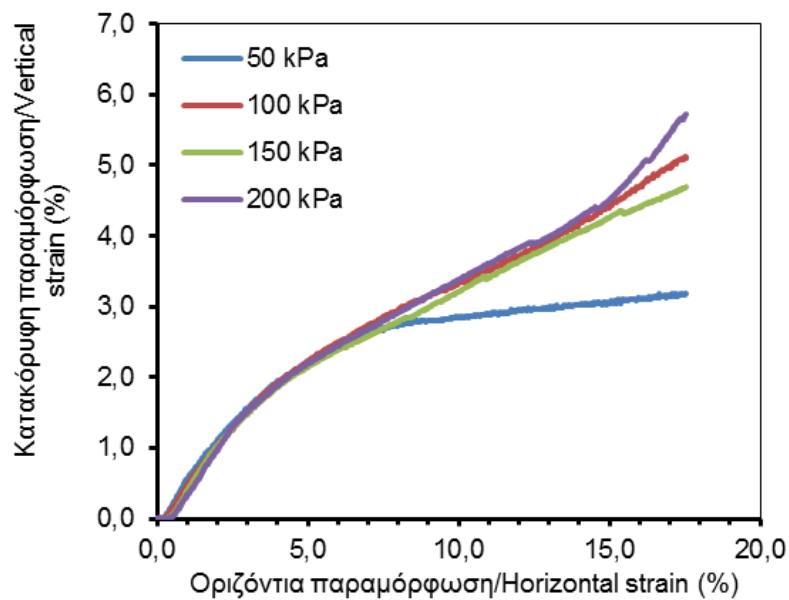


Σχήμα 3.3.1 Εργαστηριακή διάταξη δοκιμής απευθείας διάτμησης (Μπαρδάνης, 2019).

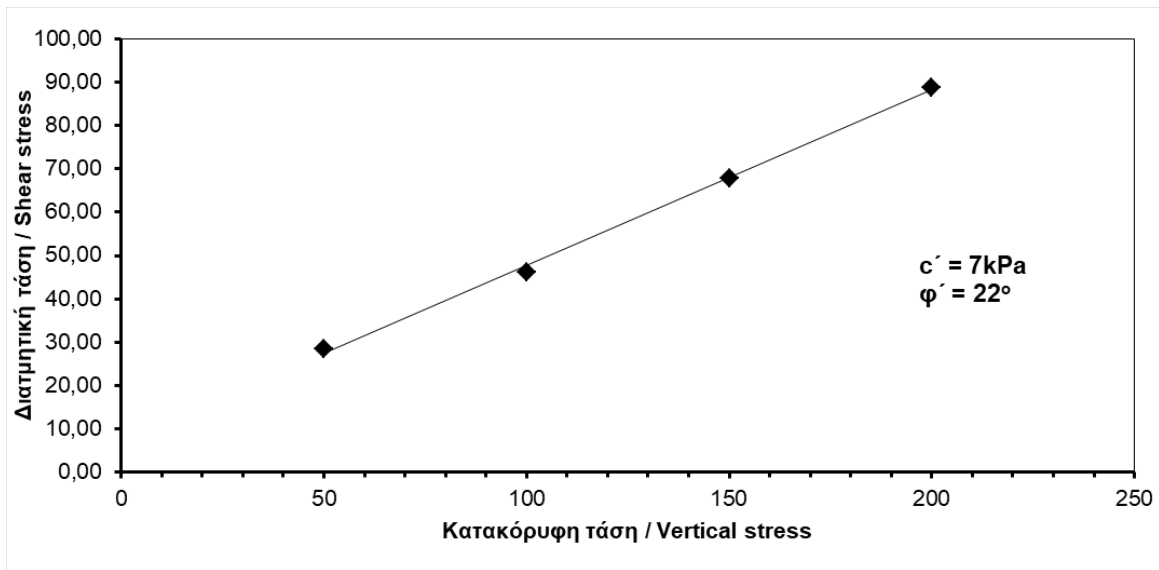
Από τη δοκιμή αυτή προέκυψαν τέσσερα ζεύγη καμπυλών που μας δείχνουν την εξέλιξη της διατμητικής τάσης με την οριζόντια παραμόρφωση (Σχ. 3.3.2) και την κατακόρυφη παραμόρφωση με την οριζόντια παραμόρφωση (Σχ. 3.3.3). Από τη δοκιμή αυτή προέκυψαν οι τιμές παραμέτρων αντοχής c' και ϕ' , 7 kPa και 22° αντίστοιχα (Σχ. 3.3.4) και η αναμενόμενη συστολική συμπεριφορά του υλικού αφού ήταν κανονικά στερεοποιημένο κατά την εκτέλεση της δοκιμής (Σχ. 3.3.3). Η μικρή τιμή της συνοχής που προέκυψε καταγράφεται συχνά σε δοκιμές σε αναζυμωμένα εδάφη και αποδίδεται σε μικροδιαφορές από δοκίμιο σε δοκίμιο και στροφές των καπακιών που προκύπτουν λόγω της μεγάλης παραμορφωσιμότητας του υλικού. Γενικά αναμενόταν μηδενική.



Σχήμα 3.3.2 Διάγραμμα οριζόντιας τάσης με τη παραμόρφωση στο εδαφικό υλικό από το Μαζαράκι και για τα τέσσερα δοκίμια της άμεσης διάτμησης.



Σχήμα 3.3.3 Διάγραμμα κατακόρυφης τάσης με την οριζόντια παραμόρφωση στο εδαφικό υλικό από το Μαζαράκι και για τα τέσσερα δοκίμια της άμεσης διάτμησης (ακολουθείται η σύμβαση προσήμων της εδαφομηχανικής: θετικές παραμορφώσεις είναι οι θλιπτικές).



Σχήμα 3.3.4 Διάγραμμα διατμητικής τάσης με την κατακόρυφη τάση όπως προέκυψε από τη δοκιμή απευθείας διάτμησης στο αναζυμωμένο εδαφικό υλικό από το Μαζαράκι.

3.4 ΑΝΤΟΧΗ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ

3.4.1 Εισαγωγή

Για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους νερού χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές μέθοδοι ελέγχου της μύζησης. Η μέθοδος μετατόπισης άξονα όπως υλοποιείται σε θάλαμο μύζησης, η μέθοδος ελέγχου της μύζησης με χρήση κορεσμένων υδατικών διαλυμάτων αλάτων και με φυσική ξήρανση στην ατμόσφαιρα. Με τον συνδυασμό όλων των μεθόδων μπορούμε και καλύπτουμε ένα μεγάλο εύρος τιμών ολικής μύζησης για ένα εδαφικό υλικό και άρα μία πλήρη χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού σε όρους ποσοστού υγρασίας και μύζησης. Επίσης για όλα τα δοκίμια προσδιορίστηκε και η πυκνότητα για κάθε τιμή της μύζησης με τη μέθοδο της εμβάπτισης σε παραφίνη και ακόμα με

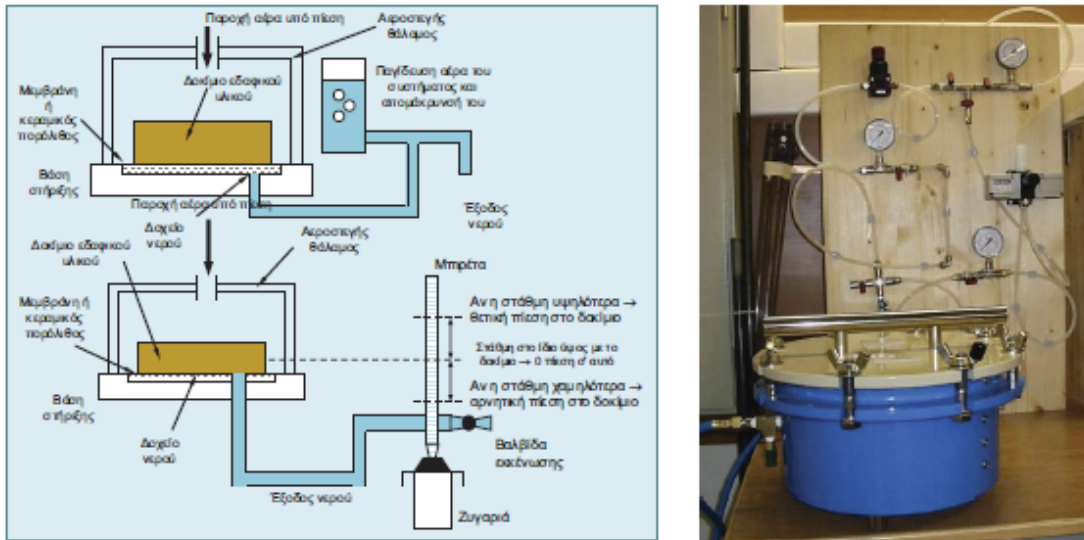
τη χρήση ψυχρόμετρου υγρού κατόπτρου μετρήθηκε και η ολική μύζηση κάθε δείγματος.

3.4.2 Μέθοδος Μετατόπισης Άξονα

Η διαδικασία και λογική της μεθόδου αυτής είναι να καταφέρουμε να εφαρμόσουμε στο εδαφικό μας υλικό διάφορες τιμές μύζησης μέσα σε ειδικό θάλαμο μύζησης. Για κάθε τιμή της μύζησης τα δοκίμια που θα παράγονται θα αξιοποιούνται και σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα (Brazilian) για την παρακολούθηση της εξέλιξης της αντοχής του εδαφικού υλικού σε σχέση με τη μύζηση και τις τιμές της συνοχής και γωνίας διατμητικής αντοχής με μέθοδο που θα περιγραφεί πλήρως στη συνέχεια.

3.4.3 Θάλαμος Μύζησης

Για την μέθοδο μετατόπισης άξονα χρησιμοποιήθηκε θάλαμος μύζησης, με κεραμικό πορόλιθο πίεσης διείσδυσης αέρα 15 Bar (1500 kPa). Ο θάλαμος έχει τρεις διόδους. Από την μία εισέρχεται ο αέρας υπό πίεση που ορίζουμε εμείς, από την άλλη με βοήθεια βαλβίδας εκτόνωσης εκκενώνουμε τον θάλαμο από την πίεση που έχουμε θέσει και μία τρίτη έξοδο που ενώνεται με σωληνάκι εσωτερικά με τον πορόλιθο και μέσω αυτής εξέρχεται το νερό λόγω της πίεσης αέρα από τα δοκίμια μας. Η πίεση εφαρμόζεται μέσω διάταξης που ενώνεται με αεροσυμπιεστή και μέσω ρυθμιστή πίεσης επιλέγουμε την τιμή που θέλουμε κάθε φορά.



Σχήμα 3.4.1 Εργαστηριακή διάταξη θαλάμου μύζησης (Μπαρδάνης, 2019).

Στη παρούσα διπλωματική το υλικό από το Μαζαράκι, ευρισκόμενο σε αρχικό ποσοστό υγρασίας 50%, τοποθετήθηκε στο θάλαμο σε πλαστικούς σωλήνες δύο διαφορετικών διαμέτρων οι οποίοι τοποθετούνταν πάνω στον πορόλιθο και με χρήση πλαστελίνης σφραγίζονταν περιμετρικά η επαφή τους με τον κεραμικό πορόλιθο. Το εδαφικό υλικό ήταν επιμελώς αναμεμιγμένο ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο ομογενές και με μικρούς κτύπους εντός κάθε σωλήνα έγινε προσπάθεια να μην υπάρχουν κενά καθώς και τα δοκίμια θα αξιοποιούνταν και σε επόμενη φάση σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα.



Σχήμα 3.4.2 Διαμορφωμένη διάταξη για αναζυμωμένα εδάφη (Μπαρδάνης, 2019).

Μετά την εφαρμογή της πίεσης αέρα αφήνονταν τα δοκίμια στο θάλαμο μύζησης για περίπου μία βδομάδα έως και 10 ημέρες οπότε και δεν έβγαινε πλέον νερό από το σωληνάκι, άρα ήταν πλέον σταθεροποιημένο το ολικό τους βάρος (δηλαδή είχε επέλθει υδραυλική ισορροπία). Εκεί μετά την αφαίρεση της πίεσης ανοιγόταν ο θάλαμος και αφαιρούνταν δύο δοκίμια (ένα από κάθε διάμετρο). Τα δοκίμια ζυγίζονταν και οι διαστάσεις τους με χρήση παχυμέτρου για τον υπολογισμό του υγρού φαινόμενου βάρους τους αμέσως μετά την έξοδό τους από τον θάλαμο μύζησης. Στη συνέχεια εμβαπτιζόταν μέρος τους (αφού έγιναν οι δοκιμές θλίψης) στην υγροποιημένη παραφίνη για τον υπολογισμό του ολικού τους όγκου στη συνέχεια με την μέθοδο ζύγισης υπό άνωση και υπολογισμό της υγρής τους πυκνότητας από την οποία και σε συνδυασμό με το ποσοστό υγρασίας και το ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών υπολογίζεται ο λόγος κενών, ο βαθμός κορεσμού και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας. Στη συνέχεια ο θάλαμος σφραγιζόταν και πάλι και επαναλαμβάνονταν η διαδικασία με τη νέα πίεση. Συνολικά έγιναν τρεις κύκλοι δοκιμών και καλύφθηκαν οι τιμές μύζησης σε kPa 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200.

Διάταξη ζύγισης
υπό άνωση επί
ζυγού ακριβείας



Σχήμα 3.4.3 Εργαστηριακή διάταξη ζύγισης των παραφινωμένων δοκιμών.

3.4.4 Έλεγχος Μύζησης με χρήση Κορεσμένων Υδατικών Διαλυμάτων Αλάτων

Στη μέθοδο αυτή τοποθετούμε δοκίμια εδάφους σε αεροστεγώς κλεισμένο δοχείο στη βάση του οποίου υπάρχει στη δική μας περίπτωση κορεσμένο υδατικό διάλυμα άλατος. Αυτό που επιτυγχάνουμε με αυτή τη μέθοδο είναι να ελέγχεται ουσιαστικά η σχετική υγρασία που αναπτύσσεται στον αέρα εντός αυτού του δοχείου. Αυτό σημαίνει ότι τοποθετώντας μέσα στο δοχείο ένα εδαφικό δοκίμιο, αυτό ανταλλάσσει υγρασία με τον αέρα μέσα στο δοχείο ώσπου φτάνουμε σε ένα σημείο όπου έχει επέλθει υδραυλική ισορροπία ανάμεσα στη σχετική υγρασία του αέρα και την ολική μύζηση στο εδαφικό υλικό κατά τις προβλέψεις του Νόμου του Kelvin.



Σχήμα 3.4.4 Θάλαμοι με υγρά διαλύματα KCl_2 και $MgCl_2$.

Ο Kelvin (1871) διατύπωσε την ομώνυμη εξίσωση, η οποία συσχετίζει τη μεταβολή της πίεσης κάθετα σε μία καμπυλωμένη διεπιφάνεια υγρής-αέριας φάσης με την πίεση των ατμών στην αέρια φάση. Προκειμένου για έναν τριχοειδή σωλήνα, την υγρή φάση να αποτελείται από νερό και την αέρια από τον ατμοσφαιρικό αέρα, η εξίσωση του Kelvin διατυπώνεται ως εξής (Εξ.3.1):

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

Εξ.3.1

όπου $\mu_1 - \mu_0$ είναι η μεταβολή στο χημικό δυναμικό των υδρατμών στον τριχοειδή σωλήνα λόγω της καμπύλωσης της διεπιφάνειας νερού-αέρα (μ_0 είναι το χημικό δυναμικό του ελεύθερου νερού ως σημείο αναφοράς και μ_1 είναι το χημικό δυναμικό στην επικρατούσα κατάσταση), R είναι η παγκόσμια σταθερά των ιδανικών αερίων, T η θερμοκρασία εκφρασμένη σε βαθμούς Kelvin, u_{u0} είναι η κορεσμένη πίεση υδρατμών σε ισορροπία με το ελεύθερο νερό σε θερμοκρασία T , u_{u1} είναι η επικρατούσα πίεση υδρατμών στον τριχοειδή σωλήνα, T_s είναι η επιφανειακή τάση του νερού, και v_w ο μερικός μοριακός όγκος των υδρατμών. Όταν η αέρια φάση είναι ο ατμοσφαιρικός αέρας και υγρή φάση το νερό όπως εδώ, ο λόγος u_{u1}/u_{u0} είναι η σχετική υγρασία RH. Η διαφορά πίεσης της αέρας και της υγρής φάσης σε τριχοειδείς σωλήνες ακτίνας r εκφράζεται από την Εξ.3.2:

$$u_a - u_w = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad \text{Εξ.3.2}$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. 3.1 και 3.2 προκύπτει η Εξ. 3.3 η οποία εκφράζει τη διαφορά της πίεσης στον αέρα και στο νερό μέσα σε ένα τριχοειδή σωλήνα (και άρα κατ' επέκταση το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης εντός αυτού) ως συνάρτηση των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στον αέρα (της μεν θερμοκρασίας άμεσα και έμμεσα μέσω της επιρροής της στα άλλα μεγέθη, της δε πίεσης έμμεσα μόνο μέσω της επιρροής της στη σχετική υγρασία και στο μερικό μοριακό όγκο των ατμών της υγρής φάσης).

$$u_a - u_w = - \frac{RT}{v_w} \ln \frac{u_{u1}}{u_{u0}} = - \frac{RT}{v_w} \ln (RH) = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad \text{Εξ.3.3}$$

Η Εξίσωση του Kelvin έχει πολύ μεγάλη θεωρητική και πρακτική σημασία. Παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο για την εξήγηση της συσχέτισης ανάμεσα στα φαινόμενα

που επικρατούν στην ατμόσφαιρα και το νερό των πόρων στα μή κορεσμένα εδάφη. Επιτρέπει δε πρακτικές εφαρμογές όπως τη μέτρηση της μύζησης μέσω της μέτρησης της σχετικής υγρασίας, ή τον έλεγχο της μέσω του ελέγχου της σχετικής υγρασίας.

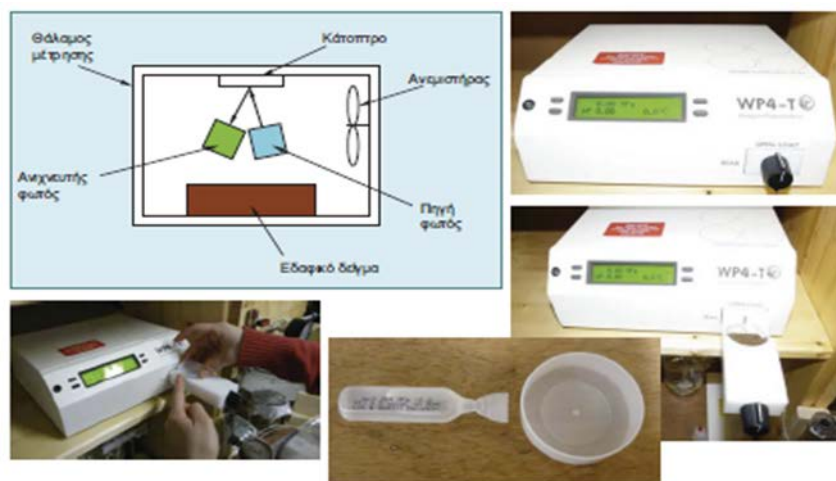
Κλείνοντας με την παρουσίαση της Εξίσωσης του Kelvin προχωράμε και με την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας. Τα δοκίμια που είχαμε αξιοποιήθηκαν ομοίως σε δοκιμές θλίψης και τα υπολείμματα τους παραφινώθηκαν. Τρίμματα του δοκιμίου ομοίως τοποθετήθηκαν σε ψυχρόμετρο για την μέτρηση της μύζησης αφού στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν γνωρίζαμε την τιμή με ακρίβεια (μειονέκτημα της μεθόδου των υδατικών διαλυμάτων που διορθώνεται όταν υπάρχει υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου).

3.4.5 Ξήρανση στην ατμόσφαιρα

Σε αντίστοιχους πλαστικούς σωλήνες και σε μεταλλική βάση που παραφινώθηκε για να μην υπάρχει διαρροή υλικού τοποθετήθηκαν δύο δοκίμια (ανεμπόδιστης και θλίψης κατά γενέτειρα) τα οποία αφέθηκαν για ξήρανση στην ατμόσφαιρα. Κάθε μέρα γινόταν ζύγιση τους ώστε να παρατηρηθεί η σταθεροποίηση τους. Στον ενάμιση μήνα τα δοκίμια ήρθαν σε ισορροπία και τότε αφαιρέσαμε τους πλαστικούς σωλήνες και μετά από περίπου ένα μήνα που τα δοκίμια έχασαν ακόμα λίγη υγρασία αξιοποιήθηκαν ομοίως για τις αντίστοιχες δοκιμές. Στην περίπτωση αυτή επιτεύχθηκαν μεγάλες τιμές μύζησης με χαμηλές τιμές βαθμού κορεσμού. Ακόμα αξιοποιήθηκαν και περισσεύματα υλικού από το θάλαμο μύζησης τα οποία αφέθηκαν μετά τις δοκιμές που τους επιβάλλαμε στην ατμόσφαιρα για ξήρανση. Έτσι καταφέραμε να πάρουμε και κάποια ακόμα σημεία με διαφορετική μύζηση για ακόμα πληρέστερη εικόνα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού, ειδικά στις πιο υψηλές τιμές μύζησης.

3.4.6 Υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου

Αφού έχουμε μορφώσει κάθε δοκίμιο για τις διάφορες τιμές της μύζησης, μετά την εκτέλεση των δοκιμών ανεμπόδιστης και θλίψης κατά γενέτειρα, τμήματά τους θα παραφινωθούν και τρίμματά τους θα τοποθετηθούν σε υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου για την μέτρηση της ολικής μύζησης και υγρασίας κάθε φορά. Αυτή η διαδικασία λειτουργεί ως επαλήθευση της αρχικής μύζησης που θέσαμε σε κάθε βήμα στο θάλαμο μύζησης και επιτρέπει την εκτίμηση της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης αν υπάρχει σημαντική τιμή.

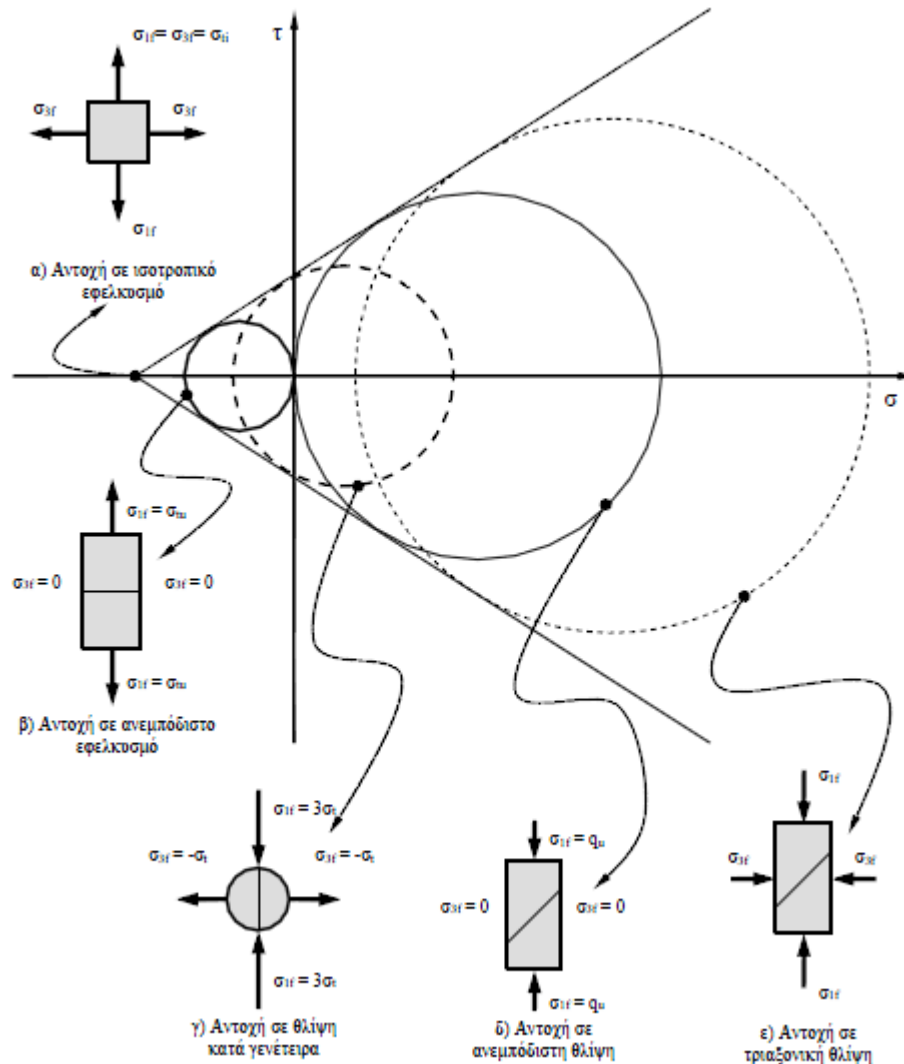


Σχήμα 3.4.5 Διάταξη υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου για τον υπολογισμό της ολικής μύζησης (Μπαρδάνης, 2019).

3.4.7 Δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα

Στο Σχ. 3.4.6 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι διάφορες μορφές φόρτισης από τις οποίες προκύπτουν χαρακτηριστικοί κύκλοι Mohr. Εκφυλισμένος κύκλος Mohr είναι το σημείο τομής της περιβάλλουσας διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb με τον άξονα της ορθής τάσης που προκύπτει εάν εφαρμοστεί ιστροπικός εφελκυσμός μέχρι την αστοχία. Το θεωρητικό σημείο τομής της περιβάλλουσας διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb με τον άξονα της ιστροπικής τάσης ορίζει την αντοχή σε ιστροπικό εφελκυσμό, $\sigma_{ti} = c' / \tan \varphi'$ (Σχ. 3.4.6 α). Χαρακτηριστικός κύκλος Mohr είναι αυτός που αντιστοιχεί στην εντατική κατάσταση του

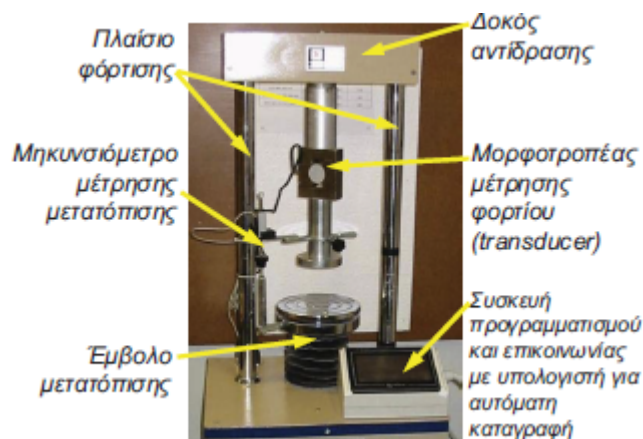
ανεμπόδιστου εφελκυσμού (Σχ. 3.4.6 β). Ο κύκλος αυτός εφάπτεται πάντοτε από δεξιά στον άξονα της διαμητικής τάσης και τέμνει τον άξονα της ορθής τάσης στην τιμή της αντοχής σε ανεμπόδιστο εφελκυσμό, σ_{tu} . Το αντίστοιχο αυτού του χαρακτηριστικού κύκλου Mohr για τη θλίψη είναι αυτός που αντιστοιχεί στην εντατική κατάσταση της ανεμπόδιστης θλίψης (Σχ. 3.4.6 δ). Ο κύκλος αυτός εφάπτεται πάντοτε από αριστερά στον άξονα της διαμητικής τάσης και τέμνει τον άξονα της ορθής τάσης στην τιμή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη, q_u . Μεταξύ των δύο αυτών χαρακτηριστικών κύκλων Mohr βρίσκεται η εντατική κατάσταση που αντιστοιχεί στη θλίψη κατά γενέτειρα (Σχ. 3.4.6 γ). Στην εντατική αυτή κατάσταση, δισκοειδή δοκίμια αστοχούν σε εφελκυσμό κάθετα στη γενέτειρά τους κατά μήκος της οποίας εξασκείται θλιπτική τάση. Κατά την αστοχία, η εφελκυστική αντοχή κάθετα στη γενέτειρα, σ_{tb} , είναι κατ' απόλυτη τιμή 3 φορές μικρότερη της ασκούμενης θλιπτικής τάσης κατά μήκος της γενέτειρας (Hondros, 1959). Οι δύο αυτές τιμές της τάσης επιτρέπουν τον καθορισμό του κύκλου Mohr που αντιστοιχεί στην εντατική αυτή κατάσταση όπως φαίνεται στο Σχ. 3.4.6γ. Κάθε άλλη εντατική κατάσταση υπό μια πλευρική τάση αντιστοιχεί σε συνθήκες τριαξονικής θλίψης (Σχ. 3.4.6 ε), ενώ προφανώς μπορούν να οριστούν και οι συνθήκες φόρτισης υπό άμεση διάτμηση (κατά τις οποίες όμως δεν μπορεί να απεικονιστεί κύκλος Mohr) κατά τις συνήθεις φορτίσεις υπό θλιπτική κατακόρυφη τάση, αλλά όπως κατέστη δυνατόν σχετικά πρόσφατα και υπό εφελκυστική κατακόρυφη τάση (Vesga, 2009).



Σχήμα 3.4.6 Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb με τον ορισμό των εξής χαρακτηριστικών εντατικών καταστάσεων: α) ισοτροπικός εφελκυσμός, β) ανεμπόδιστος εφελκυσμός, γ) θλίψη κατά γενέτειρα, δ) ανεμπόδιστη θλίψη, και ε) τριαξονική θλίψη (Μπαρδάνης, 2019).

Οποιοδήποτε δύο από τους χαρακτηριστικούς κύκλους Mohr του Σχ. 3.4.6 (ή και των σημείων θραύσης υπό συνθήκες άμεσης διάτμησης) επιτρέπουν την εκτίμηση μίας τιμής της συνοχής και της γωνίας διατμητικής αντοχής, με υπόθεση φυσικά της ισχύος της γραμμικότητας του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb. Περισσότεροι από αυτούς τους κύκλους επιτρέπουν την προσέγγιση και εναλλακτικών περιβαλλουσών διατμητικής αντοχής που μπορούν να μην είναι γραμμικές (κάτι αρκετά σύνηθες για πάρα πολύ μικρές τιμές της ορθής τάσης,

πολλώ δε μάλλον για εφελκυστικές τιμές). Με αυτό το σκεπτικό και δεδομένης της απλότητάς τους και της δυνατότητας εκτέλεσής τους σε υφιστάμενες συσκευές, επιλέχθηκε να εκτελεστούν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε δοκίμια αναζυμωμένης αργίλου από το Μαζαράκι τα οποία είχαν υποβληθεί εντός θαλάμου μύζησης σε διάφορες τιμές της μύζησης. Τα υλικά επιλέχθηκε να είναι αναζυμωμένα, ώστε αφενός να μην υπεισέρχονται στην ιστορία φόρτισης- αποφόρτισής τους άλλοι παράγοντες πλην της ξήρανσής τους και της μύζησης που έχουν τα δοκίμια και αφετέρου να μπορούν να μορφωθούν δοκίμια με διαστάσεις και λόγους διαστάσεων σύμφωνους με τους προβλεπόμενους από τα πρότυπα εκτέλεσης των δύο αυτών δοκιμών. Προηγούμενη φόρτιση δοκιμίων πριν την επιβολή της μύζησης θα απαιτούσε ειδικούς τύπους εντός των οποίων θα έπρεπε να γίνει η συμπίεση.

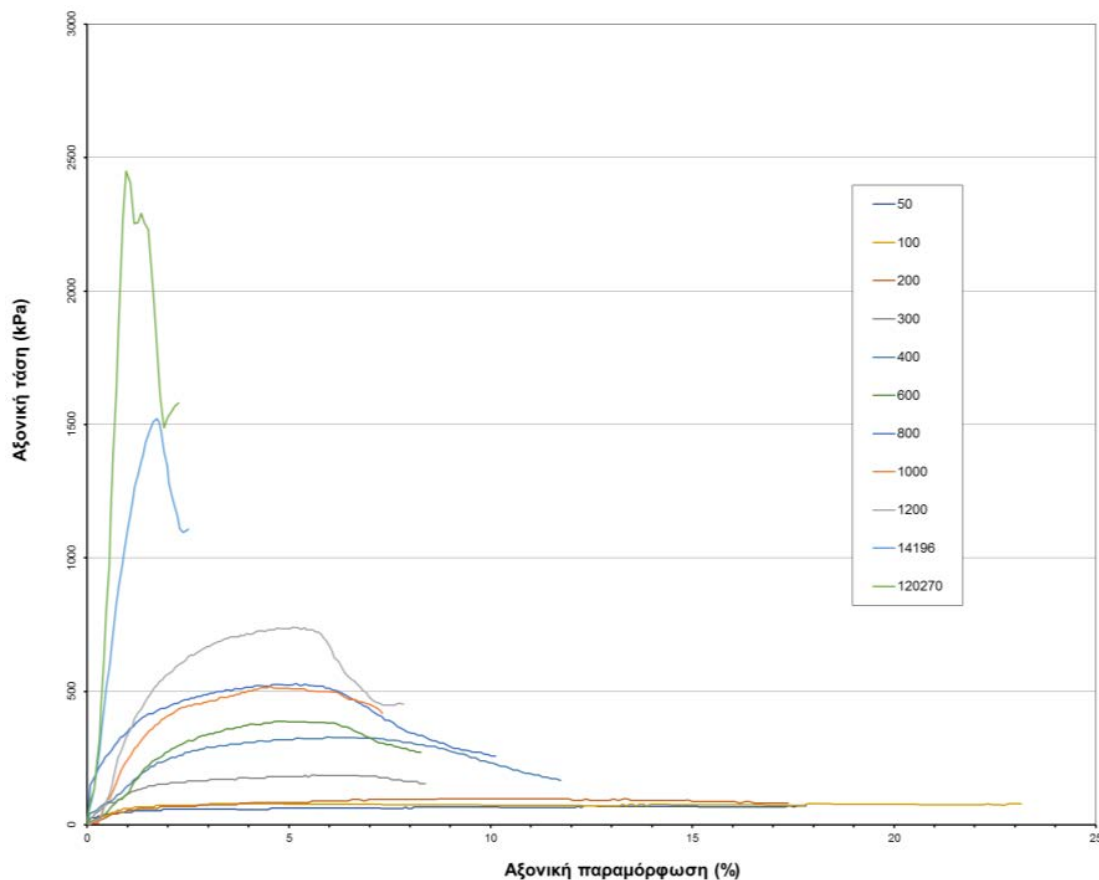


Σχήμα 3.4.7 Η διάταξη της συσκευής ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα.

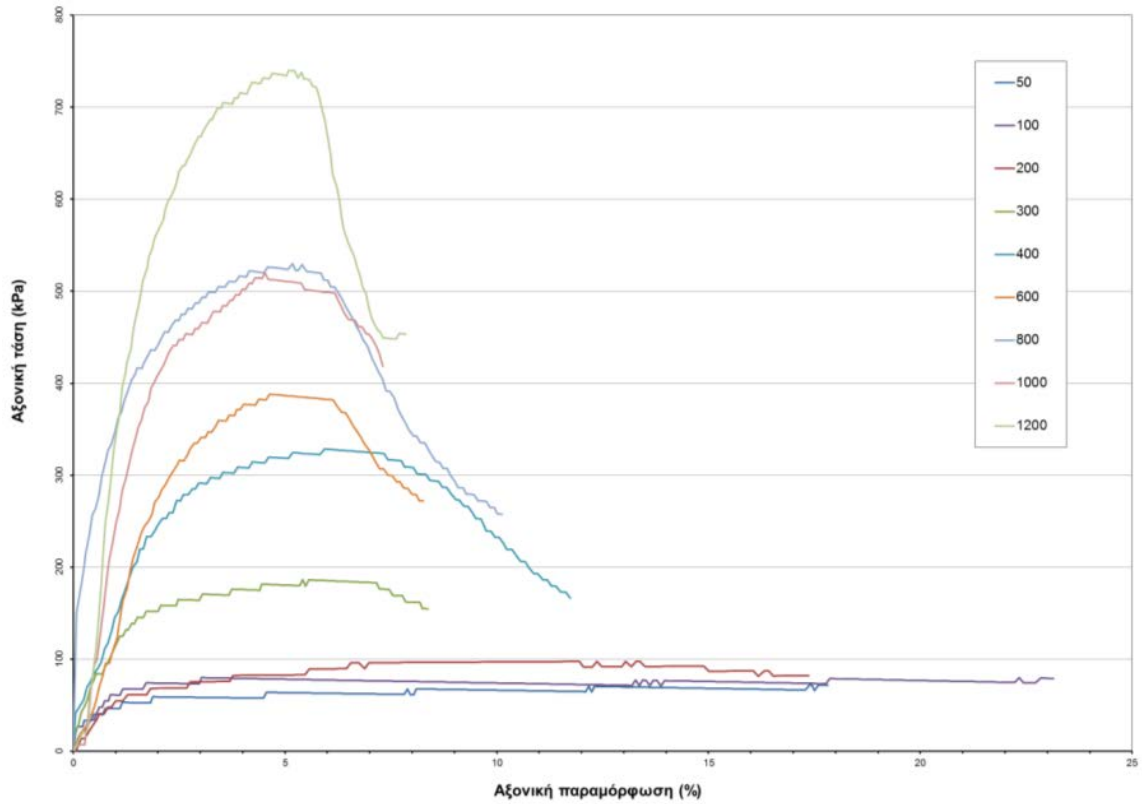
Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα από την εργαστηριακή μελέτη, όσον αφορά τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα και της εξέλιξής τους με την εξέλιξη της μύζησης. Ακόμα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα του συνδυασμού των δύο ειδών δοκιμών για την μελέτη της εξέλιξης της φαινόμενης συνοχής και της γωνίας διαμηθικής αντοχής ομοίως με την εξέλιξη της μύζησης.

Αποτελέσματα Δοκιμών Ανεμπόδιστης Θλίψης.

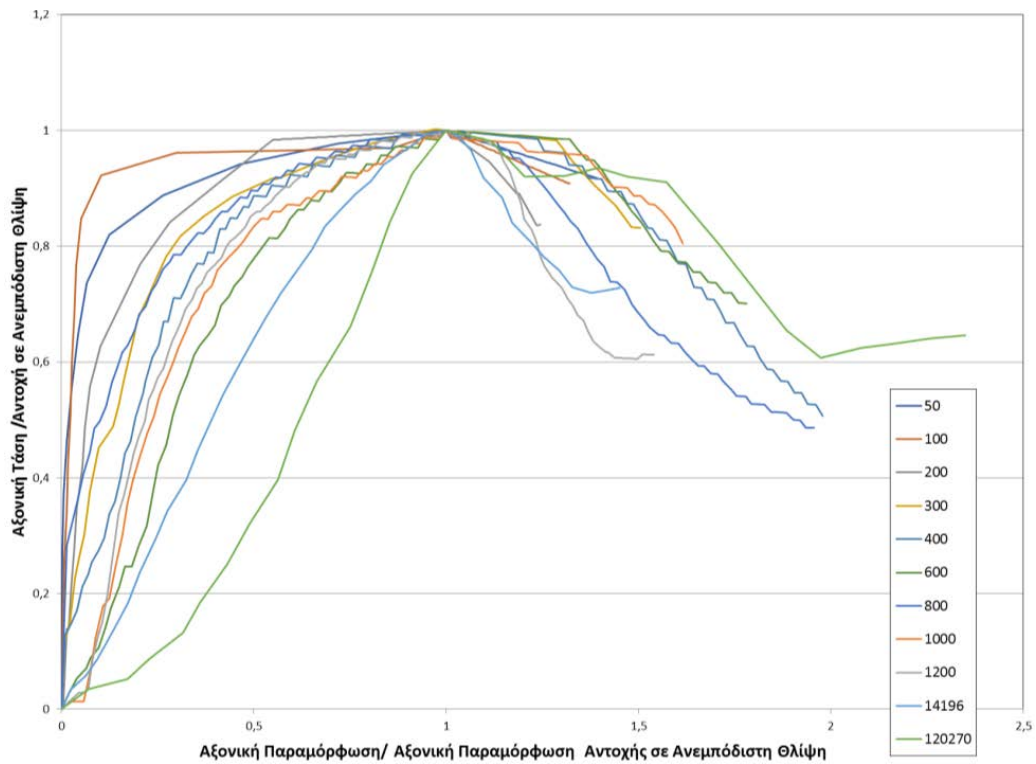
Στο Σχ. 3.4.8 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης από όλες τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν σε δοκίμια αναζυμωμένου εδαφικού υλικού από το Μαζαράκι με σταθερή ταχύτητα παραμόρφωσης 0,3 mm/s. 50 kPa ήταν η μικρότερη τιμή της μύζησης για την οποία καταγράφηκε αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη. Στο υλικό αυτό εκτελέστηκε και δοκιμή σε ένα δοκίμιο που είχε αφεθεί για ξήρανση στον ατμοσφαιρικό αέρα και ανέπτυξε μύζηση 120270 kPa και σε ένα δοκίμιο που αφέθηκε σε ειδικό θάλαμο με διάλυμα $MgCl_2$ με μύζηση 14196 kPa, ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια προέρχονταν από το θάλαμο μύζησης. Λόγω των μεγάλων μεγεθών αυτών των τιμών της μύζησης σχεδιάστηκε και το Σχ. 3.4.9 για τιμές της μύζησης έως 1200 kPa. Στο Σχ. 3.4.10 παρουσιάζονται οι ίδιες καμπύλες με την τάση κανονικοποιημένη ως προς την αντοχή και την αξονική παραμόρφωση κανονικοποιημένη ως προς την παραμόρφωση στην αντοχή όπως προέκυψε για κάθε δοκιμή.



Σχήμα 3.4.8 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για όλες τις τιμές μύζησης, Μαζαράκι.

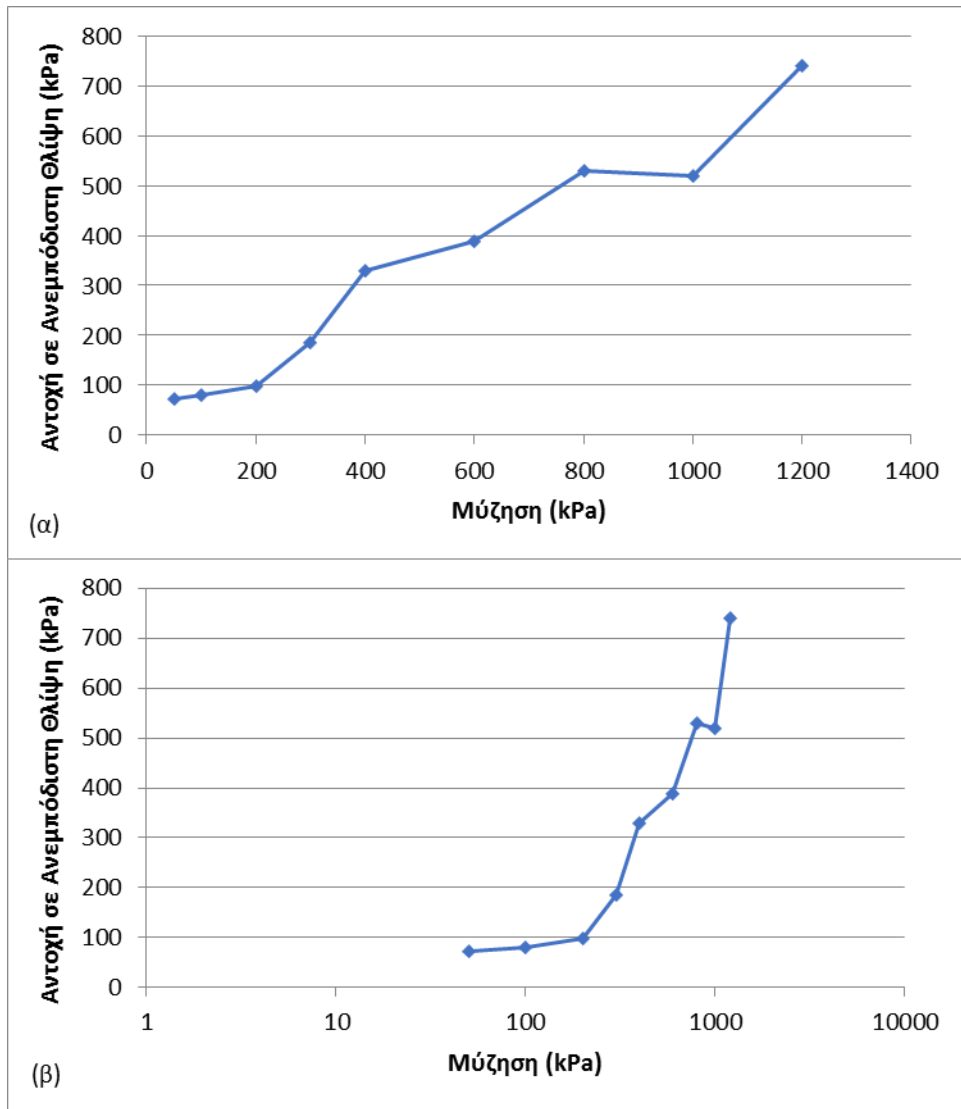


Σχήμα 3.4.9 Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης αντίστοιχα χωρίς τις δύο μεγαλύτερες τιμές της μύζησης για την πιο λεπτομερή όψη των υπολοίπων καμπύλων, Μαζαράκι.

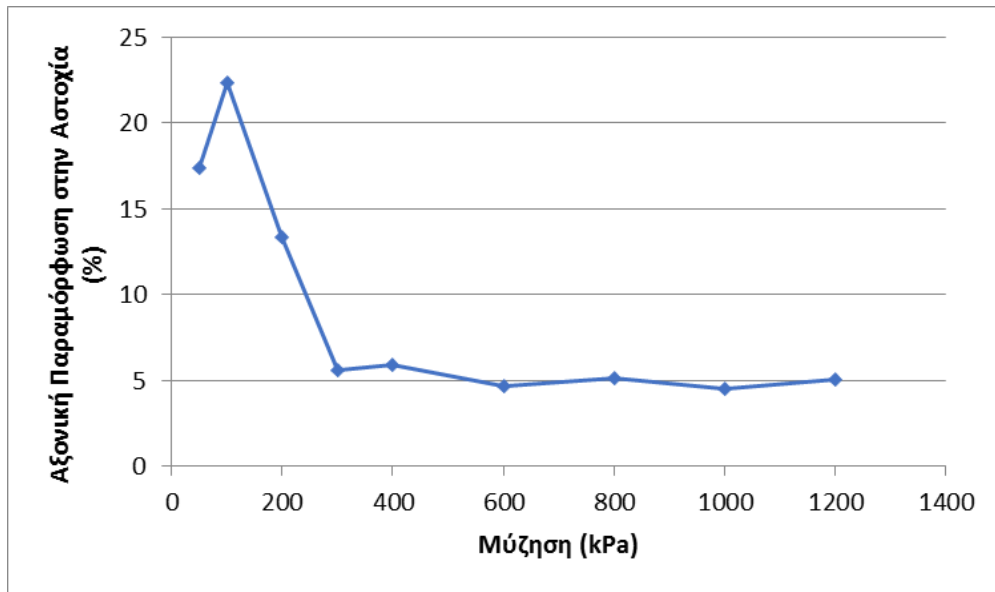


Σχήμα 3.4.10 Κανονικοποιημένες καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης ως προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη και τη παραμόρφωση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη αντίστοιχα, Μαζαράκι.

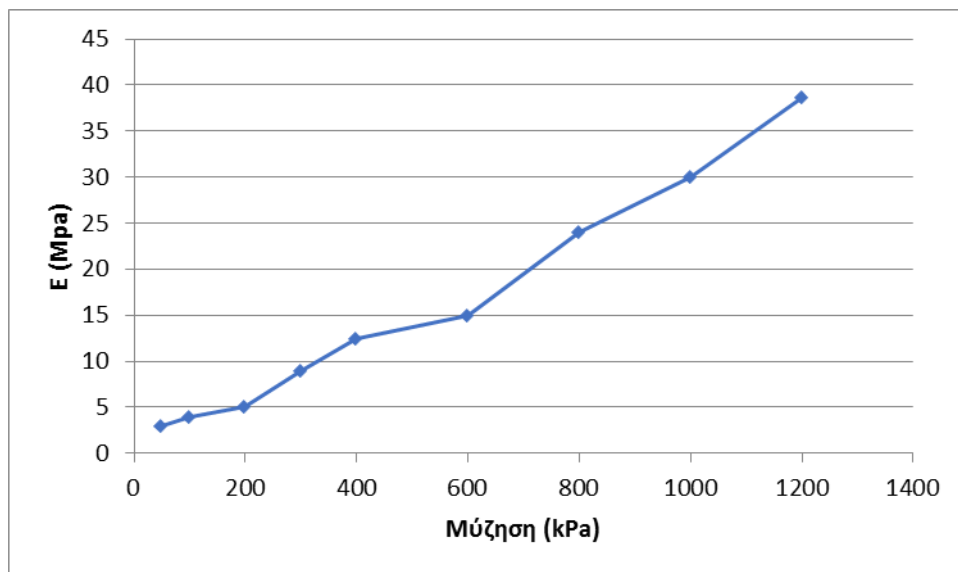
Στο Σχ. 3.4.11 παρουσιάζεται η εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση σε λογαριθμική και μη, μορφή άξονα και στο Σχ. 3.4.12 η εξέλιξη της αξονικής παραμόρφωσης στην αστοχία με τη μύζηση. Τέλος στο Σχ. 3.4.13 παρουσιάζεται η εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας των δοκιμίων με τη μύζηση.



Σχήμα 3.4.11 Εξέλιξη της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση, χωρίς λογαριθμική (α) και με λογαριθμική κλίμακα (β) για τις τιμές της μύζησης, Μαζαράκι.



Σχήμα 3.4.12 Εξέλιξη της αξονικής παραμόρφωσης στην αστοχία με τη μύζηση, Μαζαράκι.



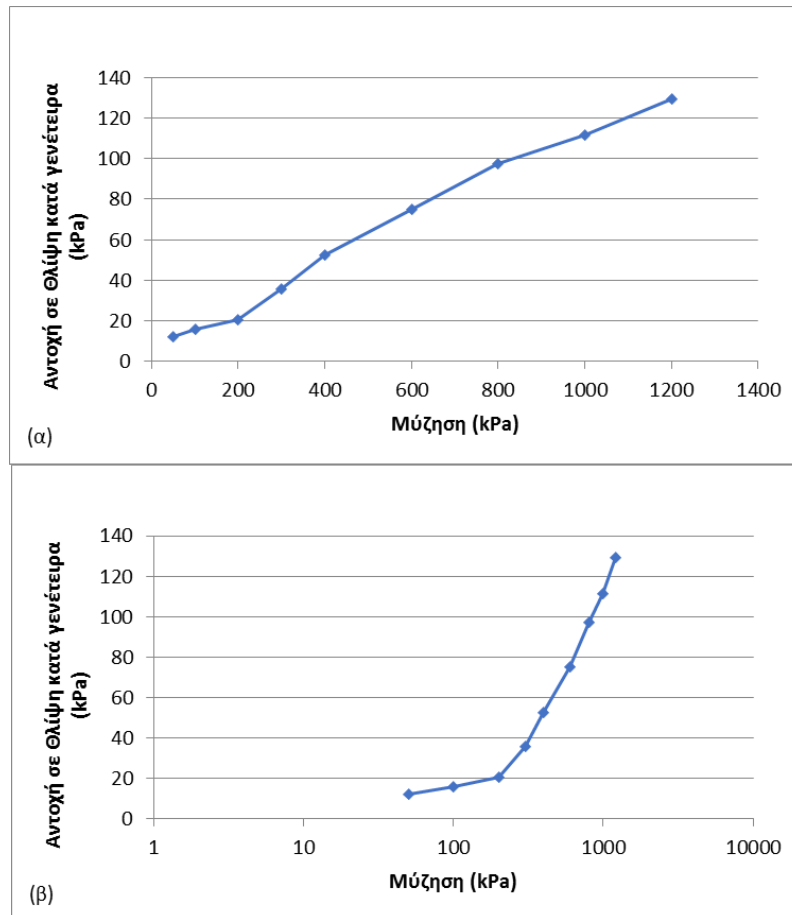
Σχήμα 3.4.13 Εξέλιξη του μέτρου ελαστικότητας με τη μύζηση, Μαζαράκι.

Όπως προκύπτει από το Σχ. 3.4.8 και 3.4.11 η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη αυξάνει με την αύξηση της μύζησης και άρα αυξάνεται με την αντίστοιχη μείωση του βαθμού κορεσμού. Όπως φαίνεται επίσης στο Σχ. 3.4.13 το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με τη μύζηση και επομένως αυξάνεται με τη μείωση του

βαθμού κορεσμού. Η αύξηση της μύζησης επίσης προκαλεί έντονη αύξηση της ψαθυρότητας των υλικών όπως φαίνεται και από το Σχ. 3.4.8 και Σχ.3.4.9 αλλά και κυρίως από το Σχ. 3.4.10 στο οποίο η αξονική τάση έχει κανονικοποιηθεί ως προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη και αντίστοιχα έχει κανονικοποιηθεί η αξονική παραμόρφωση ως προς την παραμόρφωση στην αντοχή για κάθε τιμή της μύζησης. Σε αυτό το συμπέρασμα καταλήγουμε και με τη βοήθεια του Σχ. 3.4.12 για το οποίο βλέπουμε ότι από την τιμή της μετά τα 300 kPa η αξονική παραμόρφωση στην αστοχία παραμένει σταθερή. Για τις πρώτες τιμές της μύζησης σημειώνονται αρκετά μεγαλύτερες τιμές της παραμόρφωσης καθώς τα δοκίμια είχαν ακόμα μεγάλο ποσοστό υγρασίας και ήταν σε ημιπλάσιμη μορφή.

Αποτελέσματα Δοκιμών Θλίψης κατά Γενέτειρα.

Στο Σχ. 3.4.14 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για όλα τα δοκίμια, της εξέλιξης της αντοχής σε θλίψη κατά γενέτειρα, ομοίως με επιβαλλόμενη ταχύτητα παραμόρφωσης 0.3 mm/s όπως και στην ανεμπόδιστη θλίψη, με τη μύζηση. Ομοίως παρατηρούμε την αύξηση της αντοχής με την αύξηση της μύζησης και αντίστοιχα τη μείωση του βαθμού κορεσμού. Ωστόσο η μεταβολή της αντοχής σε θλίψη κατά γενέτειρα με τη μύζηση έχει χαμηλότερο ρυθμό σε σχέση με τον ρυθμό αύξησης της μύζησης με την ανεμπόδιστη.



Σχήμα 3.4.14 Εξέλιξη της αντοχής σε θλίψη κατά γενέτειρα με τη μύζηση, χωρίς λογαριθμική (α) και με λογαριθμική κλίμακα (β) για τις τιμές της μύζησης, Μαζαράκι.

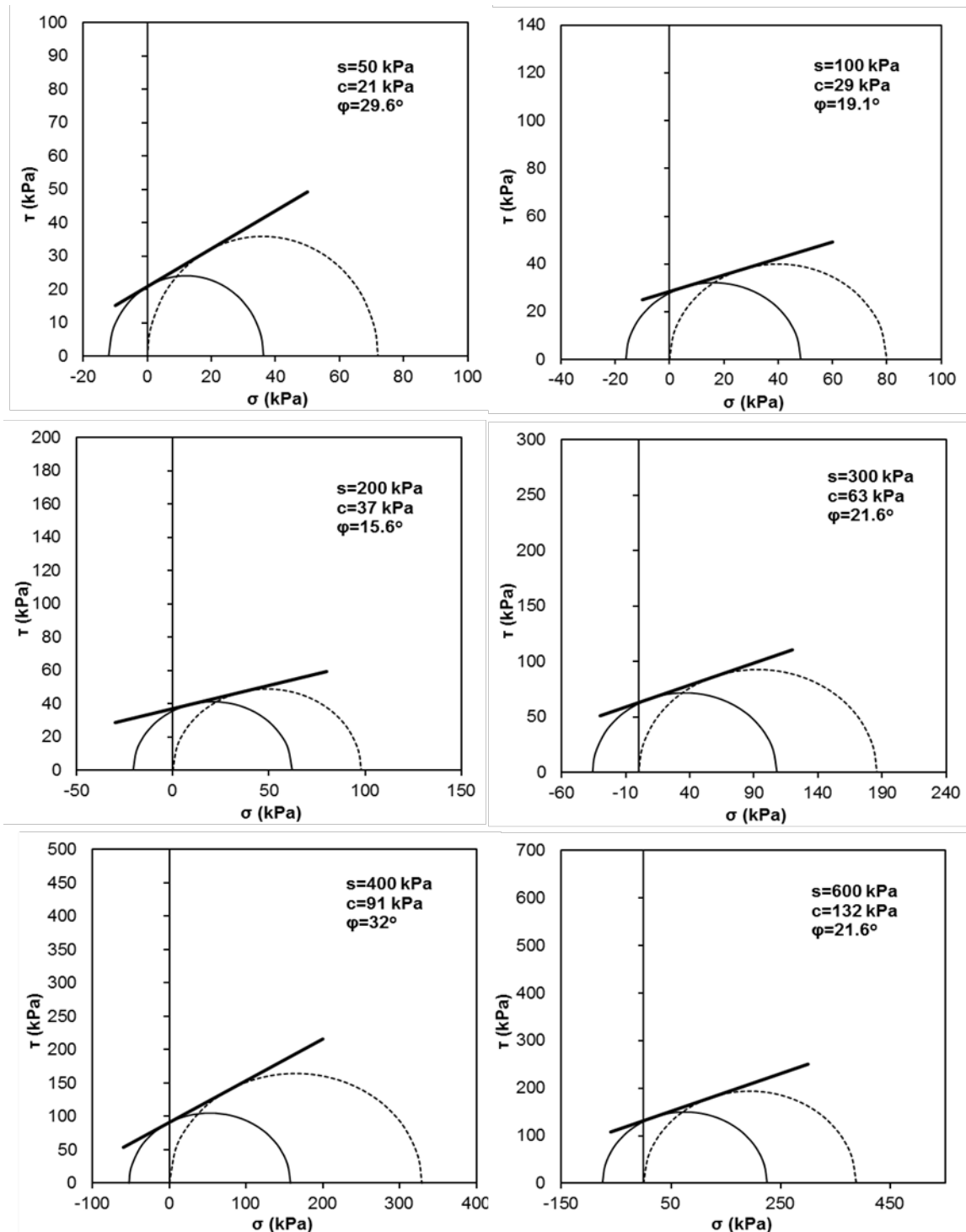
Συνδυασμός Αποτελεσμάτων Ανεμπόδιστης Θλίψης και Θλίψης κατά Γενέτειρα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω αντικειμενικός σκοπός αυτής της σειράς δοκιμών ήταν να συνδυαστούν τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα για να εκτιμηθεί η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού με τη μύζηση μέσω της εκτίμησης της τομής της περιβάλλουσας διατμητικής αντοχής για κάθε μύζηση με τον άξονα της διατμητικής τάσης (βλ. Σχ. 3.4.6) που συνιστά τη «φαινόμενη» συνοχή του γενικευμένου κριτηρίου Mohr-Coulomb. Στα Σχ. 3.4.15 και 3.4.16 παρουσιάζονται όλες οι τιμές της «φαινόμενης» συνοχής και της γωνίας διατμητικής αντοχής για όλα τα ζεύγη ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε σχέση με τη μύζηση και στο Σχ 3.4.17 παρουσιάζεται η εξέλιξη της συνοχής αυτής με τη μύζηση.

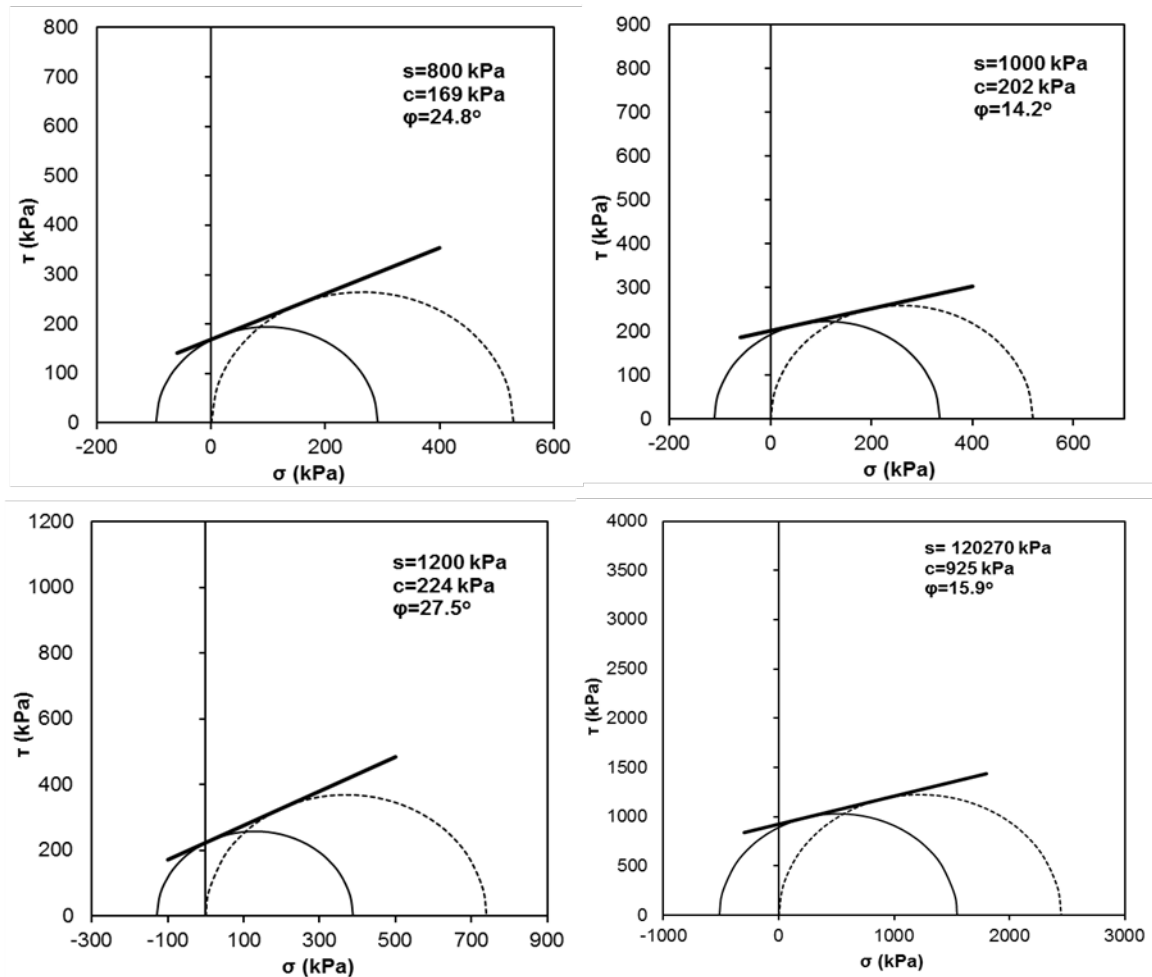
Η εικόνα της εξέλιξης της συνοχής με τη μύζηση μας δείχνει ότι, για το συγκεκριμένο αυτό υλικό από το Μαζαράκι, γίνεται με σχετικά σταθερό ρυθμό μέχρι τη τιμή της μύζησης στα 1200 kPa. Για τις τιμές της μύζησης από τα 1200 kPa και πάνω, επειδή πρακτικά δεν υλοποιήθηκε η ίδια τιμή της μύζησης και στα δύο είδη δοκιμών (ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα) δεν κατέστη δυνατή η ίδια γεωμετρική άσκηση με τους δύο κύκλους Mohr από τα δύο είδη δοκιμών.

Στο Σχ. 3.4.18 παρουσιάζεται η εξέλιξη της γωνίας διατμητικής αντοχής με τη μύζηση όπως υπολογίζουμε από τα ζεύγη δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα. Τα διαγράμματα αυτά υπολογίζονται και σε μοίρες αλλά και σε εφαπτομένη της γωνίας καθώς εκτιμάται ότι η σωστή διατύπωση είναι αυτή δεδομένου του τύπου του κριτηρίου του Mohr-Coulomb στον οποίο χρησιμοποιείται το $\tan\phi$. Ακόμα με ευθεία γραμμή συμβολίζουμε την τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής ($\phi=22^\circ$) την οποία υπολογίσαμε από τη δοκιμή απευθείας διάτμησης και η οποία αναμέναμε να παραμείνει σταθερή όπως υποδεικνύει το γενικευμένο κριτήριο Mohr-Coulomb για μη κορεσμένα εδαφά, ωστόσο βλέπουμε ότι αρκετές από τις τιμές της γωνίας αυτής έχουν αρκετά σημαντικές αποκλίσεις με την εξέλιξη της μύζησης. Για να κατανοήσουμε καλύτερα το φαινόμενο αυτό παραθέσαμε και στη συνέχεια το Σχ. 3.4.19 στο οποίο φαίνεται ότι για όποια διακύμανση στη τιμή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη (οι τιμές στην θλίψη κατά γενέτειρα ακολουθούν πρακτικά μία ευθεία άρα και δεν επηρεάζουν) που οδηγεί σε υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση της αντοχής (θεωρώντας ότι και αυτή θα ακολουθούσε μία ευθεία ή έστω ομαλή καμπύλη) αντίστοιχα παρατηρούμε ότι οδηγεί σε παρόμοια υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση της γωνίας διατμητικής αντοχής.

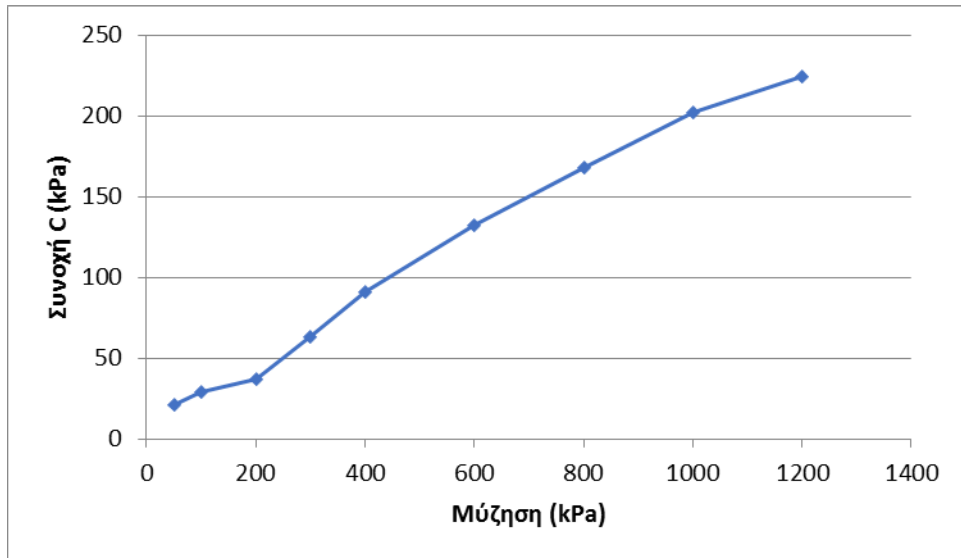
Η εξέλιξη της συνοχής με τη μύζηση για το υλικό από το Μαζαράκι αντιστοιχεί σε μία τιμή $\phi_b = 11^\circ$. Για την αξιολόγηση αυτού του αποτελέσματος συγκεντρώθηκαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα δοκιμών από τον Μπαρδάνη (2016) και μία αντίστοιχη σειρά δοκιμών από το αρχείο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. και παρατίθενται στον Πιν. 3.1.



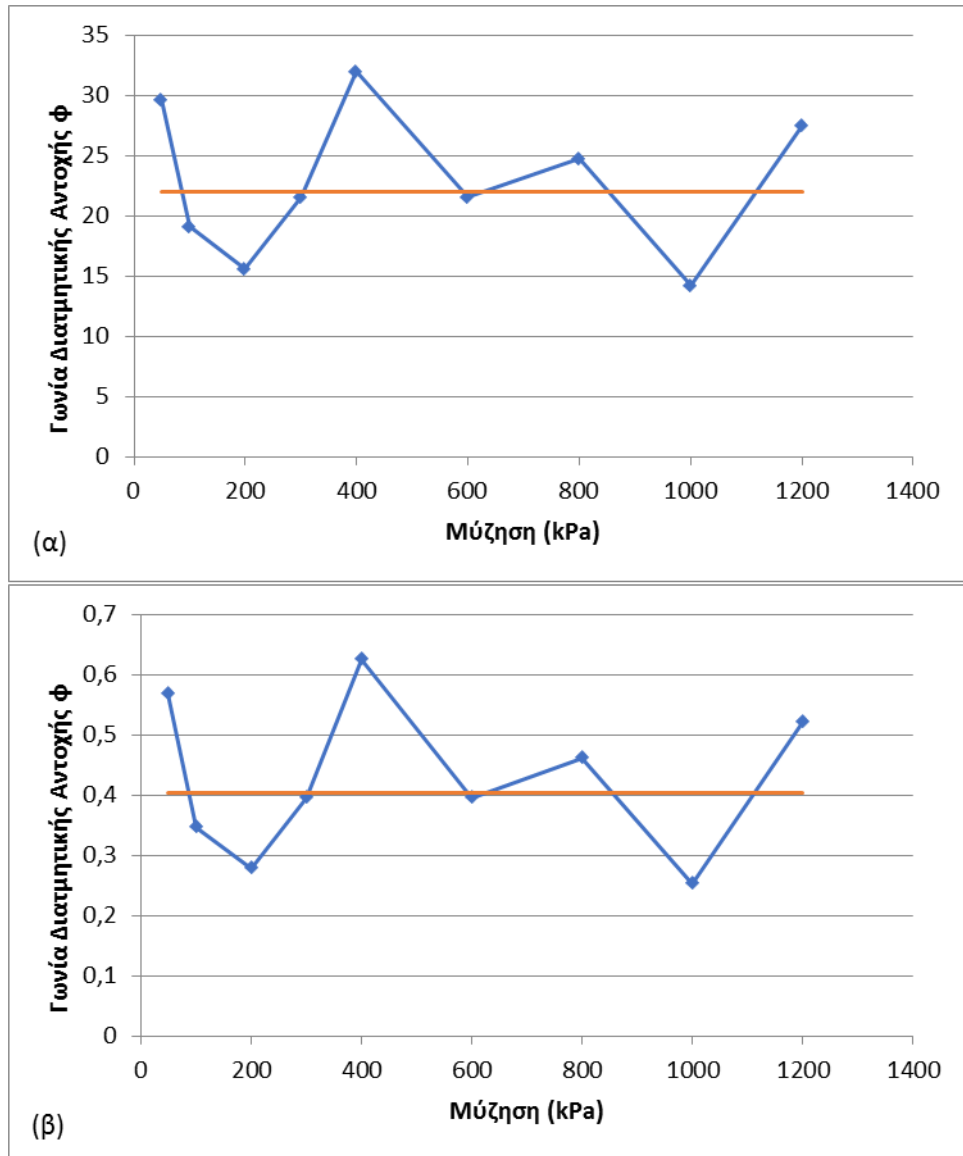
Σχήμα 3.4.15 Κύκλοι Mohr για την θλίψη κατά γενέτειρα (συνεχής γραμμή) και την ανεμπόδιστη θλίψη (διακεκομμένη γραμμή) για τιμές μύζησης 50-600 kPa. Οι τιμές των αξόνων ενώ θα βοηθούσε να είναι όμοιες για όλες τις τιμές της μύζησης για λόγους σύγκρισης, επιλέχθηκαν για την καλύτερη ευκρίνεια των σχημάτων διαφορετικές τιμές για κάθε τιμή της μύζησης.



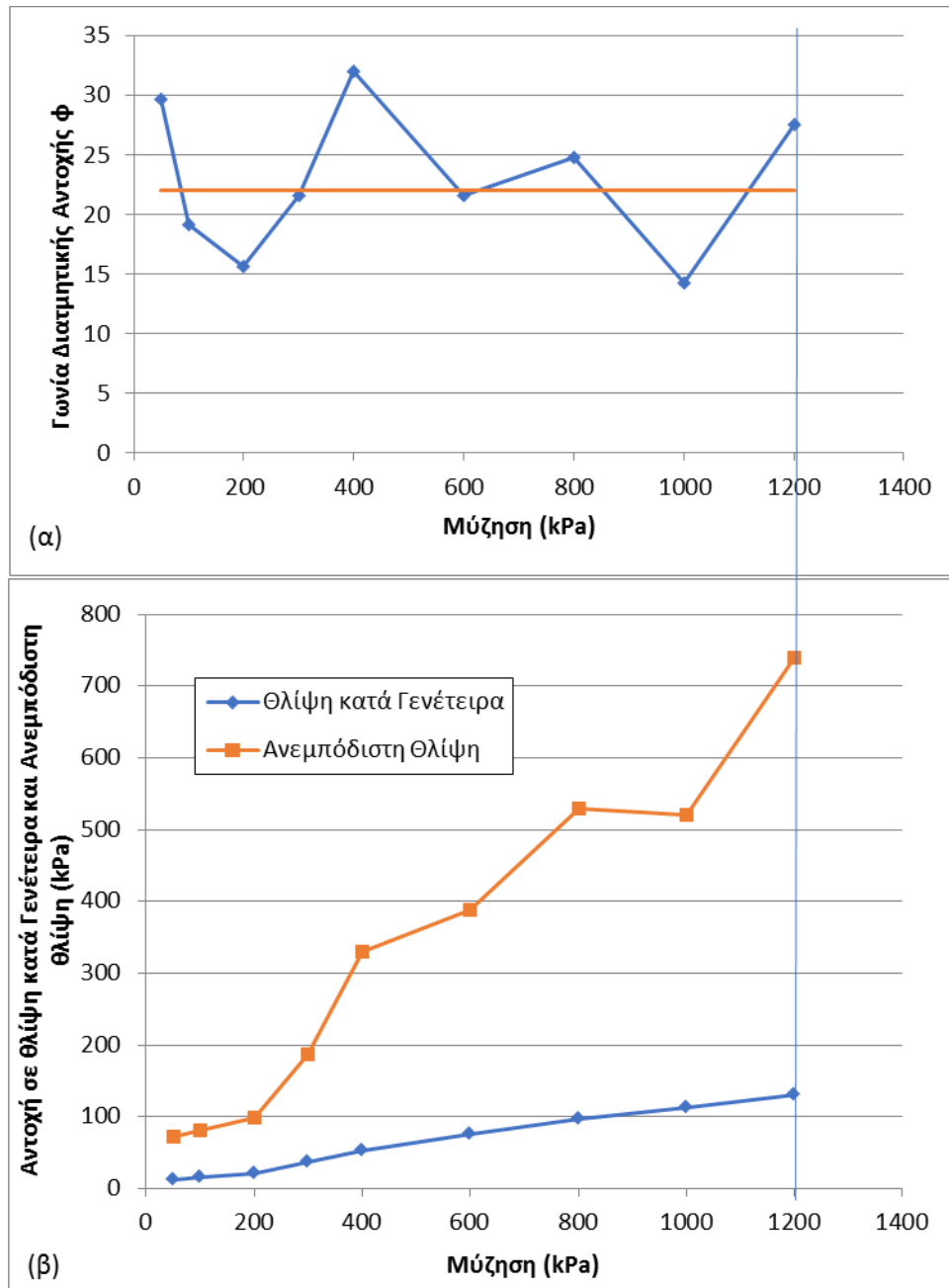
Σχήμα 3.4.16 Κύκλοι Mohr για την θλίψη κατά γενέτειρα (συνεχής γραμμή) και την ανεμπόδιστη θλίψη (διακεκομμένη γραμμή) για τιμές μύζησης 800-1200 kPa και ξήρανσης στην ατμόσφαιρα. Οι τιμές των αξόνων ενώ θα βοηθούσε να είναι όμοιες για όλες τις τιμές της μύζησης για λόγους σύγκρισης, επιλέχθηκαν για την καλύτερη ευκρίνεια των σχημάτων διαφορετικές τιμές για κάθε τιμή της μύζησης.



Σχήμα 3.4.17 Εξέλιξη της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση, Μαζαράκι.



Σχήμα 3.4.18 Εξέλιξη της γωνίας διατμητικής αντοχής με τη μύζηση στο (α) σε μοίρες και στο (β) σε εφαπτομένη της γωνίας και ακόμα σε συσχέτιση με το $\phi=22^\circ$ που είναι η γωνία διατμητικής αντοχής που υπολογίστηκε από την δοκιμή άμεσης διάτμησης και είναι σταθερή ασχέτως μύζησης βάση του κριτηρίου Mohr-Coulomb.



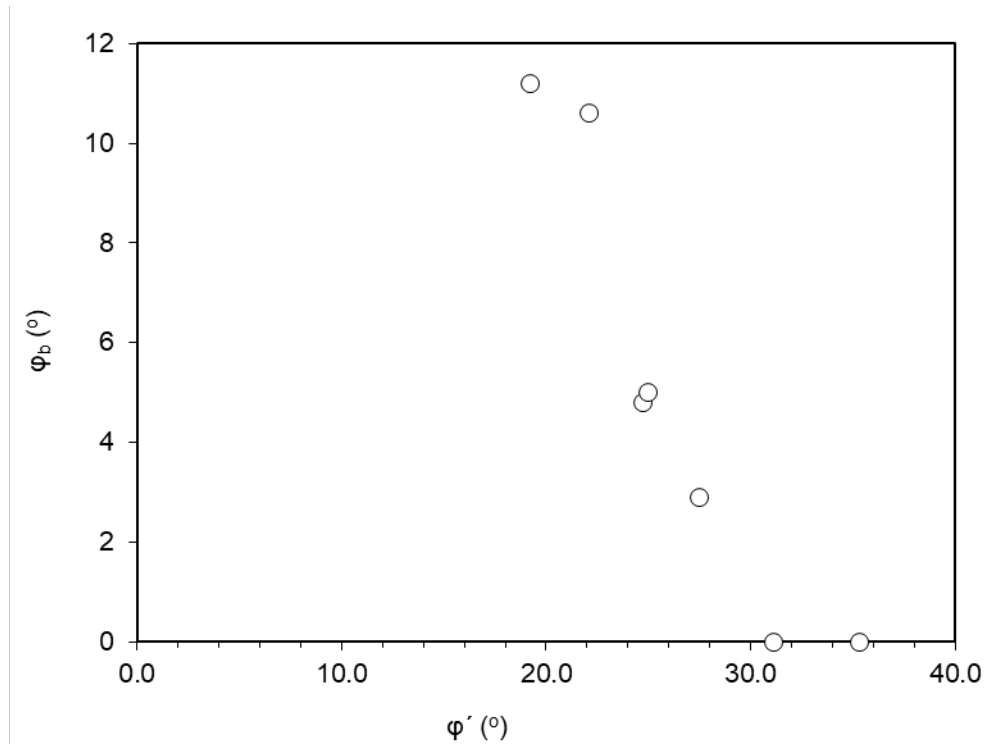
Σχήμα 3.4.19 Εξέλιξη (α) της γωνίας διατμητικής αντοχής και (β) της αντοχής σε ανεμπόδιση και θλίψη κατά γενέτειρα με τη μύζηση που φανερώνει την εκάστοτε υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση της γωνίας διατμητικής αντοχής λόγω υπερεκτίμησης και υποεκτίμησης της αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη ενώ η εξέλιξη της αντοχής σε θλίψη κατά γενέτειρα μοιάζει να είναι ομαλή.

	w _L	w _p	I _p	G _s	Άργι λος	Ιλύς	Άργιλος +Ιλύς	Λεπτή άμμος	Μέση άμμος	Χονδρή άμμος	Χάλικες	φ'	φ _b
	(%)	(%)	(%)	-	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(°)	(°)
Αποσαθρωμένος Φυλλίτης Σκύρου	-	-	-	2.69	2.2	48.5	50.7	27.1	16.8	4.8	0.7	35.3	0.0
Μάργα Πειραιά	28.5	21	7.5	2.75	4.5	58.2	62.7	11.9	15.1	10.3	0	31.1	0.0
Μάργα Κορίνθου	30.5	25	5.5	2.67	6.5	84.7	91.2	8.8	0	0	0	27.5	2.9
Αργιλοποιημένος Ιλυόλιθος Πάρνηθας	33	16.5	16.5	2.69	28.3	46.3	74.6	10.5	7.9	2.9	4.1	24.7	4.8
Άργιλος Αμαρουσίου	47.5	23	24.5	2.75	34.2	51.8	86	1.7	3.7	7.6	1	19.2	11.2
Μάργα Χαλκουτσίου	51	20.5	30.5	2.69	20.5	64.2	84.7	10	4.1	0.9	0.3	25.0	5.0
Μαζαράκι (ΠΑΡΟΥΣΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ)	34	16	18	2.73	26	63	89	11	0	0	0	22.1	10.6

Πιν. 3.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών κατάταξης και προσδιορισμού εξέλιξης αντοχής με την μύζηση από Μπαρδάνη (2016), αρχείο ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. και παρούσα διπλωματική.

Τα αποτελέσματα του Πιν. 3.1 χρησιμοποιήθηκαν για τη σχεδίαση του Σχ. 3.4.20 στο οποίο συσχετίζεται η γωνία εξέλιξης της μεταβολής της αντοχής με την μύζηση ϕ_b με την γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' . Η συγκέντρωση αυτών των στοιχείων υποδεικνύει ότι για εδαφικά υλικά με μεγαλύτερη γωνία ϕ' από 30° η αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών από την πίεση διείσδυσης αέρα και μετά μηδενίζεται, ενώ για μικρότερες τιμές η γωνία ϕ_b αυξάνεται τόσο περισσότερο, όσο μικρότερη γίνεται η γωνία διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου εδάφους. Δεδομένου ότι αυτή μειώνεται τόσο περισσότερο, όσο πιο λεπτόκοκκο και πλαστικό γίνεται ένα εδαφικό υλικό, το Σχ. 3.4.20 τεκμηριώνει την εμπειρία που καταγράφεται στη βιβλιογραφία (π.χ. Fredlund & Rahardjo, 1993), ότι όσο πιο αργιλικό ένα εδαφικό υλικό, τόσο περισσότερο αυξάνεται η φαινόμενη συνοχή του μετά την πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού με την αύξηση της μύζησης².

² Σημειώνεται ότι μέχρι την μύζηση που αντιστοιχεί στην πίεση διείσδυσης αέρα, ο ρυθμός αύξησης της φαινόμενης συνοχής με την μύζηση ακολουθεί την εφαιπτομένη της γωνίας διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου εδάφους.



Σχήμα 3.4.20. Εξέλιξη της γωνία μεταβολής της αντοχής με τη μύζηση ϕ_b με την γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' του αντίστοιχου εδαφικού υλικού πλήρως κορεσμένου.

3.4.8 Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους-Νερού

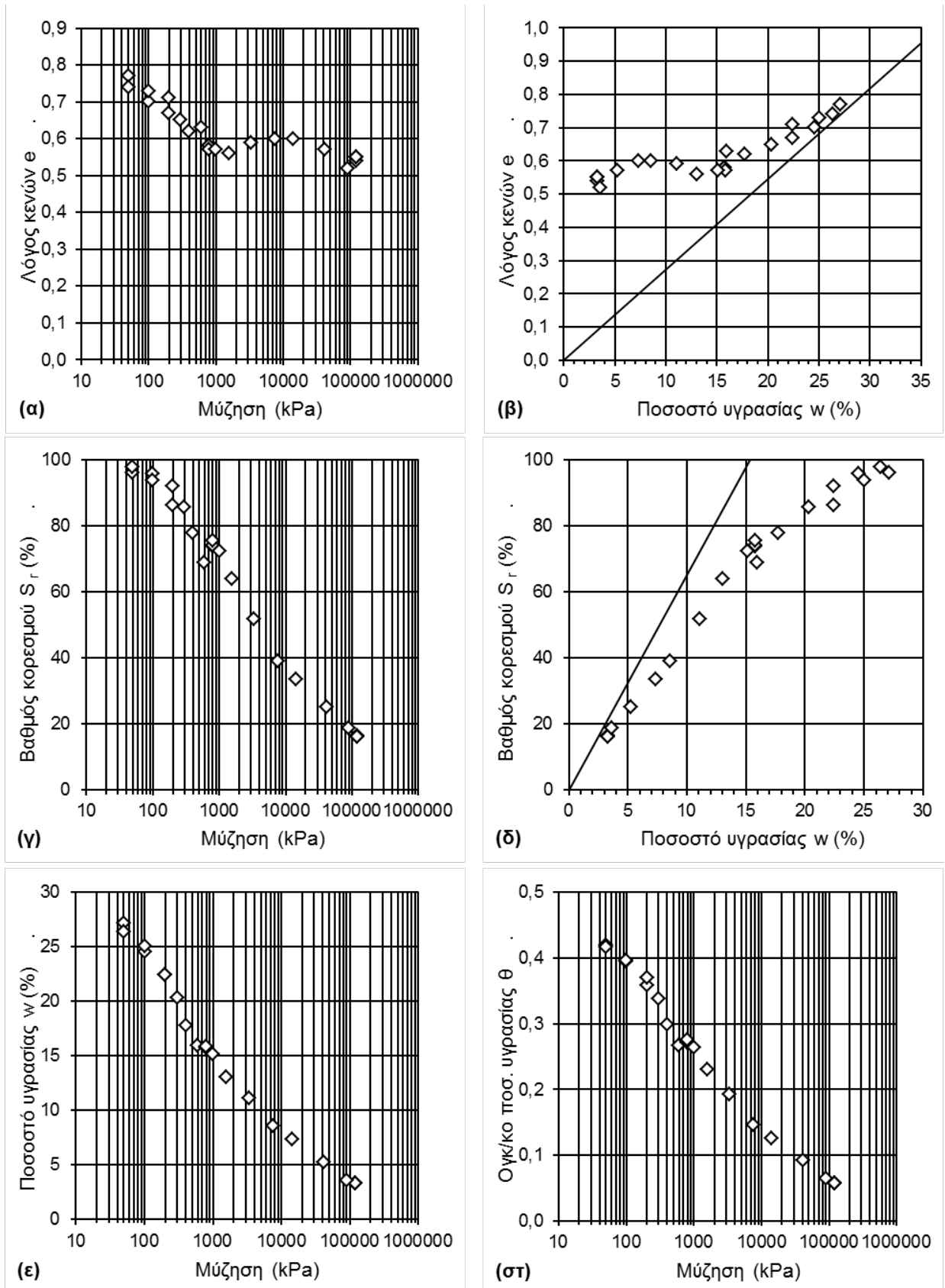
Από τη συγκέντρωση των στοιχείων των εργαστηριακών δοκιμών έχουμε ότι απαιτείται για την πλήρη σχεδίαση της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους-Νερού. Τα αποτελέσματα παρατίθενται ακριβώς στη συνέχεια.

ΔΟΚΙΜΕΣ ΘΛΙΨΗΣ	s	w	e	Sr	θ
	(kPa)	(%)		(%)	
κατά γενέτειρα	50	27,120	0,770	96,240	0,419
ανεμπόδιστη	50	26,370	0,740	97,860	0,416
ανεμπόδιστη	100	24,550	0,700	95,940	0,395
κατά γενέτειρα	100	25,040	0,730	93,880	0,396
ανεμπόδιστη	200	22,420	0,710	86,230	0,358
κατά γενέτειρα	200	22,420	0,670	92,050	0,369
ανεμπόδιστη	300	20,350	0,650	85,780	0,338
κατά γενέτειρα	400	17,740	0,620	77,910	0,298
κατά γενέτειρα	600	15,930	0,630	68,990	0,267
ανεμπόδιστη	800	15,760	0,580	73,900	0,271
ανεμπόδιστη	800	15,760	0,580	74,050	0,272
κατά γενέτειρα	800	15,810	0,570	75,660	0,275
κατά γενέτειρα	1000	15,140	0,570	72,460	0,263
κατά γενέτειρα	3352	11,120	0,590	51,760	0,192
κατά γενέτειρα	1568	13,030	0,560	63,990	0,230
ανεμπόδιστη ατμόσφαιρας	120270	3,320	0,540	16,410	0,058
ανεμπόδιστη ατμόσφαιρας	120270	3,320	0,550	16,200	0,057
κατά γενέτειρα ατμόσφαιρας	120270	3,320	0,550	16,240	0,058
κατά γενέτειρα ατμόσφαιρας	89940	3,610	0,520	18,790	0,064
ανεμπόδιστη MgCl ₂	14196	7,340	0,600	33,530	0,126
κατά γενέτειρα MgCl ₂	41065	5,270	0,570	25,260	0,092
κατά γενέτειρα KCl ₂	7583	8,570	0,600	38,940	0,146

Πιν. 3.2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών που αφορούν τη διερεύνηση της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Εδάφους-Νερού όπου s είναι η μύζηση, w το ποσοστό υγρασίας, e ο λόγος κενών, Sr ο βαθμός κορεσμού και θ το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας, Μαζαράκι.

Στο Σχ. 3.4.21 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού του εδαφικού υλικού από το Μαζαράκι. Όπως προκύπτει από το Σχ. 3.4.21α (μύζηση-λόγος κενών) ο λόγος κενών του εδαφικού αυτού υλικού κατά την απώλεια υγρασίας του φαίνεται να μειώνεται με την μύζηση με σημαντικό ρυθμό αρχικά ενώ στη συνέχεια σταθεροποιείται. Ξεκινάει από 0.77 για 50 kPa μύζηση και μετά τα 800 kPa που σταθεροποιείται κυμαίνεται σε τιμές κοντά στο 0.55. Όπως φαίνεται

από τα Σχ. 3.4.21β (ποσοστό υγρασίας-λόγος κενών) και 3.4.21γ (μύζηση-βαθμός κορεσμού) έγινε αποκορεσμός για τιμές της μύζησης μεταξύ 100 και 200 kPa. Όπως προκύπτει όμως από το Σχ. 3.4.21δ συνέβη πράγματι ο αποκορεσμός αλλά είναι σταδιακή η μετάβαση από την ευθεία $S_r = 100\%$ προς την ευθεία κλίσης $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$. Για αυτό το εδαφικό υλικό λοιπόν πράγματι υπάρχει καμπύλο τμήμα κατά την μετάβαση από την ευθεία $S_r = 100\%$ στην ευθεία $S_r = (G_s/e_s) \cdot w$, αλλά σε κάθε περίπτωση το σημείο αποκορεσμού εκτιμάται ότι βρίσκεται μεταξύ 50 και 100 kPa. Τέλος από τα Σχ. 3.4.21ε και 3.4.21στ προκύπτει ότι και το ποσοστό υγρασίας και το ογκομετρικό ποσοστό υγρασίας μειώνονται με την μύζηση με σημαντικό ρυθμό.



Σχήμα 3.4.9 Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού του αναζυμωμένου υλικού από το Μαζαράκι.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΟΠΙΑΣ – ΕΥΘΕΙΕΣ & ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΚΑΙ Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ

4.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Η μέθοδος οριακής ισορροπίας (limit equilibrium method) αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας πρανών. Η αναζήτηση της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης για ένα πρανές αποτελεί στατικά αόριστο πρόβλημα. Υποθέτοντας μία επιφάνεια ολίσθησης γίνεται στατικά ορισμένο και αναζητείται για την κατολισθαίνουσα μάζα, δεδομένης της υποθεθείσας επιφάνειας ολίσθησης, των λοιπών παραδοχών (π.χ. πιέσεις πόρων) και των παραμέτρων αντοχής του εδάφους, ο συντελεστής ασφαλείας ως αποτέλεσμα του λόγου των σταθεροποιητικών εντάσεων (ροπών ή δυνάμεων) προς τις κινούσες εντάσεις (ροπές ή δυνάμεις). Η επιφάνεια ολίσθησης για την οποία προκύπτει ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας είναι η λεγόμενη κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης, και αυτή για την οποία θα σχεδιαστούν μέτρα βελτίωσης της ευστάθειας εάν η τιμή του συντελεστή ασφαλείας δεν επαρκεί, ενώ για αυτήν θα αναφερθεί ο συντελεστής ασφαλείας που προέκυψε ως ο κρίσιμος συντελεστής ασφαλείας του πρανούς. Η χρήση ροπών, αντί για δυνάμεις, εξυπηρέτησε κατά την ιστορική ανάπτυξη της μεθόδου καθώς η εμπειρική παρατήρηση ήταν ότι οι επιφάνειες πραγματικών κατολισθήσεων έχουν κυκλικό σχήμα σε δύο διαστάσεις, οπότε ο υπολογισμός ροπών δυνάμεων που εξασκούνται κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης ήταν

πολύ εύκολος. Οι αναλύσεις αυτές γίνονται σε δύο διαστάσεις υποθέτοντας συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, ενώ η μέθοδος έχει επεκταθεί ώστε να μπορούν να γίνουν και αναλύσεις σε τρεις διαστάσεις, ή μέσω της χρήσης περισσότερων της μιας διατομών δύο διαστάσεων οι λεγόμενες ψευδο-τρισεδιάστατες αναλύσεις. Η μέθοδος αυτή για την ανάλυση ευστάθειας πρανών μπορεί να εφαρμοστεί και για κορεσμένα και για μη κορεσμένα εδαφικά υλικά, καθώς και για αστράγγιστες και για στραγγιζόμενες συνθήκες φόρτισης.

Οι αναλύσεις οριακής ισορροπίας βασίζονται στην εξέταση της ισορροπίας των δυνάμεων που ενεργούν σε ένα πρανές οι οποίες τείνουν να προκαλέσουν την μετακίνηση του (δύναμη βαρύτητας, δυνάμεις από πιέσεις πόρων εντός του εδάφους, εξωτερικές δυνάμεις κ.α.) κατά μήκος μιας ορισμένης ή υποθεθείσας επιφάνειας ολίσθησης και των δυνάμεων εκείνων που αντιτίθεται στη ολίσθηση (διατμητική αντοχή εδάφους, εξωτερικές δυνάμεις που βρίσκονται σε περιοχή που συνεισφέρουν στη βελτίωση της ευστάθειας).

Η προαναφερθείσα σχέση ισορροπίας δυνάμεων συνδυάζεται σε ένα συντελεστή, που λέγεται Συντελεστής Ασφάλειας FS (Factor of Safety), ο οποίος εκφράζει το κατά ποσό πρέπει να μειωθεί η διατμητική αντοχή του εδάφους ώστε να καταστήσει την προς ολίσθηση μάζα σε κατάσταση οριακής ισορροπίας κατά μήκος μιας ορισμένης επιφάνειας ολίσθησης κατά τις προβλέψεις της Εξ. 4.1

$$FS = \frac{\int_0^{\omega} R \tau_f(\alpha) d\alpha}{W X_w}$$

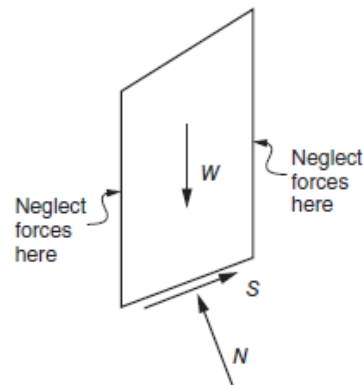
Εξ.4.1

Στην περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας γίνει ίσος με την μονάδα, το πρανές βρίσκεται σε κατάσταση οριακής ισορροπίας οπότε αστοχεί. Ο αποδεκτός συντελεστής ασφαλείας είναι μεγαλύτερος από 1 και έχει σκοπό να εξασφαλίσει ένα περιθώριο ασφαλείας μεταξύ του πραγματικών εντάσεων και των εντάσεων στην αστοχία.

Γενικά οι τιμές του αποδεκτού συντελεστή ασφαλείας για την ευστάθεια πρανών είναι της τάξης του 1.4-1.5 για συνήθεις συνθήκες υπόγειου ορίζοντα χωρίς

4.2.1 Συνήθης Μέθοδος Λωρίδων

Η συνήθης μέθοδος λωρίδων είναι μία μέθοδος κατά την οποία αγνοούμε τις πλευρικές δυνάμεις στις λωρίδες. Η συγκεκριμένη μέθοδος θεωρεί κυκλική επιφάνεια αστοχίας και μας επιτρέπει να υπολογίσουμε άμεσα το συντελεστή ασφαλείας σε αντίθεση με τις άλλες μεθόδους.



Σχήμα 4.2.1 Τυπική λωρίδα με φορτία στη συνήθη μέθοδο λωρίδων (Duncan, et al.,2014).

Ωστόσο στη συγκεκριμένη μέθοδο έχουμε χαμηλή ακρίβεια στα αποτελέσματα σχετικά με τις υπόλοιπες μεθόδους. Ωστόσο η ακρίβεια των αποτελεσμάτων βελτιώνεται με την χρήση της παρακάτω εξίσωσης υπολογισμού του συντελεστή ασφαλείας:

$$F = \frac{\sum [c' \Delta \ell + (W \cos \alpha - u \Delta \ell \cos^2 \alpha) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha} \quad \text{Εξ. 4.2}$$

4.2.2 Απλοποιημένη Μέθοδος Bishop (1955)

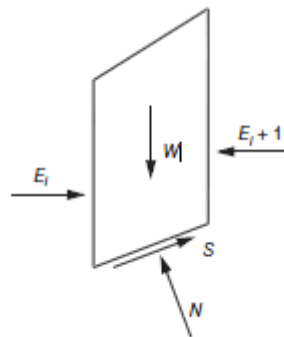
Στη μέθοδο αυτή η συνισταμένη των πλευρικών δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε λωρίδα υποτίθεται ότι έχει οριζόντια διεύθυνση (Σχήμα 4.2.2). Στην περίπτωση αυτή η ορθή δύναμη στην βάση της λωρίδας N υπολογίζεται από ισορροπία των κατακόρυφων δυνάμεων που ασκούνται στην λωρίδα. Ο συντελεστής ασφαλείας

FS υπολογίζεται από την ισορροπία ροπών των δυνάμεων κατά μήκος της επιφάνειας της ολισθαίνουσας μάζας.

Η εξίσωση του συντελεστή ασφαλείας για την απλοποιημένη μέθοδο Bishop είναι η εξής :

$$F = \frac{\sum \left[\frac{c' \Delta \ell \cos \alpha + (W - u \Delta \ell \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + (\sin \alpha \tan \phi')/F} \right]}{\sum W \sin \alpha}$$

Εξ. 4.3



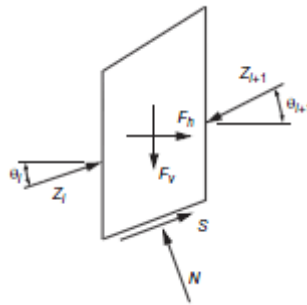
Σχήμα 4.2.2 Τυπική λωρίδα με φορτία για την απλοποιημένη μέθοδο Bishop (Duncan, et al., 2014).

Η απλοποιημένη μέθοδος Bishop πληροί την υπόθεση της ισορροπίας ως προς το κέντρο του κύκλου της επιφάνειας αστοχίας για το σύνολο της επιφάνειας και ακόμα την ισορροπία των κάθετων δυνάμεων στην κάθε λωρίδα. Η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί ότι είναι περισσότερο ακριβής από την απλή μέθοδο των λωρίδων.

4.2.3 Αναλύσεις μόνο με Ισορροπία Δυνάμεων

Η διαφορά σε αυτές τις μεθόδους σε σχέση με τις παραπάνω είναι ότι εδώ ικανοποιείται μόνο η ισορροπία δυνάμεων μεταξύ λωρίδων και αγνοείται η ισορροπία των ροπών. Οι μέθοδοι αυτές έρχονται να λύσουν το πρόβλημα όταν οι επιφάνειες αστοχίας δεν είναι απλά κυκλικές, αλλά είναι πιο περίπλοκες (σύνθετες με τμήματά τους να είναι ευθύγραμμα και άλλα κυκλικά). Στις μεθόδους αυτές παίρνουμε δύο εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων, μία ως προς τη βάση της

λωρίδας και μία για τις παραμένουσες δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων. Με την χρήση των δύο αυτών εξισώσεων και για να μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή ασφαλείας (έχοντας πλέον ίσο αριθμό εξισώσεων και αγνώστων), πρέπει να κάνουμε θεωρήσεις όσον αφορά τις κλίσεις των δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων.

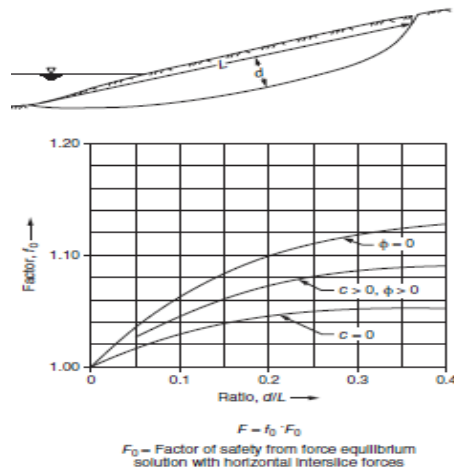


Σχήμα 4.2.3 Τυπική λωρίδα με δυνάμεις για τις μεθόδους ανάλυσης μόνο με ισορροπία δυνάμεων (Duncan, et al., 2014).

Για τις θεωρήσεις αυτές έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα με τρία από αυτά να είναι τα πιο χαρακτηριστικά και αναγνωρισμένα. Είναι τα εξής:

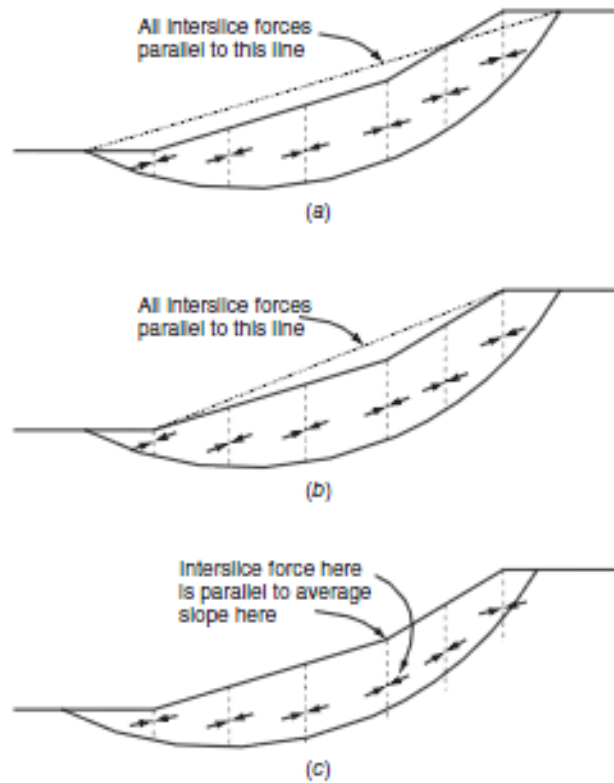
- **Lowe and Karafiath (1959)** : Σε αυτή τη μέθοδο υποθέτουμε ότι οι δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων δρουν στο μέσο όρο της κλίσης της επιφάνειας αστοχίας με την κλίση της επιφάνειας του πρσανούς. Η μέθοδος αυτή μας δίνει τα πιο κοντινά αποτελέσματα με τις μεθόδους ανάλυσης που πληρούν όλες τις συνθήκες ισορροπίας που θα δούμε και παρακάτω.

- **Απλοποιημένη Μέθοδος Janbu (Janbu et al., 1956; Janbu, 1973)** : Στη μέθοδο αυτή υποθέτουμε ότι οι δυνάμεις μεταξύ λωρίδων είναι οριζόντιες και δεν υπάρχει διατμητική δύναμη μεταξύ τους. Αυτή η θεώρηση σχεδόν πάντα μας δίνει συντελεστές ασφαλείας μικρότερους από τις μεθόδους που πληρούν όλες τις συνθήκες ισορροπίας και για αυτό το λόγο οι Janbu et al. (1956), πρότειναν κάποιους διορθωτικούς συντελεστές για τον πιο ακριβή υπολογισμό ωστόσο χρειάζεται προσοχή στο πως λαμβάνονται υπόψη ειδικά σε υπολογιστικά προγράμματα.



Σχήμα 4.2.4 Διορθωτικοί συντελεστές για την απλοποιημένη μέθοδο Janbu (Duncan, et al., 2014).

- **Μέθοδος U.S. Army Corps of Engineers' Modified Swedish (U.S. Army Corps of Engineers, 1970)** : Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη θεώρηση ότι οι δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων δρουν στο μέσο όρο της κλίσης της επιφάνειας του πρανούς. Αυτό μπορεί να μεταφραστεί με τουλάχιστον τρεις διαφορετικούς τρόπους που φαίνονται και στο παρακάτω σχήμα. Όπως φαίνεται οι κλίσεις των δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων μπορεί να είναι είτε ίδιες μεταξύ τους είτε να διαφέρουν από λωρίδα σε λωρίδα.



Σχήμα 4.2.5 Τρεις βασικές υποθέσεις για την θεώρηση της κλίσης των δυνάμεων μεταξύ λωρίδων για τη μέθοδο U.S. Army Corps of Engineers' Modified Swedish (Duncan, et al., 2014).

Ωστόσο οι μέθοδοι τείνουν πλέον να έχουν κοινή κλίση στις δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων. Ακόμα τα αποτελέσματα που έχουμε από αυτή τη μέθοδο σε όλες τις περιπτώσεις είναι μη συντηρητικά καθώς οι συντελεστές ασφαλείας είναι μεγαλύτεροι από ότι είναι στις άλλες μεθόδους και για αυτό το λόγο δεν προτιμάται.

4.2.4 Μέθοδοι που ικανοποιούν όλες τις συνθήκες ισορροπίας

Σε αυτή τη κατηγορία συναντάμε αρκετές μεθόδους που ικανοποιούν όλες τις περιπτώσεις για την στατική ισορροπία μεταξύ των λωρίδων. Κάθε μία μέθοδος λαμβάνει υπόψη διαφορετικές παραδοχές για την επίτευξη αυτού του στόχου. Παρακάτω παρατίθενται μερικές από αυτές:

Οι εξισώσεις που προκύπτουν για τα δύο αθροίσματα είναι οι εξής:

$$N + F_v \cos \alpha - F_h \sin \alpha - Q \sin(\alpha - \theta) = 0 \quad \text{Εξ. 4.4}$$

$$S + F_v \sin \alpha + F_h \cos \alpha + Q \cos(\alpha - \theta) = 0 \quad \text{Εξ. 4.5}$$

Στη συνέχεια ο συνδυασμός αυτών των δύο εξισώσεων με την συνάρτηση Mohr-Coulomb για τη διατμητική δύναμη S και λύνοντας ως προς Q έχουμε την συνάρτηση :

$$Q = \frac{-F_v \sin \alpha - F_h \cos \alpha - (c' \Delta \ell / F) + (F_v \cos \alpha - F_h \sin \alpha + u \Delta \ell)(\tan \phi' / F)}{\cos(\alpha - \theta) + [\sin(\alpha - \theta) \tan \phi' / F]} \quad \text{Εξ. 4.6}$$

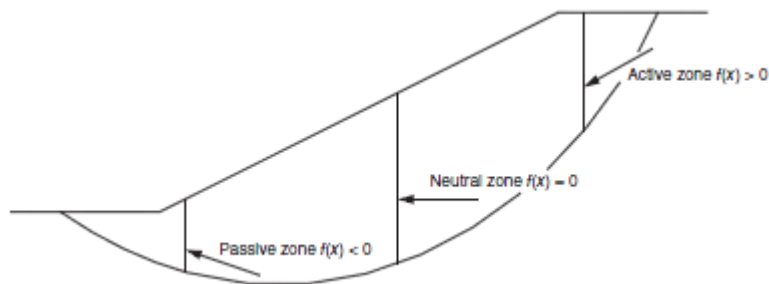
Με την μέθοδο συνεχών επαναλήψεων με υποθέσεις για τους δύο αγνώστους (F , θ) καταλήγουμε σε αποτέλεσμα όπου αυτές οι τιμές συγκλίνουν και άρα προχωράμε στον υπολογισμό και των υπόλοιπων στοιχείων.

- **Μέθοδος Morgenstern και Price (1965)** : Η μέθοδος αυτή θεωρεί ότι οι διατμητικές δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων σχετίζονται με τις δυνάμεις με την εξής σχέση:

$$X = \lambda f(x)E \quad \text{Εξ. 4.7}$$

Όπου το X και το E είναι οι κάθετες και οριζόντιες δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων, λ είναι ένας παράγοντας που υπολογίζεται μαζί με τους υπόλοιπους αγνώστους και $f(x)$ που είναι μία θεωρημένη συνάρτηση που έχει ορισμένες τιμές για κάθε στα

όρια κάθε λωρίδας. Οι δυνάμεις θεωρείται ότι δρουν στο μέσο της βάσης της λωρίδας. Η λογική που ακολουθείται για την θεώρηση της συνάρτησης $f(x)$ φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.2.8 Ζώνες τιμών για τη συνάρτηση $f(x)$ λαμβάνοντας υπόψη τις πιέσεις που ασκούνται από το έδαφος (Duncan, et al.,2014).

Οι άγνωστοι για τους οποίους προβλέπει λύση η μέθοδος αυτή είναι ο συντελεστής ασφαλείας (F), η παράμετρος (λ), οι δυνάμεις στη βάση (N), οι οριζόντιες δυνάμεις μεταξύ λωρίδων (E) και η τοποθεσία των δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων. Η τιμή του X γίνεται γνωστή μέσω της Εξ. 4.7.

Γενικά η μέθοδος Morgenstern και Price (1965) είναι παρόμοιας λογικής με του Spencer (1967). Η βασική τους διαφορά είναι ότι στη πρώτη μέθοδο έχουμε περισσότερες επιλογές και ευελιξία όσον αφορά την θεώρηση της κλίσης των δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων. Αντίστοιχα αυτή η ευκολία μας προσφέρει ευελιξία και στην θεώρηση των ίδιων των δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων.

- **Μέθοδος Chen και Morgenstern (1983)** : Η μέθοδος αυτή είναι επί της ουσίας μία πιο ολοκληρωμένη έκδοση της προηγούμενης μεθόδου των Morgenstern και Price (1965). Αυτό που αλλάζει είναι ότι με αυτή τη μέθοδο μπορούμε πλέον καλύτερα να υπολογίσουμε τις δυνάμεις στα άκρα της επιφάνειας αστοχίας. Αυτό το κατάφεραν προτείνοντας οι δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων στα άκρα να είναι παράλληλες με το πρηνές. Αυτό το πετυχαίνουν με τη παρακάτω σχέση:

$$X = [\lambda f(x) + f_0(x)]E$$

Εξ.

4.8

με $f(x)$ και $f_0(x)$ δύο ξεχωριστές συναρτήσεις που καθορίζουν τη συνεισφορά των κλίσεων των δυνάμεων μεταξύ των λωρίδων ανάλογα με το σημείο που βρίσκονται στο πρηνές. Στις άκρες του πρηνούς η συνάρτηση $f(x)$ είναι μηδενική και η $f_0(x)$ έχει τιμή ανάλογα με τη κλίση του πρηνούς. Οι ενδιάμεσες τιμές αναλόγως θεωρούνται από το μελετητή.

- **Μέθοδος Sarma (1973)** : Η μέθοδος Sarma (1973) είναι διαφορετική από τις υπόλοιπες μεθόδους αυτού του κεφαλαίου διότι θεωρεί ως άγνωστο τον σεισμικό συντελεστή (k) και ως δεδομένο το συντελεστή ασφαλείας (F). Συνήθως θεωρείται μία τιμή για τον συντελεστή ασφαλείας ίση με 1.00 και στη συνέχεια υπολογίζεται η τιμή του k για την οποία και έχουμε ολίσθηση του πρηνούς. Στη μέθοδο αυτή η διατμητικές δυνάμεις μεταξύ των λωρίδων σχετίζονται με τη διαθέσιμη δύναμη στα όρια της λωρίδας, S_v και εκφράζεται με τη σχέση:

$$X = \lambda f(x)S_v$$

Εξ. 4.9

με το λ να είναι μία κλιμακούμενη παράμετρος και την συνάρτηση $f(x)$ με ορισμένες τιμές σε κάθε κάθετο όριο των λωρίδων που είναι αντίστοιχες αλλά όχι πανομοιότυπες με των προηγούμενων δύο μεθόδων. Η S_v εξαρτάται από τις παραμέτρους των δυνάμεων διάτμησης (c , c' και ϕ , ϕ') του εδαφικού υλικού που συναντάται κατά μήκος του ορίου των λωρίδων και από την πίεση πόρων με την ύπαρξη νερού.

Η μέθοδος Sarma (1973) αναπτύχθηκε για αξιολογήσεις ευστάθειας πρηνών υπό συνθήκες σεισμικής φόρτισης και για αυτό το σκοπό είναι πλεονεκτική σε σχέση με

τις άλλες μεθόδους ανάλυσης. Με αυτή τη μέθοδο δίνεται η δυνατότητα να υπολογίζεται άμεσα ο σεισμικός συντελεστής όπως και οι υπόλοιποι άγνωστοι.

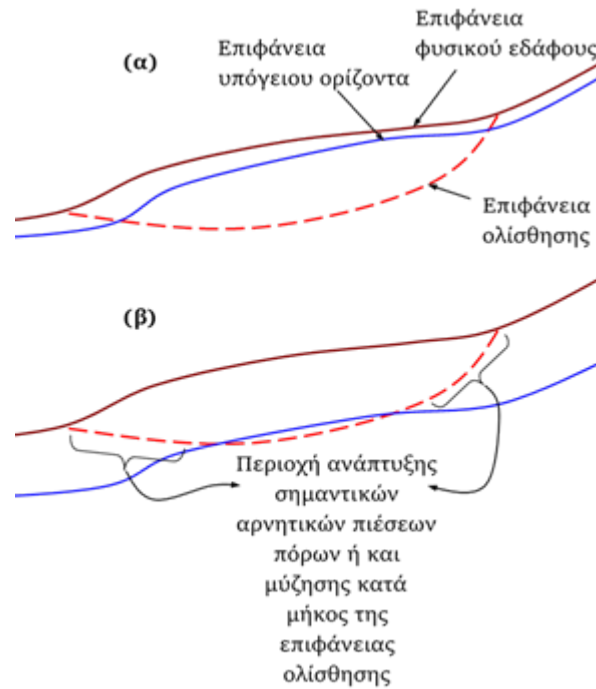
4.3 ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΑ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΓΩΝΙΑ

Η γνώση της διατμητικής αντοχής είναι πολύ σημαντική στα πλαίσια της μελέτης αποκατάστασης κατολισθήσεων. Στις κατολισθήσεις, και ειδικά στις παλαιοκατολισθήσεις (palaeo-land-slides), δηλαδή εκείνες που έχουν συμβεί πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα πριν από σήμερα και άρα έχουν συμβεί πολύ μεγάλες παραμορφώσεις επί των επιφανειών ολίσθησής τους, οι οποίες είναι σαφώς καθοριζόμενες, κινηματικά δυνατές, και κατά μήκος τους –ή τουλάχιστον σε μεγάλο τμήμα του μήκους τους- η διατμητική αντοχή έχει περιέλθει στην κατάσταση παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Στις περιπτώσεις αυτές βέβαια η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής υπολογίζεται από αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας (στις οποίες τίθεται $c'=0$) αντί για εργαστηριακές δοκιμές, προκύπτοντας πάντα λίγο μεγαλύτερη από τη τιμή που προκύπτει από εργαστηριακές δοκιμές προκειμένου για κατολίσθηση η επιφάνεια ολίσθησης της οποίας διέρχεται από ομογενή αργιλικά εδάφη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η ίδια παραμόρφωση που έχει συμβεί κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης δεν έχει απαραίτητα το ίδιο αποτέλεσμα στο εδαφικό υλικό από το οποίο διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης σε κάθε σημείο της, απομειώνοντας με τον ίδιο τρόπο τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής. Το ίδιο αποτέλεσμα έχει επίσης και η ανομοιογένεια των υλικών από τα οποία διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης. Η εγγύτητα της τιμής της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής από αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας (στις οποίες έχει τεθεί $c'=0$) και της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής από εργαστηριακές δοκιμές συνιστά μέτρο εκτίμησης του μεγέθους των παραμορφώσεων που έχουν συμβεί στη συγκεκριμένη κατολίσθηση και της επιρροής τους επί των παραμέτρων αντοχής των απαντώμενων από την επιφάνεια ολίσθησης υλικών.

Το ερώτημα όμως που προκύπτει ανεξάρτητα από τον τρόπο που προέκυψε η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής είναι πως –και αν- μεταβάλλεται η παράμετρος αυτή με τον βαθμό κορεσμού και τη μύζηση. Οι λόγοι για τους οποίους ένα τέτοιο ερώτημα καθίσταται σημαντικό είναι ο τρόπος με τον οποίο θα

αποφασιστούν οι παράμετροι διατμητικής αντοχής επί μίας επιφάνειας ολίσθησης, κατά μήκος της οποίας έχει αναπτυχθεί αρνητική πίεση πόρων ή και μύζηση, ώστε με τις παραμέτρους αυτές να σχεδιαστούν τα μέτρα σταθεροποίησης της κατολίσθησης. Έστω ότι έχουμε δύο περιπτώσεις, όπου στην πρώτη η στάθμη του υπογείου ορίζοντα είναι ψηλά ενώ στην άλλη χαμηλά. Εάν υποθέσουμε ότι στην πρώτη περίπτωση η στάθμη του υπογείου ορίζοντα είναι τόσο ψηλά που μόνο ένα μικρό μέρος της επιφάνειας ολίσθησης βρίσκεται πάνω από αυτήν, τότε μπορεί να υπολογιστεί η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής θέτοντας τον συντελεστή ασφαλείας ίσο με τη μονάδα σε αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας. Από τις αναλύσεις αυτές θα υπολογιστεί πράγματι η «μέση» τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης θέτοντας $c'=0$. Χρησιμοποιώντας αυτήν την παράμετρο αντοχής για το σχεδιασμό των μέτρων σταθεροποίησης, τότε στις ευθείες αναλύσεις προκύπτει ο επιθυμητός συντελεστής ασφαλείας για τα μέτρα σταθεροποίησης που εισήχθησαν. Εάν ωστόσο ισχύουν οι συνθήκες της δεύτερης περίπτωσης όπου η στάθμη είναι χαμηλά, τότε σε σημαντικά τμήματα της επιφάνειας ολίσθησης έχουν αναπτυχθεί αρνητικές πιέσεις πόρων ή και μύζηση (ανάλογα με την τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα των υλικών που απαντώνται κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης, με τη μεταβολή στη στάθμη του υπογείου ορίζοντα και το μέγεθος της κατείσδυσης από την επιφάνεια του εδάφους και διά της επιφάνειας ολίσθησης, η οποία συχνά συνιστά και η ίδια επιλεκτική δίοδο για τα κατεισδύοντα ύδατα). Υπό αυτές τις συνθήκες, αν αγνοηθούν οι αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση πάνω από τη στάθμη του υπογείου ορίζοντα κατά την εκτέλεση της αντίστροφης ανάλυσης, υπερεκτιμάται η τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής για $c'=0$, συχνά σε εξωπραγματικά μεγάλες τιμές για τη φύση των απαντώμενων υλικών. Αν αντίθετα οι τιμές της αρνητικής πίεσης πόρων ληφθούν υπόψη, υπολογίζεται μία μικρότερη τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Εάν οι τιμές της αντοχής από την αντίστροφη ανάλυση χωρίς να ληφθούν υπόψη οι αρνητικές πιέσεις πόρων ($c'=0$, $\phi' > \phi'_{res}$) εισαχθούν στις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας για τη διαστασιολόγηση των απαιτούμενων μέτρων σταθεροποίησης, τότε υπάρχει ο κίνδυνος σοβαρού υποσχεδιασμού των μέτρων αυτών. Και αυτό γιατί οι παράμετροι αντοχής που προέκυψαν από την αντίστροφη ανάλυση ευσταθείας εμπεριέχουν την επιρροή της αρνητικής πίεσης πόρων ή της μύζησης στη ευστάθεια μέσω του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb, αλλά και την

επιρροή της μύζησης επί της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής αυτής καθεαυτής. Δεδομένου όμως ότι αυτή η επιρροή μπορεί να χαθεί ως συνέπεια της απώλειας της παροδικής παρουσίας της μύζησης, ο συντελεστής ασφαλείας με τα μέτρα σταθεροποίησης θα είναι αυτός που προκύπτει μόνο για τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής από αντίστροφη ανάλυση της κατάστασης όπως περιγράφεται στις συνθήκες της δεύτερης περίπτωσης λαμβάνοντας υπόψη και τις αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση. Ο Χατζηγώγος (2019) αναφέρεται ειδικά στο θέμα της δυνατότητας ταχείας απώλειας της επιρροής του μερικού κορεσμού στην αντοχή σε υπολειμματικά εδάφη, λόγω επιλεκτικής κίνησης των υδάτων επί ασυνεχειών. Η λύση για την αποφυγή αυτών των προβλημάτων κατά τη μελέτη σταθεροποίησης κατολισθήσεων βρίσκεται στην ορθή αναγνώριση των συνθηκών που περιγράφονται στη δεύτερη περίπτωση (στάθμη χαμηλά) για κάθε κατολίσθηση και την υιοθέτησή τους στο προσομοίωμα κατά την εκτέλεση της αντίστροφης ανάλυσης ευσταθείας με εισαγωγή της αρνητικής πίεσης πόρων ή της μύζησης όπως έχει αναπτυχθεί κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Κάτι τέτοιο απαιτεί ιδιαίτερη εμπειρία από πλευράς μελετητή, αλλά αν δεν υπάρχουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία μπορεί να οδηγήσει σε συντηρητικές εκτιμήσεις ή κατηγορίες εκ μέρους του κυρίου του έργου για συντηρητικό σχεδιασμό. Από την άλλη πλευρά, η ορθή εισαγωγή της αρνητικής πίεσης πόρων ή της μύζησης απαιτεί ένα πρόγραμμα γεωτεχνικής έρευνας πεδίου και εργαστηρίου που ξεφεύγει από την καθεστηκυία γεωερευνητική πρακτική στην Ελλάδα και άλλες χώρες (παρά την καθολική αναγνώριση πλέον της επιρροής της ξήρανσης στην ευστάθεια πρανών και την αυξημένη αντοχή γενικότερα, η απώλεια της οποίας κατά τις βροχερές περιόδους με πιο πρόσφατο παράδειγμα την χειμερινή περίοδο 2018-19 στην Ελλάδα και Κύπρο).



Σχήμα 4.3.1 Ενδεικτική απεικόνιση συνθηκών υπόγειου ορίζοντα σε εκδηλωθείσες κατολισθήσεις: α) με τον υπόγειο ορίζοντα «ψηλά», δηλαδή με ελάχιστο τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης να υπόκειται σε αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση, και β) με τον υπόγειο ορίζοντα «χαμηλά», δηλαδή με σημαντικό τμήμα της επιφάνειας ολίσθησης να υπόκειται σε αρνητικές πιέσεις πόρων/μύζηση (Μπαρδάνης, 2019).

Η άμεση επιρροή της αρνητικής πίεσης πόρων και της μύζησης στην αντίσταση στην ολίσθηση κατά μήκος επιφανειών αστοχίας στις οποίες η διατμητική αντοχή καθορίζεται μόνο από τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής γίνεται αντιληπτή μέσω του γενικευμένου κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb. Η μείωση του βαθμού κορεσμού και η συνεπαγόμενη αύξηση της μύζησης ωστόσο έχουν συνέπειες και επί της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής αυτής καθεαυτής. Ο Brandl (1996) μέτρησε σε συσκευή επαναλαμβανόμενης άμεσης διάτμησης με έλεγχο του βαθμού κορεσμού τη μεταβολή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής με το βαθμό κορεσμού. Με βάση τα ευρήματά του, η γωνία ϕ'_{res} αυξάνεται ραγδαία με τη μείωση το βαθμού κορεσμού και μάλιστα τόσο πιο ραγδαία, όσο πιο μεγάλη είναι η εφαρμοζόμενη κατακόρυφη τάση. Για πολύ μικρές τιμές του βαθμού κορεσμού (20% στην ιλυώδη άργιλο των δοκιμών του Brandl, 1996) παρατηρείται ότι η επιρροή της κατακόρυφης τάσης πρακτικά εξαλείφεται.

Η παράγραφος 4.3 του Κεφ.4 παρατίθεται χάριν πληρότητας, ωστόσο *στη παρούσα διπλωματική εργασία δεν έγιναν οι αντίστοιχες παραμετρικές αναλύσεις*. Η αναφορά αυτή γίνεται με μοναδικό στόχο την πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της επιρροής των μη κορεσμένων εδαφών και με όρους παραμένουσας διατμητικής αντοχής και γωνίας, όσον αφορά την ευστάθεια πρανών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

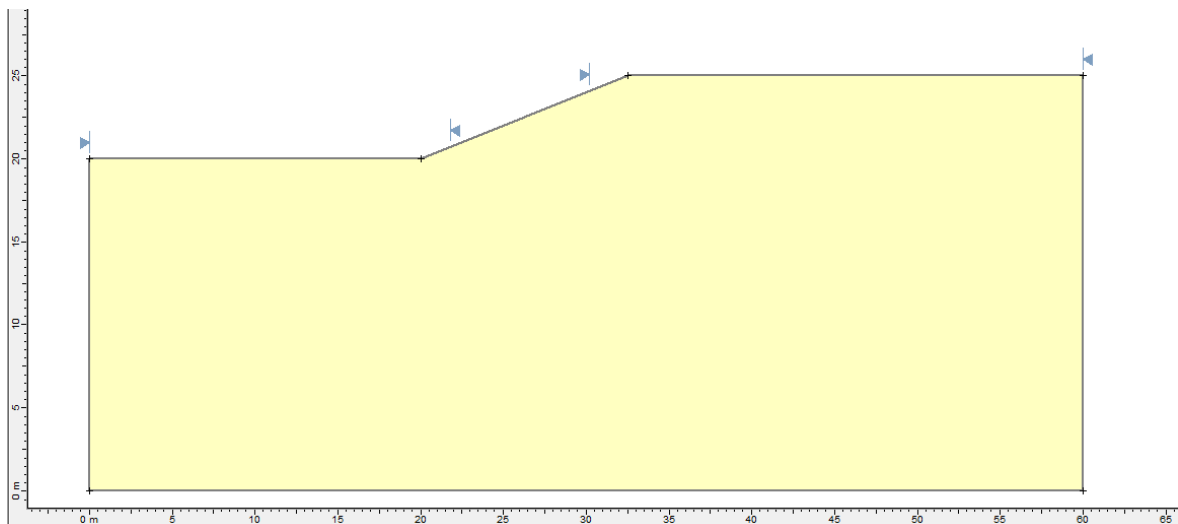
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναλύσεων ευσταθείας με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα Slide 5.02 της Rocscience και επιχειρήθηκε σε αυτές να επιδειχθεί η επιρροή της μύζησης των μη κορεσμένων εδαφών. Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα πεδίο τιμών μύζησης, χρησιμοποιήθηκε η διαμόρφωση προσδιορισμού καθεστώτος πιέσεων πόρων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που ενσωματώνει το πρόγραμμα Slide 5.02 εισάγοντας διάφορους συνδυασμούς οριακών συνθηκών σε σχέση με την υπόγεια ροή. Για τα παραδείγματα που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια αξιοποιήθηκαν τόσο τα αποτελέσματα της εργαστηριακής διερεύνησης στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας όσο και τα συγκεντρωθέντα εργαστηριακά αποτελέσματα από προηγούμενες έρευνες και μελέτες (βλ. Κεφ. 3, Πιν. 3.1).

Στις ευθείες αναλύσεις ευστάθειας ενός πρανούς το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας, με γνωστές τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του εδάφους (συνοχή και γωνία διατμητικής αντοχής), το ειδικό βάρος του εδάφους, τη θέση της επιφάνειας ολίσθησης και το βάθος του υπόγειου ορίζοντα (γενικότερα των πιέσεων του νερού των πόρων εντός του εδάφους, ή αλλιώς του καθεστώτος των πιέσεων πόρων). Όπως προαναφέρθηκε, παρά τη σημασία του βαθμού κορεσμού και της επιρροής αυτού στη διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών, η επιρροή του πολύ σπάνια και μόνο πρόσφατα λαμβάνεται υπόψη κατά τις ευθείες αναλύσεις ευστάθειας πρανών, αφού η πιθανότητα απώλειας της συμβολής του βαθμού κορεσμού στη διατμητική αντοχή θεωρείται πολύ μεγάλη

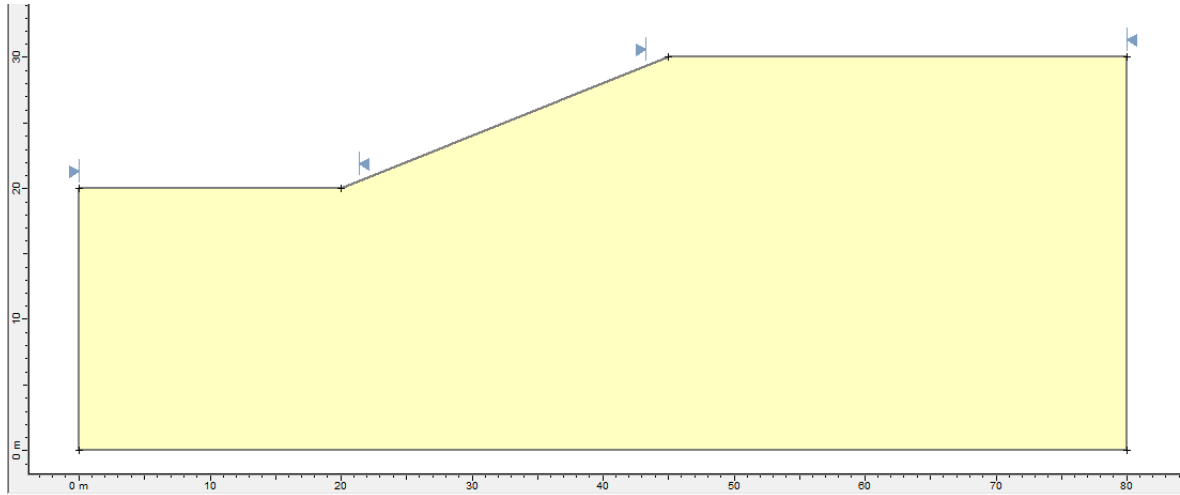
λόγω επεισοδίων βροχόπτωσης. Ο έλεγχος της κατεΐσδυσης κατά τη διάρκεια αυτών άλλωστε, αν και έχει δοκιμαστεί, σίγουρα δεν αποτελεί καθημερινή πρακτική, λόγω της δυσκολίας και του κόστους υλοποίησής του. Κατά συνέπεια η χρησιμοποίηση της επιπλέον αυτής συνιστώσας της αντοχής λόγω μερικού κορεσμού σε ευθείες αναλύσεις ευστάθειας είναι σε βάρος της ασφάλειας, αφού θα οδηγήσει στην εκτίμηση μεγαλύτερου συντελεστή ασφαλείας από εκείνου που πολύ πιθανόν θα υπάρχει μετά την απώλεια αυτής της επιπλέον αντοχής σε περίπτωση βροχόπτωσης, η οποία απώλεια όμως δεν μπορεί ακόμα να προσομοιωθεί και να εκτιμηθεί με ασφάλεια (τουλάχιστον για συνήθη προβλήματα της καθημερινής γεωτεχνικής πράξης). Η χρησιμοποίησή της λοιπόν πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή και μόνο όταν είναι γνωστά τα βροχομετρικά και γενικότερα τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής (συχνότητα, διάρκεια και ένταση επεισοδίων βροχόπτωσης, διάρκεια ηλιοφάνειας/νέφωσης, μεταβολές θερμοκρασίας κ.α.) και τα χαρακτηριστικά διαπερατότητας του σχηματισμού στον οποίο γίνεται ο σχεδιασμός, δηλαδή κατανομή βροχόπτωσης σε κατεΐσδυση και επιφανειακή απορροή (όπως επηρεάζεται και από την γεωμετρία της τοποθεσίας), εξάτμιση και διαπνοή από την επιφάνεια του σχηματισμού, μικροδιαπερατότητα και μακροδιαπερατότητα του σχηματισμού συναρτήσει του βαθμού κορεσμού του, πιεζομετρικά δεδομένα εντός αυτού και η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού, τόσο ο κλάδος ξήρανσης, όσο και ο κλάδος ύγρανσης. Η γνώση όλων αυτών των στοιχείων δεν είναι δυνατή τις περισσότερες φορές, ιδίως για προβλήματα της καθημερινής γεωτεχνικής πράξης, ενώ συχνά ακόμα και όταν είναι γνωστά, ο χρόνος που απαιτείται για την αξιοποίησή τους με τα υπάρχοντα υπολογιστικά εργαλεία και οι αβεβαιότητες που συνοδεύουν τα αποτελέσματα των σχετικών αναλύσεων δεν επιτρέπουν την επίδειξη ιδιαίτερης εμπιστοσύνης στην επιπλέον συνιστώσα της διατμητικής αντοχής σε ευθείες αναλύσεις ευστάθειας. Σε κάθε περίπτωση δε τέτοιου είδους αναλύσεις πρέπει να περιορίζονται σε έργα με μικρό χρονικό ορίζοντα αφού βασίζονται σε εκτιμήσεις της εξέλιξης μετεωρολογικών δεδομένων, η αβεβαιότητα των οποίων μεγαλώνει όσο μεγαλώνει ο χρονικός ορίζοντας των εκτιμήσεων αυτών.

5.2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

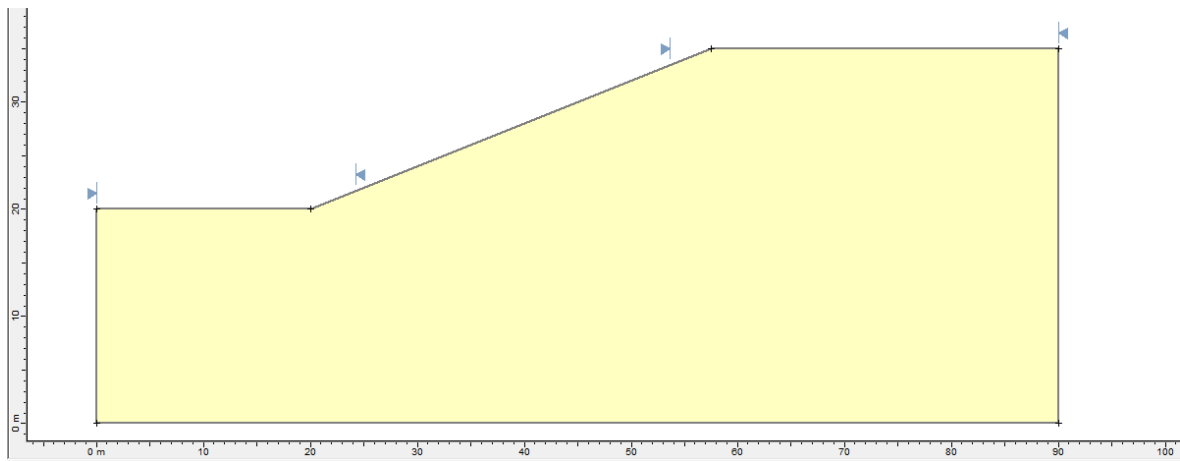
Οι αναλύσεις ευστάθειας έγιναν με τη βοήθεια του προγράμματος Slide 5.02. Το λογισμικό αυτό βασίζεται στη μέθοδο οριακής ισορροπίας υλοποιούμενης με την μέθοδο των λωρίδων για αναλύσεις ευστάθειας. Για τις αναλύσεις επιλέχθηκαν τέσσερα διαφορετικά γεωμετρικά μοντέλα. Αρχικά προσαρμόστηκε η κλίση του πρανούς, κοινή για όλα τα μοντέλα, σε συνάρτηση με τη γωνία διαμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού από το Μαζαράκι ($\varphi' = 22^\circ$) έτσι ώστε τα πρανά αυτά να είναι αρχικά ευσταθή χωρίς την παρουσία υπογείου υδροφόρου ορίζοντα στο μοντέλο. Κατόντη του πρανούς διατηρήθηκε σταθερό ύψος (20m) και μήκος (20m) του ορίου του εδάφους ώστε να μην επηρεάζεται η επιφάνεια αστοχίας από τη γεωμετρία του εδάφους και επιλέχθηκαν τέσσερα διαφορετικά ύψη πρανών, **H=5m**, **H=10m**, **H=15m** και **H=20m**, με τα αντίστοιχα ανεκτά γεωμετρικά όρια ώστε να μην επηρεάζεται η ανάλυση και ανάντη του πρανούς. Αυτές οι διατομές επιλέχθηκαν για να καταγραφεί στις αναλύσεις η επιρροή του ύψους του πρανούς κάθε φορά πέρα από την επιρροή του υδροφόρου ορίζοντα.



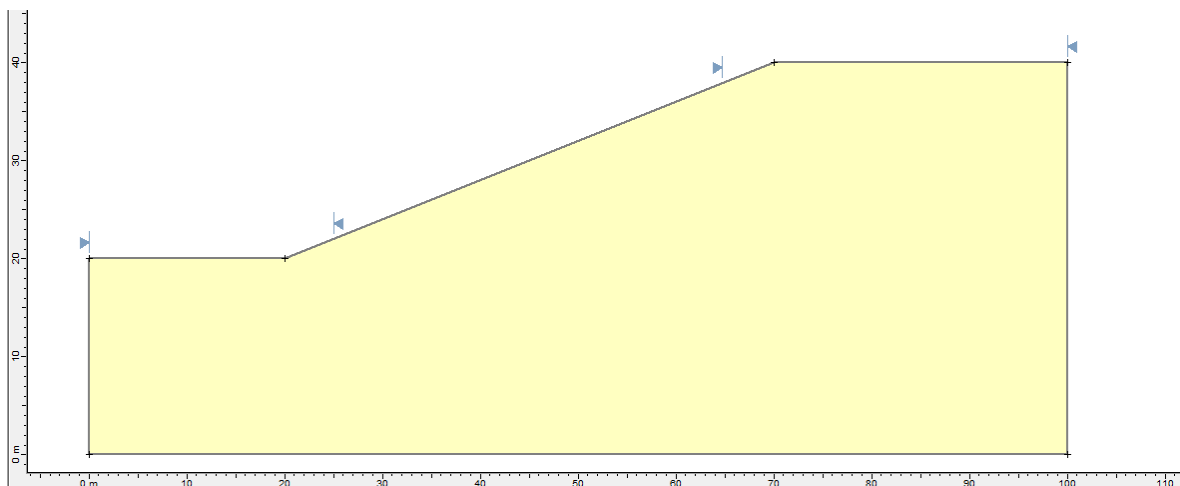
Σχήμα 5.2.1 Γεωμετρικό μοντέλο για H=5m.



Σχήμα 5.2.2 Γεωμετρικό μοντέλο για $H=10\text{m}$.



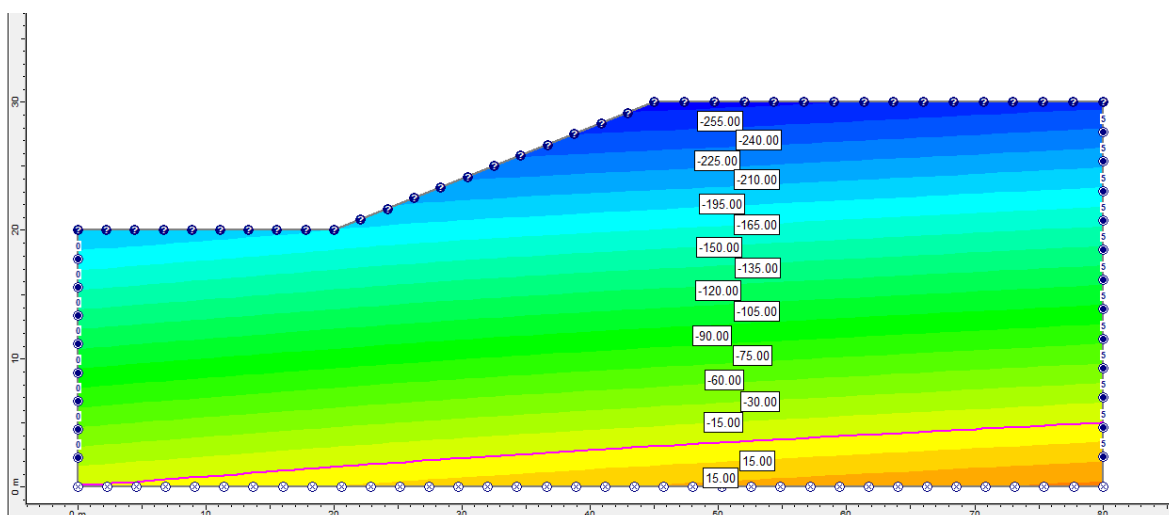
Σχήμα 5.2.3 Γεωμετρικό μοντέλο για $H=15\text{m}$.



Σχήμα 5.2.4 Γεωμετρικό μοντέλο για $H=20\text{m}$.

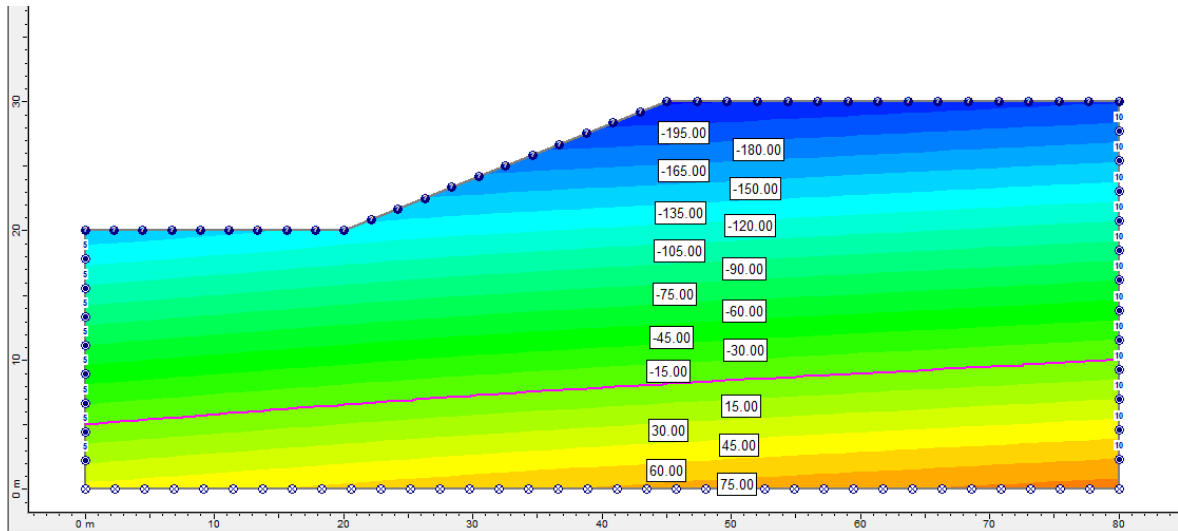
5.3 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

Αρχικά εκτελέστηκε μία ανάλυση σε κάθε μοντέλο με την υπόθεση του πλήρους κορεσμένου εδάφους (υδροφόρος ορίζοντας στην επιφάνεια του εδάφους) για να υπάρχει η εικόνα του συντελεστή ασφαλείας σε αυτές τις συνθήκες. Στη συνέχεια για να μπορέσουμε να προσομοιάσουμε την παρουσία της μύζησης στο πρηνές προσαρμόσαμε το ύψος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα σε τέσσερα διαφορετικά ύψη με τον εξής τρόπο. Για το μοντέλο με $H=10\text{m}$ (του οποίου τα αποτελέσματα θα παρατεθούν ως παράδειγμα στη συνέχεια) ορίστηκαν υδραυλικά ύψη ως οριακές συνθήκες κατόντη και ανάντη $0\text{m}-5\text{m}$, $5\text{m}-10\text{m}$, $10\text{m}-15\text{m}$, $15\text{m}-20\text{m}$ αντίστοιχα και σε αναλογία με τα αντίστοιχα ανάντη ύψη ορίστηκαν και τα αντίστοιχα υδραυλικά ύψη για τα υπόλοιπα μοντέλα ώστε να μπορεί να υπάρχει αναλογία μεταξύ τους και να είναι πιο εύστοχη η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών γεωμετρικών μοντέλων. Ακόμα τέθηκαν συνθήκες μηδενικής ροής κάθετα στο κάτω όριο του αριθμητικού προσομοιώματος και συνθήκες ελεύθερης ροής στην επιφάνεια. Με αυτό τον τρόπο επιτεύχθηκε η δημιουργία τεσσάρων διαφορετικών πεδίων μύζησης για κάθε γεωμετρικό μοντέλο, καθένα από τα οποία κατέγραφε διαφορετικού μεγέθους μυζήσεις στην περιοχή των επιφανειών ολίσθησης ως αποτέλεσμα της απόστασής τους από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα.¹

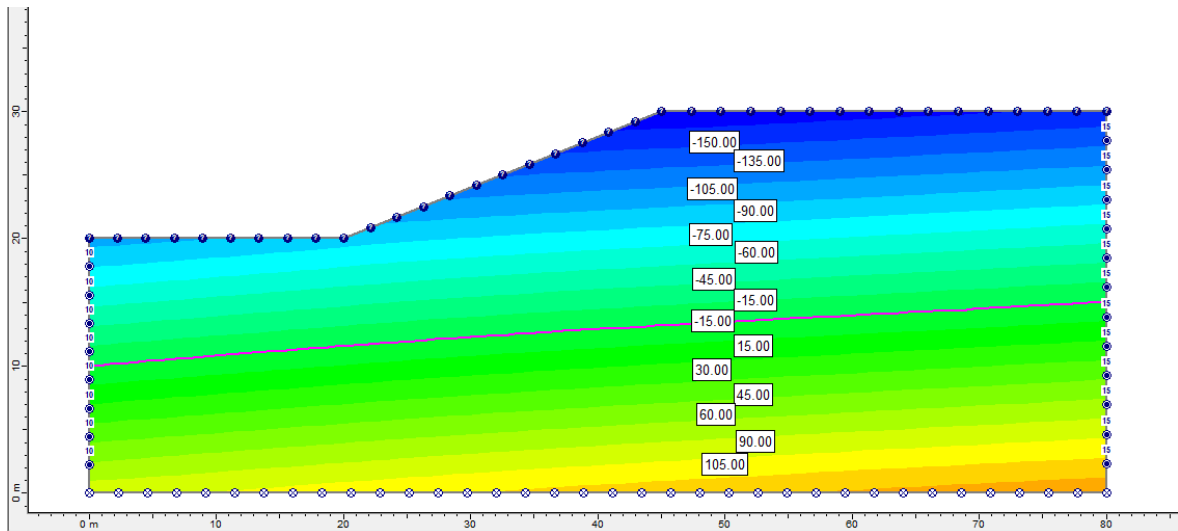


Σχήμα 5.3.1 Αρνητικές πιέσεις πόρων για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 20m στο μοντέλο με $H=10\text{m}$.

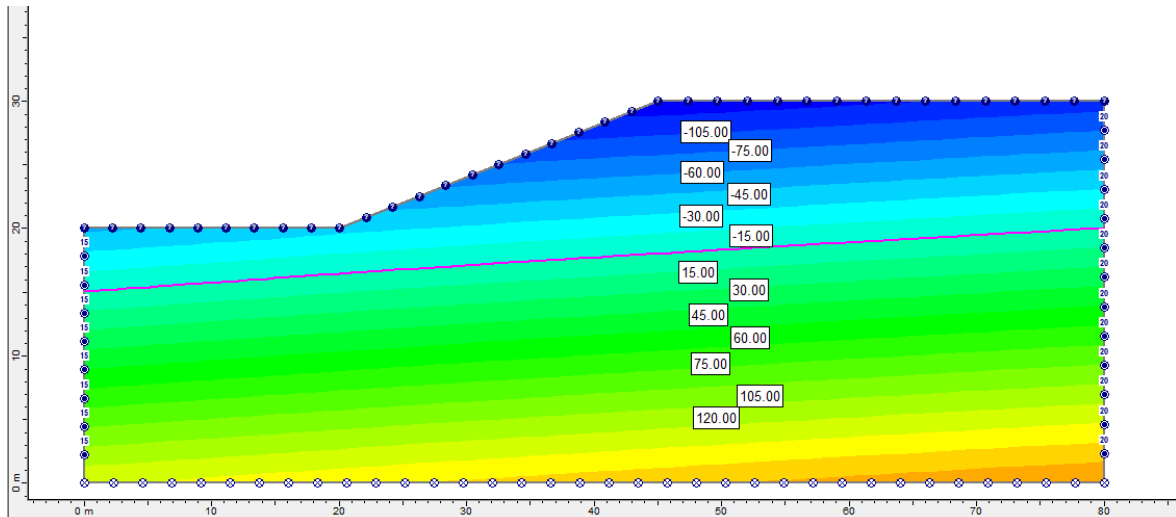
¹ Οι αναλύσεις υπόγειας ροής εκτελέστηκαν από τον Μπαρδάνη(2022).



Σχήμα 5.3.2 Αρνητικές πιέσεις πόρων για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 15m στο μοντέλο με $H=10m$.



Σχήμα 5.3.3 Αρνητικές πιέσεις πόρων για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 10m στο μοντέλο με $H=10m$.



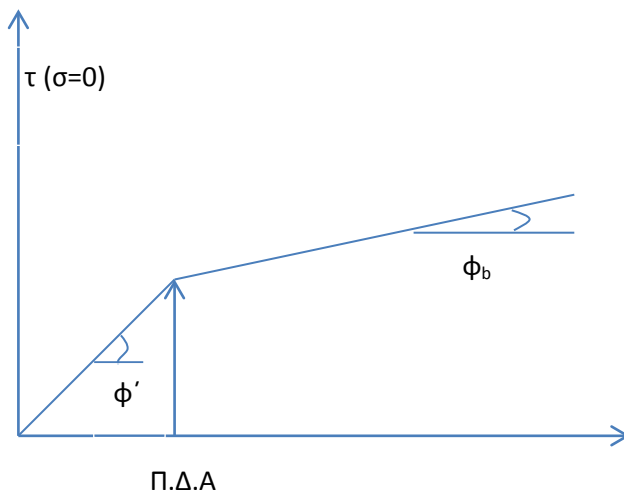
Σχήμα 5.3.4 Αρνητικές πιέσεις πόρων για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 5m στο μοντέλο με $H=10m$.

Στα παραπάνω σχήματα ,όπως αντίστοιχα ισχύει για τις υπόλοιπες αναλύσεις που εκτελέστηκαν, η αρνητική πίεση πόρων μειώνεται με την αύξηση του ύψους της θέσης από τον υπόγειο ορίζοντα.

Ο συντελεστής διαπερατότητας ετέθη ίσος με 10^{-9} m/sec και με αυτό τον τρόπο επιλύθηκε το πρόβλημα μόνιμης ροής σε όλα τα προσομοιώματα υπόγειας ροής. Στο στάδιο της προσέγγισης του προβλήματος στην παρούσα διπλωματική δεν έγιναν πιο πολύπλοκες αναλύσεις υπόγειας ροής (με πιο περίπλοκα προσομοιώματα για την εξέλιξη του συντελεστή διαπερατότητας με την μύζηση) ή διερευνήσεις της επιρροής της τιμής του συντελεστή διαπερατότητας.

5.4 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ

Για την καταγραφή της επιρροής της μύζησης, στο πρόγραμμα εισήχθησαν διάφοροι συνδυασμοί τιμών ϕ' και ϕ_b με βάση και την εικόνα από τα εργαστηριακά αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής και τα συγκεντρωθέντα από προηγούμενες εργασίες (Πιν. 3.1 Κεφ. 3). Ταυτόχρονα εισήχθη η τιμή της πίεσης διεύθυνσης αέρα του υλικού (σε ξεχωριστή ομάδα αναλύσεων ελέγχθηκε και η δική της επιρροή). Κατά τις αναλύσεις ευσταθείας, αυτό που κάνει το πρόγραμμα είναι να «διαβάζει» την τιμή της μύζησης. Αν αυτή είναι μικρότερη (κατ' απόλυτο τιμή) από την πίεση διεύθυνσης αέρα, υποθέτει ότι το υλικό είναι πλήρως κορεσμένο με αρνητική πίεση πόρων και χρησιμοποιεί την τιμή ϕ' στον υπολογισμό της πρόσθετης διατμητικής αντοχής λόγω αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης. Αν αυτή είναι μεγαλύτερη (κατ' απόλυτο τιμή) από την πίεση διεύθυνσης αέρα, υποθέτει ότι το υλικό είναι μη κορεσμένο με μύζηση και χρησιμοποιεί την τιμή ϕ_b στον υπολογισμό της πρόσθετης διατμητικής αντοχής λόγω αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης. Αυτή η θεώρηση από το πρόγραμμα επιδεικνύεται στο Σχ. 5.3.5.

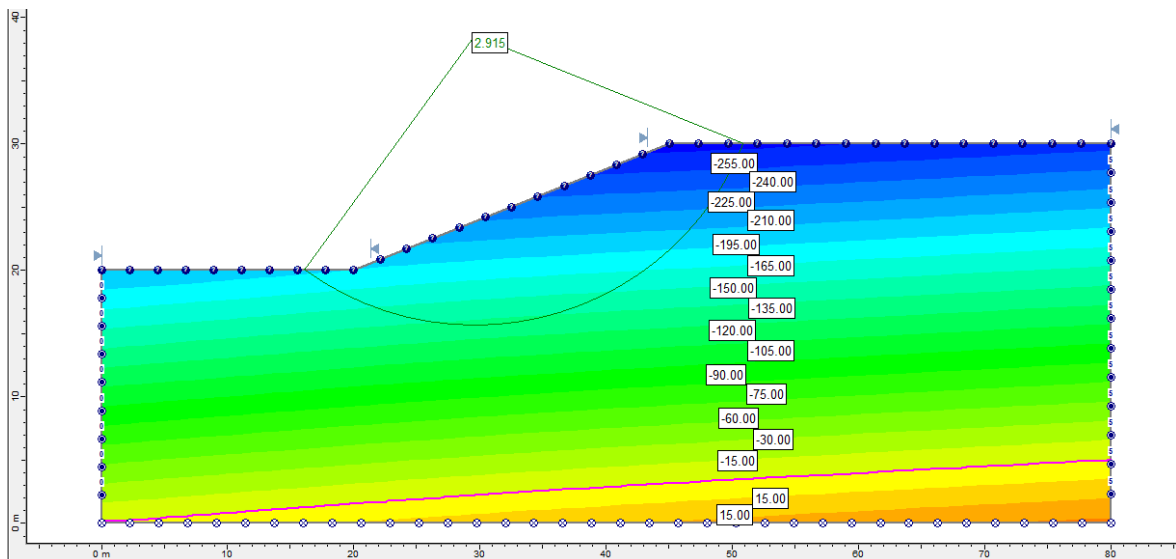


Σχήμα 5.3.5 Συνθήκες (steady state) μόνιμης ροής (αλλαγή κλίσης στην τιμή πίεσης διεύθυνσης αέρα).

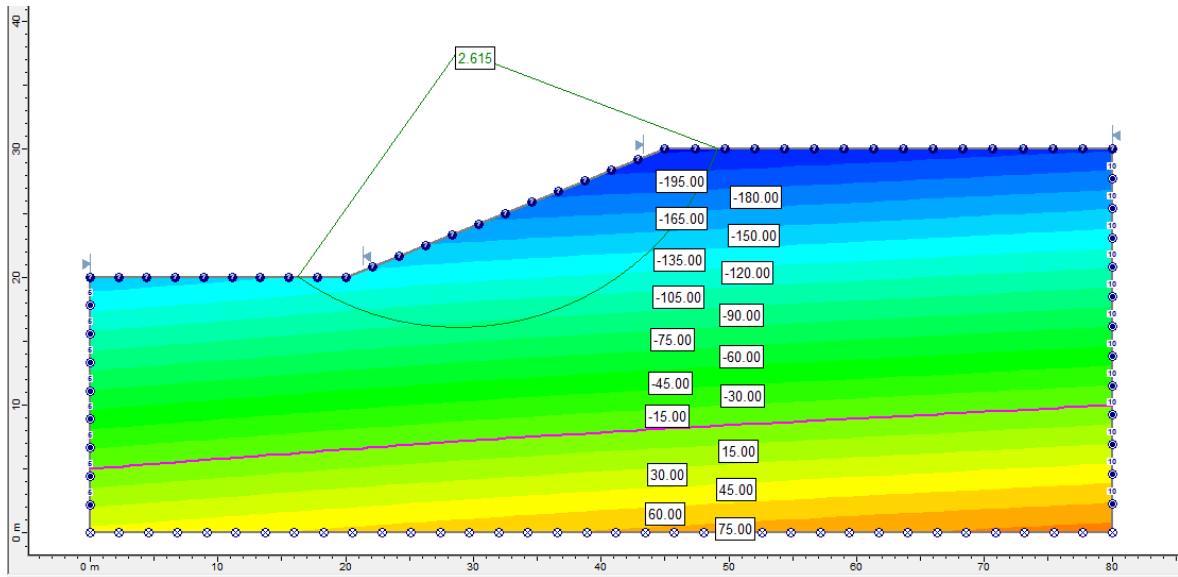
Για όλες τις αναλύσεις ευσταθείας επιλέχθηκε τιμή συνοχής όμοια σε όλα τα μοντέλα ίση με το μηδέν ($c=0$) και φαινόμενο βάρος $\gamma_b=20\text{kN/m}^3$. Η γωνία

διατμητικής αντοχής όπως υπολογίστηκε πειραματικά τέθηκε σταθερή και ίση με $\phi' = 22^\circ$ για όλες τις αναλύσεις. Επιλέχθηκαν διαφορετικές τιμές ϕ_b . Αντιπροσωπευτικές κρίθηκαν οι τιμές 10° , 6° , 2° και για μηδενική γωνία που είναι η αρχική μας περίπτωση, χωρίς ύπαρξη υπογείου υδροφόρου ορίζοντα στο μοντέλο. Οι τιμές αυτές έδωσαν τους αντίστοιχους λόγους $\tan\phi_b/\tan\phi'$: 0,461, 0,260 και 0,086. Ακόμα με τη βοήθεια της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού που μετρήθηκε στο Κεφ.3 τέθηκε η τιμή πίεσης διείδυσης αέρα ίση με 50 kPa.

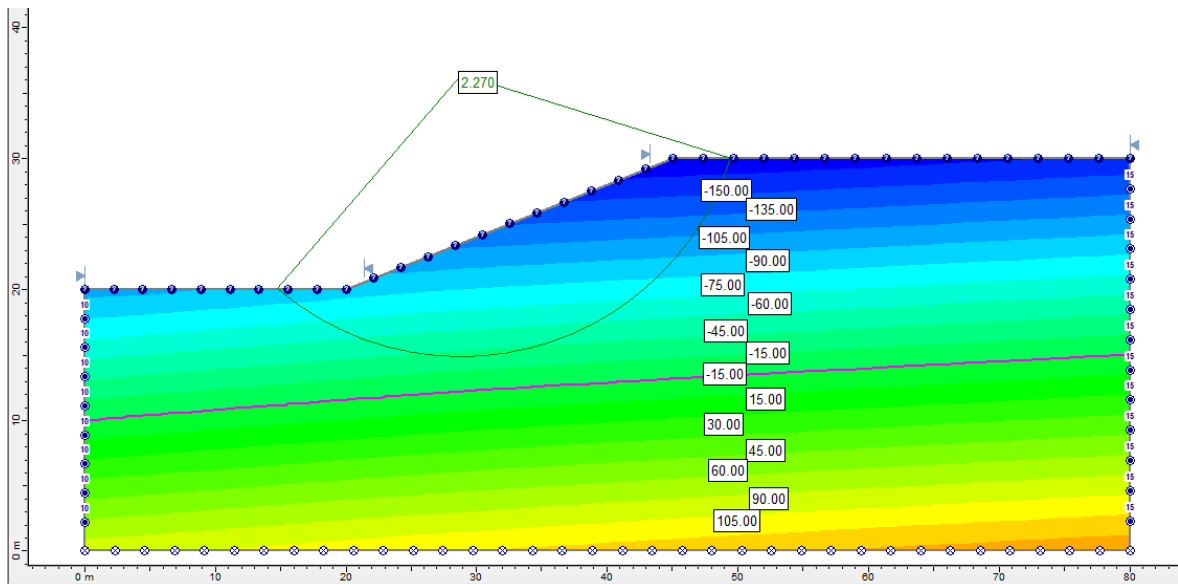
Για αυτούς τους τρεις διαφορετικούς λόγους διατηρώντας τα υπόλοιπα στοιχεία των αναλύσεων σταθερά, εκτελέστηκαν δοκιμές στο πρόγραμμα Slide 5.02, σε κάθε ένα από τα τέσσερα γεωμετρικά μοντέλα και για τα τέσσερα διαφορετικά βάθη του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα στο καθένα (ανά γεωμετρικό μοντέλο), επιλέγοντας τη μέθοδο λωρίδων κατά Janbu για τις αναλύσεις αυτές. Παρακάτω παρουσιάζονται, για το μοντέλο με ύψος πρανούς $H=10\text{m}$ και $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,461$, οι συντελεστές ασφαλείας για τα διάφορα ύψη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.



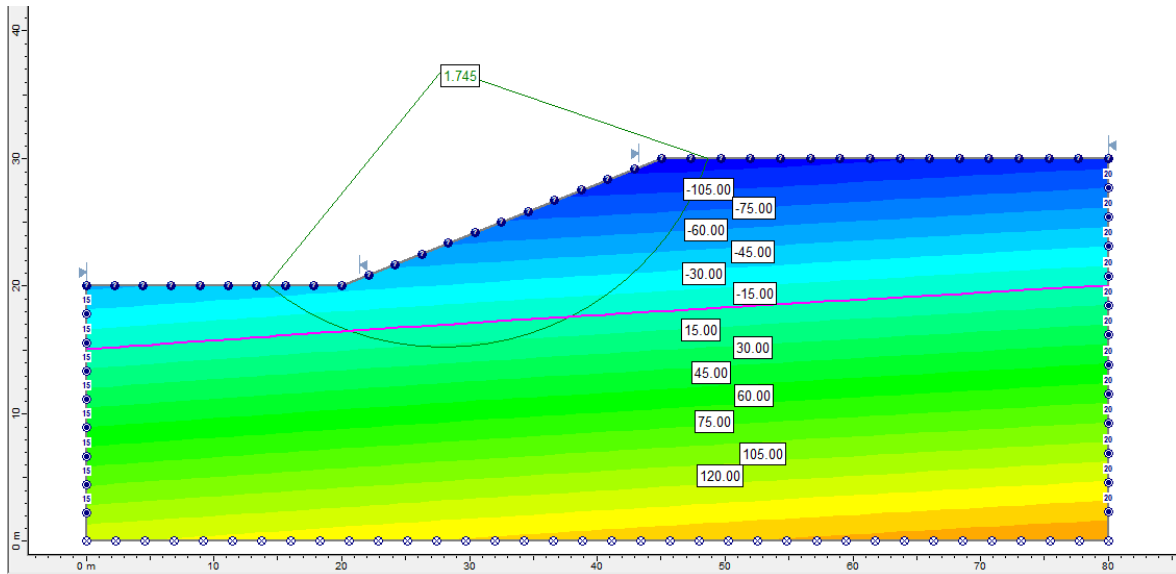
Σχήμα 5.4.1 Συντελεστής και επιφάνεια αστοχίας για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 20m στο μοντέλο με $H=10\text{m}$ και $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,461$.



Σχήμα 5.4.2 Συντελεστής και επιφάνεια αστοχίας για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 15m στο μοντέλο με $H=10m$ και $\tan\phi_b/\tan\phi' = 0,461$.



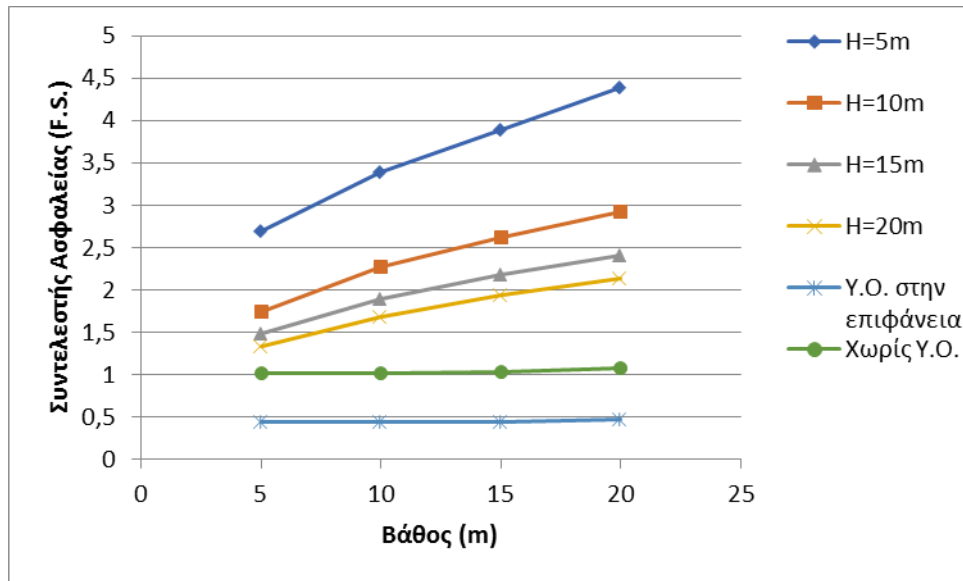
Σχήμα 5.4.3 Συντελεστής και επιφάνεια αστοχίας για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 10m στο μοντέλο με $H=10m$ και $\tan\phi_b/\tan\phi' = 0,461$.



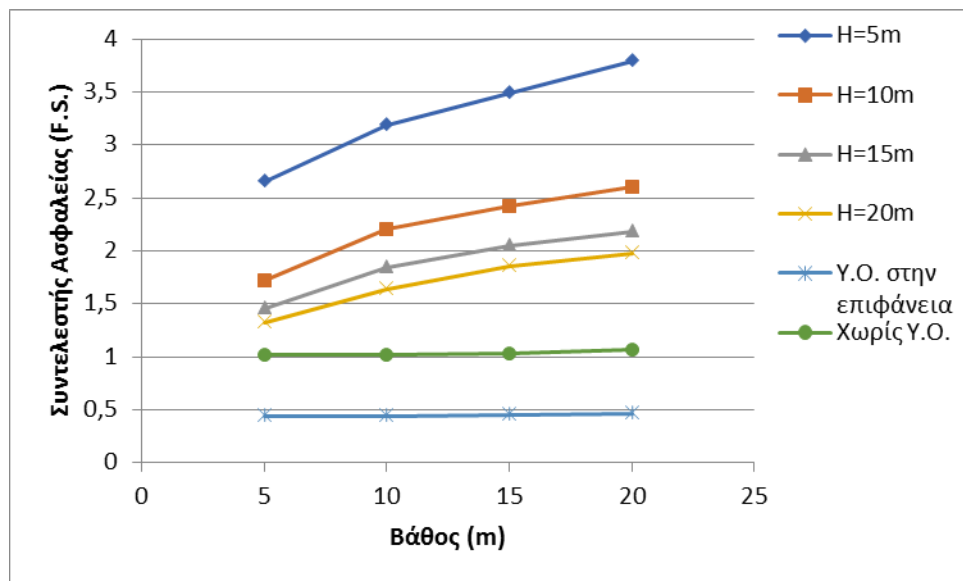
Σχήμα 5.4.4 Συντελεστής και επιφάνεια αστοχίας για βάθος υπόγειου ορίζοντα στα 5m στο μοντέλο με $H=10m$ και $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,461$.

Ενώ σε όλες τις περιπτώσεις καταγράφεται πολύ μεγαλύτερος συντελεστής ασφαλείας σε σχέση με την περίπτωση που αγνοούνται οι αρνητικές πιέσεις πόρων/μυζήσεις, είναι εμφανής εδώ η μείωση του συντελεστή ασφαλείας για το πρηνές με την παράλληλη άνοδο του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και την μείωση κατ' απόλυτη τιμή των αρνητικών πιέσεων πόρων που αναπτύσσονται πάνω από αυτόν. Δηλαδή επιβεβαιώνεται η θεώρηση ότι με την ανοδική εξέλιξη της μύζησης οι συντελεστές ασφαλείας τείνουν να μεγαλώνουν με σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των αναλύσεων που εκτελέστηκαν.

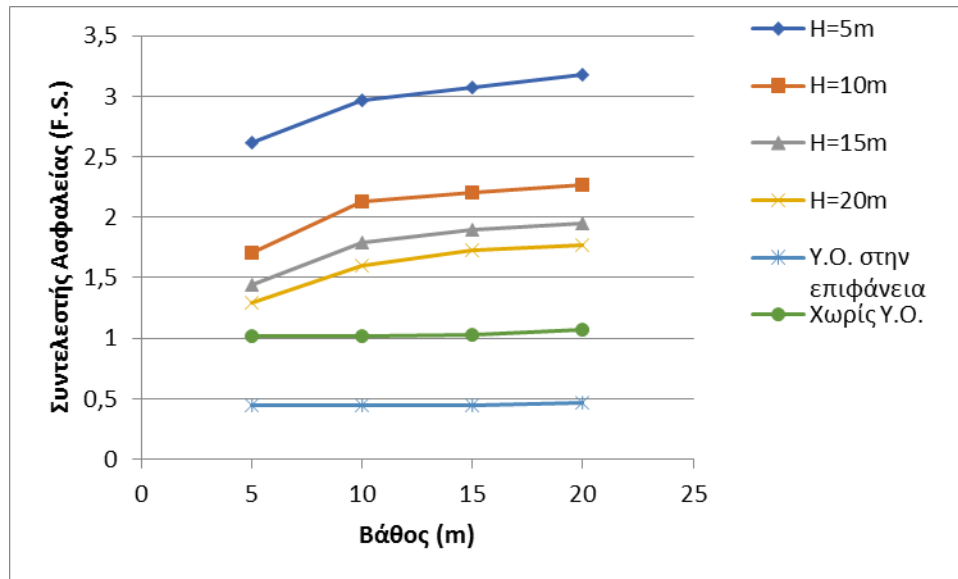
Στο Σχ. 5.4.5 η εξέλιξη του συντελεστή ασφαλείας με το βάθος του υπόγειου ορίζοντα για την περίπτωση που ισχύει $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,461$ και για όλα τα ύψη πρηνών, στο Σχ. 5.4.6 για $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,26$ και στο Σχ. 5.4.7 για $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,086$. Για σύγκριση, σε κάθε ένα από τα σχήματα παρατίθεται η εξέλιξη του συντελεστή ασφαλείας (σταθερός) για θεώρηση της στάθμης του Υπόγειου Ορίζοντα στην επιφάνεια του εδάφους και για τις ίδιες αναλύσεις χωρίς καθόλου υπόγειο ορίζοντα αλλά ούτε και θεώρηση αρνητικών πιέσεων πόρων/μυζήσεων.



Σχήμα 5.4.5 Συντελεστής ασφαλείας προς το βάθος υπόγειου ορίζοντα σε όλα τα μοντέλα με $\tan\phi_b/\tan\phi' = 0,461$ και σε σύγκριση με την περίπτωση, χωρίς υδροφόρο ορίζοντα και με τον υδροφόρο ορίζοντα στην επιφάνεια του πρανούς.



Σχήμα 5.4.6 Συντελεστής ασφαλείας προς το βάθος υπόγειου ορίζοντα σε όλα τα μοντέλα με $\tan\phi_b/\tan\phi' = 0,26$ και σε σύγκριση με την περίπτωση, χωρίς υδροφόρο ορίζοντα και με τον υδροφόρο ορίζοντα στην επιφάνεια του πρανούς .



Σχήμα 5.4.7 Συντελεστής ασφαλείας προς το βάθος υπόγειου ορίζοντα σε όλα τα μοντέλα με $\tan\phi_b/\tan\phi' = 0,086$ και σε σύγκριση με την περίπτωση, χωρίς υδροφόρο ορίζοντα και με τον υδροφόρο ορίζοντα στην επιφάνεια του πρανούς.

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Σχ. 5.4.5 έως 5.4.7 προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

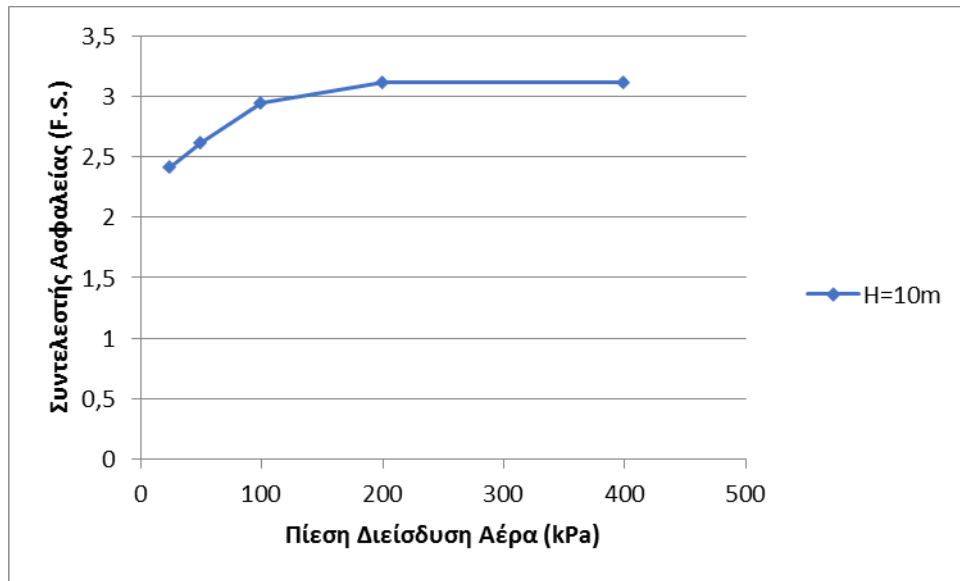
- Όσο αυξάνεται το βάθος του υπόγειου ορίζοντα, τόσο περισσότερο αυξάνεται ο συντελεστής ασφαλείας γιατί αυξάνεται η μύζηση κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.
- Όσο μειώνεται το ύψος του πρανούς, τόσο περισσότερο αυξάνεται ο συντελεστής ασφαλείας. Αυτό οφείλεται στο ότι ο όρος μύζηση $\times \tan\phi_b$ είναι η «φαινόμενη» λόγω μερικού κορεσμού συνοχή. Όπως λοιπόν και στα πλήρως κορεσμένα εδάφη, η συνοχή προκαλεί τόσο μεγαλύτερη αύξηση του συντελεστή ασφαλείας, όσο μικρότερο είναι το ύψος του πρανούς, έτσι και εδώ καταγράφεται η ίδια επιρροή.
- Για τα ίδια βάθη στάθμης υπόγειου ορίζοντα (δηλαδή ίδιο επίπεδο τιμών μύζησης κοντά στην επιφάνεια του εδάφους) γίνεται τόσο μεγαλύτερος ο συντελεστής ασφαλείας, όσο μεγαλύτερος γίνεται ο λόγος $\tan\phi_b/\tan\phi'$. Δεδομένου λοιπόν ότι ο λόγος αυτός εκφράζει ουσιαστικά την φύση των εδαφικών υλικών (μικρός λόγος = μικρή γωνία ϕ_b ως προς την γωνία διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου εδάφους = πιο χονδρόκοκκο

και λιγότερο πλαστικό υλικό, αντίθετα μεγάλος λόγος = μεγάλη γωνία ϕ_b ως προς την γωνία διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου εδάφους = πιο λεπτόκοκκο και περισσότερο πλαστικό υλικό), το συμπέρασμα είναι ότι ενώ η παρουσία μύζησης αυξάνει τον συντελεστή ασφαλείας σε όλα τα εδάφη ανεξάρτητα από τη φύση του, έχει μεγαλύτερη επιρροή στα πιο λεπτόκοκκα εδάφη επειδή σε αυτά είναι μεγαλύτερος ο λόγος $\tan\phi_b/\tan\phi'$.

5.5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΙΕΣΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΕΡΑ

Η τελευταία σειρά αναλύσεων ευσταθείας αποσκοπούσε στη διερεύνηση της επιρροής της τιμής της πίεσης διείσδυσης αέρα. Έτσι για ένα ύψος πρανούς ($H=10m$), μία στάθμη υπογείου ορίζοντα (5m-10m), και μία τιμή του λόγου $\tan\phi_b/\tan\phi'=0,461$, επιλέχθηκε η μεταβολή της τιμής πίεσης διείσδυσης αέρα προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή στον συντελεστή ασφαλείας. Επιλέχθηκε λοιπόν να εκτελεστούν αναλύσεις για τιμές πίεσης διείσδυσης αέρα ίσες με 25, 50 (ήδη εκτελεσθείσες αναλύσεις), 100, 200, 400 kPa. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων αυτών καταγράφονται στο Σχ. 5.5.1.

Το συμπέρασμα από τα αποτελέσματα του Σχ. 5.5.1 είναι ότι η αύξηση της τιμής της πίεσης διείσδυσης αέρα (τηρουμένων ίδιων των λοιπών συνθηκών) προκαλεί αύξηση του συντελεστή ασφαλείας όταν λαμβάνουμε υπόψη μας τις αρνητικές πιέσεις πόρων/μυζήσεις, μέχρι όμως την τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα που υπερβαίνει τις υπάρχουσες τιμές μύζησης στο πρανές. Η αύξηση αυτή του συντελεστή ασφαλείας εξηγείται από το Σχ. 5.3.5. Όσο αυξάνεται η πίεση διείσδυσης αέρα, η πρόσθετη διατμητική αντοχή υπολογίζεται από την τιμή ϕ' και όχι την τιμή ϕ_b η οποία είναι πάντα μικρότερη από την ϕ' . Όταν λοιπόν η τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα του υλικού ξεπεράσει την μέγιστη μύζηση στο πρανές, δεν προκύπτει πλέον οποιαδήποτε μεταβολή στον υπολογισμό της πρόσθετης αντοχής, οπότε η τιμή του αυξημένου συντελεστή ασφαλείας παραμένει πλέον σταθερή.



Σχήμα 5.5.1 Συντελεστής ασφαλείας προς την πίεση διείσδυσης αέρα για βάθος υπογείου ορίζοντα ίσο με 5m για το μοντέλο με ύψος πρανούς $H=10m$ και $\tan\phi_b/\tan\phi' = 0,461$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗ ΚΟΡΕΣΜΕΝΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Σε ό,τι αφορά την εργαστηριακή διερεύνηση των μη κορεσμένων εδαφών προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα.

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού είναι κεντρικής σημασίας για την κατανόηση και την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Είναι η καμπύλη μεταβολής του ποσοστού υγρασίας ή του βαθμού κορεσμού με την μύζηση, δείχνοντας τον τρόπο με τον οποίο ένα εδαφικό υλικό χάνει νερό όσο η μύζηση αυξάνεται (όσο δηλαδή γίνεται πιο ξηρό) και τον τρόπο με τον οποίο προσροφά νερό όσο η μύζηση μειώνεται (όσο δηλαδή το υλικό επανυγραίνεται). Ο προσδιορισμός της, όπως αποδείχθηκε από την εργαστηριακή διερεύνηση είναι μία επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία.

Τα σημεία καμπής επί της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού περιγράφουν τα σημεία κατά τα οποία έχουμε ραγδαίες αλλαγές της συνύπαρξης της υγρής και της αέριας φάσης των πόρων και συνακόλουθα της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών. Το συνηθισμένο σχήμα της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι αυτό της ανάστροφης «σιγμοειδούς» καμπύλης με τα δύο σημεία καμπής της να αντιστοιχούν σε δύο χαρακτηριστικά φυσικά μεγέθη και να οριοθετούν τρεις περιοχές μεταξύ των ακραίων καταστάσεων που αντιστοιχούν στα πλήρως κορεσμένα και στα απολύτως ξηρά εδάφη. Το πρώτο σημείο καμπής αντιστοιχεί στην πίεση διείσδυσης αέρα και το δεύτερο στο παραμένον ποσοστό υγρασίας (residual water content). Στην περιοχή που ορίζεται

μεταξύ πλήρους κορεσμού ($u_a - u_w = 0$) και πίεσης διείσδυσης αέρα (Περιοχή I), το έδαφος είναι πρακτικά πλήρως κορεσμένο, έχουμε αρνητική πίεση πόρων ασκούμενη ολόπλευρα στο στερεό σκελετό και ισχύει η αρχή των ενεργών τάσεων. Στην περιοχή περί την πίεση διείσδυσης αέρα, ο αέρας των πόρων βρίσκεται υπό τη μορφή διακριτών φυσαλίδων, ενώ αμέσως μετά από αυτό το στάδιο η αέρια φάση των πόρων γίνεται συνεχής, συνυπάρχοντας με τη συνεχή υγρή φάση των πόρων ως τη μύζηση που αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας (Περιοχή II). Από την τιμή αυτή της μύζησης και μετά η υγρή φάση του εδαφικού υλικού χάνει τη συνέχειά της και η κίνηση του νερού εντός των πόρων γίνεται με αυτό σε μορφή υδρατμών (Περιοχή III). Εκτός από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με το συνηθισμένο σχήμα της ανάστροφης σιγμοειδούς καμπύλης υπάρχουν και χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με περισσότερα των δύο σημεία καμπής, οι οποίες αντιστοιχούν σε εδαφικά υλικά με δύο κυρίαρχα μεγέθη πόρων. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού όπως στην περίπτωση του εδαφικού υλικού από το Μαζαράκι που αυτά τα σημεία καμπής δεν είναι τόσο ευδιάκριτα.

Η κατάστρωση της κατάλληλης εργαστηριακής διάταξης για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού είναι ιδιαίτερης σημασίας αφού πρακτικά όλες οι μέθοδοι προσδιορισμού είναι αρκετά πολύπλοκες, χρονοβόρες και οδηγούν σε σημαντική διασπορά των πειραματικών αποτελεσμάτων. Η προσπάθεια ελαχιστοποίησης αυτής είναι ιδιαίτερης σημασίας αφού όπως επισημάνθηκε υπάρχουν εδαφικά υλικά με χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους-νερού με περισσότερα από δύο σημεία καμπής όπως συναντάται και στη διεθνή βιβλιογραφία. Τυχόν μεγάλες αποκλίσεις λοιπόν στα πειραματικά αποτελέσματα κατά τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού μπορεί να οδηγήσουν στη λανθασμένη αναγνώριση της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Προκειμένου να αποφευχθούν τέτοιου είδους σφάλματα είναι σκόπιμη η συνεκτίμηση όλων των διαθέσιμων στοιχείων για το εδαφικό υλικό (για παράδειγμα της καμπύλης κοκκομετρικής διαβάθμισής του) και η επιβεβαίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων, είτε μέσω της επανάληψης του προσδιορισμού διαφόρων σημείων της καμπύλης, είτε μέσω της πύκνωσης των σημείων της καμπύλης (όπως και έγινε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής

εργασίας), ώστε να διαφανούν τυχόν σημεία αυτής που αποκλίνουν σημαντικά της γενικότερης μορφής της καμπύλης.

Η μέγιστη πίεση των 1500 kPa (15 Bar) που μπορεί να επιβληθεί με τον χρησιμοποιηθέντα θάλαμο μύζησης μοιάζει ανεπαρκής για απόκτηση ολοκληρωμένης εικόνας της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού. Για τον πλήρη προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους-νερού λοιπόν πρέπει να χρησιμοποιούνται και επιπλέον μέθοδοι ικανές να εφαρμόζουν μεγαλύτερες τιμές της μύζησης, όπως π.χ. η μέθοδος ελέγχου της ολικής μύζησης με κορεσμένα υδατικά διαλύματα αλάτων που εφαρμόστηκε στην πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ή και της ξήρανσης σε ατμοσφαιρικές συνθήκες σε συνδυασμό με την χρήση υγρομέτρου ψυχρού κατόπτρου για την μέτρηση της μύζησης στις συνθήκες ισορροπίας μετά την ξήρανση.

Οι καμπύλες ποσοστού υγρασίας-μύζησης και ογκομετρικού ποσοστού υγρασίας-μύζησης, στην χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους νερού, προέκυψαν πρακτικά γραμμικές παρά την σαφώς ανάστροφη σιγμοειδή μορφή των καμπυλών λόγω κενών-μύζησης και βαθμού κορεσμού-μύζησης παρά τα καταγραφόμενα στη διεθνή βιβλιογραφία. Η διαφοροποίηση αυτή αποδίδεται στο ότι το υλικό στο οποίο μετρήθηκε η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού ήταν σε μορφή πολτού με αρχική υγρασία 1.5 φορές το όριο υδαρότητας το υλικού.

Στα εδαφικά υλικά που η διατμητική αντοχή συνεχίζει να αυξάνεται με την μύζηση για τιμές αυτής μεγαλύτερες της πίεσης διείσδυσης αέρα του εδαφικού υλικού, ο ρυθμός αύξησης της διατμητικής αντοχής συναρτήσει της μύζησης για τιμές μεγαλύτερες της πίεσης διείσδυσης αέρα είναι μικρότερος του ρυθμού αύξησης της διατμητικής αντοχής συναρτήσει της ολικής τάσης, πράγμα που σημαίνει ότι η γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' είναι μεγαλύτερη της γωνίας αύξησης της διατμητικής αντοχής συναρτήσει της μύζησης ϕ_b .

Από τις δοκιμές της ανεμπόδιστης θλίψης που εκτελέστηκαν προκύπτει ότι η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη αυξάνει με την αύξηση της μύζησης και άρα αυξάνεται με την αντίστοιχη μείωση του βαθμού κορεσμού, το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται με τη μύζηση και επομένως αυξάνεται με τη μείωση του βαθμού κορεσμού, η αύξηση της μύζησης προκαλεί έντονη αύξηση της ψαθυρότητας των

υλικών και τέλος για τις χαμηλές τιμές της μύζησης καταγράφονται αρκετά μεγαλύτερες τιμές της παραμόρφωσης στην αστοχία καθώς τα δοκίμια είχαν ακόμα μεγάλο ποσοστό υγρασίας και ήταν σε ημιπλάσιμη μορφή. Από τις δοκιμές της θλίψης κατά γενέτειρα ομοίως παρατηρήθηκε η αύξηση της αντοχής με την αύξηση της μύζησης και αντίστοιχα τη μείωση του βαθμού κορεσμού. Ωστόσο η μεταβολή της αντοχής σε θλίψη κατά γενέτειρα με τη μύζηση έχει χαμηλότερο ρυθμό σε σχέση με τον ρυθμό αύξησης της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη με τη μύζηση.

Με την συνδυαστική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα (Brazilian) παρακολούθηθηκε η εξέλιξη της συνοχής των μη κορεσμένων εδαφών με την αύξηση της μύζησης. Με την χρήση του συνδυασμού των κύκλων του Mohr κατά την αστοχία, για κάθε επιβληθείσα τιμή μύζησης, υπήρξε και η αντίστοιχη τιμή από το διάγραμμα για την συνοχή και τη γωνία διατμητικής αντοχής. Η συνοχή εμφάνισε σχετικά σταθερή αύξηση τιμών με την αύξηση της μύζησης. Ακόμα η γωνία διατμητικής αντοχής παρατηρήθηκε ότι είχε τιμές μεταβαλλόμενες γύρω από την γωνία $\varphi = 22^{\circ}$ που ήταν η γωνία διατμητικής αντοχής που υπολογίστηκε από την δοκιμή απευθείας διάτμησης. Η γωνία αυτή ενώ αναμενόταν να παραμένει σταθερή, όπως αναφέρθηκε στο Κεφ.3, προέκυψε με διακύμανση. Η διακύμανση των τιμών οφείλεται σε αντίστοιχη διακύμανση του υπολογισμού της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη της οποίας η εξέλιξη φαίνεται να είχε υποεκτιμήσεις και υπερεκτιμήσεις αντίστοιχα.

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εξέλιξης της αντοχής με τη μύζηση από τη βιβλιογραφία αξιοποιήθηκαν για τη συσχέτιση της γωνίας εξέλιξης της μεταβολής της αντοχής με τη μύζηση φ_b με την γωνία διατμητικής αντοχής φ' . Η συγκέντρωση αυτών των στοιχείων υποδεικνύει ότι για εδαφικά υλικά με μεγαλύτερη γωνία φ' από 30° , η αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών από την πίεση διείδυσης αέρα και μετά μηδενίζεται, ενώ για μικρότερες τιμές η γωνία φ_b αυξάνεται τόσο περισσότερο, όσο μικρότερη γίνεται η γωνία διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου εδάφους. Δεδομένου ότι αυτή μειώνεται τόσο περισσότερο, όσο πιο λεπτόκοκκο και πλαστικό γίνεται ένα εδαφικό υλικό τεκμηριώνεται ότι όσο πιο αργιλικό ένα εδαφικό υλικό, τόσο περισσότερο αυξάνεται η φαινόμενη συνοχή του μετά την πίεση διείδυσης αέρα του υλικού με την αύξηση της μύζησης.

6.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΜΕΡΙΚΟΥ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

Σε ό,τι αφορά στη διερεύνηση της επιρροής του μερικού κορεσμού και της εξ αυτού μύζησης στην ευστάθεια των πρανών προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Παρά την σημασία του βαθμού κορεσμού και της επιρροής αυτού στην διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών, η επιρροή του πολύ σπάνια και μόνο πρόσφατα λαμβάνεται υπόψη κατά τις ευθείες αναλύσεις ευσταθείας πρανών, αφού η πιθανότητα απώλειας της συμβολής του στην διατμητική αντοχή είναι πολύ μεγάλη λόγω επεισοδίων βροχόπτωσης. Κατά συνέπεια η χρησιμοποίηση της επιπλέον αυτής συνιστώσας της αντοχής λόγω μερικού κορεσμού σε ευθείες αναλύσεις ευσταθείας είναι σε βάρος της ασφάλειας αφού θα οδηγήσει στην εκτίμηση μεγαλύτερου συντελεστή ασφαλείας από εκείνον που πολύ πιθανόν θα υπάρχει μετά την απώλεια αυτής της επιπλέον αντοχής σε περίπτωση βροχόπτωσης.

Στις αναλύσεις που εκτελέστηκαν εκτός από την κύρια επιρροή του βάθους του υπογείου ορίζοντα, δηλαδή του μεγέθους της μύζησης και των αρνητικών πιέσεων που εξελίσσονταν στο πρανές, υπήρξαν και άλλοι παράγοντες που επηρέασαν τον συντελεστή ασφαλείας και γενικά την ευστάθεια του πρανούς. Όπως αποδείχθηκε σε σημαντικό βαθμό επηρέασε η γεωμετρία του μοντέλου που αξιοποιήθηκε καθώς για διαφορετικό ύψος πρανών (παρόλο που διατηρούνταν κοινή κλίση πρανούς) προέκυψαν διαφορετικές τιμές για τον συντελεστή ασφαλείας. Όσο μειώνεται το ύψος του πρανούς, τόσο περισσότερο αυξάνεται ο συντελεστής ασφαλείας. Αυτό οφείλεται στο ότι ο όρος μύζηση $\times \tan \phi_b$ είναι η «φαινόμενη» λόγω μερικού κορεσμού συνοχή. Όπως λοιπόν και στα πλήρως κορεσμένα εδάφη, η συνοχή προκαλεί τόσο μεγαλύτερη αύξηση του συντελεστή ασφαλείας, όσο μικρότερο είναι το ύψος του πρανούς, έτσι και εδώ καταγράφεται η ίδια επιρροή.

Για τα ίδια βάθη στάθμης υπόγειου ορίζοντα (δηλαδή ίδιο επίπεδο τιμών μύζησης κοντά στην επιφάνεια του εδάφους) γίνεται τόσο μεγαλύτερος ο συντελεστής ασφαλείας, όσο μεγαλύτερος γίνεται ο λόγος $\tan \phi_b / \tan \phi'$. Δεδομένου λοιπόν ότι ο

λόγος αυτός εκφράζει ουσιαστικά την φύση των εδαφικών υλικών (μικρός λόγος = μικρή γωνία ϕ_b ως προς την γωνία διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου εδάφους = πιο χονδρόκοκκο και λιγότερο πλαστικό υλικό, αντίθετα μεγάλος λόγος = μεγάλη γωνία ϕ_b ως προς την γωνία διατμητικής αντοχής του πλήρως κορεσμένου εδάφους = πιο λεπτόκοκκο και περισσότερο πλαστικό υλικό), το συμπέρασμα είναι ότι ενώ η παρουσία μύζησης αυξάνει τον συντελεστή ασφαλείας σε όλα τα εδάφη ανεξάρτητα από τη φύση τους, έχει μεγαλύτερη επιρροή στα πιο λεπτόκοκκα εδάφη επειδή σε αυτά είναι μεγαλύτερος ο λόγος $\tan\phi_b/\tan\phi'$.

Τέλος αποδείχθηκε ότι η αύξηση της τιμής της πίεσης διείδυσης αέρα (τηρουμένων ίδιων των υπόλοιπων συνθηκών) προκαλεί αύξηση του συντελεστή ασφαλείας όταν λαμβάνουμε υπόψη μας τις αρνητικές πιέσεις πόρων/μυζήσεις, μέχρι όμως την τιμή της πίεσης διείδυσης αέρα που υπερβαίνει τις υπάρχουσες τιμές μύζησης στο πρανές. Όσο αυξάνεται η πίεση διείδυσης αέρα, η πρόσθετη διατμητική αντοχή υπολογίζεται από την τιμή ϕ' και όχι την τιμή ϕ_b η οποία είναι πάντα μικρότερη από την ϕ' . Όταν λοιπόν η τιμή της πίεσης διείδυσης αέρα του υλικού ξεπεράσει την μέγιστη μύζηση στο πρανές, δεν προκύπτει πλέον οποιαδήποτε μεταβολή στον υπολογισμό της πρόσθετης αντοχής, οπότε η τιμή του αυξημένου συντελεστή ασφαλείας παραμένει πλέον σταθερή.

6.3 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Όλα τα προαναφερθέντα καθιστούν σημαντική την ανάγκη πραγματοποίησης επιτόπου μετρήσεων της μύζησης και παρακολούθησης της εξέλιξής της. Τα θεωρητικά προσομοιώματα για την εξέλιξη της διατμητικής αντοχής των εδαφικών υλικών με την μύζηση υπάρχουν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε είδους αναλύσεις που απαιτούνται εκτιμήσεις της επιρροής της μύζησης στην διατμητική αντοχή. Η αξιοπιστία αυτών των εκτιμήσεων ωστόσο δεν πρόκειται να είναι μεγάλη όσο δεν πραγματοποιούνται συστηματικές, μακροχρόνιες μετρήσεις της μύζησης επιτόπου και συσχέτισή τους, αφενός με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού των απαντώμενων σχηματισμών, και αφετέρου τα μετεωρολογικά δεδομένα που καταγράφονται στην επιφάνεια του εδάφους.

Η πραγματοποιηθείσα εργαστηριακή διερεύνηση επέδειξε τον χρόνο που απαιτείται για την κατάληξη σε τιμές παραμέτρων για ένα εδαφικό υλικό μόνο. Υφίσταται ανάγκη για την διερεύνηση της συμπεριφοράς περισσότερων εδαφικών υλικών υπό συνθήκες μερικού κορεσμού και καταγραφής των σχετικών τιμών παραμέτρων στην βιβλιογραφία. Είναι σκόπιμο λοιπόν στο πλαίσιο μελλοντικών εργασιών να διερευνηθούν οι ιδιότητες και άλλων υλικών (με διαφορετικά μάλιστα φυσικά χαρακτηριστικά). Επίσης πρέπει να διερευνηθεί η συσχέτιση των τιμών παραμέτρων που προκύπτουν με την μέθοδο του συνδυασμού των κύκλων Mohr από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και δοκιμές θλίψης κατά γενέτειρα μετά από επιβολή μύζησης με τις τιμές παραμέτρων που προκύπτουν από δοκιμές άμεσης διάτμησης ή δοκιμές τριαξονικής θλίψης με συνεχώς ελεγχόμενη μύζηση.

Σε ό,τι αφορά στην παραμετρική διερεύνηση με τις αναλύσεις ευσταθείας, είναι σκόπιμο στο πλαίσιο μελλοντικών εργασιών να διερευνηθούν τα αποτελέσματα και με τιμές παραμέτρων από άλλα εδαφικά υλικά. Ιδιαίτερης σημασίας θα είναι επίσης η διερεύνηση της επιρροής της μύζησης σε αντίστροφες αναλύσεις ευσταθείας. Τέλος θα έχει ιδιαίτερη αξία η διερεύνηση της επιρροής πιο πολύπλοκων κατανομών μύζησης με το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους και της χρονικής τους μεταβολής σε σχέση με τις κατανομές που προέκυψαν από αναλύσεις μόνιμης ροής και χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελώντας απλώς πεδία τιμών μύζησης για την καταγραφή της επιρροής της στην ευστάθεια πρανών.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ιωάννου, Ε, 2020, Εξέταση μίας κατολίσθησης στην περιοχή Άρμου της Επαρχίας Πάφου, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Νεάπολις Πάφου Κύπρου, σελ. 97.

Μπαρδάνης, Μ. Ε., 2016, Εργαστηριακή και αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ 2016, σελ. 1300.

Μπαρδάνης, Μ. Ε., 2019, Φύση, μηχανική συμπεριφορά και εμφάνιση μη κορεσμένων εδαφών, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 1-42.

Μπαρδάνης, Μ. Ε., 2019, Εισαγωγή στην Εδαφομηχανική, Σημειώσεις διδασκαλίας του Μαθήματος Εδαφομηχανική, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Νεάπολις Πάφου Κύπρου, σελ. 470.

Μπαρδάνης, Μ. Ε., 2019, Εξέλιξη της παραμένουσας διατμητικής αντοχής με τη μεταβολή του βαθμού κορεσμού, πρακτικά 8ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα, 6-8 Νοεμβρίου 2019.

Μπαρδάνης, Μ. Ε., 2022, Προσωπική επικοινωνία: Εκτέλεση αναλύσεων υπόγειας ροής για τα προσομοιώματα του σχήματος 5.3.1-5.3.4

Χατζηγώγος, Ν. Θ., 2019, Διατμητική αντοχή μη κορεσμένων εδαφών, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 67-82.

ASTM, 2006, D4318 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bishop, A.W. (1955). The use of slip circle in the stability analysis of earth slopes, *Geotechnique*, **5**(1), 7–17.

Bishop, A.W. (1959). The Principle of Effective Stress. *Teknisk Ukeblad*, 106, pp. 859-863.

- Bishop, A. W., 1971, *Shear strength parameters for undisturbed and remoulded soil specimens*, proc. of the Roscoe Memorial Symposium, Cambridge, Foulis.
- Brandl, H., 1996, *Stabilization of multiple progressive slope failures*, proc. 7th Int. Symp. On Landslides, Trondheim, Norway, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 1661-1666.
- Bromhead, E. N., 1979, *A simple ring shear apparatus*, Ground Eng., **12**, pp. 40-44.
- Chen, Z.-Y., and Morgenstern, N. R. (1983). Extensions to the generalized method of slices for stability analysis, *Canadian Geotechnical Journal*, **20**(1), 104–119.
- Duncan, J. M., Wright, S. G., Brandon, T. L., 2004, *Soil Strength and Slope Stability*, Second Edition, pp.317
- Di Maio, C., 1996a, The influence of pore fluid composition on the residual shear strength of some natural clayey soils, in K. Seneset (ed.), proc. 7th Int. Conf. on Landslides, 2, pp. 1189-1194, A.A. Balkema, Rotterdam.
- Di Maio, C., 1996b, Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effect, *Géotechnique*, 46, 4, pp. 695-707.
- Escario, V., Sáez, J., 1986, *The shear strength of partly saturated soils*, *Géotechnique*, Vol. 36, 3, pp. 453-456.
- Escario, V., Juca, J. F., & Coppe, M. S., 1989, Strength and Deformation of Partly Saturated Soils, Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech & Found. Eng., (σσ. 43-46). Rio de Janeiro, Brazil.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., 1993, *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, New York, N.Y., 517 pp.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., Widger, R. A., 1978, The shear strength of unsaturated soils, *Can. Geot. J.*, Vol. 15, pp. 313-321.
- Hondros, G., 1959, The Evaluation of Poisson's Ratio and the Modulus of Materials of a Low Tensile Resistance by the Brazilian (Indirect Tensile) Test with Particular Reference to Concrete, *Aust. J. Appl. Sci.*, 10, pp. 243-264.

- Jaksa, M. B. (2020). Reflections on Some Contemporary Aspects of Geotechnical Engineering Education – From Critical State to Virtual Immersion, University of Adelaide, Adelaide, Australia, pp.3-4
- Janbu, N. (1973). Slope stability computations, Embankment-Dam Engineering—Casagrande Volume, Wiley, New York, pp. 47–86.
- Janbu, N., Bjerrum, L., and Kjǫrnsli, B. (1956). Veiledning ved Losning av Fundamenteringsoppgaver (Soil Mechanics Applied to some Engineering Problems), Publication 16, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
- Kalteziotis, N., 1993, The residual shear strength of some Hellenic clayey soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, **11**, pp. 125-145.
- Kenney, T. C., 1967, The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils, *proc. Geotech. Conf. on the Shear Strength properties of natural soils and rocks*, 1, pp. 123-129.
- Krahn, J., Fredlund, D. G., Klassen, M. J., 1989, Effect of soil suction on slope stability at Notch Hill, *Can. Geot. J.*, Vol. 26, pp. 269-278.
- Lowe, J., and Karafiath, L. (1959). Stability of earth dams upon drawdown, *Proceedings, First PanAmerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City*, Vol. 2, pp. 537–552
- Lupini, J. F., Skinner, A. E., Vaughan, P. R., 1981, The drained residual strength of cohesive soils, *Géotechnique*, **31**, 2, pp. 181-213.
- Maksimović, M., 1989, On the residual shearing strength of clays, *Géotechnique*, **39**, 2, pp. 347- 351.
- Merchán, V., Vaunat, J., Romero, E., Meca, T., 2008, Experimental study of the influence of suction on the residual friction angle of clays, *Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering*, Toll et al. (eds), *Proc. 1st Eur. Conf. on Unsaturated Soils*, Durham, UK, 2-4 July, 2008, pp. 423-428.
- Mitchell, J., 1976, *Fundamentals of Soils Behavior*, John Wiley & Sons, Inc. New York.

- Morgenstern, N. R., and V. E. Price (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces, *Geotechnique*, **15**(1), Mar., 79–93.
- Sarma, S. K. (1973). Stability analysis of embankments and slopes, *Geotechnique*, **23**(3), Sept., 423–433.
- Skempton, A. W., 1964, The 4th Rankine Lecture: Long-term stability of clay slopes, *Géotechnique*, **14**, 1, pp. 77-102.
- Skempton, A. W., 1985, Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Géotechnique*, **35**, 1, pp. 3-18.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces, *Geotechnique*, **17**(1), 11–26.
- Stark, T. D., Eid, H. T., 1994, Drained residual strength of cohesive soils, *J. of Geotech. Engng, ASCE*, **120**, 5, pp. 856-871.
- Tika, T. E., Vaughan, P., Lemos, L. J., 1996, Fast shearing of pre-existing shear zones in soil, *Géotechnique*, 46, 2, pp. 197-233.
- U.S. Army Corps of Engineers (1970). *Engineering and Design: Stability of Earth and Rock-Fill Dams*, Engineer Manual EM 1110–2–1902, Department of the Army, Corps of Engineers, Office of the Chief of Engineers, Washington, DC, April
- Vaunat, J., Amador, C., Romero, E., Djeran-Maigre, I., 2006, *Residual strength of a low plasticity clay at high suctions*, 4th International Conf. on Unsaturated Soils, Carefree, Arizona, USA, April 2-5 2006, Vol. 1, pp. 1279-1289.
- Vaunat, J., Merchán, V., Romero, E., Pineda, J., 2007, *Residual strength of clays at high suctions*, in T., Schanz (Ed.), *Theoretical and Numerical Unsaturated Soil Mechanics*, Proc. of the Int. Conf. “Mechanics of Unsaturated Soils”, Weimar, 7-9 March 2007, Springer, Berlin, Vol. II, pp. 151-163.
- Vesga L F (2009) Direct tensile-shear test (DTS) on unsaturated kaolinite clay. *GTJ*, 32: Paper ID GTJ101563
- Wesley, L. D., 2003, Residual strength of clays and correlations using Atterberg limits, *Géotechnique*, **53**, 7, pp. 669-672.