

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ -
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF MINING AND
METALLURGICAL ENGINEERING

SECTION OF MINING ENGINEERING

*Η επίδραση του μερικού κορεσμού στη διατμητική αντοχή των εδαφών:
Εργαστηριακή και υπολογιστική διερεύνηση σε προβλήματα ευστάθειας πρανών*

Effect of partial saturation on shear strength of soils:

Experimental and computational investigation in slope stability problems

Διπλωματική Εργασία / Diploma Thesis

Φεγιάς Μαριάννα / Feuillas Marianna

Επιβλέπων / Supervised by

Ιωάννης Ε. Ζευγώλης – Επίκ. Καθηγητής ΕΜΠ / Ioannis E. Zevgolis – Assist. Professor of NTUA

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ -
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF MINING AND
METALLURGICAL ENGINEERING

SECTION OF MINING ENGINEERING

*Η επίδραση του μερικού κορεσμού στη διατμητική αντοχή των εδαφών:
Εργαστηριακή και υπολογιστική διερεύνηση σε προβλήματα ευστάθειας πρανών*

Effect of partial saturation on shear strength of soils:

Experimental and computational investigation in slope stability problems

Διπλωματική Εργασία / Diploma Thesis

Φεγιάς Μαριάννα / Feuillas Marianna

Επιβλέπων: Ιωάννης Ε. Ζευγώλης – Επίκ. Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 01/11/2022

Ιωάννης Ζευγώλης, Επίκουρος Καθηγητής

.....

Ανδρέας Μπενάρδος, Καθηγητής

.....

Πάυλος Νομικός, Καθηγητής

.....

Copyright © Φεγιάς Μαριάννα, 2022

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ιωάννη Ζευγώλη για την εμπιστοσύνη που έδειξε προς το πρόσωπό μου καθώς και την υποστήριξη του κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της. Επίσης ευχαριστώ τους καθηγητές κ. Ανδρέα Μπενάρδο και κ. Παύλο Νομικό για το χρόνο που διέθεσαν για την εξέταση της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μιχάλη Μπαρδάνη, Διευθυντή του εργαστηρίου της εταιρίας ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε., για όλες τις γνώσεις που μου προσέφερε, την καθοδήγησή του και τη συνεχή επίβλεψή του αυτούς τους μήνες. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω επίσης στους εργαζόμενους του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε., Γρίφιζα Σοφία, Παναγιωτοπούλου Ιωάννα, Βαγενά Χάρη, Καλαντζή Νίκο και Τσουκαλαδάκη Μάριο για τη βοήθειά τους στην εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου και στους φίλους μου που με στήριξαν όλο αυτό το διάστημα, ο καθένας με τον δικό του μοναδικό τρόπο.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μηχανική συμπεριφορά εδαφικών υλικών σε συνθήκες μερικού κορεσμού έχει αποτελέσει αντικείμενο εντατικής διερεύνησης τα τελευταία χρόνια, καθώς η αντοχή των εν λόγω υλικών επηρεάζεται από την τιμή της μύζησης που έχει επιβληθεί σε αυτά. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η μπεντονιτική άργιλος Άρμου υπό συνθήκες μερικού κορεσμού. Πρόκειται για επιφανειακή στρώση υλικού προερχόμενου από κατολίσθηση στην περιοχή Άρμου στην Πάφο της Κύπρου. Στο συγκεκριμένο υλικό πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών του (κοκκομετρία, όρια Atterberg, όριο γραμμικής συρρίκνωσης, ανηγμένο ειδικό βάρος στερεής φάσης) και την κατάταξη του κατά USCS. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα, καθώς και δακτυλιοειδούς διάτμησης, για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς του. Με αυτό τον τρόπο εκτιμήθηκε η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές μύζησης και προσδιορίστηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους – νερού. Ακολούθως, με τη χρήση προγράμματος οριακής ισορροπίας (Slide2) πραγματοποιήθηκαν δισδιάστατες παραμετρικές αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας, με σκοπό την παρατήρηση της μεταβολής της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής συναρτήσει της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και της ύπαρξης ρωγμής στο πρηνές της κατολίσθησης σε συνθήκες πλήρους κορεσμού. Τέλος, πραγματοποιήθηκε παραμετρική ανάλυση, σε συνθήκες μερικού κορεσμού, για τη διερεύνηση της επιρροής της μύζησης του εδάφους για Υ.Υ.Ο. βάθους 50m και την εξέλιξη του συντελεστή ασφαλείας με την πίεση διείδυσης αέρα.

ABSTRACT

The engineering behavior of partially saturated soils has been thoroughly investigated over the last years, as the shear strength of such material is affected by the value of the suction imposed on them. In the present thesis, the bentonite clay of Armou was studied under conditions of partial saturation. It is a surface layer of material, derived from a landslide in the region of Armou, in Paphos, Cyprus. Laboratory tests were carried out to determine its physical characteristics (granulometry, Atterberg limits, linear shrinkage limit, specific gravity) and its classification according to the USCS. In addition, laboratory tests (unconfined compression test, splitting tensile strength test, ring shear test) were carried out to determine the mechanical behavior of the material. In this way, the evolution of shear strength in relation to the corresponding suction values was assessed and the soil-water characteristic curves were determined. Also, using a limit equilibrium program (Slide2), two-dimensional parametric stability back analyses were carried out to investigate the variation of the angle of residual shear strength with the change of water table level and the existence of a crack on the landslide slope in full saturation conditions. A final parametric study was carried out, in conditions of partial saturation, to investigate the suction values along a slope for a table water depth of 50m and the effect of the air-entry pressure of the soil on the safety factor.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|----|
| Κεφάλαιο 1 | 1 |
| Εισαγωγή..... | 1 |
| 1.1 Εισαγωγή | 1 |
| 1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας | 2 |
| 1.3 Περιεχόμενο διπλωματικής εργασίας | 3 |
| Κεφάλαιο 2 | 7 |
| Μη κορεσμένα εδάφη..... | 7 |
| 2.1 Εισαγωγή | 7 |
| 2.2 Ορισμός βαθμού κορεσμού..... | 8 |
| 2.3 Μύζηση – Πίεση πόρων..... | 9 |
| 2.3.1 Ορισμός και κατηγορίες μύζησης | 9 |
| 2.3.2 Πίεση πόρων | 10 |
| 2.4 Φύση της μύζησης..... | 12 |
| 2.5 Περιγραφή χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους – νερού | 13 |
| 2.6 Χαρακτηριστικά μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών..... | 17 |
| 2.6.1 Μεταβολές όγκου μη κορεσμένων εδαφών | 17 |
| 2.6.2 Διατμητική αντοχή μη κορεσμένων εδαφικών | 18 |
| 2.6.3 Διαπερατότητα μη κορεσμένων εδαφικών υλικών | 21 |
| 2.7 Επίλογος..... | 22 |
| Κεφάλαιο 3 | 23 |
| Μπεντονιτική Άργιλος Άρμου..... | 23 |
| 3.1 Εισαγωγή στις κατολισθήσεις | 23 |
| 3.1.1 Ορισμός κατολίσθησης..... | 23 |
| 3.1.2 Τα αίτια που προκαλούν μία κατολίσθηση | 23 |
| 3.1.3 Ταξινόμηση κατολισθήσεων | 24 |
| 3.2 Περιγραφή κατολίσθησης Άρμου | 26 |
| 3.3 Κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής..... | 30 |
| 3.4 Επίλογος..... | 32 |
| Κεφάλαιο 4 | 33 |
| Εργαστηριακές δοκιμές στην μπεντονιτική άργιλο Άρμου..... | 33 |
| 4.1 Εισαγωγή | 33 |

| | |
|---|-----|
| 4.2 Δοκιμές προσδιορισμού φυσικών χαρακτηριστικών | 35 |
| 4.2.1 Προσδιορισμός φυσικής υγρασίας εδάφους | 35 |
| 4.2.2 Κοκκομετρική ανάλυση του εδαφικού υλικού..... | 36 |
| 4.2.3 Όρια Atterberg..... | 40 |
| 4.2.4 Δοκιμή Γραμμικής Συρρίκνωσης..... | 48 |
| 4.2.5 Δοκιμή προσδιορισμού ανηγμένου ειδικού βάρους στερεής φάσης G _s | 52 |
| 4.2.6 Κατάταξη υλικού σύμφωνα με την ταξινόμηση εδαφών | 54 |
| 4.2.7 Σύνοψη Φυσικών χαρακτηριστικών δειγμάτων μπεντονιτικής αργίλου Άρμου | 57 |
| 4.3 Δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών | 61 |
| 4.3.1 Μέθοδοι ελέγχου και προσδιορισμού της μύζησης..... | 61 |
| 4.3.2 Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα..... | 69 |
| 4.3.3 Προσδιορισμός φαινόμενου βάρους με παραφίνωση | 89 |
| 4.3.4 Δοκιμή Δακτυλιοειδούς διάτμησης | 92 |
| 4.3.5 Σύνοψη μηχανικών χαρακτηριστικών του μίγματος Δ4-Δ5 της Άρμου | 104 |
| Κεφάλαιο 5 | 107 |
| Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με τη χρήση λογισμικού προγράμματος Slide2..... | 107 |
| 5.1 Εισαγωγή | 107 |
| 5.2 Γεωμετρικό προσομοίωμα..... | 109 |
| 5.3 Αναλύσεις ευστάθειας χωρίς την εισαγωγή αρνητικών πιέσεων πόρων ή μύζησης | 110 |
| 5.3.1 Αναλύσεις διερεύνησης Υδροφόρου ορίζοντα | 111 |
| 5.3.2 Αναλύσεις διερεύνησης ύπαρξης ρωγμής | 121 |
| 5.3.3 Αναλύσεις διερεύνησης πλήρωσης της ρωγμής με νερό | 125 |
| 5.4 Αναλύσεις ευστάθειας με την εισαγωγή αρνητικών πιέσεων πόρων ή μύζησης..... | 129 |
| Κεφάλαιο 6 | 139 |
| Συμπεράσματα..... | 139 |
| 6.1 Εισαγωγή | 139 |
| 6.2 Εργαστηριακή διερεύνηση των μη κορεσμένων εδαφών..... | 140 |

| | |
|---|------------|
| 6.3 Παραμετρική διερεύνηση της επιρροής του πλήρους και μερικού κορεσμού στην ευστάθεια πρανών | 143 |
| 6.4 Σύνοψη..... | 145 |
| Βιβλιογραφία..... | 147 |

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΩΝ

| | |
|--|----|
| Φωτογραφίες 3.2.1 & 3.2.2: Αριστερά - Απόσπασμα δορυφορικής φωτογραφίας από το πρόγραμμα GoogleEarth (ημερομηνία λήψης 2/8/2017). Δεξιά – Φωτογραφία από επιτόπου επίσκεψη στην περιοχή της Άρμου. [Μπαρδάνη (2019, α)]. | 26 |
| Φωτογραφία 3.2.3: Απόσπασμα δορυφορικής φωτογραφίας από το πρόγραμμα GoogleEarth (ημερομηνία λήψης 2/8/2017) σε λοξή όψη από νότια της κατολίσθησης της Άρμου. (Ιωάννου, 2020) | 29 |
| Φωτογραφία 3.2.4: Φωτογραφία της κατολίσθησης της Άρμου ληφθείσα από νοτιοανατολικά. Το μαύρο διακεκομμένο περίγραμμα δείχνει τα όρια της κατολίσθησης, το οριζόντιο κίτρινο, διακεκομμένο παραλληλόγραμμο την περιοχή των κατοικιών περί την οφρύ, και το στραμμένο κίτρινο, διακεκομμένο παραλληλόγραμμο την χαρακτηριστική στραμμένη στρώση που δείχνεται σε μεγέθυνση στην Φωτογραφία 3.2.5 (Bardanis, 2022) | 29 |
| Φωτογραφία 3.2.5: Φωτογραφία της κατολίσθησης της Άρμου ληφθείσα από νότο. Το οριζόντιο κίτρινο, διακεκομμένο παραλληλόγραμμο οριοθετεί την περιοχή των κατοικιών περί την οφρύ, και το στραμμένο κίτρινο, διακεκομμένο παραλληλόγραμμο την χαρακτηριστική στραμμένη στρώση που δείχνεται από μακριά και στην Φωτογραφία 3.2.4 (Bardanis, 2022) | 30 |
| Φωτογραφία 4.1.1: Απόσπασμα της δορυφορικής φωτογραφίας από το πρόγραμμα GoogleEarth που δείχνεται με τις θέσεις λήψης των δειγμάτων μαζί με το περίγραμμα της κατολίσθησης (από Ιωάννου 2020, με προσθήκη νέων σημείων δειγματοληψίας). | 34 |
| Φωτογραφία 4.2.2.1.1: Συρμάτινα κόσκινα κατά ASTM (Μπαρδάνης 2021) | 38 |
| Φωτογραφία 4.2.2.2.1: Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρα (Κοκκοβιάδης, 2022) | 40 |
| Φωτογραφία 4.2.3.1.1: Συσκευή Casagrande (Μπαρδάνης, 2019) | 42 |
| Φωτογραφία 4.2.3.1.2: Αριστερά-Ομοιόμορφη τοποθέτηση του υλικού στην κάψα, Μέση-Διέλευση ειδικού χαρακτήρα από την εδαφική μάζα, Δεξιά-Κλείσιμο χαραγής 12,5mm (Μπαρδάνης, 2019). | 43 |
| Φωτογραφία 4.2.3.2.1: Μορφοποιημένο, ελαφρώς ρωγματωμένο υλικό διαμέτρου 3mm (Μπαρδάνης, 2019). | 47 |
| Φωτογραφία 4.2.4.1: Μεταλλικές φόρμες γραμμικής συρρίκνωσης | 48 |
| Φωτογραφία 4.2.4.2: Τοποθέτηση του υγρού μίγματος στις φόρμες γραμμικής συρρίκνωσης | 49 |
| Φωτογραφία 4.2.4.3: Μπεντονιτική άργιλος Άρμου μετά από 24 ώρες ξήρανσης στην ατμόσφαιρα | 50 |

| | |
|---|----|
| Φωτογραφία 4.2.4.4: Μπεντονιτική άργιλος Άρμου μετά από 24 ώρες ξήρανσης σε φούρνο 60ο C..... | 50 |
| Φωτογραφία 4.2.4.5: Μπεντονιτική άργιλος Άρμου με 24 ώρες ξήρανσης σε φούρνο θερμοκρασίας 110ο C..... | 50 |
| Φωτογραφία 4.2.4.6: Καμπύλωση των δοκιμίων της Άρμου μετά την ξήρανση στους 110ο C..... | 51 |
| Φωτογραφία 4.2.4.7: Καμπύλωση δοκιμίου Άρμου μετά την ξήρανση στους 110ο C..... | 51 |
| Φωτογραφία 4.2.5.1: Θάλαμος απαέρωσης συνδεδεμένη με αντλία κενού για τον υπολογισμό του Gs | 53 |
| Φωτογραφία 4.2.5.2: Διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής Gs για τα δείγματα Δ7, Δ8κ, Δ8π (φιάλες εντός θαλάμου απαέρωσης)..... | 54 |
| Φωτογραφίες 4.3.1.1.1 & 4.3.1.1.2: Αριστερά-Θάλαμος μύζησης εργαστηρίου ΕΔΑΦΟΣ, Δεξιά-Σχέδιο λειτουργίας θαλάμου μύζησης, Αρχή της μεθόδου μετατόπισης άξονα για τη μέτρηση της μύζησης (Μπαρδάνης, 2016) | 63 |
| Φωτογραφίες 4.3.1.1.3 & 4.3.1.1.4: Διάταξη δοκιμίων μπεντονιτικής αργίλου Άρμου στον θάλαμο μύζησης πριν και μετά την εισροή αέρα υπό πίεση..... | 65 |
| Φωτογραφίες 4.3.1.2.2 & 4.3.1.2.3: Το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Decagon Devices, Inc. -νυν METER Environmental (Μπαρδάνης, 2016)..... | 67 |
| Φωτογραφίες 4.3.1.3.1-4: Σταδιακή μείωση του ποσοστού υγρασίας της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου κατά την ξήρανση των δειγμάτων στην ατμόσφαιρα..... | 69 |
| Φωτογραφία 4.3.2.1: Συσκευή ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα | 70 |
| Φωτογραφίες 4.3.2.2 & 4.3.2.3: Αριστερά-Δοκίμιο στο οποίο εκτελείται δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, Δεξιά-Δοκίμιο στο οποίο εκτελείται δοκιμή θλίψης κατά γενέτειρα..... | 71 |
| Φωτογραφία 4.3.4.1: Συσκευή δακτυλοειδούς διάτμησης εργαστηρίου ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε..... | 94 |
| Φωτογραφία 4.3.4.2: Συσκευή δακτυλοειδούς διάτμησης εργαστηρίου ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε..... | 94 |
| Φωτογραφίες 4.3.4.3 & 4.3.4.4: Αριστερά-Τοποθέτηση του δακτυλοειδούς δοκιμίου στη συσκευή, Δεξιά- Η κυψέλη με το δοκίμιο μπεντονιτικής αργίλου Άρμου συναρμολογημένη..... | 95 |

Φωτογραφία 4.3.4.5 & 4.3.4.6: Αριστερά-Πλήρωση της κυψέλης με απιονισμένο νερό κατά τη διαδικασία της συμπίεσης, Δεξιά-Διαδικασία φόρτισης της μπεντονιτικής αργίλου στα 150 kPa 95

Φωτογραφία 4.3.4.7 & 4.3.4.8: Δείγμα μπεντονιτικής αργίλου Άρμου μετά το πέρας της δοκιμής δακτυλιοειδούς διάτμησης 99

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.2.1: Ιδεατή απεικόνιση α) μη κορεσμένου και β) μερικώς κορεσμένου εδάφους (Μπαρδάνης, 2016).....9

Σχήμα 2.3.2.1: 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) 11

Σχήμα 2.5.1: 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) πλήρης κορεσμός (Περιοχή I), (β) μερικός κορεσμός με την αέρια φάση σε μορφή φυσαλίδων (οριακή περιοχή μεταξύ Περιοχής I και II), (γ) μερικός κορεσμός με την υγρή και την αέρια φάση να είναι ταυτόχρονα συνεχείς (Περιοχή II) και (δ) μερικός κορεσμός με την υγρή φάση να μην είναι πια συνεχής (Περιοχή III) (Μπαρδάνης, 2016)..... 14

Σχήμα 2.6.2.1.1: Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών με βάση το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Μπαρδάνης, 2016). 19

Σχήμα 2.6.2.2.1: Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών με βάση το γενικευμένο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. (Μπαρδάνης, 2016). 20

Σχήμα 3.1.3.1: Σύστημα ταξινόμησης κατολισθήσεων κατά Varnes.....25

Σχήμα 3.2.1: Σκαρίφημα συνδυασμού περιστροφικών κατολισθήσεων επιμέρους τμημάτων σε μία ενιαία κατολισθαίνουσα μάζα κυρίως μεταθετικής μορφής28

Σχήμα 3.3.1: Εξέλιξη της ετήσιας βροχόπτωσης κατ' απόλυτη τιμή (Ιωάννου 2020)31

Σχήμα 4.2.3.2.1: Αποτελέσματα μίγματος Δ4-Δ5 για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας..... 44

Σχήμα 4.2.3.2.2: Αποτελέσματα δείγματος Δ7 για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας..... 44

Σχήμα 4.2.3.2.3: Αποτελέσματα δείγματος Δ8κ για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας..... 45

| | |
|--|----|
| Σχήμα 4.2.3.2.4: Αποτελέσματα δείγματος Δ8μ για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας..... | 45 |
| Σχήμα 4.2.3.2.5: Αποτελέσματα δείγματος Δ8π για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας..... | 46 |
| Σχήμα 4.2.7.1: Έντυπο αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων μπεντονιτικής αργίλου Άρμου Δ1, Δ2 και Δ3.. | 58 |
| Σχήμα 4.2.7.2: Έντυπο αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων μπεντονιτικής αργίλου Άρμου Δ4, Δ5 και Δ6.. | 59 |
| Σχήμα 4.2.7.3: Έντυπο αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων μπεντονιτικής αργίλου Άρμου Δ7, Δ8κ, Δ8μ και Δ8π | 60 |
| Σχήμα 4.3.1.2.1: Απεικόνιση της αρχής μέτρησης της μύζησης με υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου όπως παρουσιάζεται από τους Gee et al. (1992) (Μπαρδάνης, 2016) | 66 |
| Σχήμα 4.3.2.1: Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για όλες τις τιμές μύζησης της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου από τη δοκιμή της ανεμπόδιστης θλίψης..... | 73 |
| Σχήμα 4.3.2.2: Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης από τη δοκιμή της ανεμπόδιστης θλίψης, για τα δείγματα μπεντονιτικής αργίλου Άρμου με τιμές μύζησης που επιβλήθηκαν στον θάλαμο μύζησης | 74 |
| Σχήμα 4.3.2.3: Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου με κανονικοποιημένο τον άξονα της αξονικής τάσης ως προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη..... | 75 |
| Σχήμα 4.3.2.4: Εξέλιξης της αντοχής ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα για όλες τις τιμές μύζησης στην μπεντονιτική άργιλο Άρμου | 76 |
| Σχήμα 4.3.2.5: Εξέλιξης της αντοχής ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα για μικρές τιμές μύζησης στην μπεντονιτική άργιλο Άρμου, εως 14,000kPa | 76 |
| Σχήμα 4.3.2.6: Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb – Χαρακτηριστικοί κύκλοι Mohr (Μπαρδάνης, 2016)..... | 78 |
| Σχήμα 4.3.2.7: Κύκλοι Mohr για τιμή μύζησης $s = 400\text{kPa}$ (Θάλαμος μύζησης).... | 79 |
| Σχήμα 4.3.2.8: Κύκλοι Mohr για τιμή μύζησης $s = 600\text{kPa}$ (Θάλαμος μύζησης).... | 80 |
| Σχήμα 4.3.2.9: Κύκλοι Mohr για τιμή μύζησης $s = 800\text{kPa}$ (Θάλαμος μύζησης).... | 80 |
| Σχήμα 4.3.2.10: Κύκλοι Mohr για τιμή μύζησης $s = 1100\text{kPa}$ (Θάλαμος μύζησης) | 80 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 4.3.2.11: Κύκλοι Mohr για τιμή μύζησης $s = 1500\text{kPa}$ (θάλαμος μύζησης) | 81 |
| Σχήμα 4.3.2.12: Κύκλοι Mohr για τιμή μύζησης $s = 1500\text{kPa}$ στον θάλαμο μύζησης και ξήρανση στην ατμόσφαιρα στη συνέχεια..... | 81 |
| Σχήμα 4.3.2.13: Κύκλοι Mohr για ολική ξήρανση στην ατμόσφαιρα σε κέρινη επιφάνεια..... | 81 |
| Σχήμα 4.3.2.14: Κύκλοι Mohr για ολική ξήρανση στην ατμόσφαιρα σε μεταλλική επιφάνεια..... | 82 |
| Σχήμα 4.3.2.15: Κύκλοι Mohr – ξήρανση υλικού στην ατμόσφαιρα με 30% υγρασία | 82 |
| Σχήμα 4.3.2.16: Κύκλοι Mohr– ξήρανση υλικού στην ατμόσφαιρα με 20% υγρασία | 82 |
| Σχήμα 4.3.2.17: Εξέλιξη της συνοχής με τη μύζηση για την μπεντονιτική άργιλο Άρμου (Άξονας συνοχής σε γραμμική κλίμακα και άξονας μύζησης σε λογαριθμική κλίμακα) | 85 |
| Σχήμα 4.3.2.18: Εξέλιξη της συνοχής με τη μύζηση για την μπεντονιτική άργιλο Άρμου (Άξονας συνοχής και μύζησης σε γραμμική κλίμακα)..... | 85 |
| Σχήμα 4.3.2.19: Εξέλιξη της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση για την μπεντονιτική άργιλο Άρμου (Άξονας συνοχής και μύζησης σε γραμμική κλίμακα) | 86 |
| Σχήμα 4.3.2.20: Εξέλιξη της γωνίας μεταβολής της αντοχής με τη μύζηση ϕ_b με τη γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' του αντίστοιχου πλήρως κορεσμένου εδαφικού υλικού (Κοκκοβιάδης, 2022 και συμπλήρωση αυτού με στοιχεία της παρούσας διπλωματικής)..... | 87 |
| Σχήμα 4.3.2.21: Εξέλιξη της γωνίας μεταβολής της αντοχής με τη μύζηση ϕ_b με τη γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' του αντίστοιχου πλήρως κορεσμένου εδαφικού υλικού εξαιρουμένων των κοκκωδών υλικών και με κανονικοποιημένο τον κατακόρυφο άξονα..... | 88 |
| Σχήμα 4.3.3.1: Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους – νερού της αναζυμωμένης μπεντονιτικής αργίλου Άρμου | 90 |
| Σχήμα 4.3.4.1: Περιβάλλουσα παραμένουσας διατμητικής αντοχής και εξέλιξης της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής με την κατακόρυφη τάση σε πλήρως κορεσμένη μπεντονιτική άργιλο..... | 97 |
| Σχήμα 4.3.4.2: Περιβάλλουσα παραμένουσας διατμητικής αντοχής σε πλήρως κορεσμένη μπεντονιτική άργιλο (πλήρεις κύκλοι) και σε μη κορεσμένη μπεντονιτική άργιλο (άδειοι κύκλοι) | 98 |
| Σχήμα 4.3.4.3: Καμπύλη διατμητικής τάσης-Οριζόντιας παραμόρφωσης για αποφόρτιση της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου στα 300 kPa | 99 |

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 4.3.4.4: Καμπύλη διατμητικής τάσης-Οριζόντιας παραμόρφωσης για αποφόρτιση της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου στα 200 kPa | 101 |
| Σχήμα 4.3.4.5: Καμπύλη διατμητικής τάσης-Οριζόντιας παραμόρφωσης για αποφόρτιση της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου στα 100 kPa | 101 |
| Σχήμα 4.3.4.6: Καμπύλες διατμητικής τάσης-οριζόντιας παραμόρφωσης για τις 3 κατακόρυφες τάσεις με τα χαρακτηριστικά σημεία ξήρανσης και υδρεμποτισμού. | 102 |
| Σχήμα 4.3.4.7: Καμπύλες διατμητικής τάσης-οριζόντιας παραμόρφωσης για τις 3 κατακόρυφες τάσεις με τα χαρακτηριστικά σημεία ξήρανσης και υδρεμποτισμού, προσαρμοσμένες ώστε να συμπίπτει το στάδιο του αποκορεσμού. | 103 |
| Σχήμα 5.2.1: Κεντροβαρική διατομή του πρανούς της Άρμου στο πρόγραμμα Slide2..... | 110 |
| Σχήμα 5.3.1.1: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς στην περίπτωση που ο υδροφόρος ορίζοντας συμπίπτει με την επιφάνεια του εδάφους | 113 |
| Σχήμα 5.3.1.2: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 2.5m | 113 |
| Σχήμα 5.3.1.3: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 5m | 113 |
| Σχήμα 5.3.1.4: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 7.5m | 114 |
| Σχήμα 5.3.1.5: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 10m | 114 |
| Σχήμα 5.3.1.6: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 15m | 114 |
| Σχήμα 5.3.1.7: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 20m | 115 |
| Σχήμα 5.3.1.8: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 25m | 115 |
| Σχήμα 5.3.1.9: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 30m | 115 |
| Σχήμα 5.3.1.10: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 40m | 116 |
| Σχήμα 5.3.1.11: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 50m | 116 |
| Σχήμα 5.3.1.12: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 60m | 116 |

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 5.3.1.13: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 75m | 117 |
| Σχήμα 5.3.1.14: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 100m..... | 117 |
| Σχήμα 5.3.1.15: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 150m..... | 117 |
| Σχήμα 5.3.1.16: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 200m..... | 118 |
| Σχήμα 5.3.1.17: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς χωρίς την ύπαρξη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα..... | 118 |
| Σχήμα 5.3.1.18: Επιρροή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ'ρες σε σχέση με το βάθος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα | 119 |
| Σχήμα 5.3.1.19: Επιρροή του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης σε σχέση με το βάθος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα..... | 119 |
| Σχήμα 5.3.2.1: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγμή βάθους 1m, πληρωμένη με νερό..... | 122 |
| Σχήμα 5.3.2.2: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγμή βάθους 2m, πληρωμένη με νερό..... | 122 |
| Σχήμα 5.3.2.3: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγμή βάθους 3m, πληρωμένη με νερό..... | 122 |
| Σχήμα 5.3.2.4: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγμή βάθους 4m, πληρωμένη με νερό..... | 123 |
| Σχήμα 5.3.2.5: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγμή βάθους 5m, πληρωμένη με νερό..... | 123 |
| Σχήμα 5.3.2.6: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγμή βάθους 6m, πληρωμένη με νερό..... | 123 |
| Σχήμα 5.3.2.7: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγμή βάθους 7m, πληρωμένη με νερό..... | 124 |
| Σχήμα 5.2.2.8: Επιρροή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ'ρες σε σχέση με το βάθος ρωγμής..... | 124 |
| Σχήμα 5.3.2.9: Επιρροή του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης σε σχέση με το βάθος ρωγμής..... | 125 |
| Σχήμα 5.3.3.1: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος νερού 0m εντός ρωγμής 7m (πλήρως ξηρή ρωγμή)..... | 127 |

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 5.3.3.2: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος νερού 2m εντός ρωγμής 7m..... | 127 |
| Σχήμα 5.3.3.3: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος νερού 4m εντός ρωγμής 7m..... | 127 |
| Σχήμα 5.3.3.4: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος νερού 5.5m εντός ρωγμής 7m..... | 128 |
| Σχήμα 5.3.3.5: Επιρροή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής ϕ' res με το βάθος του νερού που παρατηρείται εντός της ρωγμής 7m | 128 |
| Σχήμα 5.3.3.6: Επιρροή του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης με το βάθος του νερού που παρατηρείται εντός της ρωγμής 7m | 129 |
| Σχήμα 5.4.1: Συνθήκες (steady state) μόνιμης ροής (αλλαγή κλίσης στην τιμή πίεσης διείδυσης αέρα) (Κοκκοβιάδης, 2022) | 130 |
| Σχήμα 5.4.2: Ανάλυση ευστάθειας για γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'=20.3\text{o}$, μηδενική συνοχή και ρωγμή στο φρύδι της κατολίσθησης βάθους 4m πληρωμένη με νερό..... | 131 |
| Σχήμα 5.4.3: Ανάλυση ευστάθειας για γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'=20.3\text{o}$, συνοχή $c = 5\text{kPa}$ και ρωγμή στο φρύδι της κατολίσθησης βάθους 4m πληρωμένη με νερό..... | 132 |
| Σχήμα 5.4.4: Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού υλικού με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'=20.3\text{o}$, συνοχή $c = 5\text{kPa}$, $\phi_b = 7.4\text{o}$ και Πίεση Διείδυσης Αέρα 10,000 kPa . | 133 |
| Σχήμα 5.4.5: Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού υλικού με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'=20.3\text{o}$, συνοχή $c = 5\text{kPa}$, $\phi_b = 7.4\text{o}$ και μηδενική Πίεση Διείδυσης Αέρα | 134 |
| Σχήμα 5.4.6: Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού υλικού με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'=20.3\text{o}$, συνοχή $c = 5\text{kPa}$, $\phi_b = 7.4\text{o}$ και Πίεση Διείδυσης Αέρα 100 kPa | 135 |
| Σχήμα 5.4.7: Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού υλικού με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'=20.3\text{o}$, συνοχή $c = 5\text{kPa}$, $\phi_b = 7.4\text{o}$ και Πίεση Διείδυσης Αέρα 200 kPa | 135 |
| Σχήμα 5.4.8: Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού υλικού με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'=20.3\text{o}$, συνοχή $c = 5\text{kPa}$, $\phi_b = 7.4\text{o}$ και Πίεση Διείδυσης Αέρα 300 kPa | 136 |
| Σχήμα 5.4.9: Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού υλικού με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi'=20.3\text{o}$, συνοχή $c = 5\text{kPa}$, $\phi_b = 7.4\text{o}$ και Πίεση Διείδυσης Αέρα 450 kPa | 136 |
| Σχήμα 5.4.10: Διάγραμμα εξέλιξης του συντελεστή ασφαλείας με την Πίεση διείδυσης αέρα..... | 137 |

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 4.2.2.1.1: Πρότυπα μεγέθη πλήρους σειράς κοσκίνων κατά A.S.T.M..... | 38 |
| Πίνακας 4.2.2.1.2: Κοκκομετρική διαβάθμιση υλικών από αριστερά προς δεξιά Δ7 - Δ8κ - Δ8μ - Δ8π | 38 |
| Πίνακας 4.2.4.1: Πίνακας αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό της γραμμικής συρρίκνωσης της Άρμου | 49 |
| Πίνακας 4.2.6.1: Πίνακας ταξινόμησης εδαφικών υλικών κατά USCS (Μπαρδάνης, 2019) | 55 |
| Πίνακας 4.3.1.1: Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης (Μπαρδάνης, 2016) | 62 |
| Πίνακας 4.3.2.1: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου | 72 |
| Πίνακας 4.3.2.2: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, θλίψης κατά γενέτειρα και των χαρακτηριστικών κύκλων Mohr της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου | 84 |
| Πίνακας 4.3.4.1: Πίνακας αποτελεσμάτων κατά το στάδιο της φόρτισης της μπεντονιτικής αργίλου στη δακτυλιοειδή διάτμηση..... | 96 |
| Πίνακας 5.3.1.1: Συγκεντρωτικός πίνακας που παραθέτει τις τιμές των γωνιών παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ'ges κατά Janbu και Bishop καθώς και τα μέγιστα βάθη που αποκτά η επιφάνεια ολίσθησης για τα διάφορα βάθη του υδροφόρου ορίζοντα..... | 112 |
| Πίνακας 5.3.2.1: Συγκεντρωτικός πίνακας που παραθέτει τις τιμές των γωνιών παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ'ges κατά Janbu καθώς και τα μέγιστα βάθη που αποκτά η επιφάνεια ολίσθησης για κάθε βάθος ρωγμής..... | 121 |
| Πίνακας 5.3.3.1: Συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές των γωνιών παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ'ges και τα μέγιστα βάθη της επιφάνειας ολίσθησης για τα διάφορα βάθη νερού εντός ρωγμής 7m..... | 126 |
| Πίνακας 5.4.1: Πίνακας τιμών Πίεσης Διείσδυσης Αέρα σε kPa και τιμών συντελεστών ασφαλείας..... | 136 |

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Ένα από τα κύρια προβλήματα που απασχολεί τους γεωτεχνικούς μηχανικούς είναι η ευστάθεια πρανών, καθώς η αστοχία πρανών επιφέρει οικονομικής και κοινωνικής φύσης προβλήματα στον άνθρωπο. Βασικός παράγοντας που καθορίζει την ευστάθεια ενός πρανού αποτελεί η σχέση δυνάμεων βαρύτητας και διατμητικής αντοχής, ενώ υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες 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 επαρχία της Πάφου, στην Κύπρο, η ανέγερση κατοικιών και συγκροτημάτων σε περιοχές με γεωτεχνικά προβλήματα όπως διογκούμενες άργιλοι μεγάλης πλαστικότητας, χαλαρά ή ασυμπιεστα εδάφη ενεργοποιούν παλιές και αδρανείς κατολισθήσεις, τις λεγόμενες παλαιοκατολισθήσεις, που έχουν σαν αποτέλεσμα την επανενεργοποίησή τους με εμφάνιση νέων μετακινήσεων που προκαλούν αστοχία στις κατασκευές.

Μια τέτοιου είδους κατολίσθηση εντοπίστηκε στην περιοχή της κοινότητας Άρμου στην Επαρχία Πάφου. Είναι σχετικά μεγάλου μεγέθους παρά το ήπιο ανάγλυφο. Η έκταση που καταλαμβάνει είναι περί τα 300m μήκος και 185m πλάτος. Σύμφωνα με δημοσιεύματα η κατολίσθηση ενεργοποιήθηκε μετά από μια περίοδο έντονων βροχοπτώσεων, προκαλώντας εκτεταμένες ζημιές στις κατοικίες που βρίσκονται στο περίγραμμα της κατολίσθησης. Με τις πρώτες μεγάλες μετακινήσεις εδάφους που παρατηρήθηκαν οι ιδιοκτήτες αναγκάστηκαν να εγκαταλείψουν τις κατοικίες τους καθώς αποτελούσαν πολύ μεγάλο κίνδυνο.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια προσπάθεια διερεύνησης της φυσικής και μηχανικής συμπεριφοράς του εδαφικού σχηματισμού της κατολίσθησης της Άρμου. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επιρροή του μερικού κορεσμού στην μπεντονιτική άργιλο Άρμου, καθώς επίσης

διερευνήθηκε η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής του υλικού σε σχέση με τις διάφορες τιμές μύζησης. Επιπλέον, μέσω αντίστροφων αναλύσεων ευστάθειας με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας, υπολογίστηκε η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής του εδαφικού σχήματος, η οποία αποτελεί τη βάση για επίλυση προβλημάτων που έχουν σχέση με την ευστάθεια πρανών. Ευθείες αναλύσεις δε επέδειξαν τη σχετική επιρροή του βαθμού κορεσμού στον συντελεστή ασφαλείας.

Τα μη κορεσμένα εδαφικά υλικά, δηλαδή τα υλικά εκείνα των οποίων ο βαθμός κορεσμού είναι μεταξύ 0 και 100% επιδεικνύουν μεγαλύτερη διατμητική αντοχή σε σχέση με τα πλήρως κορεσμένα εδαφικά υλικά.

Η παρουσία των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών αποτελεί ένα σχετικά νέο επιμέρους αντικείμενο της εδαφομηχανικής και γίνεται ολοένα και πιο έντονο όχι μόνο στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης αλλά και σε στρώματα σημαντικού βάθους. Η εμφάνιση τέτοιων υλικών έχει απασχολήσει τους γεωτεχνικούς μηχανικούς και οφείλεται στην κλιματική αλλαγή και στις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής. Ειδικότερα τα μη κορεσμένα υλικά εμφανίζονται στη φύση ως αποτέλεσμα απότομης εναλλαγής θερμών και ξηρών κλιματολογικών συνθηκών που δρουν στην επιφάνεια του εδάφους αλλά μπορεί να κορεστούν πλήρως, παραδείγματος χάριν σε συνθήκες έντονων βροχοπτώσεων. Βασική ιδιομορφία των μη κορεσμένων υλικών, πέραν της πολυπλοκότητας της φύσης τους, αποτελεί η μηχανική τους συμπεριφορά, η οποία επηρεάζεται από τον τύπο, τη φύση του εδάφους και τις κλιματολογικές συνθήκες.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση της επίδρασης του βαθμού κορεσμού στη διατμητική αντοχή της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου. Πρωτίστως θεωρήθηκε απαραίτητο να κατανοηθεί η φύση των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών και η μηχανική τους συμπεριφορά, όπως αποτυπώνεται στη διεθνή βιβλιογραφία. Σε συνέχεια αυτού, έγινε αναφορά στο προς εξέταση υλικό, την μπεντονιτική άργιλο Άρμου και περιεγράφηκε η

κατολίσθηση που ενεργοποιήθηκε στην περιοχή της Άρμου, ως προς το είδος της και τα πιθανά αίτια πρόκλησής της. Ύστερα πραγματοποιήθηκε μία εκτενής πειραματική διερεύνηση στην μπεντονιτική άργιλο Άρμου με τη χρήση του εργαστηριακού εξοπλισμού της εταιρίας ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. για τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών της αργίλου σε συνθήκες μερικού κορεσμού. Τέλος, για την κατανόηση των αναλύσεων ευστάθειας με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές διερευνήσεις στην κεντροβαρική διατομή του πρανούς της Άρμου σύμφωνα με τη μέθοδο των λωρίδων, σε πλήρως κορεσμένο έδαφος, για την διερεύνηση επιρροής της μηχανικής συμπεριφοράς του εδαφικού υλικού ως προς τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα και ύπαρξη ρωγμής. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών και υπολογιστικών διερευνήσεων που πραγματοποιήθηκαν παρατίθενται στα επόμενα κεφάλαια.

1.3 Περιεχόμενο διπλωματικής εργασίας

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα περιεχόμενα της διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο. Συνολικά η εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια (συμπεριλαμβανομένου και του 1^{ου} κεφαλαίου).

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται και αναλύεται η φύση και η συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Συγκεκριμένα, επεξηγούνται έννοιες όπως ο βαθμός κορεσμού, η εμφάνιση της μύζησης και επομένως η συνύπαρξη της αέριας με την υγρή φάση μεταξύ των πόρων του υλικού καθώς και η ύπαρξη πιέσεων πόρων. Επίσης περιγράφεται η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού, η οποία θεωρείται άκρως σημαντική για την κατανόηση και τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών με μερικό κορεσμό. Τέλος, στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά που αποτελούν τη μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων εδαφών (μεταβολές όγκου, η διατμητική αντοχή και η διαπερατότητα τους ως προς το νερό και τον αέρα) και η επιρροή που έχει ο βαθμός κορεσμού και η μύζηση στην εξέλιξή τους.

Στο Κεφάλαιο 3, αρχικά γίνεται μια γενική αναφορά στις κατολισθήσεις, δηλαδή παρατίθενται ο ορισμός, τα αίτια δημιουργίας κατολισθήσεων και η ταξινόμησή

τους με βάση τα χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια περιγράφεται η περιοχή της κατολίσθησης Άρμου και τα πιθανά αίτια της κατολίσθησης, ενώ παράλληλα παρουσιάζονται τα κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας στην μπεντονιτική άργιλο Άρμου και παρατίθενται τα αποτελέσματά τους. Ειδικότερα, παρουσιάζονται οι δοκιμές που εκτελέστηκαν στην μπεντονιτική άργιλο για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών του υλικού με στόχο την κατηγοριοποίησή του βάσει της πλήρους κατάταξής του, όπως επίσης και οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού. Για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου εκτελέστηκαν οι δοκιμές της κοκκομέτρησης με κόσκινα και με αραιόμετρο, προσδιορισμού των ορίων Atterberg, δοκιμή γραμμική συρρίκνωσης, υπολογισμός ειδικού βάρους στερεής φάσης G_s και εν τέλει πραγματοποιήθηκε η κατάταξη του υλικού σύμφωνα με την ταξινόμηση εδαφών κατά USCS σε συνδυασμό με τη μέθοδο Casagrande. Για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών, με τη χρήση του θαλάμου μύζησης σε δείγματα με διαφορετικές τιμές μύζησης, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα, ο προσδιορισμός του φαινόμενου βάρους με τη μέθοδο παραφίνωσης του δείγματος και ο προσδιορισμός της ολικής μύζησης του υλικού με τη χρήση του υγρόμετρου ψυχρού κατόπτρου. Επίσης, για τον προσδιορισμό της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής σε μπεντονιτική άργιλο πραγματοποιήθηκε η δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών σχεδιάστηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους – νερού και παράλληλα διερευνήθηκε η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής και της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής με την αύξηση της μύζησης.

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται οι αναλύσεις ευστάθειας της κατολίσθησης της Άρμου που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος Slide2, έκδοσης 9.013, της εταιρίας Rocscience, το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατόπιν αδειάς από τη σχολή των Μεταλλειολόγων. Όλες οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι αντίστροφες αναλύσεις (Back analyses) κατά τις οποίες αξιοποιήθηκαν τα

αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου. Το γεωμετρικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις ευστάθειας παρατίθεται στο παρόν κεφάλαιο και πραγματοποιήθηκε κατά την περάτωση της πτυχιακής εργασίας της Ιωάννου Ευαγγελίας (2020). Αναφορικά με τις αναλύσεις, αρχικά παρουσιάζονται οι αναλύσεις ευστάθειας πρηνούς κατά τις οποίες δεν παρατηρούνται αρνητικές πιέσεις πόρων ή μύζηση. Η σχετική παραμετρική διερεύνηση περιλαμβάνει την εξέλιξη της γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ_{res} και του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης της κατολισθαίνουσας μάζας σε σχέση με το βάθος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, την ύπαρξη ρωγμής σε πλήρως κορεσμένο έδαφος και την ύπαρξη νερού εντός της ρωγμής βάθους 7m. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αναλύσεις ευστάθειας κατά τις οποίες ελήφθησαν αρνητικές πιέσεις πόρων και τιμές μύζησης, δηλαδή αναλύσεις των οποίων το εδαφικό υλικό βρίσκεται σε συνθήκες μερικού κορεσμού. κατά την παραμετρική ανάλυση στόχος είναι η διερεύνηση της επιρροής της μύζησης και της πίεσης διείσδυσης αέρα του υλικού επί του συντελεστή ασφαλείας.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία σε ό,τι αφορά τη μύζηση της μη κορεσμένης μπεντονιτικής αργίλου Άρμου και στην επιρροή που έχει στη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής όπως επίσης και στο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης.

Κεφάλαιο 2

Μη κορεσμένα εδάφη

2.1 Εισαγωγή

Μη κορεσμένο καλείται το έδαφος του οποίου ο βαθμός κορεσμού, δηλαδή ο λόγος του όγκου των κενών των πόρων του που πληρούνται με νερό προς τον συνολικό όγκο των κενών του, λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, ή σε ποσοστιαία κλίμακα από 0% έως 100%. Πλήρως κορεσμένα θεωρούνται τα υλικά με βαθμό κορεσμού 100%, ενώ απολύτως ξηρά υλικά, υλικά με βαθμό κορεσμού 0%.

Ο κλάδος της εδαφομηχανικής είναι ένας κλάδος ο οποίος αναπτύχθηκε κατά κύριο λόγο στη Βόρεια Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική. Αναπτύχθηκε σε χώρες που διαθέτουν ψυχρό και υγρό κλίμα με αποτέλεσμα ο μερικός κορεσμός να είναι πρακτικά ανύπαρκτος και τα γεωτεχνικά έργα να κατασκευάζονται εντός εδαφών πλήρως κορεσμένα. Ωστόσο σε χώρες όπου το κλίμα είναι ξηρό και θερμό (π.χ. Ελλάδα, Κύπρος), η παραδοχή των εδαφών ως πλήρως κορεσμένα δεν οδηγεί στην ορθή μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς αλλά αντιθέτως δημιουργεί οικονομικές επιπτώσεις και υπό περιπτώσεις προβλήματα σχετικά με την ασφάλεια.

Στην Ελλάδα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους το κλίμα είναι τέτοιο που διαμορφώνει εδάφη με κατά κύριο λόγο μερικό κορεσμό στις επιφανειακές του στρώσεις. Γενικότερα, λόγω των κλιματολογικών συνθηκών αλλά και της κλιματικής αλλαγής στον πλανήτη, η παρουσία μη κορεσμένων εδαφών γίνεται όλο και πιο έντονη όχι μόνο στα επιφανειακά στρώματα του φλοιού της γης αλλά και σε στρώσεις σημαντικού βάθους. Επομένως, η ανάγκη μελέτης της φύσης και της μηχανικής τους συμπεριφοράς την καθιστά απαραίτητη για την βέλτιστη σχεδιαστική λύση στα γεωτεχνικά έργα από πλευράς οικονομίας αλλά και χρόνου.

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η θεώρηση των μη κορεσμένων εδαφών ως πλήρως κορεσμένα, σε μία ευθεία ανάλυση λειτουργεί υπέρ της ασφάλειας, ωστόσο σε αντίστροφες αναλύσεις (Back analysis) παρατηρείται

υποδιαστασιολόγηση του έργου αν αγνοηθεί η επιρροή του βαθμού κορεσμού στην αντοχή και υπό προϋποθέσεις εγκυμονεί κινδύνους και προβλήματα.

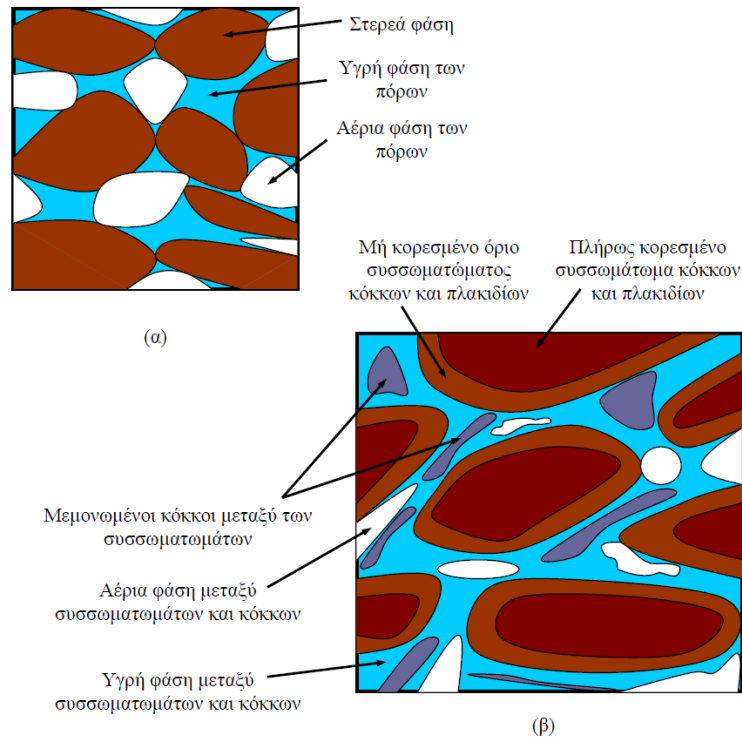
2.2 Ορισμός βαθμού κορεσμού

Ο βαθμός κορεσμού (Degree of Saturation) συμβολίζεται με S_r και ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών του εδαφικού υλικού τα οποία πληρούνται με νερό (V_w) προς τον συνολικό όγκο των κενών του (V_k). Πιο συγκεκριμένα ισχύει:

$$S_r = \frac{V_w}{V_k}$$

Οι τιμές που λαμβάνει ο βαθμός κορεσμού κυμαίνονται μεταξύ του μηδενός και της μονάδας ή αντίστοιχα στην ποσοστιαία κλίμακα 0 και 100%. Τα εδαφικά υλικά που έχουν βαθμό κορεσμού ίσο με τη μονάδα (100%) χαρακτηρίζονται ως πλήρως κορεσμένα καθώς σημαίνει ότι τα κενά του εδαφικού υλικού είναι πληρωμένα με νερό. Αντίστοιχα, υλικά των οποίων ο βαθμός κορεσμού είναι μηδέν (0%) χαρακτηρίζονται ως πλήρως ξηρά υλικά καθώς συνεπάγεται ότι τα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των κόκκων είναι πληρωμένα από αέρα.

Σε ό,τι αφορά τα εδαφικά υλικά των οποίων ο βαθμός κορεσμού είναι μικρότερος από 100% και μεγαλύτερος από 0%, δηλαδή συνυπάρχει το νερό με τον αέρα, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τα μη κορεσμένα και τα μερικώς κορεσμένα. Τα μη κορεσμένα ή ακόρεστα εδάφη (unsaturated) είναι ομοιογενή ως προς τον βαθμό κορεσμού τους, δηλαδή το εδαφικό υλικό διαθέτει έναν κοινό βαθμό κορεσμού σε όλη του την έκταση. Αντίθετα, τα μερικώς κορεσμένα (partly saturated) εδάφη χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια ως προς τον βαθμό κορεσμού τους, το οποίο σημαίνει ότι ο βαθμός κορεσμού μεταβάλλεται κατά τόπους και επομένως υπάρχουν σημεία που το έδαφος μπορεί να είναι πλήρως κορεσμένο, μη κορεσμένο ή και πλήρως ξηρό.



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

2.3 Μύζηση – Πίεση πόρων

2.3.1 Ορισμός και κατηγορίες μύζησης

Σε συνθήκες μερικού κορεσμού (μη κορεσμένα, μερικώς κορεσμένα εδάφη) όπου ο βαθμός κορεσμού κυμαίνεται μεταξύ 0 και 100%, στους πόρους του εδαφικού υλικού συνυπάρχει η υγρή με την αέρια φάση, οι οποίες και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αν η πίεση που ασκεί η αέρια φάση συμβολίζεται με u_a και η πίεση που ασκεί η υγρή φάση με u_w , η διαφορά τους $u_a - u_w$ ορίζει την μύζηση, η οποία συμβολίζεται με s , ή ψ .

Η μύζηση εκφράζει την αντίσταση ενός μη κορεσμένου εδάφους στην περαιτέρω αφαίρεση νερού από τους πόρους του και διακρίνεται στις τρεις παρακάτω κατηγορίες:

- a) Μύζηση εδαφικού σκελετού (Matric suction): εκφράζει την αντίσταση ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού στην περαιτέρω απώλεια νερού από τους πόρους του λόγω τριχοειδών φαινομένων εντός αυτών,
- b) Ωσμωτική μύζηση (Osmotic suction): εκφράζει την αντίσταση ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού στην περαιτέρω αφαίρεση νερού από τους πόρους αυτού λόγω ώσμωσης του νερού των πόρων εξαιτίας της διάλυσης ιόντων μέσα σε αυτό
- c) Ολική μύζηση (Total suction): αποτελεί τον συνδυασμό της μύζησης εδαφικού σκελετού και της ωσμωτικής μύζησης. Εκφράζει το σύνολο της αντίστασης ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού στην περαιτέρω απώλεια νερού από τους πόρους του λόγω τριχοειδών και ωσμωτικών φαινομένων.

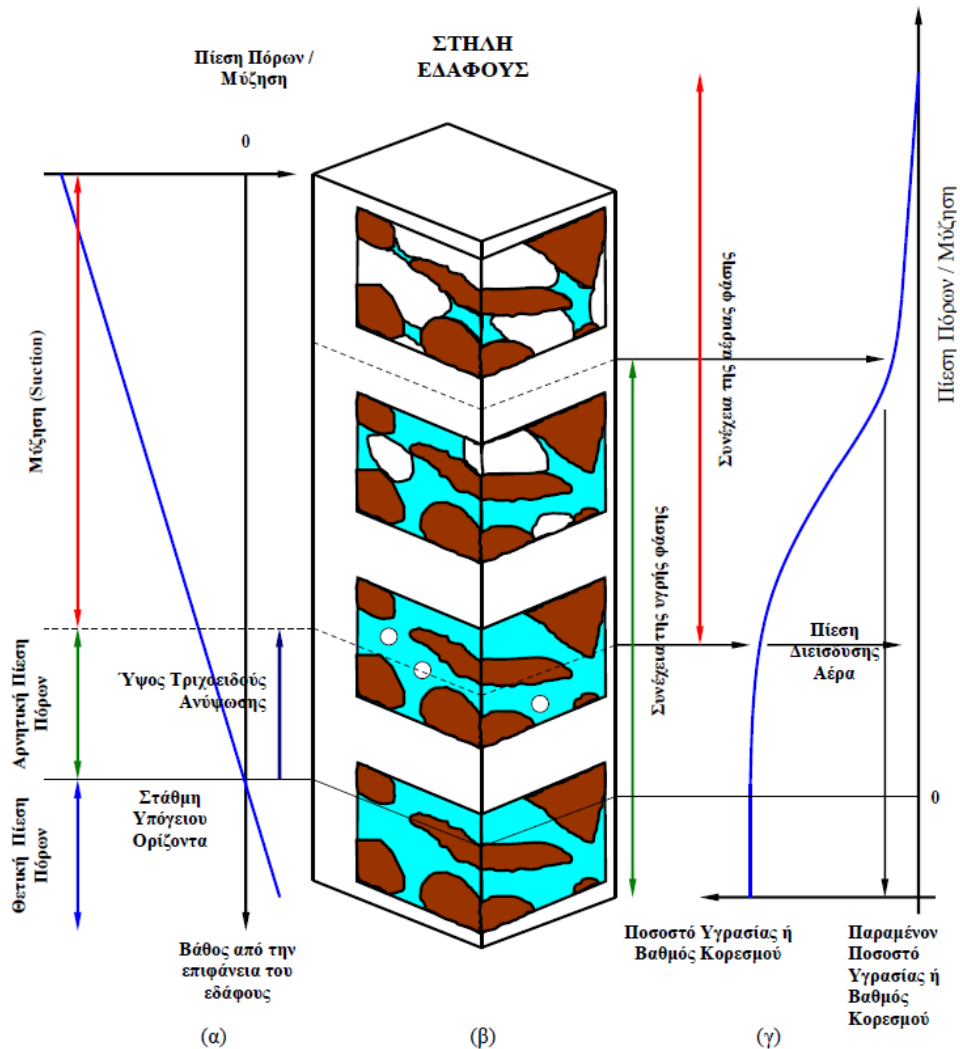
2.3.2 Πίεση πόρων

Η βασική διαφορά που χαρακτηρίζει τα μη κορεσμένα εδάφη και τα διαχωρίζει από τις άλλες κατηγορίες εδαφών είναι η εντατική κατάσταση στην υγρή φάση των πόρων, η οποία προκύπτει από τον μερικό κορεσμό. Πιο συγκεκριμένα, τα εδαφικά υλικά τα οποία υπόκεινται της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα θεωρούνται πλήρως κορεσμένα και επομένως η μοναδική ρευστή φάση που υπάρχει είναι η υγρή φάση. Κατά την ύπαρξη μόνο υγρής φάσης στα υλικά με βαθμό κορεσμού 100%, η πίεση που αναπτύσσεται μεταξύ των πόρων του υλικού είναι θλιπτική και επομένως θετικού προσήμου κατά την σύμβαση προσήμων της Εδαφομηχανικής.

Σε ό,τι αφορά τα εδάφη τα οποία βρίσκονται πάνω από τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, η ρευστή φάση που υπάρχει μεταξύ των πόρων του υλικού μπορεί να είναι μόνο υγρή ή και συνύπαρξη υγρής με αέρια φάση. Στην περίπτωση που παρατηρείται μόνο υγρή φάση στους πόρους του εδάφους, η πίεση είναι εφελκυστική και επομένως αρνητικού προσήμου. Ωστόσο στην περίπτωση που παρατηρείται συνύπαρξη της υγρής με την αέρια φάση (πραγματικός μερικός κορεσμός), η εντατική κατάσταση της υγρής φάσης περιγράφεται από τη μύζηση σύμφωνα με τον τύπο: $s = u_a - u_w$. Τέλος, απαραίτητο να αναφερθεί είναι ότι

για την συνύπαρξη των δύο φάσεων (υγρής και αέριας), σημαντικό ρόλο έχουν η φύση του εδάφους, το πάχος της μη κορεσμένης ζώνης καθώς επίσης και οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην επιφάνεια του εδάφους.

Για την καλύτερη κατανόηση της συνύπαρξης των δύο φάσεων, της κατανομής των πιέσεων πόρων με τον βαθμό κορεσμού παρατίθεται το παρακάτω Σχήμα 2.3.2.1



Σχήμα 2.3.2.1: 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 οριζοντα (Μπαρδάνης, 2016).

2.4 Φύση της μύζησης

Χρειάζεται να αναφερθεί ότι στη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα η πίεση της υγρής φάσης είναι μηδενική εφόσον το νερό που την αποτελεί (ελεύθερο νερό) δεν έχει ούτε αυξημένο ούτε και μειωμένο δυναμικό ως προς τη συγκεκριμένη θέση. Με τον όρο «ελεύθερο νερό» ορίζεται το νερό που δεν είναι προσκολλημένο στην κρυσταλλική δομή των αργιλικών πλακιδίων. Σε ό,τι αφορά την περιοχή πάνω από την στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, το δυναμικό ως προς τη χαρακτηριστική θέση μειώνεται, ενώ για την περιοχή κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα αυξάνεται.

Οι μηχανισμοί που προκαλούν τη μείωση του δυναμικού του νερού ως προς τη χαρακτηριστική θέση, αγνοώντας την θερμοκρασία, τη βαρύτητα και τα αδρανειακά φαινόμενα είναι οι εξής:

- Τριχοειδή φαινόμενα: Δημιουργούν καμπύλωση στην διεπιφάνεια της υγρής με την αέρια φάση λόγω των αρνητικών πιέσεων πόρων που αναπτύσσονται στην υγρή φάση των πόρων. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην συνύπαρξη των δύο φάσεων στους πόρους του εδαφικού υλικού και γι αυτόν το λόγο παρατηρείται στα μη κορεσμένα εδάφη και μόνο.
- Φαινόμενα προσρόφησης: Φαινόμενα που έχουν μεγαλύτερη σημασία για λεπτόκοκκα εδάφη. Οφείλονται σε πεδία δυνάμεων που αναπτύσσονται λόγω ηλεκτρικών φορτίων καθώς και δυνάμεων Van der Waals σε αρκετά μικρή απόσταση από τη διεπιφάνεια στερεής και υγρής φάσης. Τα ηλεκτρικά φορτία οφείλονται στα ηλεκτρικά πεδία τα οποία δημιουργούνται από την αρνητική φόρτιση στην επιφάνεια των αργιλικών πλακιδίων. Οι δυνάμεις Van der Waals οφείλονται στην αλληλεπίδραση των δυνάμεων μεταξύ των μορίων που αποτελούν την επιφάνεια της στερεής φάσης και αυτών της υγρής φάσης. Σημαντικό να αναφερθεί είναι το γεγονός ότι τα φαινόμενα προσρόφησης επηρεάζονται από την απόσταση των στερεών σωματιδίων. Ειδικότερα έχουν μεγαλύτερη σημασία σε υλικά, όπου η απόσταση των στερεών σωματιδίων είναι σχετικά μικρή (λεπτόκοκκα υλικά) και επομένως το ποσοστό υγρασίας και ο βαθμός κορεσμού μπορούν να αποκτήσουν χαμηλές τιμές.

- Ωσμωτικά φαινόμενα: Οφείλονται στην ύπαρξη διαλυμένων ουσιών στην υγρή φάση των πόρων των εδαφικών υλικών. Οι ουσίες αυτές δημιουργούνται από την παροχή είτε εξωτερικών διαλυμένων ουσιών (π.χ. διήθηση), είτε εσωτερικών που αναπτύσσονται στο νερό των πόρων με την ανταλλαγή ιόντων της κρυσταλλικής δομής των αργίλων με τα μόρια του νερού. Η ύπαρξη ωσμωτικών φαινομένων οδηγεί στην μείωση του δυναμικού της υγρής φάσης ως προς το δυναμικό του ελεύθερου νερού.

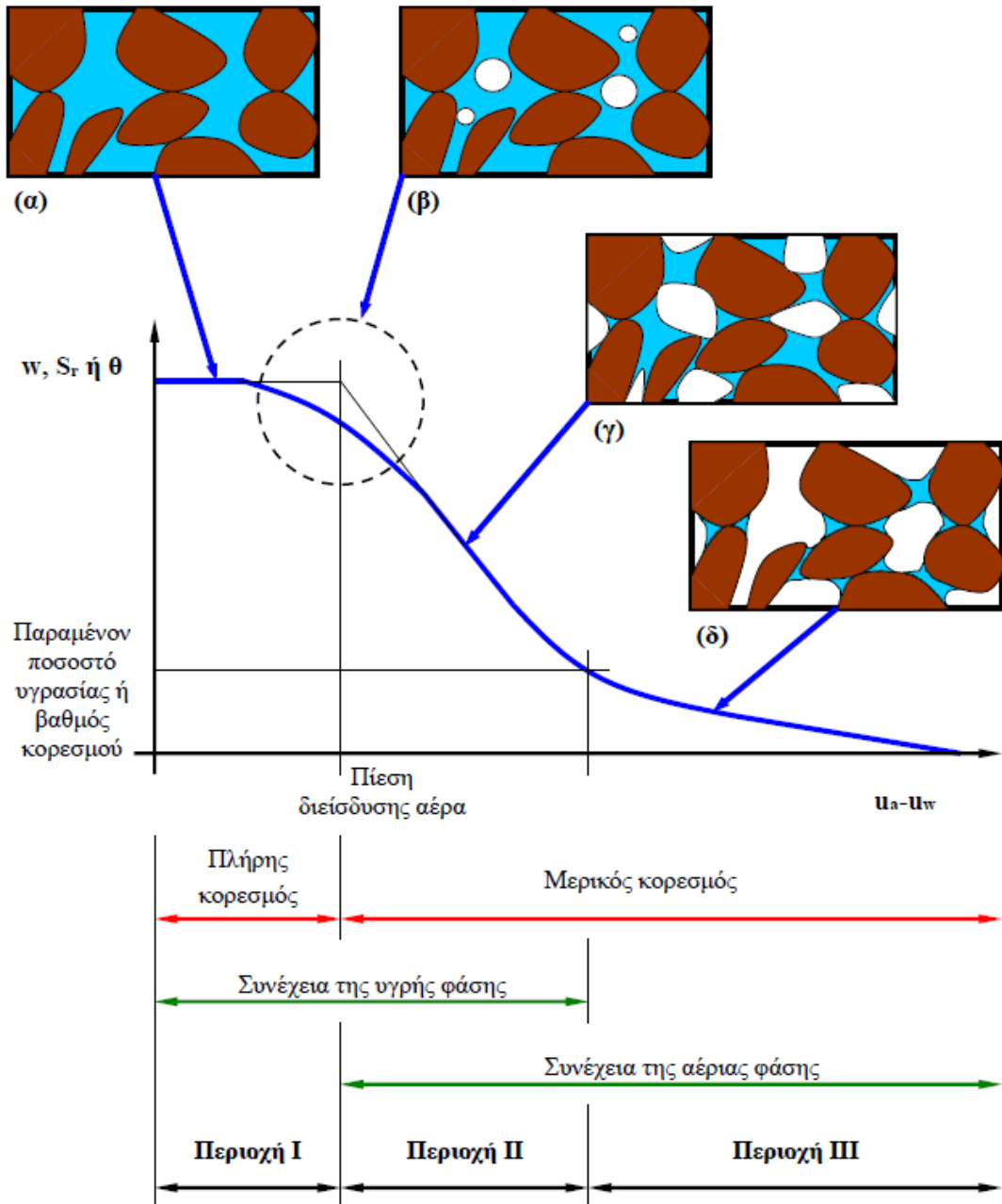
Συνεπώς, τα τριχοειδή φαινόμενα συναντώνται μόνο σε μη κορεσμένα εδαφικά υλικά, ενώ τα φαινόμενα προσρόφησης και τα ωσμωτικά φαινόμενα εμφανίζονται σε πλήρως και μη κορεσμένα εδάφη. Τέλος, αναφορικά με τη μύζηση που δημιουργείται στο εδαφικό υλικό λόγω παρουσίας τριχοειδών φαινομένων και φαινομένων προσρόφησης, ονομάζεται μύζηση εδαφικού σκελετού (Matric suction), ενώ η μύζηση που οφείλεται στην ύπαρξη ωσμωτικών φαινομένων καλείται ωσμωτική μύζηση (Osmotic suction). Το σύνολο των δύο προαναφερθέντων ειδών μύζησης, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο της παρούσας εργασίας, αποτελεί την ολική μύζηση (Total suction).

2.5 Περιγραφή χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους – νερού

Για την καλύτερη κατανόηση των μη κορεσμένων εδαφών σε σχέση με τα πλήρως κορεσμένα, την συνύπαρξη της υγρής με την αέρια φάση στην ρευστή φάση των πόρων, την μύζηση αλλά και τις πιέσεις των πόρων που αναπτύσσονται σε ένα εδαφικό υλικό είναι απαραίτητη η εισαγωγή και η περιγραφή της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους – νερού ενός υλικού.

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού αποτελεί ένα διάγραμμα το οποίο παρουσιάζει τις μεταβολές του βαθμού κορεσμού συναρτήσει της αρνητικής πίεσης των πόρων ενός υλικού και της μύζησης. Πιο συγκεκριμένα αντιπροσωπεύει τη σχέση μεταξύ του βαθμού κορεσμού και της μύζησης, δηλαδή την ποσότητα του νερού των πόρων που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη μύζηση. Συνεπώς, η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού αποτελεί θεμέλιο για την

ποιοτική περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών και της κατάταξής τους ως προς τον βαθμό κορεσμού τους.



Σχήμα 2.5.1: 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) πλήρης κορεσμός (Περιοχή I), (β) μερικός κορεσμός με την αέρια φάση σε μορφή φυσαλίδων (οριακή περιοχή μεταξύ Περιοχής I και II), (γ) μερικός κορεσμός με την υγρή και την αέρια φάση να είναι ταυτόχρονα συνεχείς (Περιοχή II) και (δ) μερικός κορεσμός με την υγρή φάση να μην είναι πια συνεχής (Περιοχή III) (Μπαρδάνης, 2016).

Όπως παρατηρείται και από το Σχήμα 2.5.1, η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού χωρίζεται σε τρεις περιοχές, Περιοχή I, II και III. Προτού αναλυθούν οι τρεις αυτές περιοχές του σχήματος, χρειάζεται να αναφερθεί ότι όταν το εδαφικό υλικό υπόκειται της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, όταν δηλαδή το υλικό είναι πλήρως κορεσμένο, στην ρευστή φάση των πόρων οι πιέσεις πόρων όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι θετικές και δεν παρατηρούνται μεταβολές του ποσοστού υγρασίας του υλικού λόγω του μεγέθους της θετικής πίεσης πόρων. Η περιοχή αυτή λοιπόν δεν παρουσιάζεται στην χαρακτηριστική καμπύλη καθώς η χαρακτηριστική καμπύλη λαμβάνει τιμές πιέσεων πόρων μόνο αρνητικές.

Στην Περιοχή I, η οποία εκτείνεται μεταξύ μηδενικής πίεσης πόρων και πίεσης διείσδυσης αέρα (ύψος τριχοειδούς ανύψωσης), το εδαφικό υλικό έχει βαθμού κορεσμού 100%, είναι επομένως πλήρως κορεσμένο αλλά διαθέτει αρνητικές πιέσεις πόρων. Η ρευστή φάση των πόρων αποτελείται μόνο από τη συνεχή υγρή φάση χωρίς την ύπαρξη αέρα.

Στην Περιοχή II, η οποία εκτείνεται μεταξύ του ύψους τριχοειδούς ανύψωσης (πίεση διείσδυσης αέρα) και του ύψους τριχοειδούς ανύψωσης με ελάχιστο μέγεθος πόρων. Ειδικότερα, στην συγκεκριμένη περιοχή η υγρή φάση αρχικά παραμένει συνεχής, ωστόσο η σταδιακή εμφάνιση των μορίων του αέρα μέσα στους πόρους του υλικού οδηγεί στην συνύπαρξη της υγρής με την αέρια φάση με αποτέλεσμα και οι δύο να γίνονται συνεχείς. Κατά την προοδευτική αυτή στράγγιση του εδαφικού υλικού, η ποσότητα του νερού όλο και μειώνεται αφήνοντας χώρο στον αέρα, χωρίς όμως να απομακρύνεται πλήρως από τους πόρους του υλικού. Το νερό, το οποίο παραμένει εγκλωβισμένο στα τοιχώματα των πόρων δεν είναι δυνατόν να απομακρυνθεί από φυσική ξήρανση, με αποτέλεσμα στο όριο της Περιοχής II προς την Περιοχή III να υπάρχει ένα παραμένον ποσοστό υγρασίας και ο βαθμός κορεσμού να είναι μεγαλύτερος από 0%.

Η Περιοχή III εκτείνεται από το ύψος τριχοειδούς ανύψωσης με ελάχιστο μέγεθος πόρων (το οποίο αντιστοιχεί στο παραμένον ποσοστό υγρασίας) μέχρι το θεωρητικό σημείο όπου ο βαθμός κορεσμού και το ποσοστό υγρασίας έχουν μηδενική τιμή. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται συνύπαρξη της υγρής με την αέρια φάση στο εσωτερικό του εδαφικού υλικού με τη διαφορά ότι δεν

θεωρούνται και οι δύο φάσεις συνεχείς. Συγκεκριμένα, συνεχής είναι πλέον μόνο η αέρια φάση του υλικού, ενώ η υγρή είναι μη συνεχής καθώς το νερό είναι εγκλωβισμένο και απομονωμένο στα τοιχώματα των μικρότερου μεγέθους πόρων του υλικού. Μηδενισμός του ποσοστού υγρασίας και του βαθμού κορεσμού του υλικού δεν μπορεί να επέλθει με φυσική ξήρανση του υλικού παρά μόνο με την επιβολή εξωτερικών δυνάμεων ή με ξήρανση του υλικού σε ειδικό φούρνο.

Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού διαθέτει δύο σημεία καμπής, τα οποία συνδέουν τα όρια των περιοχών I με II και II με III. Αναφορικά με το σημείο καμπής που συνδέει τις I και II περιοχές, είναι το σημείο πίεσης διείσδυσης αέρα και αποτελεί μία υποπεριοχή κατά την οποία η αέρια φάση του νερού των πόρων είναι μη συνεχής και βρίσκεται υπό μορφή φυσαλίδων. Η υποπεριοχή αυτή είναι η μετάβαση του εδαφικού υλικού από τον πλήρη στο μερικό κορεσμό και η κίνηση του νερού μεταξύ των πόρων πραγματοποιείται με το νερό σε υγρή φάση.

Το δεύτερο σημείο καμπής της καμπύλης παρατηρείται μεταξύ των περιοχών II και III και είναι το παραμένον ποσοστό υγρασίας ή ο παραμένον βαθμός κορεσμού. Είναι το σημείο εκείνο κατά το οποίο η υγρή φάση παύει να είναι συνεχής. Πιο συγκεκριμένα, η αέρια φάση λόγω της συνεχούς στράγγισης του υλικού παραμένει συνεχής, ενώ η υγρή φάση του νερού γίνεται μη συνεχής. Αυτό συμβαίνει καθώς το νερό που έχει παραμείνει στους πόρους του υλικού έχει εγκλωβιστεί στα στενότερα σημεία και δεν μπορεί να απομακρυνθεί με φυσικές διαδικασίες.

Βάσει όσων έχουν προαναφερθεί, η ουσία της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους – νερού έγκειται στην αναζήτηση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός εδαφικού υλικού για την περιγραφή του μερικού του κορεσμού σε αντιστοιχία με τον βαθμό κορεσμού του για τιμές μεταξύ 0-100%.

Τέλος από το γράφημα παρατηρείται ότι με την βαθμιαία μείωση του βαθμού κορεσμού, η μύζηση αυξάνεται. Η σχέση μύζησης με τον βαθμό κορεσμού είναι μη γραμμική και λαμβάνει τη μορφή ανάστροφης σιγμοειδούς καμπύλης με τη μύζηση να βρίσκεται στον οριζόντιο άξονα σε λογαριθμική κλίμακα, ενώ βαθμός κορεσμού στον κατακόρυφο σε γραμμική κλίμακα.

2.6 Χαρακτηριστικά μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών

Στην συγκεκριμένη ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάζονται, εν συντομία, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Τα κύρια μηχανικά χαρακτηριστικά των μη κορεσμένων εδαφών είναι οι μεταβολές όγκου, η διατμητική αντοχή και η διαπερατότητα τους ως προς το νερό και τον αέρα.

2.6.1 Μεταβολές όγκου μη κορεσμένων εδαφών

Η μηχανική συμπεριφορά των μη κορεσμένων υλικών διαχωρίζεται σε καταρρεύσιμη και διογκώσιμη. Καταρρεύσιμη καλείται η μηχανική συμπεριφορά ενός μη κορεσμένου υλικού όταν αυτό παρουσιάζει (συνήθως) μη αντιστρεπτή μείωση του όγκου του, όταν παρέχεται σε αυτό περίσσεια νερού. Αντίθετα, διογκώσιμη ονομάζεται η συμπεριφορά εκείνη κατά την οποία παρουσιάζεται αύξηση του όγκου του, όταν παρέχεται σε αυτό περίσσεια νερού. Τα δύο αυτά διαφορετικά είδη συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών είναι πιθανό να εμφανιστούν στο ίδιο εδαφικό υλικό. Αυτό εξαρτάται από την εντατική κατάσταση στην οποία βρίσκεται το εδαφικό υλικό, την δομή του αλλά και τις συνθήκες φόρτισης – αποφόρτισης, ξήρανσης – ύγρυνσης που έχει υποστεί στο παρελθόν.

Ειδικότερα, έχει επισημανθεί ότι η μεταβολή του όγκου επηρεάζει πολύ περισσότερο τα μη κορεσμένα από τα πλήρως κορεσμένα υλικά, καθώς τα τελευταία αδυνατούν να εκδηλώσουν φαινόμενα διόγκωσης. Αντιθέτως, το φαινόμενο της διόγκωσης ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού, λόγω της μετάπτωσης του βαθμού κορεσμού από μερικό σε πλήρη κορεσμό, είναι αρκετά συνηθισμένο και τις περισσότερες των περιπτώσεων δημιουργεί προβλήματα σε θεμελιώσεις κατασκευαστικών έργων. Σε αντίστοιχη περίπτωση, άκρως σημαντικό είναι και το αντίστροφο φαινόμενο, δηλαδή η κατάρρευση του εδάφους λόγω υδρεμποτισμού.

Γενικά, τα μη κορεσμένα εδάφη έχουν την τάση να επηρεάζονται σε πολύ σημαντικό βαθμό από την μεταβολή του όγκου τους. Ειδικότερα, πλαστικά

αργιλικά εδάφη τα οποία διαθέτουν υψηλή πυκνότητα και χαμηλές τάσεις διογκώνονται με την παροχή περίσσειας νερού ώστε να αποκτήσουν συμπεριφορά πλήρως κορεσμένου υλικού, ενώ κοκκώδη εδάφη χαμηλής πυκνότητας και υπό υψηλές και υπό χαμηλές τάσεις, με την παροχή νερού έχουν την τάση να συρρικνώνονται ώστε να περιέλθουν σε πλήρη κορεσμό.

Συνεπώς η θεώρηση των μη κορεσμένων εδαφών ως πλήρως κορεσμένα, βάσει όσων προαναφέρθηκαν, οδηγούν σε σοβαρά τεχνικά και οικονομικά προβλήματα στα κατασκευαστικά έργα.

2.6.2 Διατμητική αντοχή μη κορεσμένων εδαφικών

Ένα από τα σημαντικότερα, αν όχι το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών αποτελεί η διατμητική αντοχή και η εξέλιξή της σε σχέση με την μύζηση.

2.6.2.1 Γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb

Οι Fredlund, et al. (1978) βασισμένοι στο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb το οποίο ισχύει στα πλήρως κορεσμένα εδάφη, επέκτειναν το συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb για τα μη κορεσμένα εδάφη, ορίζοντας με όρους τάσης την μηχανική τους συμπεριφορά. Η διατύπωση αυτή έχει ως εξής:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan\phi' + (u_a - u_w) \tan\phi_b, \text{ όπου}$$

τ : η μέγιστη διατμητική τάση την οποία μπορεί να παραλάβει ένα εδαφικό υλικό,

c' : η ενεργός τιμή συνοχής,

ϕ' : η ενεργός τιμή γωνίας διατμητικής αντοχής

$\tan\phi_b$: ο ρυθμός αύξησης της διατμητικής αντοχής με την μύζηση,

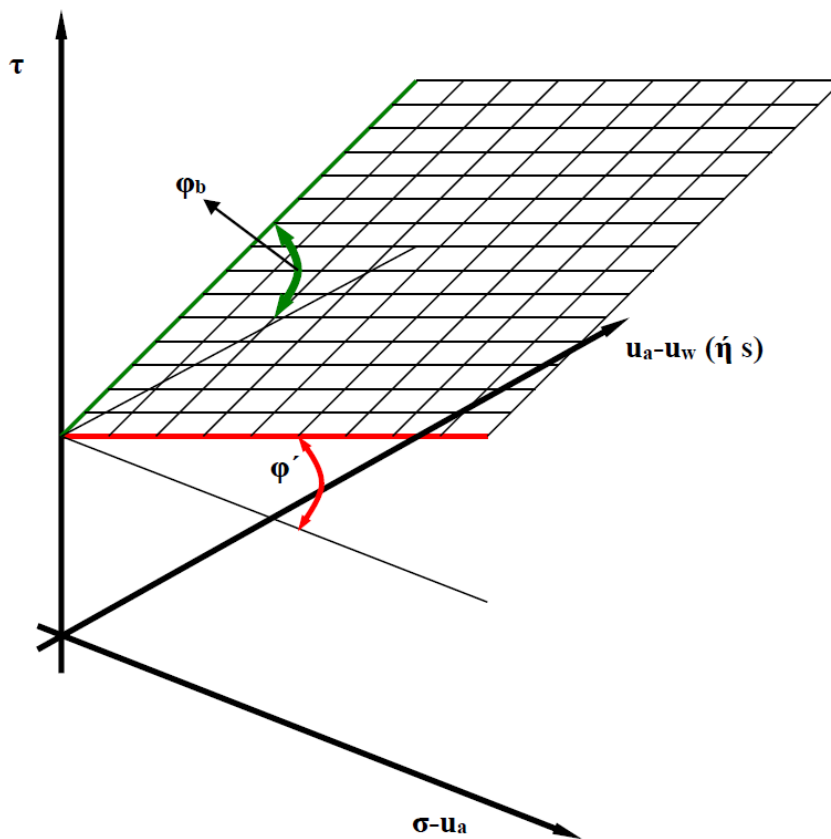
$\sigma - u_a$: ορθή ολική τάση και

$u_a - u_w$: η μύζηση s .

Σε πλήρως κορεσμένο έδαφος, $u_a = 0$ και $\phi_b = \phi'$.

Η διατύπωση της παραπάνω εξίσωσης αποτελεί το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, το οποίο ισχύει για πλήρως κορεσμένα αλλά και μη κορεσμένα εδάφη.

Εισάγοντας πλέον δύο παραμέτρους τάσης, δεν γίνεται αναφορά για μία περιβάλλουσα γραμμή αστοχίας αλλά για δύο. Ειδικότερα η μία περιβάλλουσα αστοχίας αναφέρεται στο επίπεδο $\tau - (\sigma - u_a)$, ενώ η άλλη στο επίπεδο $\tau - (u_a - u_w)$.



Σχήμα 2.6.2.1.1: Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών με βάση το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb (Μπαρδάνης, 2016).

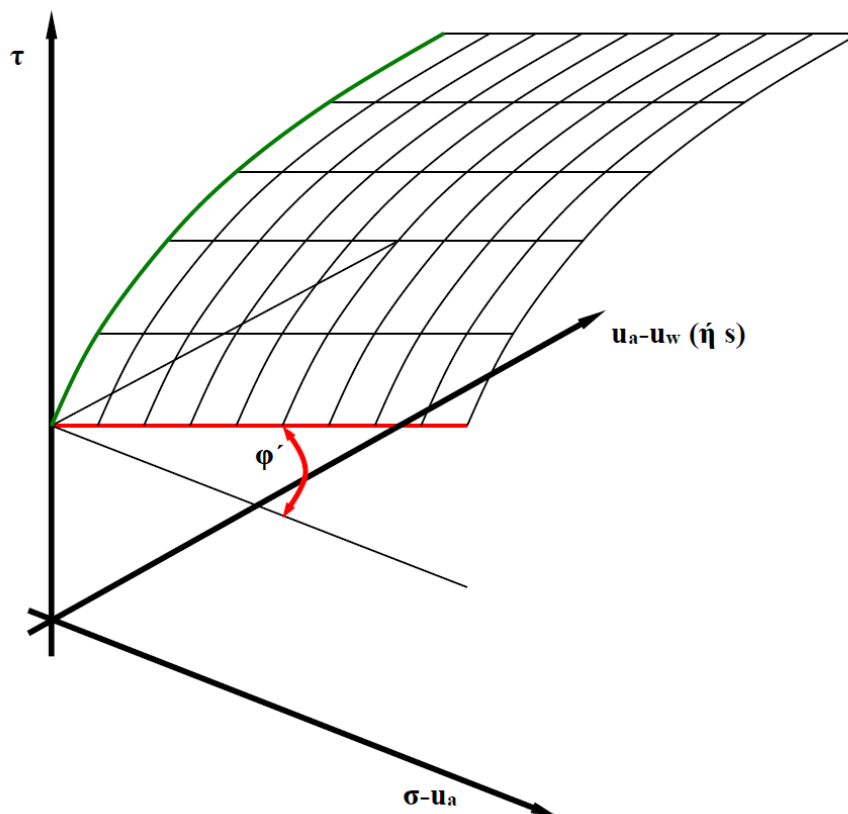
2.6.2.2 Γενικευμένο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb

Το γενικευμένο γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb, το οποίο αναλύθηκε παραπάνω ισχύει για συγκεκριμένες κατηγορίες και χαρακτηριστικά των υλικών.

Ειδικότερα χρησιμοποιείται για περιορισμένο εύρος τιμών της τάσης, (μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα του υλικού), για πολύ μικρό αριθμό εδαφικών υλικών (π.χ. αργίλους πολύ υψηλής πλαστικότητας).

Ωστόσο για λεπτόκοκκα υλικά, η διατμητική αντοχή των μη κορεσμένων εδαφών αρχικά αυξάνεται με τη μύζηση έως την πίεση διείσδυσης αέρα, ενώ στη συνέχεια δεν διαθέτει σταθερή συμπεριφορά. Ανάλογα με τη φύση του υλικού ενδέχεται να αυξηθεί, να σταθεροποιηθεί ή και να μειωθεί.

Κατά τους Escario & Sáez, 1986, και Krahn, et al., 1989, και τα πειραματικά τους αποτελέσματα, έχει παρατηρηθεί ότι ανάλογα με το είδος του λεπτόκοκκου υλικού (άργιλοι, κοκκώδη υλικά) η αύξηση της διατμητικής αντοχής του υλικού μειώνεται με την μύζηση, ενώ επίσης, μπορεί να παίρνει και αρνητικές τιμές (μείωση της αντοχής μετά από αρχική αύξηση).



Σχήμα 2.6.2.2.1: Ποιοτική απεικόνιση της περιβάλλουσας αστοχίας μη κορεσμένων εδαφών με βάση το γενικευμένο μη γραμμικό κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. (Μπαρδάνης, 2016).

Βάσει όσων προαναφέρθηκαν, σε όλα τα εδαφικά υλικά με την αύξηση της μύζησης θα παρατηρηθεί αρχικά και αύξηση της διατμητικής τους αντοχής, για τιμές μύζησης μέχρι την πίεση διείσδυσης αέρα, δηλαδή για πλήρως κορεσμένα εδάφη. Ωστόσο η συμπεριφορά των υλικών μετά την πίεση διείσδυσης αέρα (μερικός κορεσμός) διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του κάθε εδαφικού υλικού.

Αναλυτικότερα, άργιλοι πολύ υψηλής πλαστικότητας παρουσιάζουν σταθερή αύξηση της διατμητικής αντοχής με την μύζηση, άργιλοι μέσης πλαστικότητας εμφανίζουν συνεχή αύξηση της διατμητικής αντοχής αλλά με μειούμενο ρυθμό, ενώ άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας σταθεροποιούνται ως προς την διατμητική τους αντοχή μετά την πίεση διείσδυσης αέρα. Σε ό,τι αφορά τις ιλυώδεις άμμους μέχρι και τις μη πλαστικές ιλεις, μετά τον αποκορεσμό η διατμητική αντοχή μειώνεται μέχρι μία τιμή, ενώ στη συνέχεια σταθεροποιείται. Η διατμητική αντοχή των αμιγώς χονδρόκοκκων υλικών (χάλικες, άμμοι), μετά τον αποκορεσμό μειώνεται μέχρις ότου μηδενιστεί πλήρως.

Συνεπώς, αναφορικά με τη μη γραμμικότητα του γενικευμένου κριτηρίου Mohr-Coulomb ως προς τον ρυθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής με τη μύζηση, συμπεραίνεται ότι αρχικά είναι γραμμικό μέχρι η μύζηση να αποκτήσει την τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα. Από το σημείο αυτό και έπειτα, ανάλογα με τα φυσικά χαρακτηριστικά του κάθε υλικού η διατμητική αντοχή μπορεί να αυξηθεί, να μειωθεί, ή να παραμείνει σταθερή. Συγκεκριμένα η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής στις αργίλους θα αναλυθεί στο επόμενο Κεφάλαιο 3.

2.6.3 Διαπερατότητα μη κορεσμένων εδαφικών υλικών

Εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών είναι η διαπερατότητα του υλικού ως προς την υγρή φάση των πόρων του. Στα πλήρως κορεσμένα εδαφικά υλικά η ροή του νερού πραγματοποιείται μέσω των γεμάτων νερό πόρων του. Όπως περιγράφεται από την εξίσωση συνέχειας της μάζας για τα πλήρως κορεσμένα εδάφη, ο όγκος του νερού που εισέρχεται στους πόρους του υλικού ισούται με τον όγκο του νερού

που εξέρχεται (λαμβανομένων υπόψη και των μεταβολών του ολικού όγκου του εδάφους) και η διαδρομή που ακολουθεί πραγματοποιείται μέσα από την υγρή φάση των πόρων του.

Αντίθετα τα μη κορεσμένα υλικά δεν συμπεριφέρονται όμοια με τα πλήρως κορεσμένα εδάφη. Λόγω της συνύπαρξης της υγρής φάσης με την αέρια φάση στα μη κορεσμένα εδαφικά υλικά, εκτός από νερό, στους πόρους του υλικού εισέρχεται και αέρας, γεγονός που επηρεάζει τη διαπερατότητα. Πιο συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί ότι ο συντελεστής διαπερατότητας μειώνεται με την αύξηση της μύζησης ή την μείωση του βαθμού κορεσμού καθώς το νερό εγκλωβίζεται στα τοιχώματα των πόρων του υλικού χωρίς να βρίσκει διόδους διαφυγής. Σε επίπεδο μικροδιαπερατότητας ισχύουν όσα προαναφέρθηκαν, ενώ αναφορικά με την μακροδιαπερατότητα παρατηρείται ότι λόγω δημιουργίας ρωγμών στο ξηρό εδαφικό υλικό (π.χ. σε αργιλικά εδάφη) αυξάνεται η κίνηση του νερού.

2.7 Επίλογος

Με βάση όσα προαναφέρθηκαν στις προηγούμενες ενότητες του συγκεκριμένου κεφαλαίου, συμπεραίνεται ότι η μελέτη των μη κορεσμένων εδαφών στον κλάδο της εδαφομηχανικής και της γεωτεχνικής μηχανικής είναι άκρως σημαντική. Αρχικά τα μη κορεσμένα εδάφη αναφέρονται σε θερμές και ξηρές περιοχές, οι οποίες λόγω της κλιματικής αλλαγής εμφανίζονται όλο και συχνότερα στον πλανήτη. Επιπλέον, στην κατηγορία των μη κορεσμένων υλικών ανήκουν όλα τα συμπυκνωμένα εδάφη, τα λεπτόκοκκα πλαστικά εδάφη και τα αντίστοιχα χονδρόκοκκα όταν βρίσκονται πάνω από τη στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα με τάσεις τέτοιες ώστε να αναπτύσσονται τα φαινόμενα της διόγκωσης και της κατάρρευσής τους αναλόγως. Τέτοιου είδους εδάφη με την παραδοχή ότι ανήκουν στην κατηγορία των πλήρως κορεσμένων εδαφών προκαλούν τόσο οικονομικές όσο και τεχνικές επιπτώσεις καθώς δεν λειτουργούν υπέρ της ασφάλειας υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις.

Κεφάλαιο 3

Μπεντονιτική Άργιλος Άρμου

3.1 Εισαγωγή στις κατολισθήσεις

3.1.1 Ορισμός κατολίσθησης

Οι εδαφικοί σχηματισμοί που αποτελούν και διαμορφώνουν ένα πρανές τείνουν να μετακινούνται από ψηλότερες υψομετρικά θέσεις σε χαμηλότερες λόγω της βαρύτητας. Στην περίπτωση που η συνιστώσα του βάρους που έχει την τάση να μετακινήσει το πρανές είναι μικρότερη ή έστω ίση με την διατμητική αντοχή του εδάφους, τότε το πρανές παραμένει σταθερό. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή η συνιστώσα του βάρους είναι μεγαλύτερη από τη διατμητική αντοχή του εδάφους, τότε το πρανές αστοχεί με αποτέλεσμα την εκδήλωση κατολίσθησης.

3.1.2 Τα αίτια που προκαλούν μία κατολίσθηση

Σύμφωνα με το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου τα αίτια που προκαλούν μία κατολίσθηση διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Γεωλογικές συνθήκες της περιοχής
- Τοπογραφία και μορφολογία της περιοχής
- Καθεστώς πιέσεων πόρων και οι έντονες βροχοπτώσεις
- Σεισμική δράση της περιοχής
- Ανθρώπινες παρεμβάσεις

Αναφορικά με την τελευταία κατηγορία αιτιών, έχει παρατηρηθεί ότι λόγω αύξησης των αναπτυξιακών έργων (οικιστική ανάπτυξη, κυρίως εκτός σχεδίου πόλης, εκσκαφές, επιχωματώσεις, υδροδοτήσεις, αρδεύσεις κλπ.), η ανθρώπινη


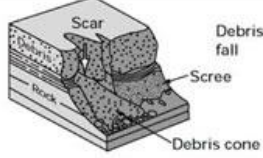
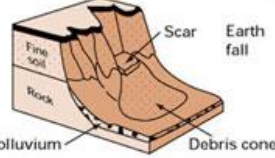
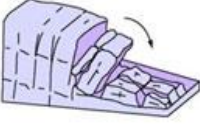
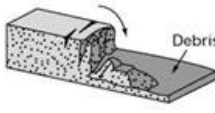
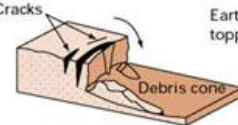

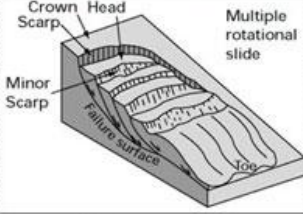
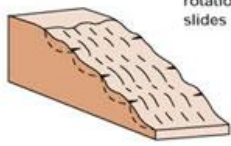
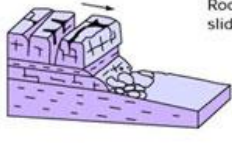
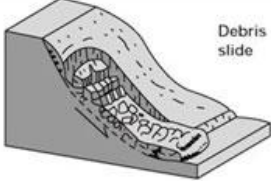
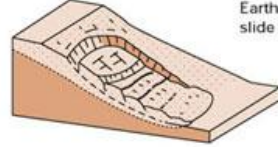
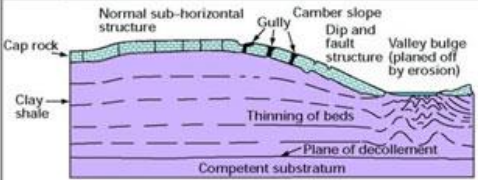

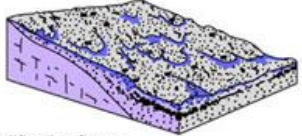
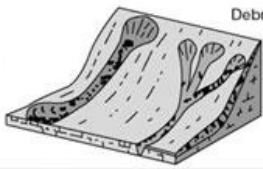


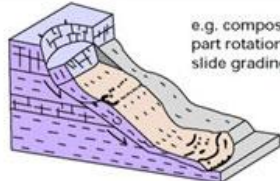
παρέμβαση προκαλεί αλλοιώσεις στο φυσικό περιβάλλον μιας περιοχής με αποτέλεσμα υπό προϋποθέσεις την δημιουργία κατολισθήσεων και λοιπών φαινομένων.

Ειδικότερα για την Κύπρο, έχει παρατηρηθεί ότι τα τελευταία χρόνια λόγω και της αύξησης του τουρισμού έχουν γίνει πολλά αναπτυξιακά έργα με αποτέλεσμα την αλλοίωση του φυσικού υδρογεωλογικού περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή της Πάφου, όπου το έδαφος είναι χαλαρό και ασυμπιεστο και αποτελείται από διογκούμενες αργίλους υψηλής πλαστικότητας, έχουν παρατηρηθεί αστοχίες και γεωτεχνικά προβλήματα λόγω ανέγερσης κατοικιών και συγκροτημάτων. Τέτοιου είδους προβλήματα προέρχονται κατά κύριο λόγο από ενεργοποίηση παλαιών και αδρανών κατολισθήσεων (παλαιοκατολισθήσεις) ή και εκδήλωση νέων.

3.1.3 Ταξινόμηση κατολισθήσεων

Για την καλύτερη κατανόηση και τη διευκόλυνση στη μελέτη των κατολισθήσεων, έχουν δημιουργηθεί διάφορα συστήματα ταξινόμησης. Η αναγνώριση όπως και η κατάταξη μία κατολισθήσεως είναι χρήσιμη για την κατανόηση του μηχανισμού της, την εκτίμηση της εξέλιξής της και την μελέτη των απαραίτητων έργων σταθεροποίησης της. Ένα από τα πιο γνωστά και κατά κόρον χρησιμοποιούμενα συστήματα κατάταξης είναι το σύστημα ταξινόμησης κατά Varnes.

Το σύστημα ταξινόμησης κατά Varnes χρησιμοποιείται για μετακινήσεις εδαφικών αλλά και βραχωδών σχηματισμών και αξιοποιεί τη γεωμετρία και τη λιθολογία των κατολισθητικών μαζών για την κατάταξή τους. Αντίθετα, το σύστημα κατά Varnes δεν έχει τη δυνατότητα να δώσει απαντήσεις σε θέματα μηχανικής συμπεριφοράς και τιμών παραμέτρων, αναλύσεων ευστάθειας και μέτρων σταθεροποίησης της ολισθαίνουσας μάζας.

| Material | | ROCK | DEBRIS | EARTH |
|---------------|---|--|--|--|
| Movement type | | | | |
| FALLS | |  Rock fall |  Debris fall Scree Debris cone |  Earth fall Colluvium Debris cone |
| | TOPPLES |  Rock topple |  Debris topple Debris cone |  Earth topple Debris cone |
| SLIDES | Rotational |  Single rotational slide (slump) Failure surface |  Multiple rotational slide Crown Scarp Head Scarp Minor Scarp Failure surface Toe |  Successive rotational slides |
| | Translational (Planar) |  Rock slide |  Debris slide |  Earth slide |
| SPREADS |  <p>e.g. cambering and valley bulging</p> | | |  Earth spread |
| FLOWES |  Solifluction flows (Periglacial debris flows) |  Debris flow | |  Earth flow (mud flow) |
| COMPLEX |  e.g. Slump-earthflow with rockfall debris | |  e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe | |

Σχήμα 3.1.3.1: Σύστημα ταξινόμησης κατολισθήσεων κατά Varnes

(<https://besafenet.net/el/hazards/landslides/>)

3.2 Περιγραφή κατολίσθησης Άρμου

Η κατολίσθηση της περιοχής της Άρμου βρίσκεται στην Κύπρο, σε απόσταση 8 χιλιομέτρων βορειοανατολικά της πόλης της Πάφου σε υψόμετρο 335m από την επιφάνεια της θάλασσας. Πρόκειται για μία κατολίσθηση σχετικά μεγάλου μεγέθους παρά το ήπιο ανάγλυφο της περιοχής. Το μήκος της κατολίσθησης είναι περί τα 300m και το πλάτος της περί τα 150m με το βάθος να είναι άγνωστο με ακρίβεια από μετρήσεις κλισιομέτρων αλλά να εκτιμάται μεγαλύτερο από 15m και πιθανόν και βαθύτερο. Η γεωλογική εκτίμηση είναι ότι πρόκειται για παλαιοκατολίσθηση.

Τα τελευταία χρόνια η Άρμου παρουσιάζει σημαντική αύξηση του πληθυσμού της και λόγω της μικρής απόστασής της από την Πάφο, του κλίματός της, αλλά και της μορφολογίας της που ευνοεί την κατασκευή νέων κατοικιών με θέα πάνω από τη Μεσόγειο Θάλασσα, έχει παρουσιάσει σημαντική οικοδομική ανάπτυξη. Σε ότι αφορά τον κατασκευαστικό τομέα παρατηρηθήκαν μεγάλες ενιαίες αναπτύξεις πολλών κατοικιών μαζί. Περί την στέψη της κατολίσθησης της Άρμου κατασκευάστηκαν περί τις 10 κατοικίες στις οποίες άρχισαν να εμφανίζονται προβλήματα από μετακινήσεις λόγω κατολίσθησης.



Φωτογραφίες 3.2.1 & 3.2.2: Αριστερά - Απόσπασμα δορυφορικής φωτογραφίας από το πρόγραμμα GoogleEarth (ημερομηνία λήψης 2/8/2017). Δεξιά - Φωτογραφία από επιτόπου επίσκεψη στην περιοχή της Άρμου. [Μπαρδάνη (2019, α)].

Από δημοσιεύματα του τύπου (MailOnline, 20/5/2019), οι κατοικίες κατασκευάστηκαν μεταξύ των ετών 2004 και 2008. Σύμφωνα με τα δημοσιεύματα, δεν είχε παρατηρηθεί κάποιο κατασκευαστικό πρόβλημα, ενώ οι πρώτες ρωγμές στις κατοικίες παρατηρήθηκαν το 2010, ύστερα από έντονες βροχοπτώσεις που είχαν προηγηθεί. Μέσα στα επόμενα χρόνια εκτός από τις ρωγμές, που δημιουργούνταν ολοένα και περισσότερες, ξεκίνησαν και οι πρώτες μεγάλου μεγέθους μετακινήσεις του εδάφους με αποτέλεσμα οι περισσότεροι κάτοικοι να αναγκαστούν να εγκαταλείψουν τις κατοικίες τους.

Η κατολίσθηση στην Άρμου είναι γεωμετρικά σύνθετη, καθώς η εικόνα της και τα χαρακτηριστικά της παραπέμπουν σε συνδυασμό μεταθετικής και περιστροφικής κατολίσθησης.

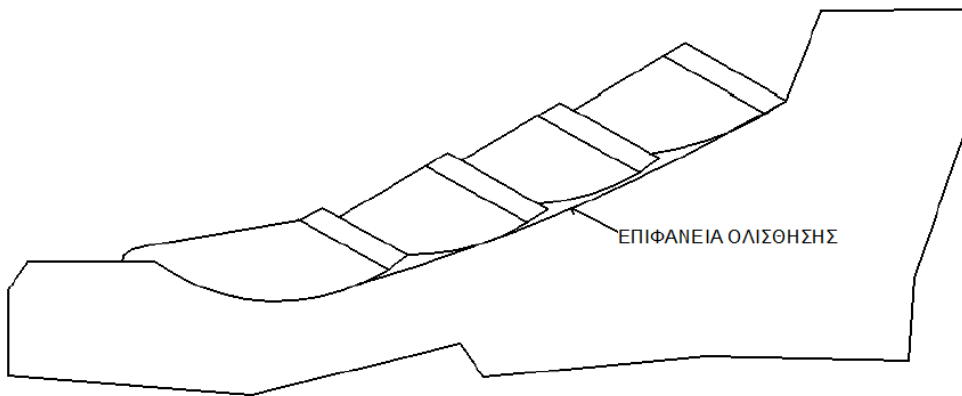
Η περιστροφική κατολίσθηση (Σχήμα 3.1.3.1 – Rotational Slide) δημιουργείται κατά μήκος κοίλων επιφανειών με μικρή παραμόρφωση στο σώμα της κατολισθαίνουσας μάζας. Η ολίσθηση αυτή γίνεται πάνω σε μια κυλινδρική επιφάνεια ο άξονας της οποίας θεωρείται παράλληλος προς την περιστροφή της κατολίσθησης σε δύο διαστάσεις. Στο συγκεκριμένο είδος κατολισθήσεων είναι ευδιάκριτα η οφρύς και ο πόδας της κατολίσθησης. Παράλληλα, το ανώτερο τμήμα της ολισθαίνουσας μάζας (όφρυς) κινείται προς τα κάτω ενώ στο κατώτερο τμήμα της (πόδας) παρατηρείται ανύψωση του εδάφους, ή όπως αλλιώς ονομάζεται γεωλογικά αναθόλωση.

Ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό των περιστροφικών κατολισθήσεων που τις διαχωρίζουν από τα άλλα είδη κατολισθήσεων είναι η ύπαρξη στρώσεων αντίστροφης κλίσης, φαινόμενο το οποίο παρατηρήθηκε και στην περίπτωση της Άρμου. Πιο συγκεκριμένα η κατολίσθηση στην Άρμου χαρακτηρίζεται ως παλαιοκατολίσθηση καθώς έχουν συμβεί μεγάλες μετακινήσεις του εδάφους στον γεωλογικό χρόνο. Το πρώτο τμήμα της κατολίσθησης καθώς μετακινούνταν προς τον πόδα του πρανούς έστριψε ανάποδα, με αποτέλεσμα και τα επόμενα τμήματα που ολίσθαιναν να ακολουθούν την ίδια πορεία.

Κατά τη μεταθετική κατολίσθηση, η επιφάνεια ολίσθησης είναι επίπεδη και η μετακίνηση γίνεται παράλληλα στην επιφάνεια ολίσθησης (Σχήμα 3.1.3.1 – Translational Slide). Η μάζα που ολισθαίνει μετακινείται προς τα κάτω και

εξωτερικά κατά μήκος μιας επίπεδης επιφάνειας χωρίς να δημιουργείται περιστροφή. Η ολισθαίνουσα μάζα που τελικά παίρνει τη μορφή μεταθετικής κατολίσθησης, μπορεί να αποτελείται από τμήματα περιστροφικών κατολισθήσεων που εν τέλει έχουν ενοποιηθεί και στην οποία υπάρχει η πιθανότητα να παρουσιαστούν τοπικά και εσωτερικές μετακινήσεις.

Ο συνδυασμός των δύο ειδών κατολίσθησης φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 3.2.1.



Σχήμα 3.2.1: Σκαρίφημα συνδυασμού περιστροφικών κατολισθήσεων επιμέρους τμημάτων σε μία ενιαία κατολισθαίνουσα μάζα κυρίως μεταθετικής μορφής.

Αναφορικά με την κατολίσθηση της Άρμου, πέρα από το γεγονός ότι είναι μία σύνθετη κατολίσθηση, απαραίτητο να αναφερθεί είναι ότι έχει επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από την παρουσία δύο ρεμάτων τα οποία και οριοθετούν την κατολίσθηση πλευρικά και παράλληλα με την διεύθυνση κίνησης.



Φωτογραφία 3.2.3: Απόσπασμα δορυφορικής φωτογραφίας από το πρόγραμμα GoogleEarth (ημερομηνία λήψης 2/8/2017) σε λοξή όψη από νότια της κατολίσθησης της Άρμου. (Ιωάννου, 2020)

Στην Φωτογραφία 3.2.3 διακρίνεται άποψη της κατολίσθησης της Άρμου από νοτιοανατολικά με επισήμανση της θέση των κατοικιών στην οφρύ και χαρακτηριστικής στραμμένης στρώσης. Η τελευταία παρουσιάζεται στην Φωτογραφία 3.2.4 από νότια, όπου διακρίνεται με σαφήνεια ο πόδας καθώς και στραμμένη στρώση της Φωτογραφίας 3.2.5 μαζί με άλλες παράλληλές της.



Φωτογραφία 3.2.4: Φωτογραφία της κατολίσθησης της Άρμου ληφθείσα από νοτιοανατολικά. Το μαύρο διακεκομμένο περίγραμμα δείχνει τα όρια της κατολίσθησης, το οριζόντιο κίτρινο, διακεκομμένο παραλληλόγραμμο την περιοχή των κατοικιών περί την οφρύ, και το στραμμένο κίτρινο, διακεκομμένο

παράλληλόγραμμο την χαρακτηριστική στραμμένη στρώση που δείχνεται σε μεγέθυνση στην Φωτογραφία 3.2.5 (Bardanis, 2022).



Φωτογραφία 3.2.5: Φωτογραφία της κατολίσθησης της Άρμου ληφθείσα από νότο. Το οριζόντιο κίτρινο, διακεκομμένο παράλληλόγραμμο οριοθετεί την περιοχή των κατοικιών περί την οφρύ, και το στραμμένο κίτρινο, διακεκομμένο παράλληλόγραμμο την χαρακτηριστική στραμμένη στρώση που δείχνεται από μακριά και στην Φωτογραφία 3.2.4 (Bardanis, 2022).

Συνοψίζοντας, η κατολίσθηση της Άρμου όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι συνδυασμός περιστροφικής και μεταθετικής κατολίσθησης. Αυτό παρατηρείται από την ύπαρξη στρώσεων ανάστροφης κλίσης που εντοπίζονται είτε ολόκληρες είτε με τη μορφή εναπομεινάντων υπολειμμάτων ύστερα από τη διάβρωση που προκάλεσαν τα ρέματα που οριοθετούν πλευρικά την κατολίσθηση. Η διάβρωση που έχει προκληθεί από την παρουσία των ρεμάτων, έχει επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό τη μορφή της κατολίσθησης.

3.3 Κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής

Ένα από τα σημαντικότερα αίτια για την πρόκληση μίας κατολίσθησης, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, είναι τα κλιματολογικά στοιχεία της περιοχής και η αλλαγή αυτών μέσα στα χρόνια.

Συγκεκριμένα για την Άρμου αλλά και για την ευρύτερη περιοχή της Πάφου, το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ζεστό και ξηρό για αρκετούς μήνες τον χρόνο, από τον Απρίλιο έως και τον Σεπτέμβρη. Τον υπόλοιπο χρόνο του έτους, το κλίμα χαρακτηρίζεται βροχερό, με ήπιο χειμώνα. Επίσης, κυριαρχεί η ηλιοφάνεια, η οποία είναι κατά μέσο όρο έντεκα ώρες την ημέρα τους καλοκαιρινούς μήνες και

πέντε ώρες τους χειμερινούς. Όσον αφορά τη θερμοκρασία, κατά τους θερινούς μήνες κυμαίνεται από 14-40° C, ενώ τους χειμερινούς είναι γύρω στους 10° C, με αποτέλεσμα το κλίμα να χαρακτηρίζεται ημίξηρο.

Όπως και στην Ελλάδα, έτσι και στην Κύπρο, οι βροχοπτώσεις που καταγράφονται τα τελευταία χρόνια έχουν μειωθεί ενώ έχει παρατηρηθεί άνοδος της θερμοκρασίας. Σύμφωνα με την Μετεωρολογική Υπηρεσία το 2010 θεωρήθηκε το θερμότερο έτος των τελευταίων δεκαετιών, και στο οποίο υπήρξε μεγάλο κύμα καύσωνα, ενώ τα προηγούμενα έτη λόγω της μεγάλης μείωσης των βροχοπτώσεων, η Κύπρος είχε χαρακτηριστεί από περίοδο ανομβρίας. Ύστερα, με την ξαφνική αύξηση των βροχοπτώσεων στις αρχές του 2009, μετά από μία παρατεταμένη περίοδο ξηρασίας, προκλήθηκαν σοβαρά προβλήματα στις συνθήκες ευστάθειας της περιοχής, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται οι πρώτες μετακινήσεις εδάφους στην περιοχή της Άρμου. Μετά την εμφάνιση ενός νέου κύματος βροχοπτώσεων (2018-2019), οι οποίες ξεπέρασαν κατά πολύ τον μέσο όρο βροχοπτώσεων των τελευταίων δεκαετιών, παρατηρήθηκε από επιτόπου επισκέψεις ερευνητών (Ιωάννου, 2020) ότι υπήρξε σημαντική εξέλιξη των μετακινήσεων του εδάφους της Άρμου. Στο Σχήμα 3.3.1 παρουσιάζεται η μεταβολή της βροχόπτωσης των τελευταίων είκοσι ετών σε σχέση με το μέσο ετήσιο ποσοστό βροχόπτωσης.



Σχήμα 3.3.1: Εξέλιξη της ετήσιας βροχόπτωσης κατ' απόλυτη τιμή (Ιωάννου 2020)

Στα χαρακτηριστικά αυτά του κλίματος πρέπει να προστεθεί και καθεαυτή η επιρροή των κατοικιών. Είναι χαρακτηριστικό το απόσπασμα της δορυφορικής φωτογραφίας στην Φωτογραφία 3.2.1. όπου φαίνονται τα χαρακτηριστικά «ξηρά» χρώματα του φυσικού τοπίου στην μάζα της κατολίσθησης, αλλά στην οφρύ κυριαρχεί το πράσινο ως αποτέλεσμα της δενδροφύτευσης και της άρδευσης που την συνοδεύει. Κατοικίες λοιπόν στην οφρύ μιας κατολίσθησης σημαίνουν πότισμα κήπων, άδειασμα και συντήρηση πισίνας, και προκειμένου για εκτός πόλεως δόμηση, όπως στην περίπτωση της Άρμου, αποχέτευση όχι προς κεντρικό δίκτυο αλλά σε δεξαμενές, οι οποίες στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι μη στεγανές. Ενώ λοιπόν το φυσικό περιβάλλον της περιοχής και το καθεστώς των υπογείων υδάτων, προ οικιστικής ανάπτυξης βρισκόταν σε μια ισορροπία μεταξύ χειμερινών βροχοπτώσεων και καλοκαιρινής ξηρασίας, μετά οικιστικής ανάπτυξης (με τουριστικό μάλιστα προσανατολισμό) η ξηρή περίοδος αυτής της προηγούμενης ισορροπίας διαταράσσεται από την τουριστική δραστηριότητα που φέρνει περισσότερη άρδευση και χρήση αποχέτευσης.

3.4 Επίλογος

Συνοψίζοντας, βάσει όσων προαναφέρθηκαν, η κατολίσθηση στην Άρμου της Πάφου αποτελεί μία γεωμετρικά σύνθετης μορφής κατολίσθηση, η οποία παραπέμπει σε συνδυασμό περιστροφικής και μεταθετικής ολίσθησης. Τα επιφανειακά στρώματα της περιοχής της Άρμου αποτελούνται από μπεντονιτικές αργίλους μεγάλης πλαστικότητας, ενώ παράλληλα η κατολίσθηση οριοθετείται πλευρικά από δύο ρέματα, τα οποία έχουν επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό τη μορφή της κατολίσθησης καθώς βοηθούν στην διάβρωση του εδάφους. Τέλος η μεταβολή των κλιματολογικών συνθηκών και ειδικότερα η απότομη αύξηση των βροχοπτώσεων στην περιοχή της Άρμου τα τελευταία χρόνια, έχει δημιουργήσει σοβαρά προβλήματα, επιδεινώνοντας τη μορφή της κατολίσθησης.

Κεφάλαιο 4

Εργαστηριακές δοκιμές στην μπεντονιτική άργιλο Άρμου

4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών σε επιφανειακά δείγματα μπεντονιτικής αργίλου από την περιοχή της κατολίσθησης της Άρμου στην επαρχία της Πάφου της Κύπρου. Σκοπός των δοκιμών και της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της φυσικής και μηχανικής συμπεριφοράς της μπεντονιτικής αργίλου υπό συνθήκες μερικού κορεσμού.

Οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο της εταιρείας ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε. και εκτελέστηκαν υπό την επίβλεψη του διευθυντή του εργαστηρίου της εταιρείας, κύριο Μ. Μπαρδάνη. Η μπεντονιτική άργιλος Άρμου προϋπήρχε στο εργαστήριο σε περίσσεια ως περίσσειμα παλαιότερου προγράμματος εργαστηριακών δοκιμών και υπήρχε σε επαρκείς ποσότητες ώστε να χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής. Η άργιλος αυτή είναι εξαιρετικά υψηλής πλαστικότητας και αποτελεί σπάνιο δείγμα εδαφικού υλικού με τέτοια χαρακτηριστικά, ευχερώς διαθέσιμο σε επαρκείς ποσότητες για να μελετηθεί στο πλαίσιο μίας διπλωματικής και για αυτό και επιλέχθηκε.

Τα παλαιότερα δείγματα της μπεντονιτικής αργίλου που είχαν μεταφερθεί στα εργαστήρια της ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε. είχαν έρθει υπό τη μορφή έξι δειγμάτων Δ1-Δ6, καθένα εκ των οποίων είχε ληφθεί από διαφορετικό σημείο της κατολίσθησης. Από τις εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν είχε παρατηρηθεί ότι τα έξι αυτά διαφορετικά δείγματα είχαν μικρές διαφορές στα εργαστηριακά αποτελέσματα και γι' αυτόν το λόγο αποφασίστηκε στα πλαίσια της διπλωματικής να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά ενός μίγματος δειγμάτων, αποτελούμενο από τα δείγματα Δ4 και Δ5 της μπεντονιτικής αργίλου. Στο μίγμα Δ4-Δ5 πραγματοποιήθηκε μία σειρά δοκιμών για τον

προσδιορισμό όχι μόνο των φυσικών χαρακτηριστικών του υλικού αλλά και για τη διατμητική αντοχή του υλικού υπό μερικό κορεσμό.

Παράλληλα, από επίσκεψη προσωπικού της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. στην περιοχή της Άρμου τον Ιούλιο του 2022 για την επιτόπου μελέτη της κατολίσθησης, μεταφέρθηκαν εκ νέου τέσσερα καινούρια δείγματα, Δ7, Δ8κ, Δ8μ, Δ8π. Στα δείγματα αυτά προσδιορίστηκαν μόνο τα φυσικά χαρακτηριστικά της μπετονιτικής αργίλου.

Στο απόσπασμα της δορυφορικής φωτογραφίας από το πρόγραμμα GoogleEarth που δείχνεται στην Φωτ. 4.1 παρουσιάζονται οι θέσεις λήψης των δειγμάτων μαζί με το περίγραμμα της κατολίσθησης.



Φωτογραφία 4.2.1: Απόσπασμα της δορυφορικής φωτογραφίας από το πρόγραμμα GoogleEarth που δείχνεται με τις θέσεις λήψης των δειγμάτων μαζί με το περίγραμμα της κατολίσθησης (από Ιωάννου 2020, με προσθήκη νέων σημείων δειγματοληψίας).

4.2 Δοκιμές προσδιορισμού φυσικών χαρακτηριστικών

Ο προσδιορισμός των φυσικών χαρακτηριστικών ενός υλικού (πλην υγρασίας και πυκνότητας) δεν επηρεάζεται από την ποιότητα του δείγματος, δηλαδή αν το υλικό είναι διαταραγμένο ή αδιατάρακτο. Σε αντίθετη περίπτωση, για τον προσδιορισμό των μηχανικών και των υδραυλικών ιδιοτήτων ενός υλικού τα αποτελέσματα είναι αντιπροσωπευτικά όταν το δείγμα είναι καλής ποιότητας.

Οι δοκιμές προσδιορισμού των φυσικών χαρακτηριστικών ενός δείγματος αποτελούν τις δοκιμές πλήρους κατάταξης του υλικού. Αυτές οι δοκιμές περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό του ποσοστού φυσικής υγρασίας, των ορίων Atterberg, του ανηγμένου ειδικού βάρους στερεών G_s και της κοκκομετρικής διαβάθμισης με κόσκινα και αραιόμετρο. Οι δοκιμές αυτές θα παρουσιαστούν στη συνέχεια της συγκεκριμένης ενότητας.

Αναφορικά με τα δείγματα της μπεντονιτικής αργίλου από το Δ1 έως το Δ6, οι δοκιμές είχαν πραγματοποιηθεί σε παλαιότερο πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών και στην παρούσα διπλωματική εργασία απλώς παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών. Δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στα νέα υλικά που μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, Δ7, Δ8κ, Δ8μ, Δ8π. Επίσης πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές προσδιορισμού των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας στο μίγμα των δειγμάτων Δ4-Δ5. Συνολικά τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών παρουσιάζονται στο τέλος της συγκεκριμένης ενότητας του κεφαλαίου.

4.2.1 Προσδιορισμός φυσικής υγρασίας εδάφους

Ο προσδιορισμός του ποσοστού υγρασίας πραγματοποιήθηκε κατά τα πρότυπα ΥΠΕΧΩΔΕ/ΚΕΔΕ Ε105-86/2 και ισούται με τον λόγο του βάρους του νερού W_w (απώλεια βάρους μετά την ξήρανση) προς το βάρος των ξηρών στερεών συστατικών του δείγματος W_s , όπως φαίνεται και από τον τύπο.

$$w\% = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100$$

Μικρή ποσότητα του δείγματος που λαμβάνεται τοποθετείται σε αριθμημένο υποδοχέα, ο οποίος πρωτίστως έχει ζυγιστεί, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται ζύγιση του υλικού με τον υποδοχέα. Μετά την ζύγιση το δοκίμιο ξηραίνεται σε φούρνο θερμοκρασίας 110° C για περίπου 24 ώρες ώστε να έχει σταθεροποιηθεί το βάρος του. Τέλος το δοκίμιο αφού ψυχθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (προστατευμένο εντός στεγανού δοχείου ώστε να μην προσροφά νερό από την υγρασία της ατμόσφαιρας όσο ψύχεται) ζυγίζεται εκ νέου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τις ζυγίσεις του δοκιμίου και την παραπάνω εξίσωση, προσδιορίζεται το ποσοστό υγρασίας του εδάφους.

Όπως προαναφέρθηκε και προηγουμένως στα δείγματα μπεντονιτικής αργίλου Άρμου που προϋπήρχαν στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ, ο προσδιορισμός του ποσοστού υγρασίας εντός του υλικού είχε προσδιοριστεί όταν μεταφέρθηκε το υλικό στο εργαστήριο. Σε ό,τι αφορά τα δείγματα Δ7, Δ8κ, Δ8μ, Δ8π, υπολογίστηκαν τα ποσοστά υγρασίας για το κάθε δείγμα ξεχωριστά και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο τέλος της συγκεκριμένης ενότητας.

4.2.2 Κοκκομετρική ανάλυση του εδαφικού υλικού

Η κοκκομετρική ανάλυση είναι η διαδικασία διαχωρισμού του υλικού σε κλάσματα, κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από κόκκους, των οποίων η διάμετρος ορίζεται εντός συγκεκριμένων ορίων. Είναι δηλαδή η ποσοτική κατάταξη των κόκκων με βάση το μέγεθός τους.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού πραγματοποιείται σε δύο στάδια, ανάλογα με τη φύση του υλικού. Πιο συγκεκριμένα, το χονδρόκοκκο μέρος του εδαφικού υλικού, αυτό δηλαδή που αποτελείται από άμμους και χάλικες και προέρχεται από τη μηχανική αποσάθρωση των πετρωμάτων εξετάζεται στη δοκιμή της κοκκομετρικής ανάλυσης με την χρήση κοσκίνων.

Αντίθετα, στο λεπτόκοκκο μέρος του υλικού, αυτό που προέρχεται από τη χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων και αποτελείται από ιλεις και αργίλους, πραγματοποιείται κοκκομετρική διαβάθμιση με αραιόμετρο. Από το συνολικό

αποτέλεσμα των δύο αυτών δοκιμών προκύπτει η πλήρης κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού.

4.2.2.1 Κοκκομετρική ανάλυση με χρήση κοσκίνων

Η συγκεκριμένη κατηγορία κοκκομετρικής ανάλυσης πραγματοποιείται κατά τα πρότυπα ΥΠΕΧΩΔΕ/ΚΕΔΕ Ε105-86/7 με τη χρήση κοσκίνων, τα οποία ποικίλουν ανάλογα με το μέγεθος ανοίγματός τους και την φύση του προς εξέταση υλικού.

Για την εξέταση ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος του εδαφικού υλικού χρησιμοποιείται η διαδικασία του τετραμερισμού, ή του διαχωριστή και λαμβάνεται η απαραίτητη ποσότητα δείγματος. Αφού εκτελεστεί η διαδικασία του τετραμερισμού, πραγματοποιείται η έκπλυση του δείγματος με σκοπό την αποκόλληση των λεπτόκοκκων από τα χονδρόκοκκα. Στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται σε σκεύος ξήρασης και θερμαίνεται σε φούρνο στους 110° C. Ύστερα πραγματοποιείται ζύγιση του ξηρού δείγματος και ξεκινάει η διαδικασία του κοσκινίσματος.

Το κοσκίνισμα μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη χρήση δονητικής κοσκίνισης σε ειδική συσκευή («κοσκινιέρα») είτε χειρωνακτικά όπως και συνέβη στο εργαστήριο. Η τοποθέτηση των κοσκίνων πραγματοποιείται από το κόσκινο με το μεγαλύτερο προς αυτό με το μικρότερο άνοιγμα οπής. Το υλικό που έχει συγκρατηθεί στο κόσκινο ζυγίζεται ενώ το διερχόμενο υλικό υποβάλλεται σε εκ νέου κοσκίνισμα, σε κόσκινο μικρότερης διαμέτρου οπής από το προηγούμενο. Αξιοσημείωτο να αναφερθεί είναι το γεγονός ότι η κοκκομετρική ανάλυση εφαρμόζεται σε υλικά που έχουν διάμετρο μεγαλύτερη από 0,075mm, το οποίο αποτελεί και τις διαστάσεις του κοσκίνου Νο 200, το οποίο είναι και το τελευταίο κόσκινο, και το όριο που διαχωρίζει την ιλύ από την άμμο κατά την κατάταξη υλικών κατά USCS.

Τέλος, σε δελτίο δεδομένων της δοκιμής καταγράφονται τα βάθη και εν συνεχεία τα ποσοστά του δείγματος που έχουν παραμείνει σε κάθε κόσκινο ώστε να σχεδιαστεί η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης και να βγουν τα αποτελέσματα και τα σχόλια για την καταλληλότητα του υλικού.

| Κόσκινο / Sieve | Διάμετρος / Opening (mm) |
|-----------------|--------------------------|
| 3" | 75.0 |
| 2" | 50.0 |
| 1 1/2" | 37.5 |
| 1" | 25.0 |
| 3/4" | 19.0 |
| 3/8" | 9.5 |
| No 4 | 4.750 |
| No 6 | 3.350 |
| No 8 | 2.360 |
| No 10 | 2.000 |
| No 16 | 1.180 |
| No 20 | 0.850 |
| No 30 | 0.600 |
| No 40 | 0.425 |
| No 50 | 0.300 |
| No 60 | 0.250 |
| No 80 | 0.180 |
| No 100 | 0.150 |
| No 140 | 0.106 |
| No 170 | 0.088 |
| No 200 | 0.075 |
| No 270 | 0.053 |



Φωτογραφία 4.2.2.1.1: Συρμάτινα κόσκινα κατά ASTM (Μπαρδάνης 2021)

Πίνακας 4.2.2.1.1: Πρότυπα μεγέθη πλήρους σειράς κοσκίνων κατά A.S.T.M.

Αντίστοιχα με τη δοκιμή προσδιορισμού του ποσοστού υγρασίας, τα αποτελέσματα των μετρήσεων των δειγμάτων 1-6 παρατίθενται στη συνέχεια της ενότητας. Για τα δείγμα Δ7, Δ8κ, Δ8μ, Δ8π, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.2.2.1.2.

| ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ / Grain Size Distribution Data | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------|
| | Κόσκινο Sieve | Διάμετρος Opening (mm) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) | |
| ΧΑΛΙΚΕΣ / GRAVEL | Χονδροί Coarse | 3" | 76.2 | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 33.9 | 100.0 | 2.6 | |
| | | 2" | 50.8 | 100.0 | | | 100.0 | | 100.0 | | |
| | Λεπτοί Fine | 1" | 25.4 | 100.0 | | 100.0 | 76.2 | | 97.4 | | |
| | | 3/4" | 19.1 | 100.0 | | 100.0 | 66.1 | | 97.4 | | |
| ΑΜΜΟΣ / SAND | Χονδρή Coarse | 1/2" | 12.7 | 100.0 | 0.0 | 0.1 | 38.3 | 43.6 | 97.4 | 0.2 | |
| | | 3/8" | 9.5 | 100.0 | | | 100.0 | | 30.2 | | 97.4 |
| | Μέση Medium | No 4 | 4.8 | 100.0 | | 99.9 | 22.5 | | 97.2 | | |
| | | Χονδρή Coarse | No 8 | 2.4 | | 99.7 | 99.8 | | 20.0 | | 97.1 |
| | | | No 10 | 1.9 | | 99.5 | 99.8 | | 19.5 | | 97.1 |
| | | Λεπτή Fine | No 20 | 0.840 | | 99.0 | 99.7 | | 18.0 | | 96.8 |
| No 40 | 0.417 | | 98.7 | 99.6 | 16.6 | 96.7 | | | | | |
| ΑΡΓΙΛΟΣ / CLAY | Λεπτή Fine | No 100 | 0.149 | 98.3 | 0.7 | 0.8 | 13.5 | 5.7 | 96.2 | 3.0 | |
| | | No 200 | 0.074 | 98.0 | | | 98.8 | | 10.9 | | 93.7 |
| ΙΛΥΣ / SILT | | | 41.1 | 98.0 | 32.0 | 98.8 | - | 10.9 | 52.5 | 93.7 | |
| ΑΡΓΙΛΟΣ / CLAY | | | 56.9 | | 66.8 | | - | | 41.2 | | |

Πίνακας 4.2.2.1.2: Κοκκομετρική διαβάθμιση υλικών από αριστερά προς δεξιά Δ7 - Δ8κ - Δ8μ - Δ8π

Όπως γίνεται αντιληπτό και από τον παραπάνω Πίνακα 4.2.2.1.2, το δείγμα Δ7 αποτελείται κατά 98% από άργιλο και ιλύ, το Δ8κ κατά 98.8% από άργιλο και ιλύ και το Δ8π κατά 93.7% από άργιλο και ιλύ. Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι τα τρία αυτά δείγματα είναι λεπτόκοκκα υλικά τα οποία διέρχονται σχεδόν πλήρως από το κόσκινο Νο200. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την απαραίτητη κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού και με τη χρήση του αραιόμετρου για την εικόνα της πλήρους κοκκομετρικής ταξινόμησης του υλικού. Αντίθετα το δείγμα Δ8μ, με βάση την παραπάνω φωτογραφία, αποτελείται κατά 43.6% από λεπτούς χάλικες και κατά 33.9% από χονδρούς χάλικες.

4.2.2.2 Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο

Η κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο προσδιορίζει το τμήμα της κοκκομετρικής καμπύλης του υλικού που αναφέρεται στο λεπτόκοκκο μέρος του υλικού. Η δοκιμή του αραιόμετρου πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο σε υλικά όπως τις αργίλους και τις ιλεις ή σε υλικά τα οποία θεωρούνται αμμώδη αλλά έχουν σημαντικό ποσοστό υλικού το οποίο κατά την κοκκομετρική διαβάθμιση με κόσκινα διέρχεται από το τελικό κόσκινο Νο200. Τέλος, η κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο πραγματοποιείται κατά τα πρότυπα ΥΠΕΧΩΔΕ/ΚΕΔΕ Ε105-86/9.

Κατά τη διαδικασία της ανάλυσης με αραιόμετρο, αρχικά είναι απαραίτητη η ξήρανση του υλικού για την αφαίρεση της υγρασίας του και την θρυμματίσή του, μόλις αυτό ψυχθεί σε θερμοκρασία δωματίου. Για την πραγμάτωση της δοκιμής είναι υποχρεωτικό το υλικό να έχει θρυμματιστεί τόσο ώστε να διέρχεται από το κόσκινο Νο4 με άνοιγμα οπής 4.75mm. Στη συνέχεια λαμβάνεται ποσότητα ξηρού υλικού ίση με 50gr, το οποίο τοποθετείται σε γυάλινο δοχείο με απιονισμένο νερό. Ύστερα, πλένεται το υλικό στο κόσκινο Νο200 (μόνο με απιονισμένο νερό) και κρατείται το διερχόμενο υλικό στο οποίο προστίθεται χημικό διάλυμα υδρικού. Μετά από 24 ώρες το διάλυμα τοποθετείται σε γυάλινο ογκομετρικό σωλήνα, ενώ με τη χρήση του αραιόμετρου (πυκνόμετρο) λαμβάνονται μετρήσεις για ένα 24ωρο. Τέλος με κατάλληλους υπολογισμούς, τα αποτελέσματα μετατρέπονται

σε ονομαστικά μεγέθη κόκκων και ποσοστά αναλογίας τους και συμπληρώνεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού.



Φωτογραφία 4.2.2.2.1: Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρα (Κοκκοβιάδης, 2022)

Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν κοκκομετρήσεις με χρήση αραιόμετρου στα δείγματα Δ7, Δ8κ και Δ8π ακολουθώντας την διαδικασία εκτέλεσης που αναλύθηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα, όπως διακρίνεται και από την Φωτογραφία 4.2.2.1.3 της προηγούμενης υποενότητας, το 98% του δείγματος Δ7 αποτελείται από άργιλο και ιλύ με ποσοστά 56.9% και 41.1% αντίστοιχα. Ομοίως για το δείγμα Δ8κ, του οποίου το 98.8% αποτελείται από 66.8% άργιλο και 32% ιλύ, ενώ για το δείγμα Δ8π με ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού 93.7%, το 41.2% αυτού αποτελείται από άργιλο και το 52.5% από ιλύ. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων δειγμάτων παρατίθενται στη συνέχεια της παρούσας ενότητας.

4.2.3 Όρια Atterberg

Ως όρια Atterberg καλούνται τα όρια των τιμών της υγρασίας των συνεκτικών εδαφών που αποτελούν τις περιοχές της ημιστερεής και της πλαστικής συμπεριφοράς τους. Ειδικότερα τα όρια Atterberg είναι τα εξής:

- Όριο Υδαρότητας: Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό κατά την χρονική στιγμή που το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στη ρευστή κατάσταση. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας, ονομάζεται Casagrande.
- Όριο Πλαστικότητας: Το ελάχιστο ποσοστό υγρασίας κατά το οποίο το έδαφος μεταβαίνει από την πλαστική στην ημιστερεή κατάσταση και μπορεί να πάρει τη μορφή ράβδου διαμέτρου 3 mm χωρίς να θραύεται (εκκινώντας από ράβδο διαμέτρου 6mm).
- Όριο Συρρίκνωσης: Το ποσοστό υγρασίας, με τη μείωση του οποίου δεν μειώνεται άλλο ο όγκος του εδάφους. Είναι το όριο μεταξύ στερεής και ημιστερεής κατάστασης.

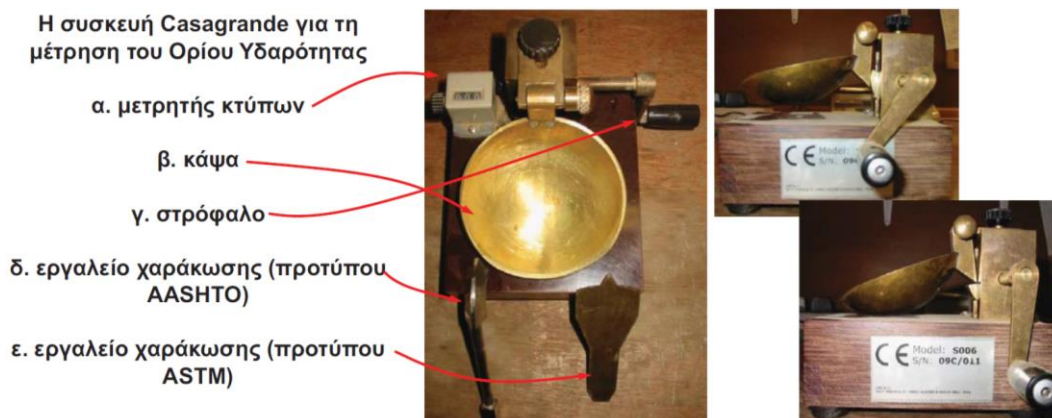
Για τη διαδικασία εκτέλεσης των δοκιμών Υδαρότητας και Πλαστικότητας απαραίτητη είναι η προετοιμασία των δειγμάτων, η οποία και στις δύο δοκιμές έγινε με παρόμοιο τρόπο. Οι δοκιμές για τον προσδιορισμό των ορίων πλαστικότητας και υδαρότητας πραγματοποιήθηκαν κατά τα πρότυπα ΥΠΕΧΩΔΕ/ΚΕΔΕ Ε105-86/5 & 6.

Για την προετοιμασία του δείγματος απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί το δείγμα να είναι διερχόμενο από το κόσκινο Νο40 (άνοιγμα οπής 0.425mm) καθώς επίσης να έχει ξηρανθεί σε φούρνο θερμοκρασίας 60° C για περίπου 24 ώρες (ξηρανση υπό 110° προκαλεί αλλοίωση των τιμών των ορίων Atterberg). Για το όριο υδαρότητας λαμβάνεται ποσότητα 100gr ξηρού υλικού ενώ για το όριο πλαστικότητας 20gr και τοποθετείται το δείγμα σε κάψα, στην οποία σταδιακά προστίθεται απιονισμένο νερό. Τέλος, αφού ανακατευτεί καλά το απιονισμένο νερό με το υλικό μέχρι να δημιουργηθεί παχύρρευστη εδαφική μάζα, τοποθετείται για μικρό έως σημαντικό (για πολύ πλαστικά υλικά) χρονικό διάστημα στον υγραντήρα ώστε η υγρασία που έχει προστεθεί να κατανεμηθεί ομοιόμορφα.

Με την πραγματοποίηση της παραπάνω διαδικασίας, έχει γίνει η απαραίτητη προετοιμασία που απαιτείται για την εκτέλεση της κάθε δοκιμής ξεχωριστά.

4.2.3.1 Όριο Υδαρότητας

Για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας, εφόσον έχει προηγηθεί το στάδιο της προετοιμασίας του, τοποθετείται ποσότητα του εδαφικού υλικού ομοιόμορφα στο κύπελο της συσκευής Casagrande με μέγιστο πάχος 1cm. Με τη διέλευση του ειδικού χαράκτη στην εδαφική μάζα, χαράσσεται ένα αυλάκι, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία καθαρή και κατάλληλων διαστάσεων χαραγή. Με τον μηχανισμό του οργάνου, το κύπελο υψώνεται μέχρι 1cm και στη συνέχεια προσκρούει στην κατώτερη επιφάνεια (κτύπος). Βάσει όσων προαναφέρθηκαν, ως όριο υδαρότητας ορίζεται το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας που απαιτείται για να κλείσει η χαραγή που δημιουργήθηκε στο μέσον του πυθμένα του κυπέλλου για μήκος 12.5mm (= μισή ίντσα). Στη συνέχεια συλλέγεται η περιοχή του υλικού κατά την οποία ενώθηκε η χαραγή και αφού ζυγιστεί, ξηραίνεται στο φούρνο, μέχρι να φύγει όλη η υγρασία και προσδιορίζεται το ξηρό βάρος.



Φωτογραφία 4.2.3.1.1: Συσκευή Casagrande (Μπαρδάνης, 2019)

Η δοκιμή υδαρότητας για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της υγρασίας πραγματοποιείται τουλάχιστον 3 φορές στο ίδιο δείγμα αλλά με διαφορετικές περιεκτικότητες υγρασίας και επομένως διαφορετικό αριθμό κτύπων τη φορά. Για μεγάλο ποσοστό υγρασίας μέσα στο δείγμα, ο αποδεκτός αριθμός κτύπων είναι 15-25, για μέσο ποσοστό 20-30, ενώ για μικρό ποσοστό είναι 25-35. Τα αποτελέσματα της δοκιμής απεικονίζονται σε διάγραμμα, με τα ποσοστά

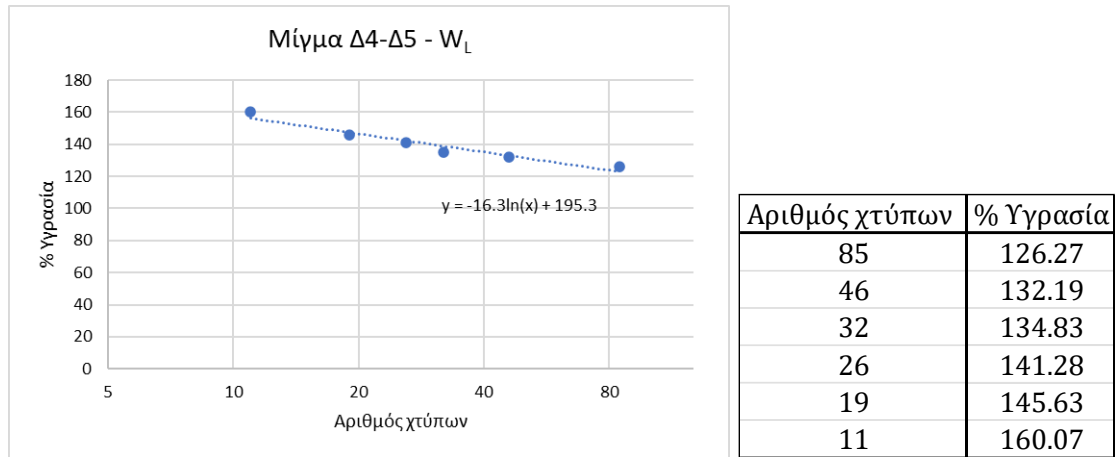
περιεχόμενης υγρασίας να βρίσκονται σε γραμμική κλίμακα ενώ οι αριθμοί των κτύπων σε λογαριθμική. Από την καμπύλη που δημιουργείται, το σημείο της υγρασίας που θα αντιστοιχεί στους 25 κτύπους, αποτελεί το όριο υδαρότητας.



Φωτογραφία 4.2.3.1.2: Αριστερά-Ομοιόμορφη τοποθέτηση του υλικού στην κάψα, Μέση-Διέλευση ειδικού χαρακτήρα από την εδαφική μάζα, Δεξιά-Κλείσιμο χαραγής 12,5mm (Μπαρδάνης, 2019).

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπολογίστηκαν τα όρια υδαρότητας του μίγματος Δ4-Δ5 και των δειγμάτων Δ7, Δ8κ, Δ8μ, Δ8π και παρουσιάζονται παρακάτω. Για τα 5 αυτά δείγματα ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω ενώ παρατίθενται όλα τα διαγράμματα για την εύρεση των ορίων υδαρότητας.

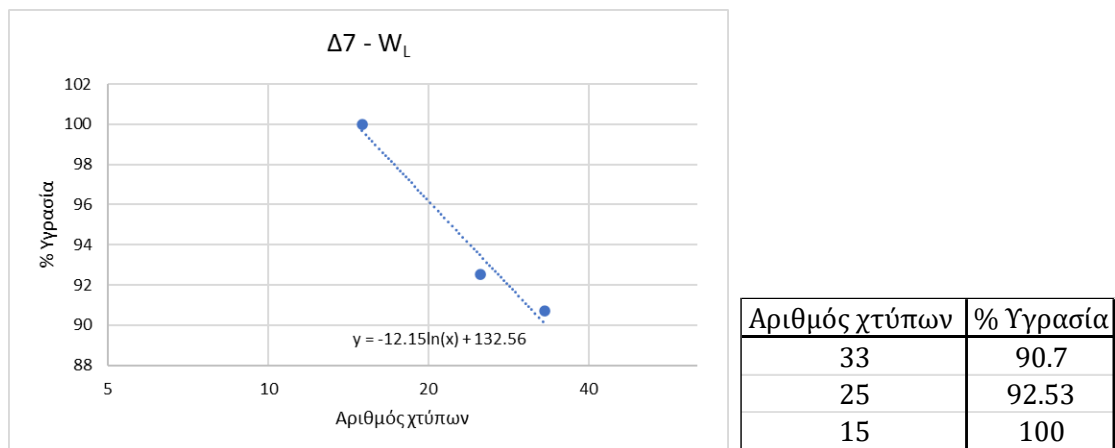
Αρχικά για το μίγμα Δ4-Δ5, η δοκιμή πραγματοποιήθηκε για 6 διαφορετικά ποσοστά υγρασίας ώστε, το όριο υδαρότητας να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ειδικότερα, βάσει των μετρήσεων από τη δοκιμή της υδαρότητας που παρουσιάζονται παρακάτω, δημιουργήθηκε το Σχήμα 4.2.3.2.1.



Σχήμα 4.2.3.2.1: Αποτελέσματα μίγματος Δ4-Δ5 για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας

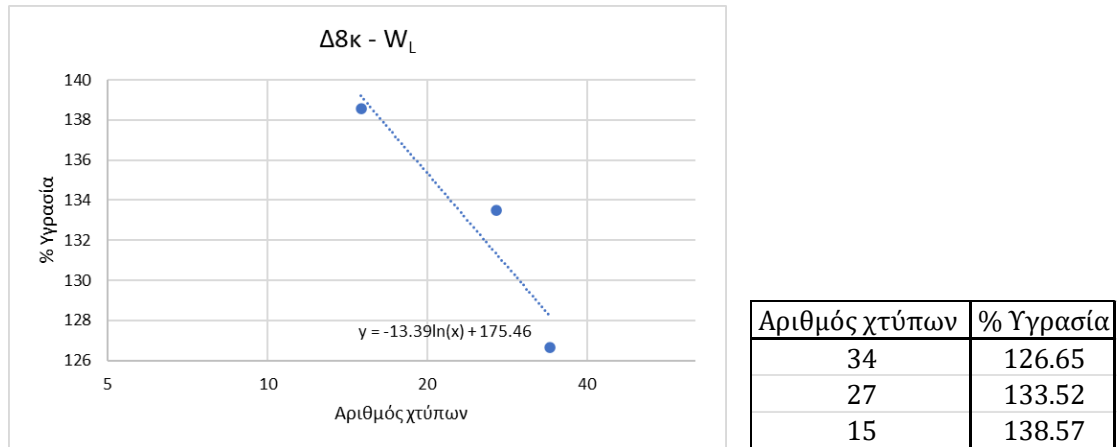
Όπως προαναφέρθηκε, από τον τύπο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.3.2.1 (προφανώς διαφορετικός για κάθε υλικό), για τιμή $x = 25$ κτύπους, προσδιορίζεται το όριο υδαρότητας, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση υπολογίστηκε $142.83 = 143\%$.

Στα υπόλοιπα τρία δείγματα, τα Δ7, Δ8κ, Δ8μ, Δ8π η δοκιμή πραγματοποιήθηκε 3 φορές και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια.



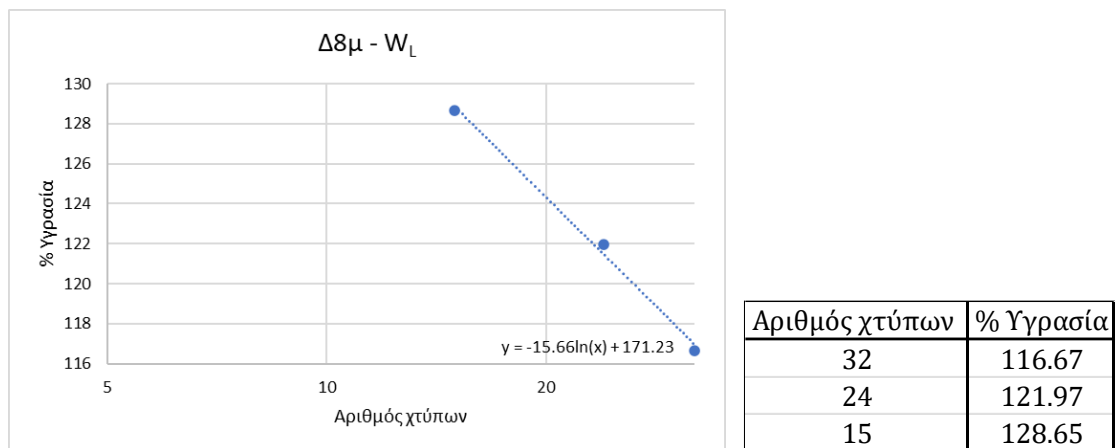
Σχήμα 4.2.3.2.2: Αποτελέσματα δείγματος Δ7 για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας

Από τον τύπο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.3.2.2, για τιμή $x = 25$ κτύπους, προσδιορίζεται το όριο υδαρότητας, το οποίο υπολογίστηκε $93.45 = 93.5\%$.



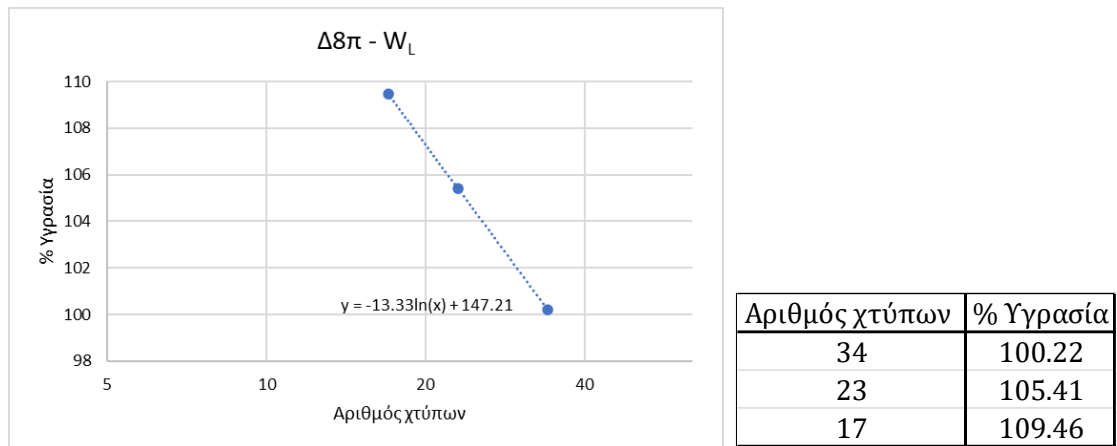
Σχήμα 4.2.3.2.3: Αποτελέσματα δείγματος Δ8κ για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας

Από τον τύπο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.3.2.3, για τιμή $x = 25$ κτύπους, προσδιορίζεται το όριο υδαρότητας, το οποίο υπολογίστηκε 132.4%.



Σχήμα 4.2.3.2.4: Αποτελέσματα δείγματος Δ8μ για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας

Απαραίτητο να αναφερθεί είναι ότι το δείγμα Δ8μ ήταν στρώση χονδρόκοκκου υλικού μεταξύ δύο λεπτόκοκκων αργιλικών στρώσεων. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg ήταν το διερχόμενο από το κόσκινο Νο200 κατά την έκπλυσή του. Από τον τύπο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.3.2.4, για τιμή $x = 25$ κτύπους, προσδιορίζεται το όριο υδαρότητας, το οποίο υπολογίστηκε $120.8 = 121\%$.



Σχήμα 4.2.3.2.5: Αποτελέσματα δείγματος Δ8π για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας

Από τον τύπο που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.3.2.5, για τιμή $x = 25$ κτύπους, προσδιορίζεται το όριο υδαρότητας, το οποίο υπολογίστηκε 104.3%.

4.2.3.2 Όριο Πλαστικότητας

Εφόσον έχει γίνει η απαραίτητη προεργασία του υλικού, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, λαμβάνεται τμήμα του δείγματος και μορφώνεται, χειρωνακτικά, σε σβώλο. Το υλικό με τη βοήθεια των δακτύλων και της γυάλινης επιφάνειας στην οποία τοποθετείται περιστρέφεται με στόχο τον σχηματισμό ενός κυλινδρικού ομοιόμορφης διαμέτρου 6mm. Στη συνέχεια αυτός στρέφεται με τα δάχτυλα επί της γυάλινης επιφάνειας μέχρι να αποκτήσει διάμετρο 3mm. Όταν η διάμετρος της ράβδου που δημιουργήθηκε γίνει 3mm χωρίς να έχει προκληθεί ρωγμάτωση στο υλικό, τότε το υλικό συμπιέζεται εκ νέου και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία.

Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται μέχρις ότου η σχηματιζόμενη ράβδος του υλικού ρωγματωθεί όταν η διάμετρος της είναι 3mm. Μόλις παρατηρηθεί θρυμματισμός του υλικού σε επιμέρους τμήματα, τοποθετείται το δείγμα σε δοχείο ξήρασης, ζυγίζεται, ξηραίνεται για μία ώρα και ξανά ζυγίζεται ώστε να προσδιοριστεί η περιεκτικότητά του σε νερό και επομένως το όριο πλαστικότητας.



Φωτογραφία 4.2.3.2.1: Μορφοποιημένο, ελαφρώς ρωγματωμένο υλικό διαμέτρου 3mm (Μπαρδάνης, 2019).

Για ακριβέστερα αποτελέσματα, η δοκιμή πραγματοποιείται στο ίδιο δείγμα συνολικά τρεις φορές και ο μέσος όρος των υγρασιών των τριών δοκιμών αποτελεί το όριο πλαστικότητας του υλικού. Τα τελικά αποτελέσματα των ορίων πλαστικότητας αναγράφονται σε κοινό έντυπο με αυτό των ορίων υδαρότητας, και από τη διαφορά τους υπολογίζεται ο δείκτης πλαστικότητας του εδαφικού υλικού.

Αναφορικά με τις δοκιμές προσδιορισμού των ορίων πλαστικότητας στα δείγματα τις Άρμου, τα συνολικά αποτελέσματα αναφέρονται στη συνέχεια της ενότητας. Τα αποτελέσματα του μίγματος Δ4-Δ5 και των δειγμάτων Δ7, Δ8κ, Δ8μ, Δ8π παρουσιάζονται παρακάτω.

Όπως και στον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας, για το μίγμα Δ4-Δ5, η δοκιμή πραγματοποιήθηκε 6 φορές ώστε, το όριο υδαρότητας να προσδιοριστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια. Από τα έξι αποτελέσματα λήφθηκε ο μέσος όρος αυτών, ο οποίος αποτελεί την τιμή του ορίου πλαστικότητας και ισούται με 35%.

Ο προσδιορισμός του ορίου πλαστικότητας για τα δείγματα Δ7, Δ8κ, Δ8μ, Δ8π υπολογίστηκε από το μέσο όρο των τριών αποτελεσμάτων κάθε δείγματος. Πιο συγκεκριμένα, το όριο πλαστικότητας για το Δ7 ισούται με 30.4%, για το Δ8κ 40.8% = 41%, για το Δ8μ 29.5% ενώ για το Δ8π 32.4%.

Γνωρίζοντας τις τιμές των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας κάθε δείγματος, υπολογίζεται και ο δείκτης πλαστικότητας, ο οποίος αποτελεί τη διαφορά του ορίου πλαστικότητας από το όριο υδαρότητας. Βάσει αυτού ο δείκτης πλαστικότητας (I_p) του μίγματος Δ4-Δ5 είναι $I_p = 143\% - 35\% = 108\%$. Με το ίδιο σκεπτικό υπολογίστηκε ο δείκτης πλαστικότητας 63.1% = 63% για το Δ7, 91.6% για το Δ8κ, 91.3% για το Δ8μ και 71.9% = 72% για το Δ8π.

4.2.4 Δοκιμή Γραμμικής Συρρίκνωσης

Για την εκτέλεση της δοκιμής στο προς επεξεργασίας υλικό προστίθεται απιονισμένο νερό, ποσότητας ανάλογης ώστε η υγρασία του υλικού να είναι μεγαλύτερη από την τιμή του ορίου υδαρότητάς του. Το υλικό τοποθετείται σε τρεις ειδικές μεταλλικές φόρμες όπως φαίνονται στη φωτογραφία 4.2.4.1, αφού πρωτίστως όλη η επιφάνεια των φορμών έχει καθαριστεί και επαλειφθεί προσεκτικά με βαζελίνη ώστε να μην δημιουργούνται τριβές με τη μεταλλική επιφάνεια και επομένως να μην επηρεάζεται η μεταβολή του όγκου του υλικού.



Φωτογραφία 4.2.4.1: Μεταλλικές φόρμες γραμμικής συρρίκνωσης

Τα δοκίμια ξηραίνονται για 24 ώρες περίπου στην ατμόσφαιρα, στη συνέχεια σε φούρνο θερμοκρασίας 60° C και τέλος σε φούρνο θερμοκρασίας 110° C. Τελικά, μετρείται το αρχικό μήκος του υλικού, το οποίο ισούται με το μήκος της μεταλλικής φόρμας, όπως επίσης και το τελικό μήκος της ράβδου. Με τους απαραίτητους υπολογισμούς προσδιορίζεται το ποσοστό γραμμικής συρρίκνωσης του υλικού το οποίο είναι ενδεικτικό της διογκωσιμότητάς του. Πιο συγκεκριμένα εδαφικά υλικά που έχουν ποσοστό γραμμικής συρρίκνωσης μικρότερο του 5% χαρακτηρίζονται ως υλικά μικρής διογκωσιμότητας. Αντίστοιχα για ποσοστό γραμμικής συρρίκνωσης μεταξύ 5% και 10% το εδαφικό είναι μέσης διογκωσιμότητας, ενώ για ποσοστό μεγαλύτερο του 10% το υλικό θεωρείται μεγάλης διογκωσιμότητας.

Αναφορικά με το προς εξέταση υλικό της παρούσας διπλωματικής εργασίας, την μπεντονιτική άργιλο Άρμου, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή της γραμμικής συρρίκνωσης για το μίγμα Δ4-Δ5. Πιο συγκεκριμένα στο μίγμα Δ4-Δ5 προστέθηκε υγρασία μεγαλύτερη του ορίου υδαρότητας, η οποία υπολογίστηκε ίση με 158,8%. Στη συνέχεια ακολουθήθηκαν τα προαναφερθέντα βήματα για τη διεξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τελικά ο μέσος όρος του ποσοστού της γραμμικής συρρίκνωσης προσδιορίστηκε ίσος με 28.1% = 28%, όπως φαίνεται και από τον παρακάτω Πίνακα 4.2.4.1, γεγονός που χαρακτηρίζει το υλικό ως μεγάλης διογκωσιμότητας.

| Μήτρα/Mould: | Αρχικό ποσοστό υγρασίας / Initial moisture content (%): | Μήκος μήτρας/Mould length: | Ρωγμές/Cracks: | Αν ναι, πόσες/If yes, how many: | Κύρτωση/Curling: | Εάν εμφανίστηκε κύρτωση / If curling occurred: | | Μήκος δοκιμίου μετά τη συρρίκνωση/Length of sample after shrinkage (mm): | Ποσοστό γραμμικής συρρίκνωσης/Linear shrinkage (%) |
|----------------------------------|---|----------------------------|----------------|---------------------------------|------------------|--|---------------------------------------|--|--|
| | | | | | | Μήκος πάνω πλευράς/Upper side length: | Μήκος κάτω πλευράς/Lower side length: | | |
| 1 | 158,8 | 250,0 | OXI | - | ΝΑΙ | 178,0 | 185,0 | 181,5 | 27,4 |
| 2 | 158,8 | 250,0 | OXI | - | ΝΑΙ | 175,0 | 185,0 | 180,0 | 28,0 |
| 3 | 158,8 | 250,0 | OXI | - | ΝΑΙ | 174,0 | 182,0 | 178,0 | 28,8 |
| Μέσος όρος / Average: (%) | | | | | | | | | 28,1 |

Πίνακας 4.2.4.1: Πίνακας αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό της γραμμικής συρρίκνωσης της Άρμου



Φωτογραφία 4.2.4.2: Τοποθέτηση του υγρού μίγματος στις φόρμες γραμμικής συρρίκνωσης



Φωτογραφία 4.2.4.3: Μπεντονιτική άργιλος Άρμου μετά από 24 ώρες ξήρανσης στην ατμόσφαιρα

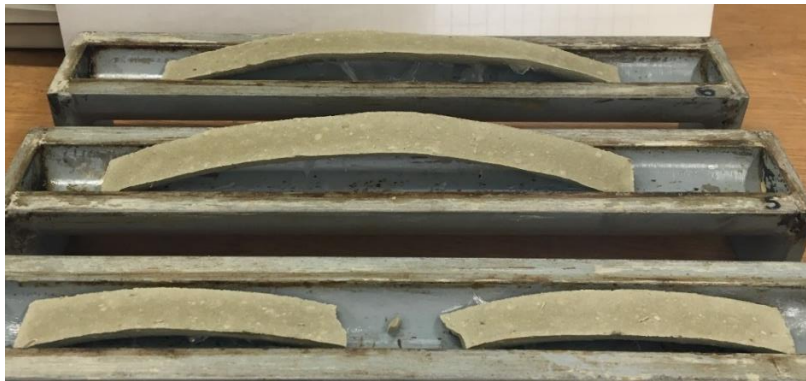


Φωτογραφία 4.2.4.4: Μπεντονιτική άργιλος Άρμου μετά από 24 ώρες ξήρανσης σε φούρνο 60° C



Φωτογραφία 4.2.4.5: Μπεντονιτική άργιλος Άρμου με 24 ώρες ξήρανσης σε φούρνο θερμοκρασίας 110° C

Πολύ πλαστικά υλικά παρατηρείται σε αυτή τη δοκιμή ότι εμφανίζουν χαρακτηριστική κύρτωση. Βάσει των παραπάνω φωτογραφιών παρατηρείται ότι το υλικό συρρικνώνεται μέχρι ένα βαθμό με την ξήρανση του στην ατμόσφαιρα και πολύ περισσότερο στον φούρνο θερμοκρασίας 60° C. Μετά την ξήρανσή του στον φούρνο θερμοκρασίας 110° C παρατηρείται ότι το υλικό, στις μεταλλικές φόρμες 5 και 6, καμπυλώνει στο κέντρο του αποκτώντας τη μορφή που αναμενόταν για την πλαστικότητα του. Το υλικό της φόρμας 4 ενώ από το στάδιο της ξήρανσης στην ατμόσφαιρα έχει σπάσει στο κέντρο του, μετά το στάδιο της ξήρανσης στους 110° C φαίνεται κάθε τμήμα του υλικού να έχει καμπυλώσει (Φωτογραφίες 4.2.4.6 & 4.2.4.7).



Φωτογραφία 4.2.4.6: Καμπύλωση των δοκιμών της Άρμου μετά την ξήρανση στους 110° C



Φωτογραφία 4.2.4.7: Καμπύλωση δοκιμίου Άρμου μετά την ξήρανση στους 110° C

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η δοκιμή γραμμικής συρρίκνωσης που εκτελέστηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε κατά

το αυστραλιανό πρότυπο AS 1289.C4.1-1977. Στο πρότυπο αυτό χρησιμοποιούνται μήτρες μήκους 250mm (όμοιες μήτρες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο) αντί των μητρών μήκους 140 mm που χρησιμοποιούνται στο βρετανικό πρότυπο BS1377. Συνεπώς το αυστραλιανό πρότυπο καθιστά το αποτέλεσμα της δοκιμής πιο αξιόπιστο και επιτρέπει και την διαπίστωση τάσεων κύρτωσης των δοκιμών με μεγαλύτερη ευχέρεια, οι οποίες είναι δηλωτικές ακόμα μεγαλύτερης διογκωσιμότητας των υλικών.

4.2.5 Δοκιμή προσδιορισμού ανηγμένου ειδικού βάρους στερεής φάσης G_s

Το ειδικό ή φαινόμενο βάρος υπολογίζεται από τον λόγο του βάρους ενός υλικού προς τον όγκο του υλικού αυτού. Το εδαφικό υλικό είναι πολυφασικό υλικό καθώς μπορεί να έχει και στερεή και υγρή και αέρια φάση.

Αναφορικά με την στερεά φάση του υλικού, ο λόγος του βάρους της στερεής φάσης προς τον όγκο που καταλαμβάνει το σύνολο του εδάφους αποτελεί το ξηρό ειδικό βάρος γ_d . Ο λόγος του βάρους της στερεάς φάσης προς τον όγκο που καταλαμβάνει μόνο η στερεά φάση αποτελεί το ειδικό βάρος της στερεάς φάσης γ_s . Ο λόγος του ειδικού βάρους της στερεάς φάσης (συμβολίζεται γ_s) προς το ειδικό βάρος του νερού (συμβολίζεται γ_w) αποτελεί ένα αδιάστατο μέγεθος το οποίο συμβολίζεται με G_s και ονομάζεται ανηγμένο ειδικό βάρος στερεάς φάσης. Η πειραματική διαδικασία για τον υπολογισμό της τιμής του G_s περιγράφεται στη συνέχεια της ενότητας.

Αρχικά λαμβάνεται ποσότητα 70gr ξηρού εδαφικού υλικού, διερχόμενου από το κόσκινο Νο4. Το υλικό μοιράζεται σε ένα ζεύγος ογκομετρικών φιαλών όγκου 250ml από 35gr στην κάθε μία, αφού έχει ζυγιστεί το βάρος κάθε φιάλης. Στη συνέχεια προστίθεται απιονισμένο νερό μέσα σε κάθε φιάλη μέχρις ότου καλυφθεί πλήρως το υλικό και επομένως να κορεστεί πλήρως. Οι δύο φιάλες τοποθετούνται σε ειδικό θάλαμο και με τη μέθοδο της απαέρωσης με αντλία κενού, αφαιρείται όλη η ποσότητα του αέρα που υπάρχει μέσα στο υλικό. Αφού πραγματοποιηθεί η διαδικασία αφαίρεσης του αέρα από το υλικό, οι

ογκομετρικές φιάλες γεμίζονται με απιονισμένο νερό μέχρι την ειδική χαραγή, ζυγίζονται και μετρείται η θερμοκρασία τους. Γνωρίζοντας την πυκνότητα του νερού για κάθε θερμοκρασία και με τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων υπολογίζεται το ειδικό βάρος G_s του εδαφικού υλικού. Τέλος απαραίτητο να αναφερθεί είναι ότι η δοκιμή του G_s πραγματοποιείται κατά τα πρότυπα ΥΠΕΧΩΔΕ/ΚΕΔΕ Ε105-86/4 στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ.

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε στην περίπτωση του υλικού της Άρμου. Πιο συγκεκριμένα ο προσδιορισμός του ειδικού βάρους G_s των δειγμάτων Δ1 – Δ6 είχε γίνει σε παλαιότερο πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ, τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στη συνέχεια. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής υπολογίστηκε το G_s για τα δείγματα Δ7 και Δ8. Αναφορικά με το μίγμα Δ4-Δ5, δεν θεωρήθηκε απαραίτητο να υπολογιστεί το ειδικό βάρος καθώς η τιμή του G_s για το Δ4 και η τιμή του Δ5 είναι ίδιες και ίσες 2.47. Επομένως και για το μίγμα Δ4-Δ5 η τιμή $G_s = 2.47$.



Φωτογραφία 4.2.5.1: Θάλαμος απαέρωσης συνδεδεμένη με αντλία κενού για τον υπολογισμό του G_s

Προσδιορισμός ειδικού βάρους G_s , έγινε και στα δείγματα Δ7, Δ8κ και Δ8π σύμφωνα με τη διαδικασία εκτέλεσης που περιγράφεται. Ειδικότερα το δείγμα Δ7 είχε τιμή $G_s = 2.54$, ενώ τα δείγματα Δ8κ και Δ8π είχαν τιμές 2.64 και 2.66 αντίστοιχα. Ήταν αναμενόμενο οι τιμές G_s των Δ8κ και Δ8π να είναι αρκετά κοντινές αφού είναι

δείγματα τα οποία ελήφθησαν από πολύ κοντινά σημεία τα οποία, στη φύση, διαχωρίζονται από ένα λεπτό στρώμα χονδρόκοκκου υλικού, το δείγμα Δ8μ.



Φωτογραφία 4.2.5.2: Διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής G_s για τα δείγματα Δ7, Δ8κ, Δ8π (φιάλες εντός θαλάμου απαέρωσης)

4.2.6 Κατάταξη υλικού σύμφωνα με την ταξινόμηση εδαφών

Βάσει των προαναφερθεισών δοκιμών και των αποτελεσμάτων αυτών, το εδαφικό υλικό κατατάσσεται σε ένα από τα πολυάριθμα συστήματα κατάταξης εκ των οποίων είναι:

- Ταξινόμηση εδαφών κατά Casagrande
- Ενιαίο σύστημα ταξινόμησης εδαφών (Unified Soil Classification System, USCS)
- Ταξινόμηση κατά AASHO (American Association of State Highway Officials)
- Γαλλική ταξινόμηση FOCS-64

Στην παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ, το σύστημα κατάταξης εδαφών που χρησιμοποιείται είναι το «Ενοποιημένο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών», δηλαδή το USCS, το οποίο θεωρείται διεθνώς από τα πιο διαδεδομένα συστήματα κατάταξης, σε συνδυασμό με το σύστημα κατάταξης κατά Casagrande.

Αναφορικά με την μπεντονιτική άργιλο της Άρμου, σε σχέση με τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε προηγούμενο πρόγραμμα από το εργαστηριακό προσωπικό αλλά και αυτών που εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής, προσδιορίστηκε ο χαρακτηρισμός τους ως προς το σύστημα κατάταξης USCS και Casagrande.

Συγκεκριμένα, βάσει των κοκκομετρικών τους ταξινομήσεων και των ορίων Atterberg, τα υλικά Δ1 – Δ5 όπως επίσης και τα Δ7, Δ8κ και Δ8π χαρακτηρίστηκαν ως άργιλοι υψηλής πλαστικότητας (CH). Πάνω από το 90% του υλικού των συγκεκριμένων δειγμάτων, στη δοκιμή της κοκκομέτρησης με κόσκινα, διερχόταν από το κόσκινο Νο200 (λεπτόκοκκα υλικά) και οι τιμές των ορίων υδαρότητας ήταν υπερβολικά υψηλές, κοντά στο 100%. Σε ό,τι αφορά το Δ6 δείγμα, αυτό χαρακτηρίστηκε ως ιλυώδης άμμος (SM), επειδή από την κοκκομετρική ταξινόμηση, περίπου το 50% του υλικού αποτελούνταν από αργίλους ενώ το άλλο 50% από άμμο διαφόρων κλασμάτων. Τέλος το δείγμα Δ8μ, το οποίο στην περιοχή της κατολίθησης αποτελεί μία λεπτή στρώση χονδρόκοκκου υλικού μεταξύ δύο λεπτόκοκκων υψηλής πλαστικότητας (Δ8κ και Δ8π), χαρακτηρίστηκε ως αργιλώδεις χάλικες – χάλικες ακανόνιστης κοκκομετρίας (GP-GC). Πράγματι, το συγκεκριμένο υλικό είχε την ιδιαιτερότητα να είναι χονδρόκοκκο, όπως παρουσιάζεται και στην κοκκομετρική του διαβάθμιση αλλά ταυτόχρονα το όριο υδαρότητάς τους να είναι τόσο υψηλό (121%), το οποίο να παραπέμπει σε αργιλικό υλικό υψηλής πλαστικότητας.


Τα συνολικά αποτελέσματα των δοκιμών όλων των δειγμάτων παρουσιάζονται στην ενότητα 4.2.7 μαζί με τα έντυπα των αποτελεσμάτων τους.

4.2.7 Σύνοψη Φυσικών χαρακτηριστικών δειγμάτων μπεντονιτικής αργίλου Άρμου

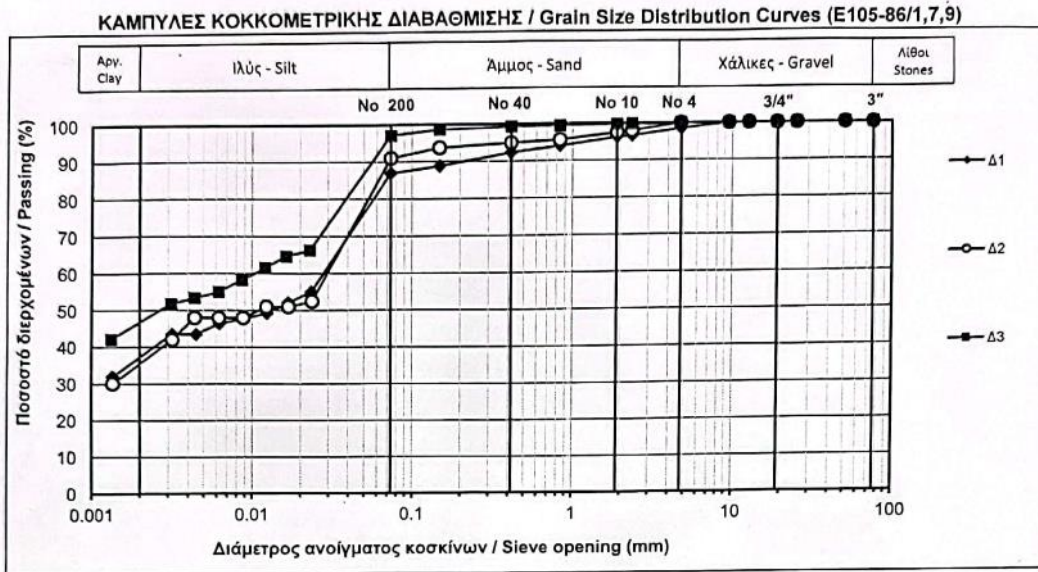
Με βάση όσα έχουν προαναφερθεί στην ενότητα 4.2, σχετικά με τις δοκιμές προσδιορισμού φυσικών χαρακτηριστικών και των αποτελεσμάτων των δοκιμών που παρουσιάζονται σε συγκεντρωτικά έντυπα παρακάτω προκύπτουν συμπεράσματα τα οποία θα αναλυθούν στην συνέχεια.

Από τα έντυπα αποτελεσμάτων που παρατίθενται, παρατηρείται ότι όλα τα δείγματα της Άρμου, εκτός από τα Δ6 και Δ8μ, χαρακτηρίζονται ως άργιλοι υψηλής πλαστικότητας, το οποίο είναι εμφανές αφενός από την κοκκομετρική τους διαβάθμιση και αφετέρου από τις υπερβολικά υψηλές τιμές των ορίων υδαρότητας και των δεικτών πλαστικότητας που διαθέτουν. Σε ό,τι αφορά τα δείγματα Δ6 και Δ8μ τα οποία ανήκουν σε κατηγορίες υλικών ιλύωδεις άμμοι και αργιλώδεις χάλικες αντίστοιχα, διαθέτουν και αυτά πολύ υψηλές τιμές ορίων υδαρότητας. Επομένως, τα Δ6 και Δ8μ, παρά του γεγονότος ότι ανήκουν στην κατηγορία των χονδρόκοκκων υλικών διαθέτουν συμπεριφορά και χαρακτηριστικά λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών.

Για το μίγμα Δ4-Δ5 δεν θεωρήθηκε αναγκαίο να γίνει πλήρης κατάταξη του μίγματος, καθώς τα δύο δείγματα διέθεταν αρκετές ομοιότητες στα αποτελέσματα των δοκιμών τους (π.χ. προσδιορισμός ειδικού βάρους G_s). Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο μίγμα Δ4-Δ5, για τον προσδιορισμό φυσικών χαρακτηριστικών, ήταν οι δοκιμές του ποσοστού υγρασίας και των ορίων Atterberg, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στις σχετικές ενότητες.

| | |
|--|---|
|  ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε. Υπερείδου 9, 105 58 Αθήνα, Τηλ. 2103222050 EDAFOS Consulting Engineers S.A. Υπερείδου 9, 105 58 Athens, Tel. 2103222050 | Εκτέλεση δοκιμών: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. Θεραπειών 2, 104 44 Αθήνα, Τηλ. 2105149020, lab@edafos.gr Tests performed by: EDAFOS S.A. Laboratory 2 Therapion st., 104 44 Athens, Tel. 2105149020, lab@edafos.gr |
|--|---|

Έργο/ Project: **ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΑΡΜΟΥ**



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ / Classification Tests Results (E105-86/1,2,3,4,5,6)

| Δείγμα/Sample: | Δ1 | Δ2 | Δ3 | - |
|---|-----------|-----------|-----------|---|
| Ποσ. Υγρασίας / Water content (%) | 26.2 | 54.9 | 45.1 | - |
| Όριο υδαρότητας / Liquid limit (%) | 126.6 | 113.3 | 134.8 | - |
| Όριο πλαστικότητας / Plastic limit (%) | 32.8 | 28.0 | 35.0 | - |
| Δείκτης πλαστικότητας / Plasticity Index | 93.8 | 85.3 | 99.8 | - |
| Ξηρό φαινόμενο βάρος / Dry unit weight (kN/m ³) | - | - | - | - |
| Ειδικό βάρος στερεών / Specific gravity (-) | 2.52 | 2.55 | 2.52 | - |
| Ποσ. Οργανικών / Organic content (%) | 6.3 | 4.9 | 6.6 | - |
| Κατάταξη / Classification (USCS) | CH | CH | CH | - |

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ / Grain Size Distribution Data

| | | Κόσκινο Sieve | Διάμετρος Opening (mm) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) |
|-----------------------|----------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| ΧΑΛΙΚΕΣ / GRAVEL | Χονδροί Coarse | 3" | 76.2 | 100.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | - | - |
| | | 2" | 50.8 | 100.0 | | 100.0 | | 100.0 | | - | - |
| | | 1" | 25.4 | 100.0 | | 100.0 | | 100.0 | | - | - |
| | | 3/4" | 19.1 | 100.0 | | 100.0 | | 100.0 | | - | - |
| | | 1/2" | 12.7 | 100.0 | | 100.0 | | 100.0 | | - | - |
| Λεπτοί Fine | 3/8" | 9.5 | 100.0 | 1.6 | 100.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | - | - | |
| | No 4 | 4.8 | 98.4 | | 100.0 | | 100.0 | | - | - | |
| | | | | | | | | | | | |
| ΑΜΜΟΣ / SAND | Χονδρή Coarse | No 8 | 2.4 | 96.6 | 2.2 | 97.9 | 2.5 | 99.7 | 0.3 | - | - |
| | | No 10 | 1.9 | 96.3 | | 97.5 | | 99.7 | | - | - |
| | Μέση Medium | No 20 | 0.840 | 94.0 | 4.0 | 95.5 | 2.6 | 99.4 | 0.4 | - | - |
| | | No 40 | 0.417 | 92.3 | | 94.9 | | 99.2 | | - | - |
| | Λεπτή Fine | No 100 | 0.149 | 88.8 | 5.3 | 93.6 | 3.9 | 98.6 | 2.2 | - | - |
| No 200 | 0.074 | 86.9 | 90.9 | 97.0 | | - | | - | | | |
| ΙΛΥΣ / SILT | | | | 50.9 | 86.9 | 56.7 | 90.9 | 51.4 | 97.0 | - | - |
| ΑΡΓΙΛΟΣ / CLAY | | | | 36.0 | | 34.2 | | 45.7 | | - | - |

Εκτέλεση δοκιμής: Επεξεργασία δεδομένων: Έλεγχος αποτελεσμάτων: Το εργαστήριο εποπτεύεται από το ΚΕΔΕ

Χ. Βαγενάς
Μ. Τσουκαλάδακης

Μ. Σαρίδου

Μ. Μπαρδάνης

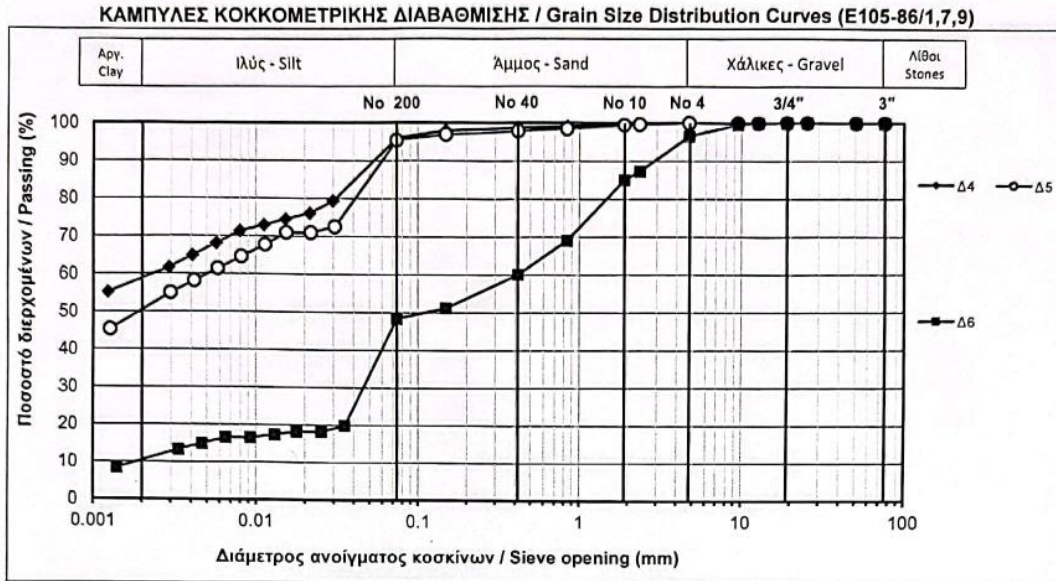
Εργ. Αρ.
Lab No. 018/2019/300-302

Σελ. / P. 1

Σχήμα 4.2.7.1: Έντυπο αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων μπεντονιτικής αργίλου Αρμου Δ1, Δ2 και Δ3

| | | |
|---|--|---|
|  | ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε. Υπερείδου 9, 105 58 Αθήνα, Τηλ. 2103222050 | Εκτέλεση δοκιμών: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. Θεραπειών 2, 104 44 Αθήνα, Τηλ. 2105149020, lab@edafos.gr |
| | EDAFOS Consulting Engineers S.A. Υπερείδου 9, 105 58 Athens, Tel. 2103222050 | Tests performed by: EDAFOS S.A. Laboratory 2 Therapion st., 104 44 Athens, Tel. 2105149020, lab@edafos.gr |

Έργο/ Project: **ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΗ ΑΡΜΟΥ**



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ / Classification Tests Results (E105-86/1,2,3,4,5,6)

| | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|---|
| Βάθος / Depth (m): | Δ4 | Δ5 | Δ6 | - |
| Ποσ. Υγρασίας / Water content (%) | 9.1 | 11.8 | 14.4 | - |
| Όριο υδαρότητας / Liquid limit (%) | 120.6 | 122.9 | 82.7 | - |
| Όριο πλαστικότητας / Plastic limit (%) | 41.0 | 43.7 | 38.3 | - |
| Δείκτης πλαστικότητας / Plasticity index | 79.6 | 79.2 | 44.4 | - |
| Ξηρό φαινόμενο βάρος / Dry unit weight (kN/m ³) | - | - | - | - |
| Ειδικό βάρος στερεών / Specific gravity (-) | 2.47 | 2.47 | 2.45 | - |
| Ποσ. Οργανικών / Organic content (%) | - | 7.6 | 4.1 | - |
| Κατάταξη / Classification (USCS) | CH | CH | SM | - |


ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ / Grain Size Distribution Data

| | | Κόσκινο Sieve | Διάμετρος Opening (mm) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) |
|------------------|----------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| ΧΑΛΙΚΕΣ / GRAVEL | Χονδροί Coarse | 3" | 76.2 | 100.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | - | - |
| | | 2" | 50.8 | 100.0 | | 100.0 | | 100.0 | | - | - |
| | | 1" | 25.4 | 100.0 | | 100.0 | | 100.0 | | - | - |
| | Λεπτοί Fine | 3/4" | 19.1 | 100.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 100.0 | 3.4 | - | - |
| | | 1/2" | 12.7 | 100.0 | | 100.0 | | 100.0 | | - | - |
| | | 3/8" | 9.5 | 100.0 | | 100.0 | | 99.6 | | - | - |
| ΑΜΜΟΣ / SAND | Χονδρή Coarse | No 8 | 2.4 | 99.6 | 0.5 | 99.6 | 0.5 | 87.3 | 11.5 | - | - |
| | | No 10 | 1.9 | 99.5 | | 99.5 | | 85.0 | | - | - |
| | Μέση Medium | No 20 | 0.840 | 99.1 | 0.7 | 98.5 | 1.6 | 69.1 | 24.9 | - | - |
| | | No 40 | 0.417 | 98.8 | | 97.9 | | 60.2 | | - | - |
| | Λεπτή Fine | No 100 | 0.149 | 98.0 | 2.9 | 96.9 | 2.5 | 51.3 | 11.7 | - | - |
| | | No 200 | 0.074 | 95.9 | | 95.4 | | 48.4 | | - | - |
| ΙΛΥΣ / SILT | | | | 37.8 | 95.9 | 46.0 | 95.4 | 38.5 | - | - | - |
| ΑΡΓΙΛΟΣ / CLAY | | | | 58.1 | | 49.4 | | 9.9 | 48.4 | - | - |

| | | | | |
|-------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Εκτέλεση δοκιμής: | Επεξεργασία δεδομένων: | Έλεγχος αποτελεσμάτων: | Το εργαστήριο εποπτεύεται από το ΚΕΔΕ | |
| X. Βαγενάς | M. Σαρίδου | M. Μπαρδάνης | Εργ. Αρ. | 084/2019/1276-1278 |
| M. Τσουκαλαδάκης | | | Lab No. | |

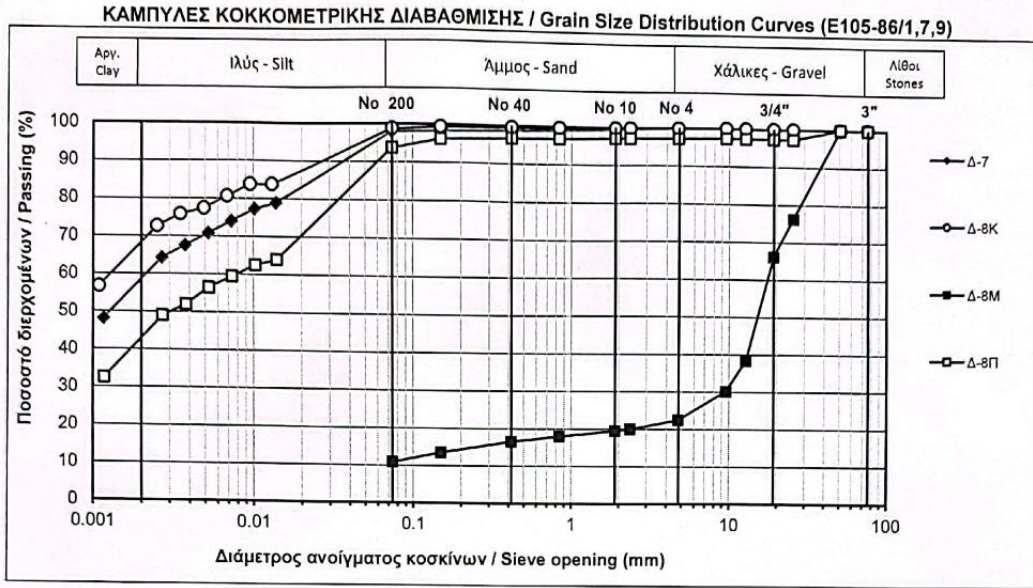
Σελ. / P. 1

Σχήμα 4.2.7.2: Έντυπο αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων μπεντονιτικής αργίλου Άρμου Δ4, Δ5 και Δ6

| | |
|--|---|
|  ΕΔΑΦΟΣ Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε. Υπερσίδου 9, 105 58 Αθήνα, Τηλ. 2103222050 EDAFOS Consulting Engineers S.A. Υπερσίδου 9, 105 58 Athens, Tel. 2103222050 | Εκτέλεση δοκιμών: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. Θεραπειών 2, 104 44 Αθήνα, Τηλ. 2105149020, lab@edafos.gr |
| | Tests performed by: EDAFOS S.A. Laboratory 2 Therapion st., 104 44 Athens, Tel. 2105149020, lab@edafos.gr |
| | |

Έργο/ Project:

Γεώτρηση / Borehole:



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ / Classification Tests Results (E105-86/1,2,3,4,5,6)

| Βάθος / Depth (m): | Δ-7 | Δ-8Κ | Δ-8Μ | Δ-8Π |
|---|-----------|-----------|--------------|-----------|
| Ποσ. Υγρασίας / Water content (%) | 6.8 | 8.2 | 2.6 | 5.1 |
| Όριο υδαρότητας / Liquid limit (%) | 93.5 | 132.4 | 120.8 | 104.3 |
| Όριο πλαστικότητας / Plastic limit (%) | 30.4 | 40.8 | 29.5 | 32.4 |
| Δείκτης πλαστικότητας / Plasticity Index | 63.1 | 91.6 | 91.3 | 71.9 |
| Ξηρό φαινόμενο βάρος / Dry unit weight (kN/m ³) | - | - | - | - |
| Ειδικό βάρος στερεών / Specific gravity (-) | 2.54 | 2.64 | - | 2.66 |
| Ποσ. Οργανικών / Organic content (%) | - | - | - | - |
| Κατάταξη / Classification (USCS) | CH | CH | GP-GC | CH |

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗΣ / Grain Size Distribution Data

| | | Κόσκινο Sieve | Διάμετρος Opening (mm) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) | Διερχόμενο Passing (%) | Κλάσματα Fractions (%) |
|------------------|----------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| ΧΑΛΙΚΕΣ / GRAVEL | Χονδροί Coarse | 3'' | 76.2 | 100.0 | 0.0 | 100.0 | 0.0 | 100.0 | 2.6 |
| | | 2'' | 50.8 | 100.0 | | 100.0 | | 100.0 | |
| | Λεπτοί Fine | 1'' | 25.4 | 100.0 | 0.0 | 100.0 | 0.1 | 76.2 | 33.9 |
| | | 3/4'' | 19.1 | 100.0 | | 100.0 | | 66.1 | 97.4 |
| | | 1/2'' | 12.7 | 100.0 | | 100.0 | | 38.3 | 97.4 |
| ΑΜΜΟΣ / SAND | Χονδρή Coarse | 3/8'' | 9.5 | 100.0 | 0.0 | 100.0 | 0.1 | 30.2 | 43.6 |
| | | No 4 | 4.8 | 100.0 | | 99.9 | | 22.5 | 97.2 |
| | Μέση Medium | No 8 | 2.4 | 99.7 | 0.5 | 99.8 | 0.1 | 20.0 | 2.9 |
| | | No 10 | 1.9 | 99.5 | | 99.8 | | 19.5 | 97.1 |
| | | No 20 | 0.840 | 99.0 | | 99.7 | | 18.0 | 96.8 |
| | Λεπτή Fine | No 40 | 0.417 | 98.7 | 0.8 | 99.6 | 0.2 | 16.6 | 3.0 |
| | | No 100 | 0.149 | 98.3 | | 99.4 | | 13.5 | 5.7 |
| | No 200 | 0.074 | 98.0 | 0.7 | 98.8 | 0.8 | 10.9 | 5.7 | |
| ΙΛΥΣ / SILT | | | | 41.1 | 98.0 | 32.0 | 98.8 | - | 10.9 |
| ΑΡΓΙΛΟΣ / CLAY | | | | 56.9 | - | 66.8 | - | - | 41.2 |

| | | | |
|---|----------------------------------|------------------------|---|
| Εκτέλεση δοκιμής: | Επεξεργασία δεδομένων: | Έλεγχος αποτελεσμάτων: | Το εργαστήριο εποπτεύεται από το ΚΕΔΕ/ Laboratory supervised by CPWL |
| X. Βαγενάς Μ. Φεγιάς Μ. Τσουκαλαδάκης | Σ. Γρίφιζα Ι. Παναγιωτοπούλου | Μ. Μπαρδάνης | |
| Εργ. Αρ. Lab No. | | | Σελ. / P. 1 |

Σχήμα 4.2.7.3: Έντυπο αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών των δειγμάτων μπεντονιτικής αργίλου Άρμου Δ7, Δ8κ, Δ8μ και Δ8π

4.3 Δοκιμές προσδιορισμού μηχανικών χαρακτηριστικών

Πέρα από τις εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου, εκτελέστηκαν και δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Ειδικότερα οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου, εκτελέστηκαν στο μείγμα Δ4-Δ5. Σε όλα τα υπόλοιπα δείγματα πραγματοποιήθηκαν μόνο οι δοκιμές για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού.

Οι δοκιμές που εκτελέστηκαν για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου είναι αρχικά η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα, ή ευρέως γνωστή και ως Brazilian, κατά τις οποίες παρουσιάζεται η αντοχή του υλικού ανάλογα με τη μύζηση και δίνεται σε κάθε περίπτωση. Επίσης πραγματοποιήθηκε η δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης και η δοκιμή προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης εδάφους – νερού του μίγματος Δ4-Δ5.

Στη συνέχεια της συγκεκριμένης ενότητας παρουσιάζεται η διαδικασία εκτέλεσης κάθε δοκιμής καθώς και τα αποτελέσματα αυτών για το μίγμα Δ4-Δ5 της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου. Προτού παρουσιαστούν οι δοκιμές, θα γίνει μία σύντομη αναφορά στις μεθόδους με τις οποίες μπορεί να ελεγχθεί η μύζηση.

4.3.1 Μέθοδοι ελέγχου και προσδιορισμού της μύζησης

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι και όργανα μέτρησης της μύζησης. Οι μέθοδοι αυτές διακρίνονται σε μεθόδους άμεσης και έμμεσης μέτρησης της μύζησης. Συγκεκριμένα, μέθοδοι άμεσης μέτρησης της μύζησης είναι εκείνες κατά τις οποίες μετρείται η μύζηση αυτή καθ' αυτή, κατά τρόπο αντίστοιχο με την άμεση μέτρηση της θετικής πίεσης του νερού των πόρων ενός εδαφικού υλικού. Αντίθετα στις μεθόδους έμμεσης μέτρησης της μύζησης υπολογίζεται ένα φυσικό μέγεθος το οποίο συσχετίζεται με τη μύζηση (π.χ. η

θερμοκρασία του υλικού) και από αυτό προσδιορίζεται η τιμή της μύζησης του εδαφικού υλικού.

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

Πίνακας 4.3.1.1: Μέθοδοι μέτρησης της μύζησης (Μπαρδάνης, 2016)

Οι μέθοδοι ελέγχου της μύζησης που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας και οι οποίες θα αναλυθούν στην πορεία είναι οι εξής:

- Μέθοδος μετατόπισης άξονα με τη χρήση θαλάμου μύζησης
- Ξήρανση στην ατμόσφαιρα

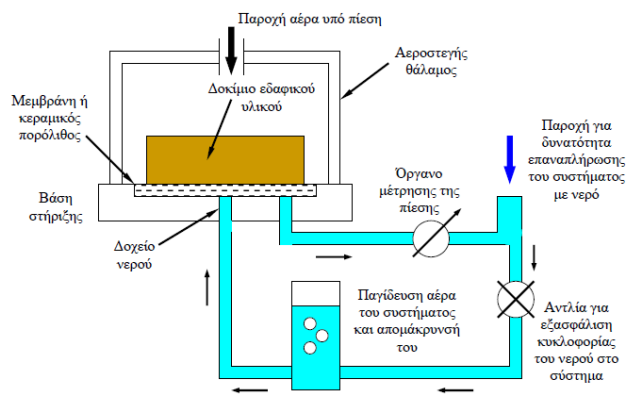
Για τη μέτρηση της μύζησης έγινε χρήση υγρομέτρου ψυχρού κατόπτρου.

4.3.1.1 Μέθοδος μετατόπιση άξονα με τη χρήση θαλάμου μύζησης

Η μέθοδος μετατόπισης άξονα βασίζεται στην προγενέστερη μέθοδο μεμβράνης, η οποία αποτελεί την πρώτη μέθοδο που αναπτύχθηκε για την μέτρηση της μύζησης του εδαφικού σκελετού αλλά στην πορεία και μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται ως μέθοδος ελέγχου της μύζησης. Η λογική της μεθόδου είναι να

εφαρμοσθούν στο εδαφικό υλικό διάφορες τιμές μύζησης εντός του ειδικού θαλάμου (θάλαμος μύζησης). Τα δοκίμια στα οποία ρυθμίζεται κάθε τιμή της μύζησης, χρησιμοποιούνται σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης ή θλίψης κατά γενέτειρα (Brazilian) για τον προσδιορισμό της αντοχής του εδαφικού υλικού σε σχέση με τη μύζησή του.

Κατά τη μέθοδο μετατόπισης άξονα, η διάταξη μέτρησης της μύζησης αποτελείται από τον κεραμικό πορόλιθο, το δείγμα του εδαφικού υλικού, το δοχείο νερού και το όργανο μέτρησης της πίεσης. Πιο συγκεκριμένα, ο πορόλιθος μαζί με το δοκίμιο τοποθετούνται σε έναν αεροστεγώς κλεισμένο θάλαμο, στον οποίο παρέχεται αέρας υπό πίεση και το δοχείο νερού επικοινωνεί με το εξωτερικό του θαλάμου όπου και συνδέεται κάποιο όργανο μέτρησης της πίεσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί μέθοδο η οποία πραγματοποιείται στο εργαστήριο και όχι επιτόπου και λειτουργεί για εύρος τιμών πίεσης από 0 έως 1500kPa.



Φωτογραφίες 4.3.1.1.1 & 4.3.1.1.2: Αριστερά-Θάλαμος μύζησης εργαστηρίου ΕΔΑΦΟΣ, Δεξιά-Σχέδιο λειτουργίας θαλάμου μύζησης, Αρχή της μεθόδου μετατόπισης άξονα για τη μέτρηση της μύζησης (Μπαρδάνης, 2016)

Αναφορικά με τον θάλαμο μύζησης, όπως διακρίνεται και από τις παραπάνω φωτογραφίες 4.3.1.1.1 & 4.3.1.1.2 διαθέτει τρεις διόδους. Από την πρώτη δίοδο εισέρχεται ο αέρας υπό πίεση η οποία ρυθμίζεται από τον ανθρώπινο παράγοντα, από τη δεύτερη εκκενώνεται ο θάλαμος από την πίεση με τη χρήση βαλβίδας

εκτόνωσης και από την τρίτη, η οποία συνδέεται με τον πορόλιθο μέσω σωλήνα, εξέρχεται το νερό από τα εδαφικά δοκίμια λόγω της πίεσης αέρα. Τέλος, η πίεση εφαρμόζεται μέσω διάταξης που ενώνεται με αεροσυμπιεστή και επομένως μέσω ρυθμιστή πίεσης επιλέγεται η τιμή πίεσης που απαιτείται κάθε φορά. Επειδή το νερό του δοχείου κάτω από τον πορόλιθο επικοινωνεί με το εξωτερικό του θαλάμου που η πίεση του αέρα είναι 0, η πίεση του νερού είναι κι εκείνη 0 (άρα $u_w=0$), οπότε η μύζηση ως διαφορά της πίεσης στον αέρα και το νερό ($u_a - u_w$) ταυτίζεται με την πίεση του αέρα που ρυθμίζουμε εντός του θαλάμου μύζησης.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προετοιμάστηκαν δείγματα μπεντονιτικής αργίλου Άρμου με ποσοστό υγρασίας 220% (~1.5-1.6 φορές το όριο υδαρότητας του υλικού). Τα δείγματα αυτά εκχύθηκαν σε πλαστικούς σωλήνες διαφορετικών διαμέτρων και ύψων εντός του θαλάμου μύζησης, οι οποίοι είχαν τοποθετηθεί πάνω στον κεραμικό πορόλιθο. Για την σφράγιση του υγρού υλικού εντός των πλαστικών σωλήνων χρησιμοποιήθηκε πλαστελίνη, η οποία τοποθετήθηκε περιμετρικά στην επαφή των σωλήνων με τον πορόλιθο. Απαραίτητη προϋπόθεση, για τη σωστή δημιουργία δειγμάτων συγκεκριμένης μύζησης, αποτελούσε πρώτον το δείγμα να είναι αναμεμιγμένο καλά και όσο το δυνατόν πιο ομοιογενές, χωρίς την παρουσία κενών εντός του πλαστικού σωλήνα και δεύτερον οι πλαστικοί σωλήνες να έχουν αλειφθεί με βαζελίνη ώστε το υλικό να μην δημιουργεί τριβές με τα τοιχώματα του σωλήνα και να μπορεί να αποκολληθεί από αυτά κατά την ξήρανσή του χωρίς να μείνουν τμήματά του προσκολλημένα στο εσωτερικό των σωλήνων ρηγματώνοντας το δοκίμιο.

Μετά την εφαρμογή της πίεσης αέρα στα δείγματα που βρίσκονταν εντός του θαλάμου μύζησης, τα δοκίμια αφήνονταν εντός του θαλάμου για περίπου 10 - 15 μέρες, μέχρι δηλαδή να μην εξέρχεται πλέον νερό, το οποίο σήμαινε ότι το ολικό βάρος τους είχε σταθεροποιηθεί και επομένως είχε επέλθει η υδραυλική ισορροπία υπό την υλοποιούμενη μύζηση. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν τρεις κύκλοι δοκιμών, από 3 ζευγάρια δειγμάτων τη φορά τα οποία στη συνέχεια αξιοποιούνταν σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα, ενώ παράλληλα καλύφθηκαν οι τιμές μύζησης σε 400, 600, 800, 1100, 1500 kPa.



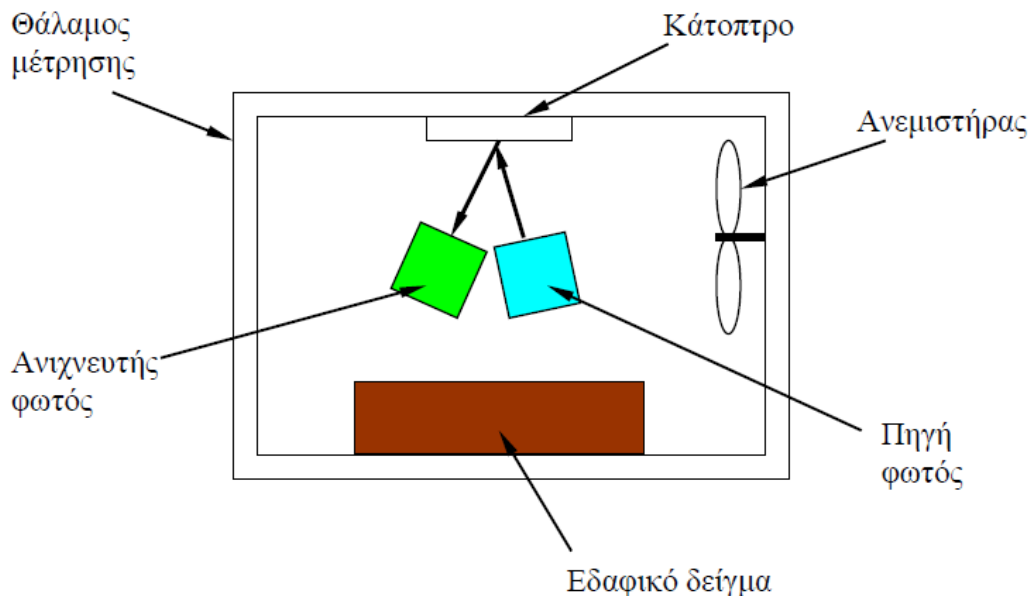
Φωτογραφίες 4.3.1.1.3 & 4.3.1.1.4: Διάταξη δοκιμών μπεντονιτικής αργίλου Άρμου στον θάλαμο μύζησης πριν και μετά την εισροή αέρα υπό πίεση

4.3.1.2 Υγρόμετρο Ψυχρού κατόπτρου

Η τεχνολογία ψυχρών κατόπτρων (chilled mirrors) χρησιμοποιείται από το 1950. Ειδικότερα, οι Gee et al. (1992) περιγράφουν τη χρήση ενός συστήματος ψυχρού κατόπτρου για τη μέτρηση της μύζησης όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 4.3.1.2.1. Τέλος, με τη χρήση ψυχρού κατόπτρου προσδιορίζεται η ολική μύζηση του υλικού και όχι η μύζηση εδαφικού σκελετού όπως στην περίπτωση της μεθόδου μετατόπισης άξονα.

Για τον προσδιορισμό της μύζησης, το δείγμα τοποθετείται σε έναν κλειστό θάλαμο και σε αρχικό στάδιο σκοπός είναι να επέλθει η ισορροπία μεταξύ της περιεχόμενης σε αυτό υγρασίας και των υδρατμών που έχουν δημιουργηθεί στον θάλαμο. Όπως διακρίνεται και από το Σχήμα 4.3.1.2.1, μέσα στο θάλαμο υπάρχει ένα μεταλλικό κάτοπτρο, ένας ανεμιστήρας, μία πηγή φωτός και ένας ανιχνευτής φωτός. Αρχικά το φως που δημιουργείται από την πηγή κατευθύνεται προς το κάτοπτρο όπου ανακλάται με αποτέλεσμα να επιστρέφει στον ανιχνευτή φωτός, ο οποίος αναγνωρίζει φως δεδομένης έντασης. Εφόσον επέλθει ισορροπία μεταξύ της υγρασίας του εδαφικού δείγματος και των υδρατμών του αέρα του θαλάμου,

τίθεται σε λειτουργία ο ανεμιστήρας με σκοπό να ψυχραίνει την επιφάνεια του κατόπτρου, τόσο ώστε να υγροποιηθούν επί αυτής υδρατμοί. Με αυτόν τον τρόπο, το φως διαχέεται και καταγράφεται μειωμένη η ένταση του φωτός στον ανιχνευτή, ενώ η θερμοκρασία μετρείται μέσω ενός θερμομέτρου ηλεκτρικής αντίστασης τοποθετημένου μέσα στο κάτοπτρο. Τέλος, το σημείο της δρόσου επί του κατόπτρου συσχετίζεται με τη σχετική υγρασία, από την οποία και προσδιορίζεται η μύζηση του εδαφικού δείγματος που τοποθετήθηκε στο θάλαμο.



Σχήμα 4.3.1.2.1: Απεικόνιση της αρχής μέτρησης της μύζησης με υγρόμετρα ψυχρού κατόπτρου όπως παρουσιάζεται από τους Gee et al. (1992) (Μπαρδάνης, 2016)

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, τμήματα των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα, είτε παραφινώθηκαν με σκοπό τη μέτρηση του ολικού όγκου τους και εξ αυτού του φαινομένου βάρους τους, είτε τρίμματά τους χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ολικής τους μύζησης με χρήση του υγρόμετρου ψυχρού κατόπτρου. Η διαδικασία μέτρησης της ολικής μύζησης πραγματοποιήθηκε αφενός ως επαλήθευση της αρχικής μύζησης που τέθηκε στον θάλαμο μύζησης

και αφετέρου ως εκτίμηση της ωσμωτικής συνιστώσας της μύζησης αφαιρώντας από την ολική μύζηση τη μύζηση εδαφικού σκελετού που είχε υλοποιηθεί εντός του θαλάμου μύζησης. Τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις της ολικής μύζησης με τη βοήθεια του ψυχρόμετρου παρουσιάζονται σε επόμενη ενότητα του κεφαλαίου.



Φωτογραφίες 4.3.1.2.2 & 4.3.1.2.3: Το υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. κατασκευής Decagon Devices, Inc. -ννν METER Environmental (Μπαρδάνης, 2016)

4.3.1.3 Ξήρανση εδαφικού υλικού στην ατμόσφαιρα

Αντίστοιχη διαδικασία με αυτήν που πραγματοποιήθηκε στον θάλαμο μύζησης για τη δημιουργία δειγμάτων με διαφορετική μύζηση, πραγματοποιήθηκε και στην ξήρανση των υλικών στην ατμόσφαιρα. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν πλαστικοί σωλήνες με δύο διαφορετικά ύψη και διαμέτρους και τοποθετήθηκαν σε παραφινωμένη μεταλλική βάση για την αποφυγή διαρροών καθώς επίσης και σε γυάλινες επιφάνειες στις οποίες με τη χρήση πλαστελίνης στην κατώτερη επιφάνεια του σωλήνα σφραγίστηκαν οι δίοδοι εκροής του υλικού.

Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν 4 ζευγάρια δοκιμίων, 1 σε μεταλλική βάση 3 σε γυάλινη, τα οποία αφέθηκαν για ξήρανση στην ατμόσφαιρα με αρχική υγρασία 220%. Όπως και στη διαδικασία του θαλάμου μύζησης, έτσι και εδώ, ήταν απαραίτητη η επάλειψη του εσωτερικού των πλαστικών σωλήνων με βαζελίνη όπως και η ομοιογένεια του υγρού υλικού που είχε δημιουργηθεί. Σε όλα τα ζευγάρια δοκιμίων πραγματοποιούνταν καθημερινή ζύγιση των δειγμάτων. Συγκεκριμένα, τα δύο πρώτα ζευγάρια δοκιμίων αφέθηκαν στην ατμόσφαιρα

μέχρις ότου παρατηρηθεί σταθεροποίηση του βάρους τους, ενώ τα άλλα δύο ζευγάρια παρέμειναν στην ατμόσφαιρα μέχρι να αποκτήσουν ποσοστά υγρασίας περίπου 20% και 30% ώστε να αντιστοιχούν περίπου σε εύρη μύζησης που θα ήταν επιθυμητό να υπάρχουν τιμές. Για την επίτευξη της ισορροπίας του βάρους των δύο πρώτων ζευγών απαιτήθηκε χρόνος περίπου δύο μηνών να αφεθούν στην ατμόσφαιρα.

Σε ό,τι αφορά τα δείγματα που αφέθηκαν στην ατμόσφαιρα για να αποκτήσουν υγρασίες 20% και 30% χρειάστηκαν διαφορετικούς χρόνους ακόμα και μεταξύ τους. Ειδικότερα, τα δείγματα τα οποία θα χρησιμοποιούνταν για τη δοκιμή της ανεμπόδιστης θλίψης (ψηλά δοκίμια με μικρή διάμετρο) αφέθηκαν στην ατμόσφαιρα για περίπου 20 μέρες, πραγματοποιώντας πρώτα την δοκιμή στο δοκίμιο με υγρασία 30% και μετά από 2 ημέρες σε αυτό με ποσοστό 20%. Τα δείγματα που στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή της θλίψης κατά γενέτειρα (κοντά σε ύψος δείγματα, μεγάλης διαμέτρου) χρειάστηκε να αφεθούν στην ατμόσφαιρα περίπου τον διπλάσιο χρόνο, δηλαδή 40 μέρες. Παρακάτω παρατίθενται Φωτογραφίες των δύο πρώτων ζευγών δοκιμών παρουσιάζοντας την σταδιακή απομάκρυνση της υγρασίας. Είναι χαρακτηριστική η πολύ μεγάλη συρρίκνωση των δοκιμών από ένα υλικό τόσο υψηλής πλαστικότητας με σημείο εκκίνησης της ξήρανσης την κατάσταση πολτού.





Φωτογραφίες 4.3.1.3.1-4: Σταδιακή μείωση του ποσοστού υγρασίας της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου κατά την ξήρανση των δειγμάτων στην ατμόσφαιρα.

Σε κάθε περίπτωση, με την διαδικασία ξήρανσης στην ατμόσφαιρα, τα δείγματα απέκτησαν αρκετά υψηλές τιμές μύζησης με αρκετά χαμηλές τιμές βαθμού κορεσμού. Συγκεκριμένα, τα δείγματα που ξηράθηκαν πλήρως στην ατμόσφαιρα στη μεταλλική και τη γυάλινη βάση απέκτησαν τιμές μύζησης 136.37 και 139.67 MPa αντίστοιχα, ενώ τα δείγματα που ξηράθηκαν μέχρι να αποκτήσουν ποσοστό υγρασίας 20 και 30% είχαν τιμές μύζησης 13.28 και 12.86 MPa αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τον προσδιορισμό των μυζήσεων θα παρουσιαστούν και στο τέλος της συγκεκριμένης ενότητας σε συγκεντρωτικό πίνακα.

4.3.2 Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα

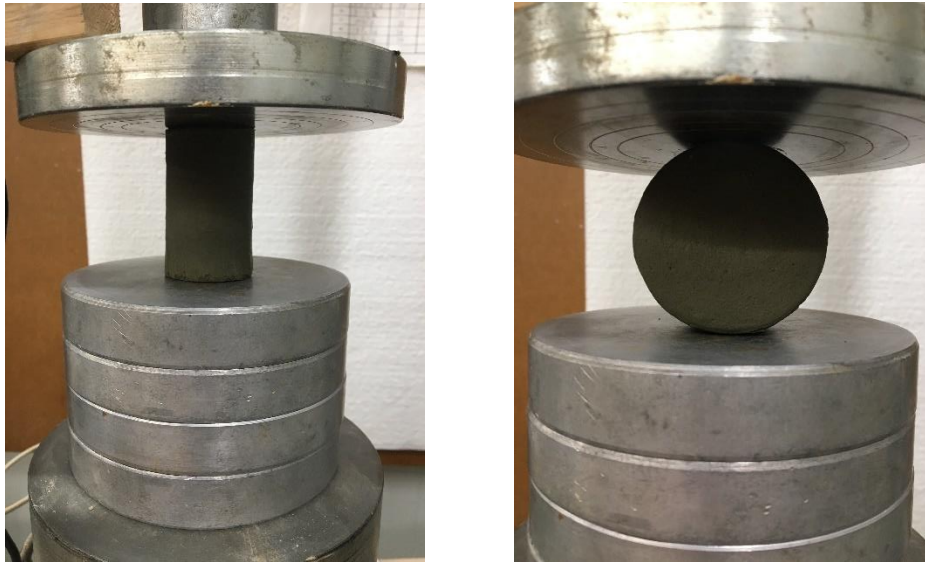
Οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είχαν ως σκοπό τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής (q_u) και της εφελκυστικής αντοχής (σ_c) αντίστοιχα, της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου και συγκεκριμένα στο μίγμα Δ4-Δ5 για τις διάφορες τιμές μύζησης.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκεκριμένες δοκιμές, είναι αυτά τα οποία δημιουργήθηκαν στο θάλαμο μύζησης και στα οποία επιβλήθηκαν τιμές μύζησης που απαιτούνταν, με τη διαδικασία που περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα. Παράλληλα, οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα πραγματοποιήθηκαν και στα δοκίμια που ξηραίνονταν στη ατμόσφαιρα.

Για την σωστή προετοιμασία των δειγμάτων πριν την εκτέλεση των δοκιμών, μετρήθηκε το βάρος τους, το μέσο ύψος τους και η μέση διάμετρος τους. Η δοκιμή της ανεμπόδιστης θλίψης πραγματοποιήθηκε στα δείγματα με ταχύτητα παραμόρφωσης 0,6mm/min, ενώ η δοκιμή θλίψης κατά γενέτειρα (Brazilian) πραγματοποιήθηκε με επιβαλλόμενη ταχύτητα 0,3mm/min (λόγω της μικρότερης χαρακτηριστικής διαμέτρου). Τέλος, απαραίτητο να αναφερθεί είναι ότι και οι δύο δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στην ίδια συσκευή, όπως φαίνεται στη Φωτογραφία 4.3.2.1, κατά τα πρότυπα ΥΠΕΧΩΔΕ/ΚΕΔΕ Ε105-86/14.



Φωτογραφία 4.3.2.1: Συσκευή ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα



Φωτογραφίες 4.3.2.2 & 4.3.2.3: Αριστερά-Δοκίμιο στο οποίο εκτελείται δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, Δεξιά-Δοκίμιο στο οποίο εκτελείται δοκιμή θλίψης κατά γενέτειρα

Με την περάτωση της δοκιμής και επομένως τη θραύση των δοκιμίων, μέρος όλων των δειγμάτων κρατούνταν με σκοπό τον υπολογισμό της υγρασίας τους. Σε ότι αφορά τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στη δοκιμή της θλίψης κατά γενέτειρα, ένα άλλο μέρος τους κρατούνταν με στόχο να παραφινωθούν και να μετρηθεί το φαινόμενο βάρος τους όπως και η μύξησή τους (s) με το ψυχρόμετρο. Η διαδικασία μέτρησης του φαινόμενου βάρους με παραφίνη θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα, ενώ τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις της ολικής μύξης με τη χρήση ψυχρόμετρου παρατίθενται στο Σχήμα 4.3.2.1.

Οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα πραγματοποιήθηκαν σε 10 ζευγάρια δοκιμίων, εκ των οποίων τα 6 προήλθαν από το θάλαμο μύξης με τιμές μύξης 400, 600, 800, 1100, 1500 kPa και 1500 kPa με μία μέρα ξήρανση στην ατμόσφαιρα πριν την εκτέλεση της δοκιμής (για περαιτέρω ξήρανση και αύξηση της μύξης). Τα υπόλοιπα 4 ζεύγη δοκιμίων είχαν αφεθεί στην ατμόσφαιρα, τα δυο εκ των οποίων αφέθηκαν στην ατμόσφαιρα μέχρι σταθεροποίησης του βάρους τους για πλήρη ξήρανση μέχρι το παραμένον ποσοστό υγρασίας τους (το ένα σε μεταλλική βάση και το άλλο σε γυάλινη), ενώ τα άλλα δύο μέχρι να αποκτήσουν ποσοστά υγρασίας 20 και 30%.

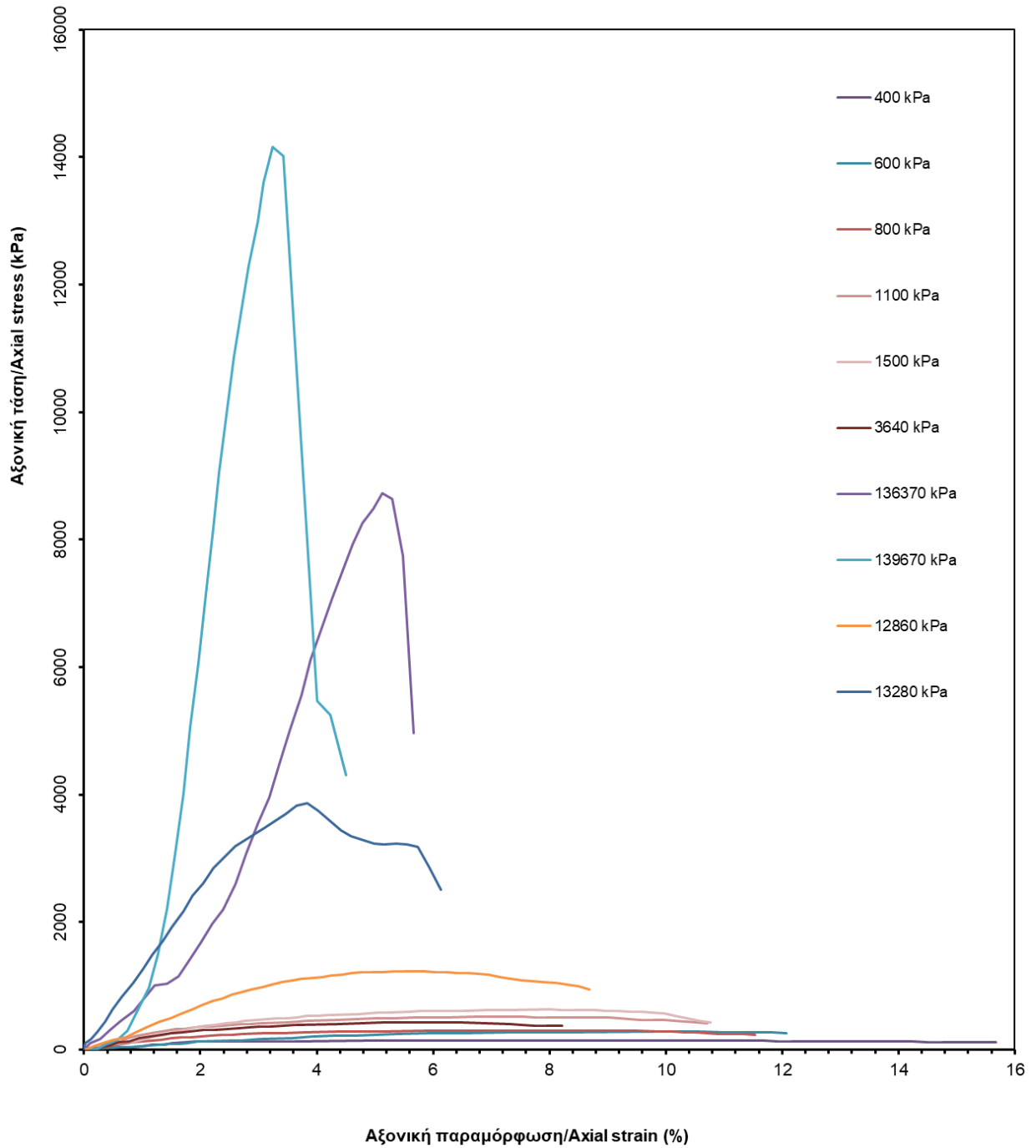
Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δειγμάτων από τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης και τη δοκιμή θλίψης κατά γενέτειρα παρουσιάζονται στον παρακάτω

Πίνακα 4.3.2.1, ενώ παράλληλα παρατίθενται και τα διαγράμματα αξονικής τάσης – αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμών στη συνέχεια της ενότητας αυτής, όπου και σχολιάζονται.

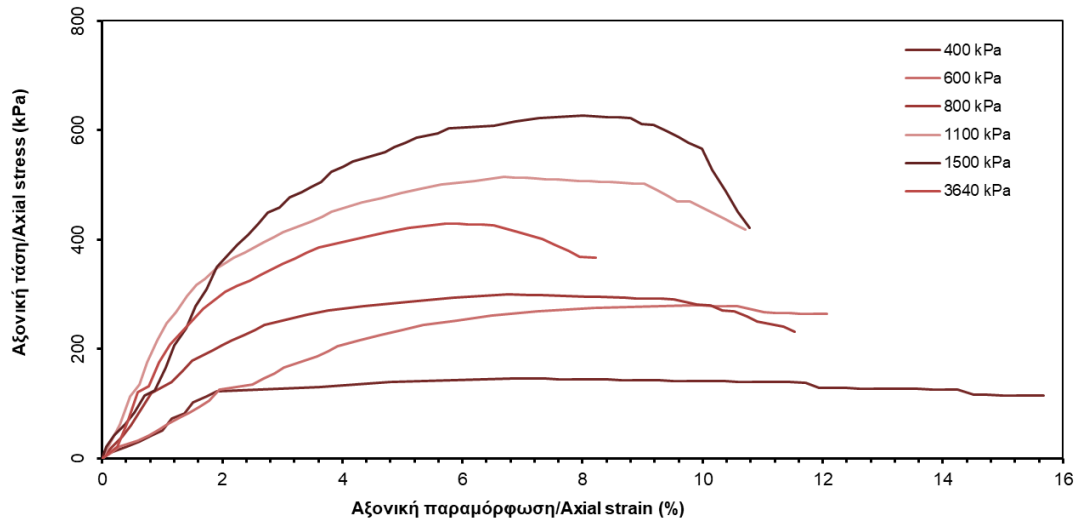
| Μύζηση όπως ελέγχθηκε στον θάλαμο μύζησης (kPa) | Μύζηση όπως μετρήθηκε στο Υ.Ψ.Κ (kPa) | q_u (kPa) | σ_c (kPa) | w (%) | γ_d (kN/m ³) | γ (kN/m ³) | Sr (%) | e | w (braz) (%) |
|---|---------------------------------------|-------------|------------------|-------|---------------------------------|-------------------------------|--------|------|--------------|
| 400 | 630 | 146 | 32,7 | 62,39 | 10,45 | 16,98 | 100 | 1,36 | 60,79 |
| 600 | 1010 | 280 | 42 | 51,09 | 10,56 | 15,96 | 94,26 | 1,34 | 49,88 |
| 800 | 4440 | 300,0 | 35,2 | 48,15 | 11,38 | 16,86 | 100,00 | 1,17 | 49,32 |
| 1100 | 3610 | 515,0 | 21,2 | 43,74 | 10,04 | 14,43 | 73,98 | 1,46 | 44,67 |
| 1500 | 10550 | 627,0 | 110,8 | 41,2 | 11,89 | 16,79 | 94,5 | 1,08 | 41,16 |
| | 3640 | 430,0 | 73,1 | 42,82 | 11,4 | 16,29 | 90,71 | 1,17 | 37,6 |
| | 136370 | 8729 | 1163,5 | 9,32 | 15,05 | 16,46 | 35,93 | 0,64 | 7,02 |
| | 139670 | 14165 | 2234,9 | 6,6 | 15,17 | 16,17 | 25,96 | 0,63 | 6,41 |
| | 12860 | 1229 | 160,6 | 33,94 | 13,2 | 17,68 | 96,26 | 0,87 | 34,49 |
| | 13280 | 3862 | 112 | 26,07 | 14,67 | 18,49 | 94,16 | 0,68 | 27,2 |

Πίνακας 4.3.2.1: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα της μπεντονικής αργίλου Άρμου

Από τον παραπάνω Πίνακα 4.3.2.1 παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ολική μύζηση του υλικού και επομένως όσο μειώνεται το ποσοστό υγρασίας και ο βαθμός κορεσμού του υλικού, αυξάνεται η διατμητική αντοχή q_u και η εφελκυστική αντοχή σ_c . Για πολύ μικρά ποσοστά υγρασίας της τάξης των 5-10%, οι αντίστοιχες τιμές μύζησης είναι αρκετά υψηλές με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 135-140 MPa. Συνεπώς, με τη μείωση της υγρασίας του υλικού αυξάνεται μύζηση, ενώ για πολύ μικρά ποσοστά υγρασίας, η μύζηση αυξάνεται με ραγδαίο ρυθμό.



Σχήμα 4.3.2.1: Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης για όλες τις τιμές μύζησης της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου από τη δοκιμή της ανεμπόδιστης θλίψης



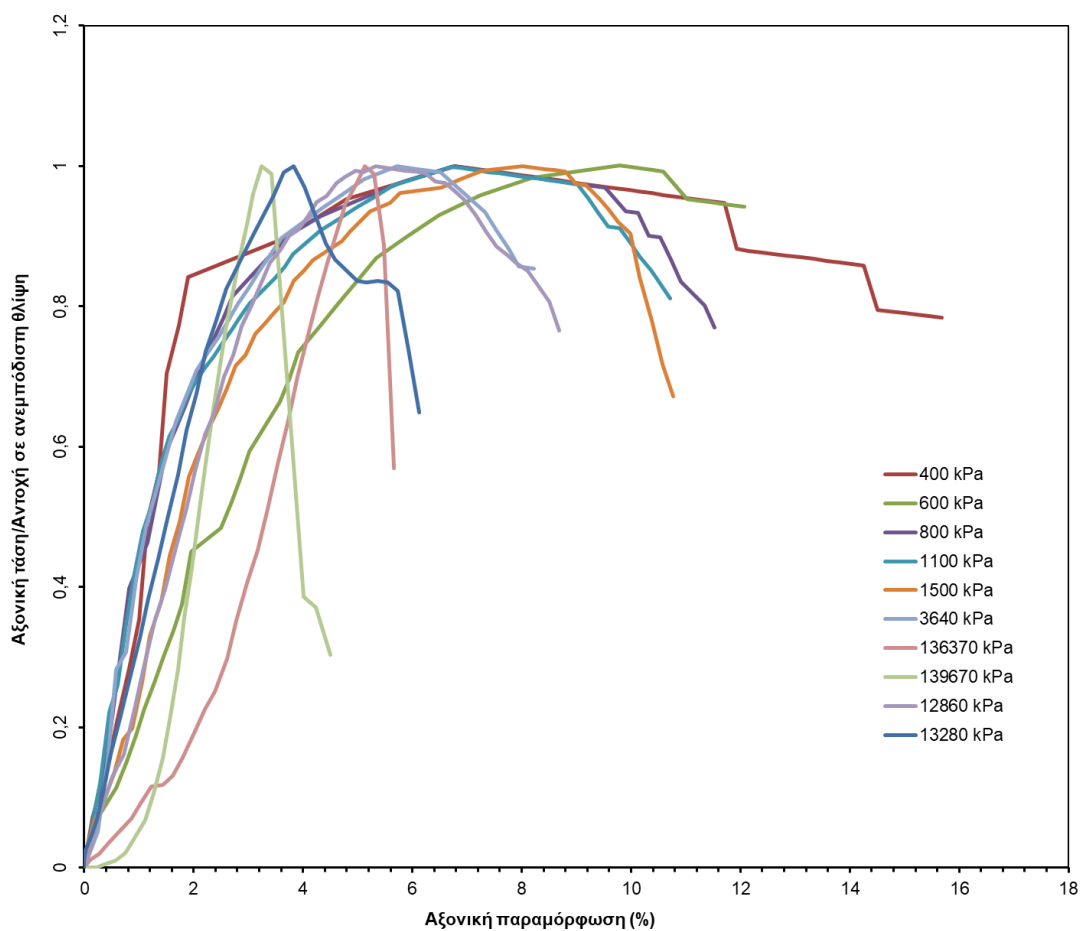
Σχήμα 4.3.2.2: Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης από τη δοκιμή της ανεμπόδιστης θλίψης, για τα δείγματα μπεντονιτικής αργίλου Αρμου με τιμές μύζησης που επιβλήθηκαν στον θάλαμο μύζησης

Από το Σχήμα 4.3.2.2 παρατηρείται ότι σε όλες τις καμπύλες με την αύξηση της παραμόρφωσης του υλικού και επομένως της επιβολής πρόσθετου φορτίου, αυξάνεται και η αξονική τάση μέχρι τη στιγμή θραύσης του δοκιμίου. Από το σημείο θραύσης του δείγματος και ύστερα, όσο και να αυξάνεται η παραμόρφωση του υλικού, η τάση του μειώνεται συνεχώς, είτε σταδιακά είτε απότομα. Πιο συγκεκριμένα σταδιακή μείωση της τάσης, εμφανίζεται, σύμφωνα με το σχήμα, στα δείγματα με μικρότερη τιμή μύζησης (π.χ. 400 kPa, 600 kPa), ενώ αντίθετα στα υλικά με υψηλή τιμή μύζησης (π.χ. 1500 kPa) παρουσιάζεται απότομη μείωση της τάσης. Η παρατήρηση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι για μικρές τιμές μύζησης, το ποσοστό υγρασίας είναι υψηλό και επομένως το υλικό μπορεί να υποστεί μεγάλες παραμορφώσεις χωρίς να αστοχήσει καθώς βρίσκεται σε ημιπλάσιμη μορφή. Αντίθετα, όπως συμπεραίνεται και από το σχήμα με την αύξηση της τιμής της μύζησης προκαλείται αύξηση της ψαθυρότητας του υλικού με αποτέλεσμα η θραύση του δοκιμίου να επέρχεται σε μικρές παραμορφώσεις και να συνοδεύεται από μεγάλη μείωση της τάσης μετά από μικρή επιπλέον παραμόρφωση.

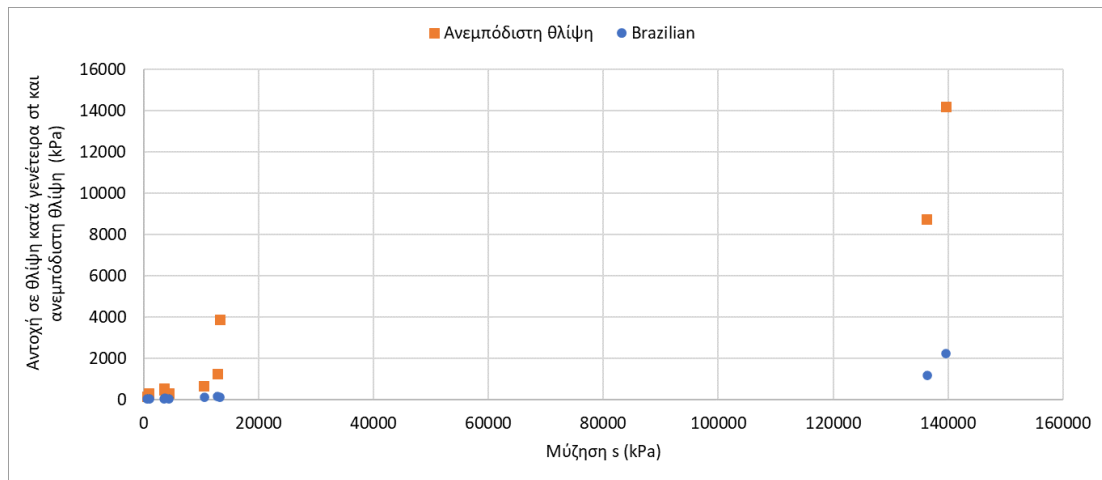
Αναφορικά με το Σχήμα 4.3.2.1, συμπεριλαμβάνει όλα τα δείγματα στα οποία πραγματοποιήθηκε η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, δηλαδή για τιμές μύζησης που επιβλήθηκαν στον θάλαμο μύζησης, αλλά και αυτές από την ξήρανση του υλικού

στην ατμόσφαιρα. Από το Σχήμα 4.3.2.2, αλλά και από τον Πίνακα 4.3.2.1 που παρουσιάστηκε προηγουμένως, γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές μύζησης που επιβλήθηκαν στον θάλαμο σε σχέση με τα δοκίμια που ξηράθηκαν στην ατμόσφαιρα είναι πολύ μικρότερες. Είναι εμφανές ότι για μείωση του ποσοστού υγρασίας και επομένως του βαθμού κορεσμού του υλικού, η αντοχή αυξάνεται σε πολύ σημαντικό βαθμό, γεγονός που διακρίνεται από τις καμπύλες των δοκιμών ξήρανσης στην ατμόσφαιρα με 20 και 30% ποσοστού υγρασίας. Τέλος, με την ολική ξήρανση των δειγμάτων και επομένως για πολύ υψηλές τιμές μύζησης, αφενός η αντοχή αποκτά τις μέγιστες τιμές της και αφετέρου το υλικό αποκτά και περισσότερο ψαθυρή συμπεριφορά.

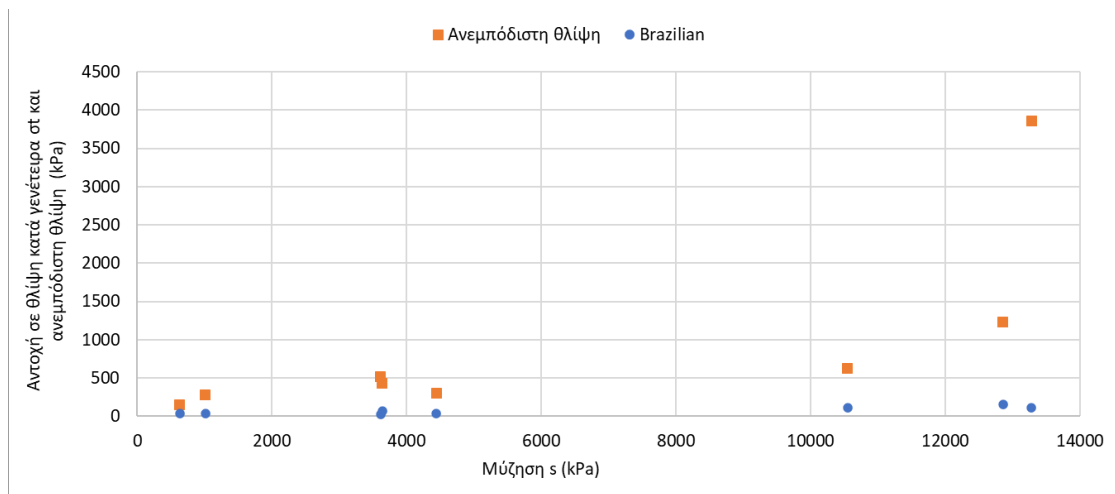
Στο Σχήμα 4.3.2.3 παρουσιάζονται οι καμπύλες που εμφανίζονται στο Σχήμα 4.3.2.1 με τη διαφορά ότι ο άξονας της αξονικής τάσης είναι κανονικοποιημένος ως προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη.



Σχήμα 4.3.2.3: Καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου με κανονικοποιημένο τον άξονα της αξονικής τάσης ως προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη



Σχήμα 4.3.2.4: Εξέλιξης της αντοχής ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα για όλες τις τιμές μύζησης στην μπεντονιτική άργιλο Άρμου



Σχήμα 4.3.2.5: Εξέλιξης της αντοχής ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα για μικρές τιμές μύζησης στην μπεντονιτική άργιλο Άρμου, εως 14,000kPa

Στα συγκεντρωτικά Σχήματα 4.3.2.4 & 4.3.2.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα και συγκεκριμένα η εξέλιξη της διατμητικής τους αντοχής για όλες τις τιμές μύζησης και για τιμές μύζησης μέχρι 14 MPa αντίστοιχα.

Από τα σχήματα αυτά παρατηρείται ότι αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτά από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης προκύπτουν και για τις δοκιμές της θλίψης κατά γενέτειρα. Συγκεκριμένα, με τη μείωση της υγρασίας στα δοκίμια της

μπεντονιτικής αργίλου Άρμου, προκύπτει αύξηση της μύζησης καθώς επίσης αυξάνεται και η αντοχή του υλικού.

Συνοψίζοντας, από τα σχήματα που αντιστοιχούν στις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και τις δοκιμές θλίψης κατά γενέτειρα παρατηρούνται αρκετές ομοιότητες σε ό,τι αφορά την συμπεριφορά των δειγμάτων με την αύξηση της μύζησης. Ωστόσο, παρατηρείται διαφορά στη μεταβολή της αντοχής της θλίψης κατά γενέτειρα με τη μύζηση σε σχέση με την ανεμπόδιστη θλίψη σχετικά με τον ρυθμό αύξησης. Πιο συγκεκριμένα, ο ρυθμός αύξησης της μύζησης στην αντοχή ανεμπόδιστης θλίψης είναι μεγαλύτερος από αυτόν που αντιστοιχεί στην αντοχή της θλίψης κατά γενέτειρα.

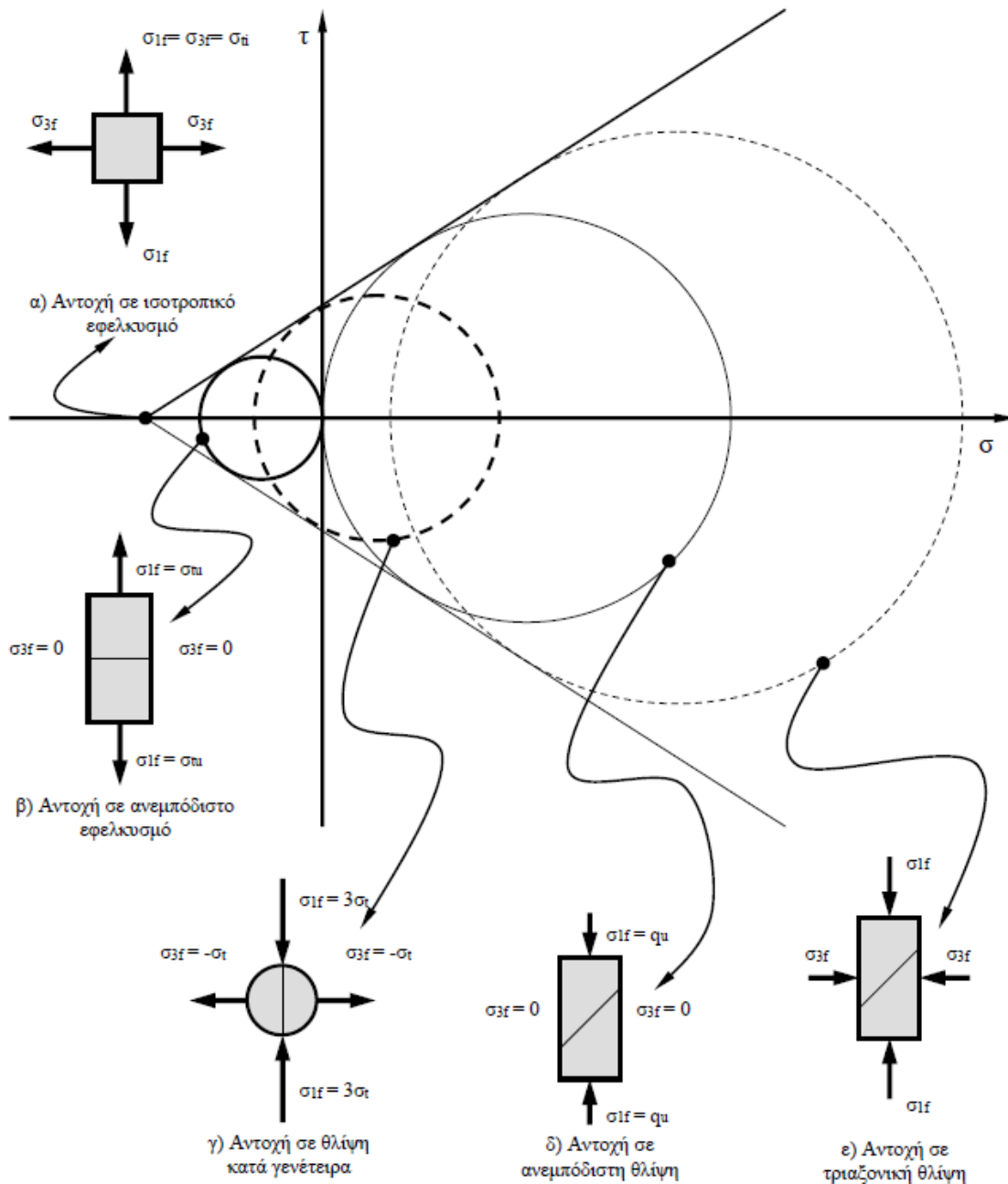
Ο λόγος για τον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι συγκεκριμένες δοκιμές ήταν για να εκτιμηθεί η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου με τη μύζηση συνδυάζοντας τα αποτελέσματά τους. Η εξέλιξη αυτή θα μπορούσε να παρουσιαστεί εκτελώντας τη δοκιμή της τριαξονικής θλίψης, η οποία όμως δεν πραγματοποιήθηκε καθώς είναι πολύ πιο χρονοβόρα δοκιμή απ' ό,τι οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα.

Πιο συγκεκριμένα, ο Μπαρδάνης (2016) πρότεινε πως η εκτίμηση της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής ενός μη κορεσμένου εδαφικού υλικού με τη μύζηση θα μπορούσε να προσδιοριστεί μέσω του συνδυασμού των κύκλων Mohr από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα σε δοκίμια στα οποία έχει επιβληθεί ίδια τιμή μύζησης. Την παραπάνω διαδικασία την πραγματοποίησε ο ίδιος σε 5 διαφορετικά εδαφικά υλικά, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στην διδακτορική του διατριβή. Το ίδιο επαναλήφθηκε και από τον Κοκοβιάδη (2022) για μία άργιλο χαμηλής πλαστικότητας.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας προσδιορίστηκε η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου με τη μύζηση σύμφωνα με τη μέθοδο που ακολούθησε ο Μπαρδάνης (2016) και τα σχετικά πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια της ενότητας αυτής.

Με την εκτέλεση των δοκιμών της ανεμπόδιστης θλίψης και της θλίψης κατά γενέτειρα στην μπεντονική άργιλο Άρμου και με την επιβολή σε αυτά τα δείγματα τιμής μύζησης, όπως προαναφέρθηκε, προέκυψε από ένα ζευγάρι

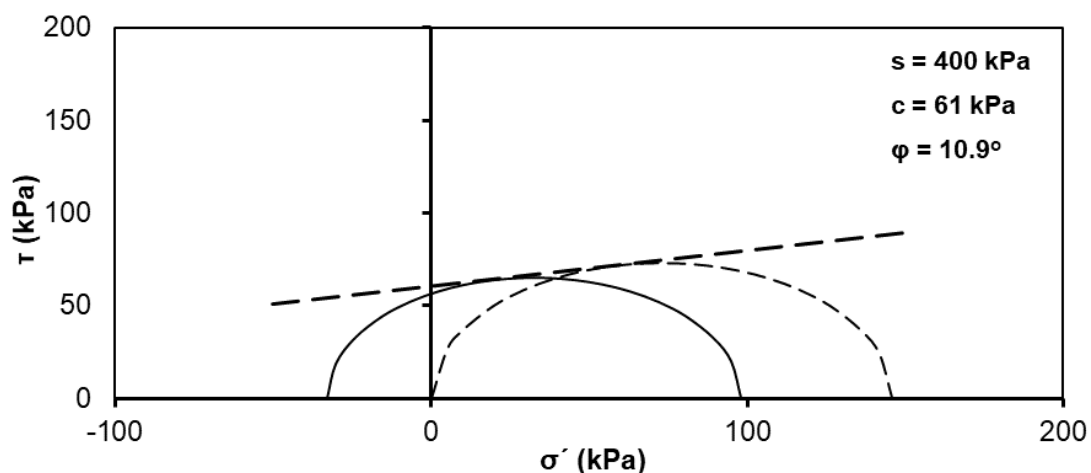
κύκλων Mohr για κάθε ζεύγος δοκιμίων. Συνδυάζοντας τους δύο κύκλους Mohr, ένας κύκλος προέρχεται από τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης και ένας από τη δοκιμή θλίψης κατά γενέτειρα, προσδιορίστηκαν οι τιμές της συνοχής c όπως και της γωνίας διατμητικής αντοχής φ .



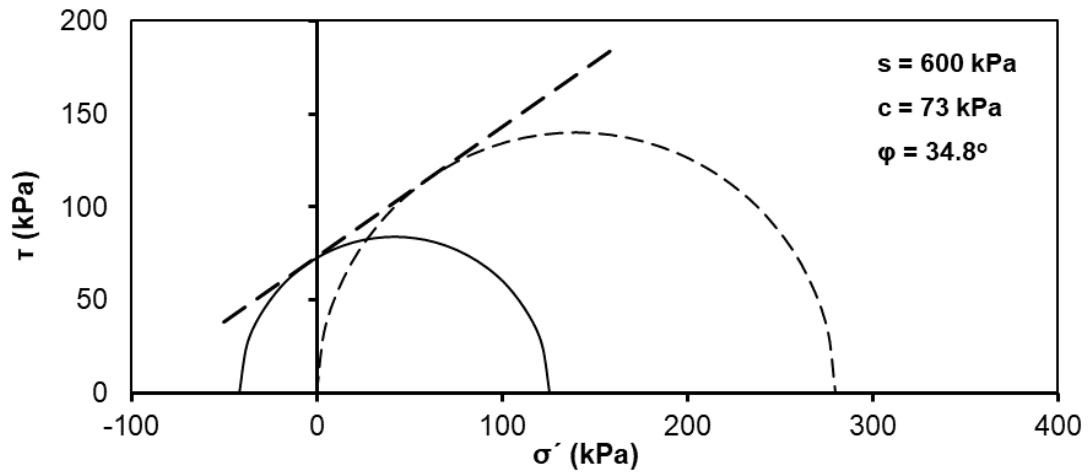
Σχήμα 4.3.2.6: Περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb - Χαρακτηριστικοί κύκλοι Mohr (Μπαρδάνης, 2016).

Στο Σχήμα 4.3.2.6 παρουσιάζονται οι συνήθεις μορφές φόρτισης από τις οποίες προκύπτουν οι χαρακτηριστικοί κύκλοι Mohr. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.2.6, ο κύκλος Mohr της ανεμπόδιστης θλίψης εφάπτεται από αριστερά στον άξονα της διατμητικής τάσης, ενώ παράλληλα τέμνει τον άξονα ορθής τάσης στο σημείο της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u . Σε ό,τι αφορά την εντατική κατάσταση που αντιστοιχεί στη θλίψη κατά γενέτειρα, τα δοκίμια δισκοειδούς μορφής αστοχούν σε εφελκυσμό υπό την παρουσία μίας θλιπτικής τάσης και η τιμή της εφελκυστικής τάσης στην αστοχία είναι κατ' απόλυτη τιμή τρεις φορές μικρότερη της θλιπτικής τάσης τη στιγμή της αστοχίας. Ο συνδυασμός των κύκλων Mohr από τις δοκιμές θλίψης κατά γενέτειρα και ανεμπόδιστης θλίψης επιτρέπει την προσέγγιση περιβάλλουσας διατμητικής αντοχής με την υπόθεση ότι το κριτήριο Mohr-Coulomb είναι γραμμικό.

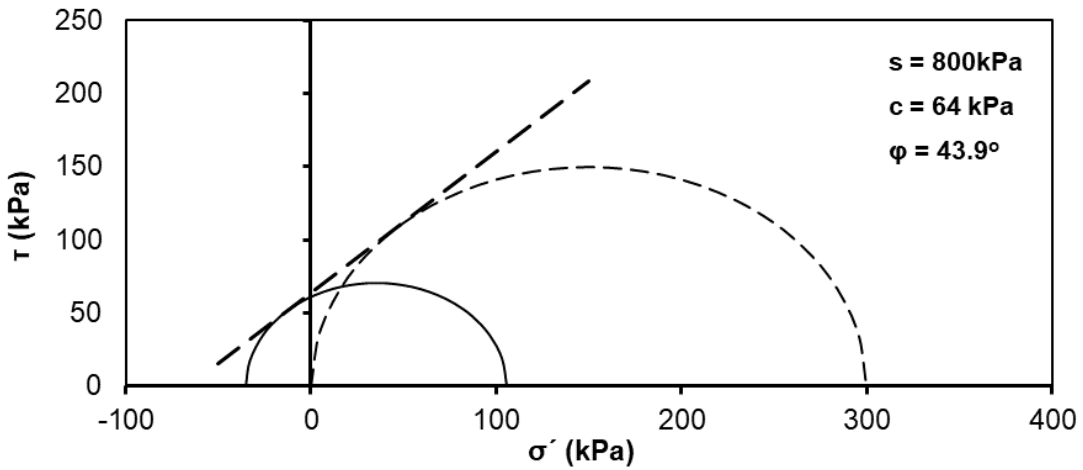
Βάσει όσων έχουν προαναφερθεί σχετικά με τους κύκλους Mohr και τα αποτελέσματα από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα, παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα οι τιμές της συνοχής c και της γωνίας διατμητικής αντοχής φ για όλα τα ζεύγη δοκιμών σε σχέση με την αντίστοιχη μύζηση. Πιο συγκεκριμένα, ο κύκλος που αντιστοιχεί στη θλίψη κατά γενέτειρα απεικονίζεται με συνεχή γραμμή, ενώ ο κύκλος που αντιστοιχεί στην ανεμπόδιστη θλίψη παρουσιάζεται με διακεκομμένη γραμμή. Για την ευκρινέστερη παρατήρηση των σχημάτων, οι τιμές των αξόνων των διαγραμμάτων δεν είναι όμοιες, αν και θα βοηθούσε στη σύγκρισή τους.



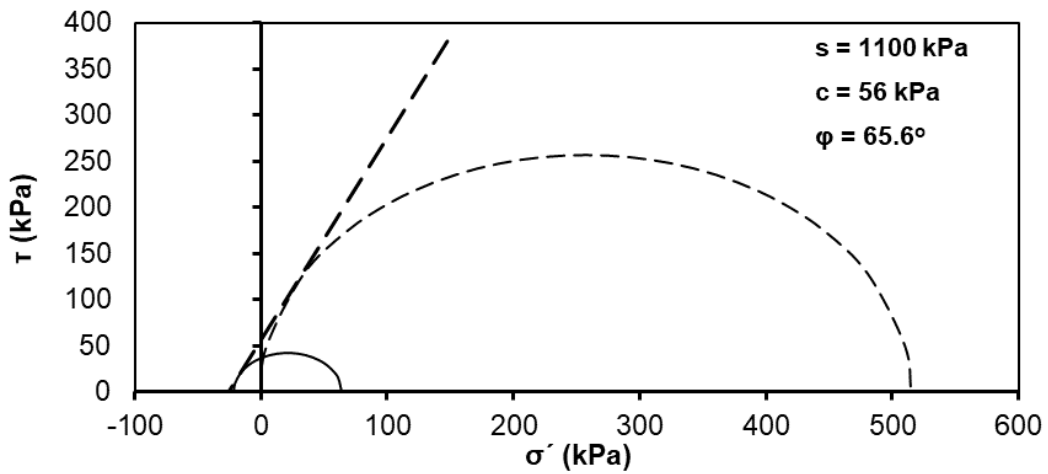
Σχήμα 4.3.2.7: Κύκλοι Mohr για τιμή μύζησης $s = 400 \text{ kPa}$ (θάλαμος μύζησης)



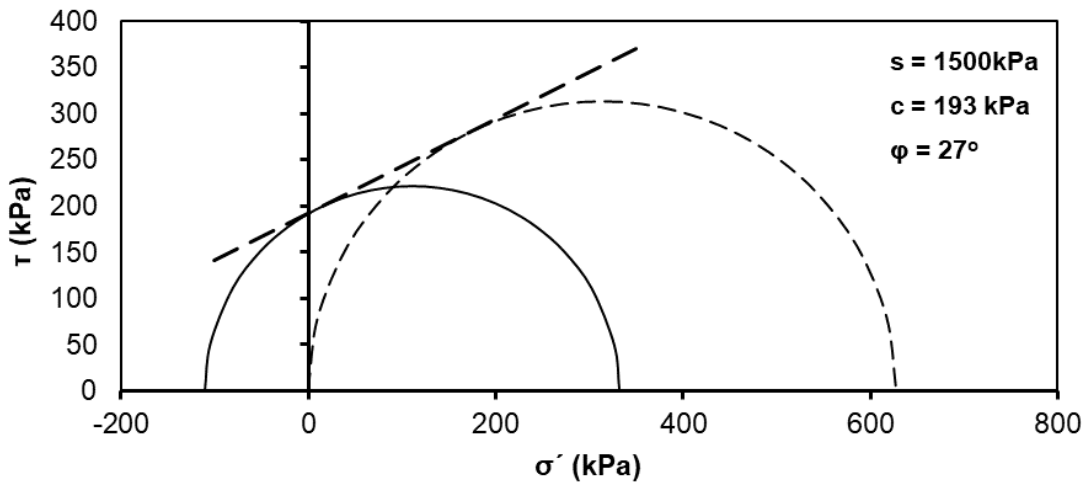
Σχήμα 4.3.2.8: Κύκλοι Mohr για τιμή μύζησης $s = 600 \text{ kPa}$ (θάλαμος μύζησης)



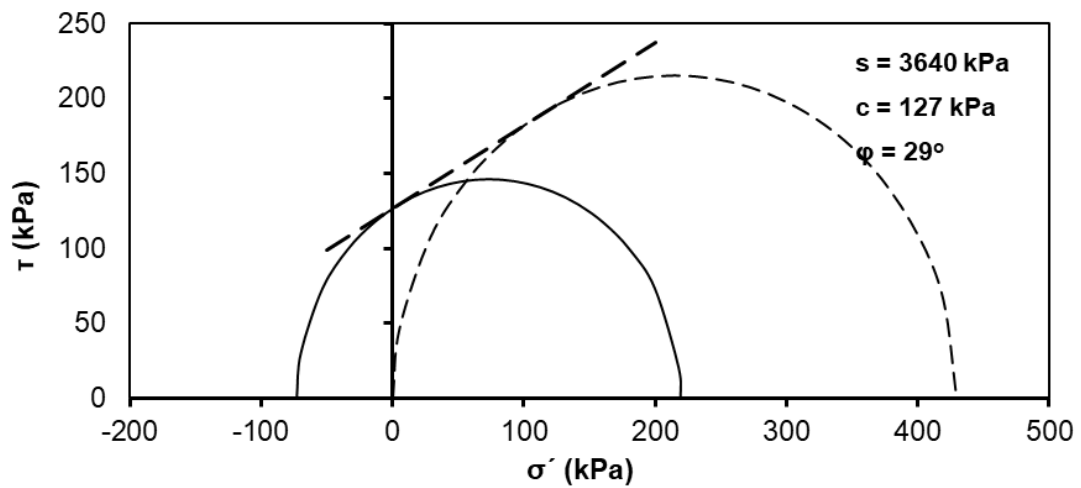
Σχήμα 4.3.2.9: Κύκλοι Mohr για τιμή μύζησης $s = 800 \text{ kPa}$ (θάλαμος μύζησης)



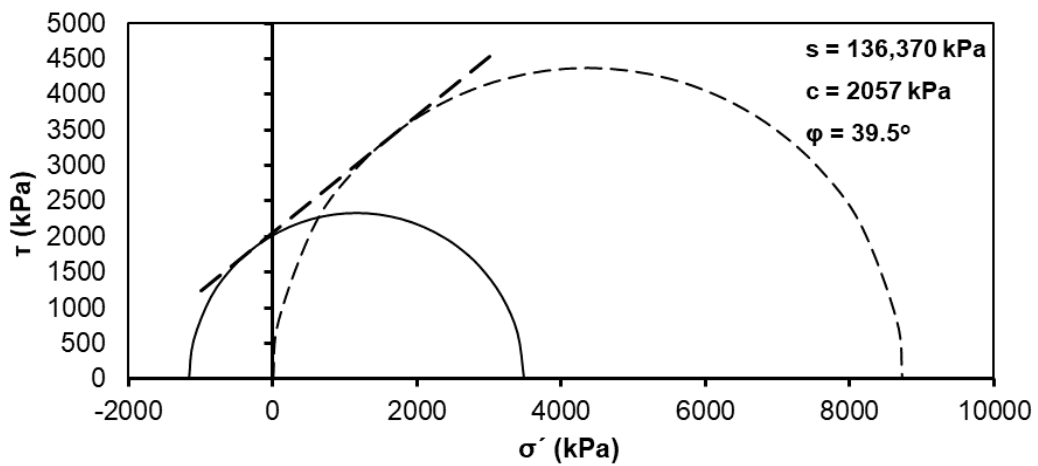
Σχήμα 4.3.2.10: Κύκλοι Mohr για τιμή μύζησης $s = 1100 \text{ kPa}$ (θάλαμος μύζησης)



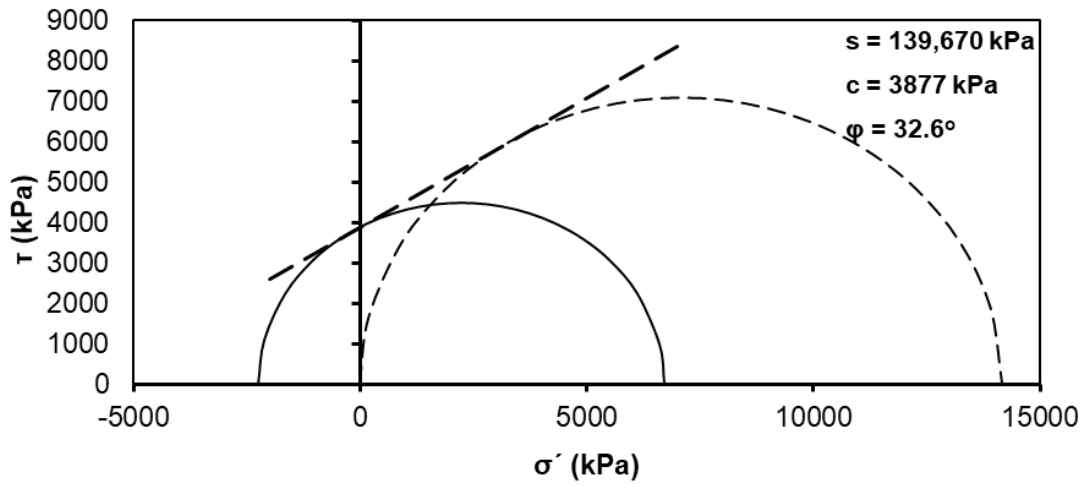
Σχήμα 4.3.2.11: Κύκλοι Mohr για τιμή μύζησης $s = 1500 \text{ kPa}$ (θάλαμος μύζησης)



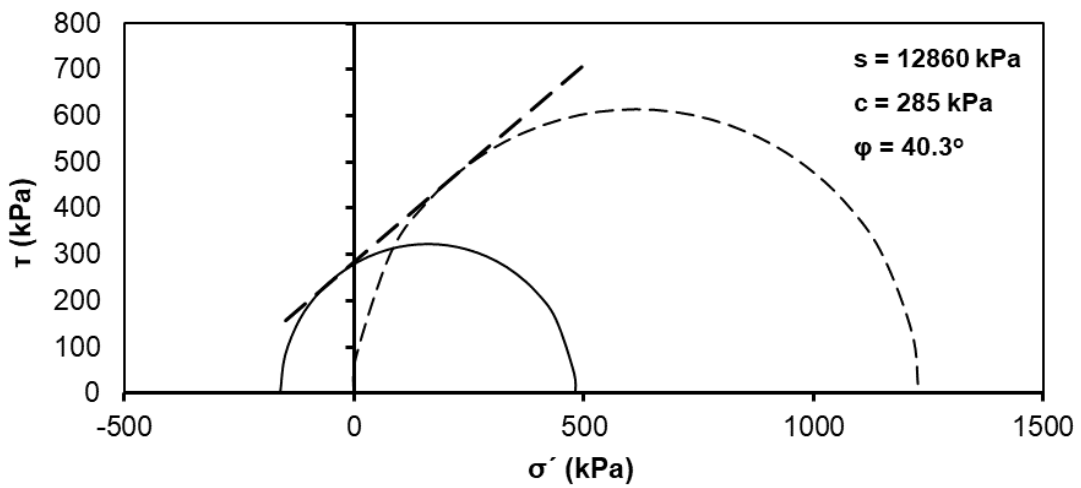
Σχήμα 4.3.2.12: Κύκλοι Mohr για τιμή μύζησης $s = 1500 \text{ kPa}$ στον θάλαμο μύζησης και ξήρανση στην ατμόσφαιρα στη συνέχεια



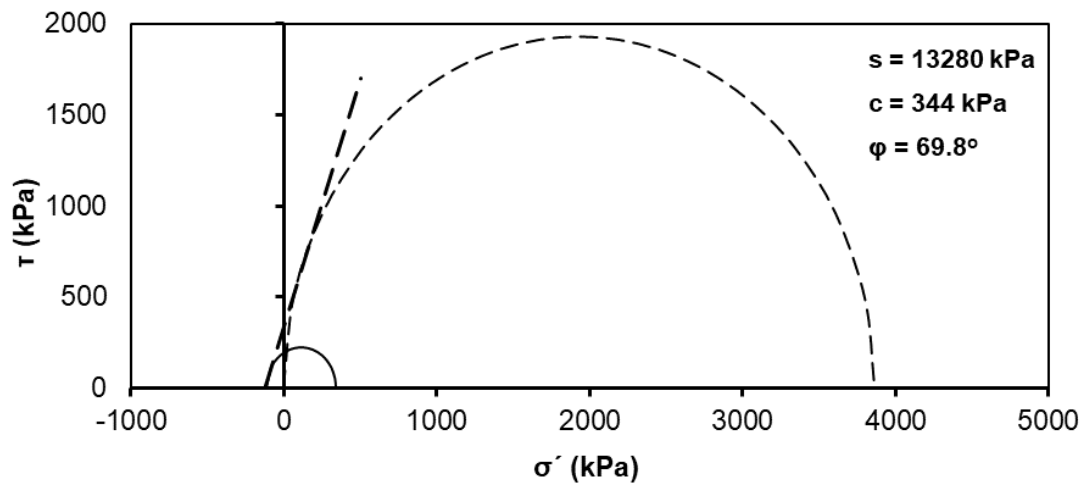
Σχήμα 4.3.2.13: Κύκλοι Mohr για ολική ξήρανση στην ατμόσφαιρα σε κέρινη επιφάνεια



Σχήμα 4.3.2.14: Κύκλοι Mohr για ολική ξήρανση στην ατμόσφαιρα σε μεταλλική επιφάνεια



Σχήμα 4.3.2.15: Κύκλοι Mohr - ξήρανση υλικού στην ατμόσφαιρα με 30% υγρασία



Σχήμα 4.3.2.16: Κύκλοι Mohr - ξήρανση υλικού στην ατμόσφαιρα με 20% υγρασία

Από τα σχήματα παρατηρείται ότι η γωνία διατμητικής αντοχής για τιμές μύζησης μέχρι τα 1100kPa αυξάνεται συνεχώς ενώ για τιμή μύζησης $s = 1500\text{kPa}$ παρατηρείται μία απότομη πτώση της τιμής φ . Παράλληλα γίνεται αντιληπτό ότι μεταξύ του δείγματος με τιμή μύζησης 1500kPa και αυτού με τιμή μύζησης 3640 kPa, οι τιμές της γωνίας διατμητικής αντοχής είναι παρόμοιες. Σε ό,τι αφορά τα δείγματα τα οποία υποβλήθηκαν σε ολική ξήρανση στην ατμόσφαιρα παρατηρείται ότι το δείγμα που βρισκόταν στη γυάλινη επιφάνεια έχει μικρότερη γωνία φ από το δείγμα της μεταλλικής επιφάνειας, με τη διαφορά να ανέρχεται στις 7°. Τέλος, στα δείγματα που ξηράθηκαν στην ατμόσφαιρα μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή υγρασίας, συμπεραίνεται ότι μειώνοντας το ποσοστό υγρασίας και επομένως τον βαθμό κορεσμού ενός υλικού αυξάνεται η τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής φ .

Αναφορικά με τις τιμές της συνοχής παρατηρείται ότι μέχρι τη μύζηση 600kPa η συνοχή αυξάνεται, ενώ από τα 600kPa μέχρι και τα 1100kPa μειώνεται συνεχώς, χωρίς όμως να είναι πολύ μεγάλες οι διαφορές των τιμών μεταξύ τους. Αντίθετα στα 1500kPa μύζησης είναι εμφανής η απότομη αύξηση της συνοχής σε σχέση με τις προηγούμενες τιμές, ενώ παράλληλα παρατηρείται διαφορά μεταξύ της συνοχής για μύζηση 1500kPa και του δείγματος με μύζηση 1500kPa με πρόσθετη ξήρανση στην ατμόσφαιρα, με το δεύτερο να αποκτά χαμηλότερη τιμή από το πρώτο. Ωστόσο και τα δύο δείγματα με μύζηση 1500kPa έχουν μεγαλύτερες τιμές μύζησης από τις προαναφερθείσες. Επίσης παρατηρείται πολύ μεγαλύτερη τιμή συνοχής, της τάξης των 3MPa, στα δείγματα που ξηράθηκαν στην ατμόσφαιρα μέχρι σταθεροποίησης του όγκου τους, σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα δείγματα. Ειδικότερα το δείγμα που απέκτησε τη μεγαλύτερη τιμή συνοχής αποτελεί το δείγμα με πλήρη ξήρανση στη γυάλινη επιφάνεια με τιμή 3877 kPa. Τέλος, σχετικά με τα δείγματα που ξηράθηκαν στην ατμόσφαιρα μέχρι να αποκτήσουν ένα συγκεκριμένο ποσοστό υγρασίας παρατηρήθηκε ότι όσο μειώνεται το ποσοστό υγρασίας, η τιμή της συνοχής αυξάνεται.

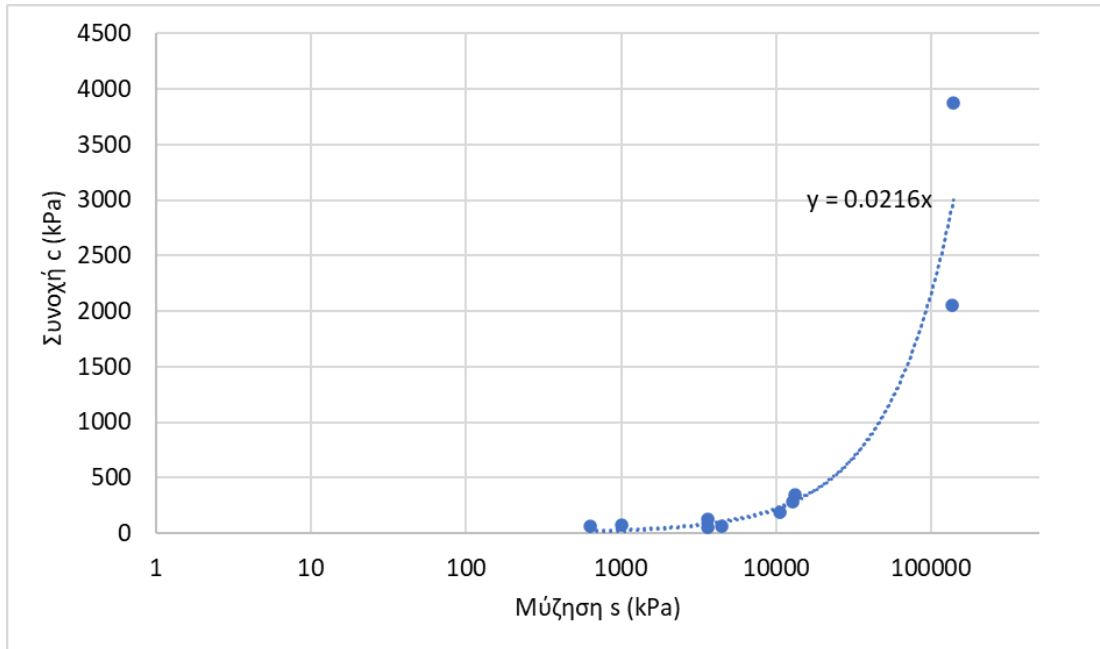
Βάσει όσων προαναφέρθηκαν, παρατίθεται ο Πίνακας 4.3.2.2, στον οποίο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές της ανεμπόδιστης θλίψης,

θλίψης κατά γενέτειρα όπως επίσης και οι τιμές της συνοχής και της γωνίας διατμητικής αντοχής, που προσδιορίστηκαν από τους κύκλους Mohr.

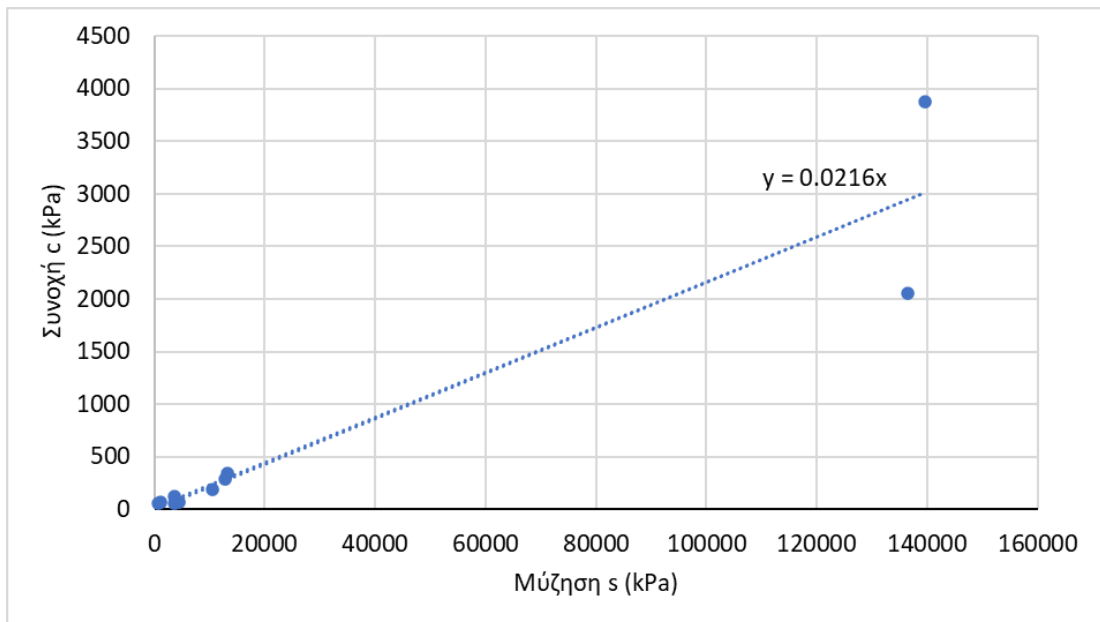
| Μύζηση όπως ελέγχθηκε στον θάλαμο μύζησης (kPa) | Μύζηση όπως μετρήθηκε στο Υ.Ψ.Κ (kPa) | q_u (kPa) | σ_1 (kPa) | w (%) | γ_d (kN/m ³) | γ (kN/m ³) | Sr (%) | e | w (braz) (%) | c (kPa) | ϕ (°) |
|---|---------------------------------------|-------------|------------------|-------|---------------------------------|-------------------------------|--------|------|--------------|---------|------------|
| 400 | 630 | 146 | 32,7 | 62,39 | 10,45 | 16,98 | 100 | 1,36 | 60,79 | 61 | 10,9 |
| 600 | 1010 | 280 | 42 | 51,09 | 10,56 | 15,96 | 94,26 | 1,34 | 49,88 | 73 | 35 |
| 800 | 4440 | 300,0 | 35,2 | 48,15 | 11,38 | 16,86 | 100,00 | 1,17 | 49,32 | 64 | 43,9 |
| 1100 | 3610 | 515,0 | 21,2 | 43,74 | 10,04 | 14,43 | 73,98 | 1,46 | 44,67 | 56 | 66 |
| 1500 | 10550 | 627,0 | 110,8 | 41,2 | 11,89 | 16,79 | 94,5 | 1,08 | 41,16 | 193 | 27 |
| | 3640 | 430,0 | 73,1 | 42,82 | 11,4 | 16,29 | 90,71 | 1,17 | 37,6 | 127 | 29 |
| | 136370 | 8729 | 1163,5 | 9,32 | 15,05 | 16,46 | 35,93 | 0,64 | 7,02 | 2057 | 40 |
| | 139670 | 14165 | 2234,9 | 6,6 | 15,17 | 16,17 | 25,96 | 0,63 | 6,41 | 3877 | 32,6 |
| | 12860 | 1229 | 160,6 | 33,94 | 13,2 | 17,68 | 96,26 | 0,87 | 34,49 | 285 | 40 |
| | 13280 | 3862 | 112 | 26,07 | 14,67 | 18,49 | 94,16 | 0,68 | 27,2 | 344 | 69,8 |

Πίνακας 4.3.2.2: Συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα από τις δοκιμές ανεμπόδισης θλίψης, θλίψης κατά γενέτειρα και των χαρακτηριστικών κύκλων Mohr της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου

Τέλος, παρατίθενται τα σχήματα 4.3.2.15 & 4.3.2.16 στα οποία παρουσιάζεται η συνοχή σε σχέση με τη μύζηση της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου, με τον άξονα της μύζησης να είναι σε λογαριθμική και γραμμική κλίμακα αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα διαγράμματα παρατηρείται ότι η συνοχή του υλικού επηρεάζεται από την τιμή της μύζησης του. Με την αύξηση της μύζησης, για χαμηλές τιμές μύζησης, αυξάνεται σταδιακά και με αργό ρυθμό η φαινόμενη συνοχή της μπεντονιτικής αργίλου. Αντίθετα με την αύξηση της μύζησης του υλικού για τιμές της τάξης των 80000 - 100000 kPa, παρατηρείται απότομη αύξηση της συνοχής του, ενώ στη συνέχεια με την παραμικρή αύξηση της μύζησης, αυξάνεται ραγδαία η τιμή της συνοχής του υλικού. Συνεπώς, με βάση και το παρακάτω σχήμα παρατηρείται ότι με την αύξηση της μύζησης, η φαινόμενη συνοχή της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου αυξάνεται με εκθετικό ρυθμό.

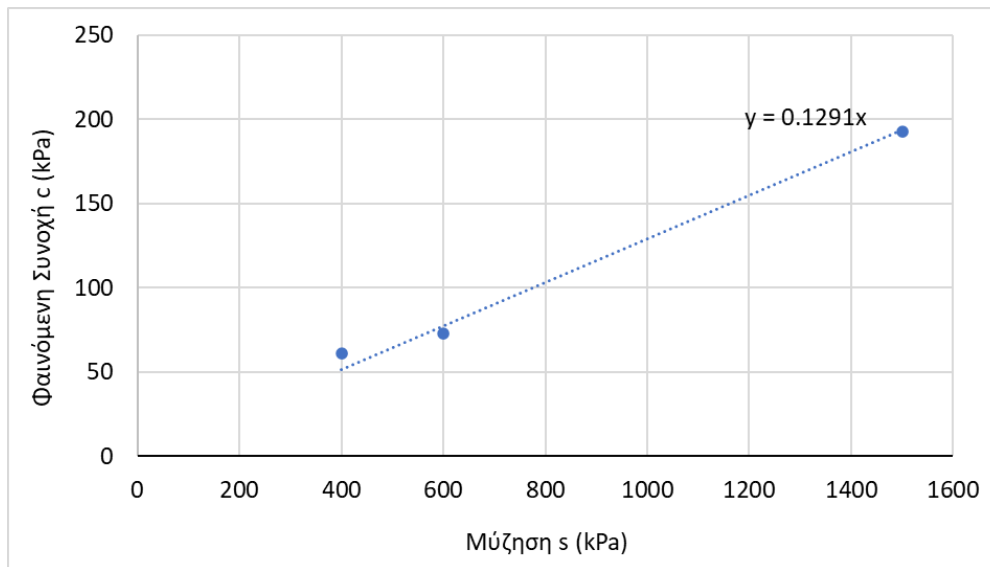


Σχήμα 4.3.2.17: Εξέλιξη της συνοχής με τη μύζηση για την μπεντονιτική άργιλο Άρμου (Άξονας συνοχής σε γραμμική κλίμακα και άξονας μύζησης σε λογαριθμική κλίμακα)



Σχήμα 4.3.2.18: Εξέλιξη της συνοχής με τη μύζηση για την μπεντονιτική άργιλο Άρμου (Άξονας συνοχής και μύζησης σε γραμμική κλίμακα)

Λαμβάνοντας υπόψη τα πιο αντιπροσωπευτικά σημεία του Σχήματος 4.3.2.18 παρουσιάζεται το Σχήμα 4.3.2.19.



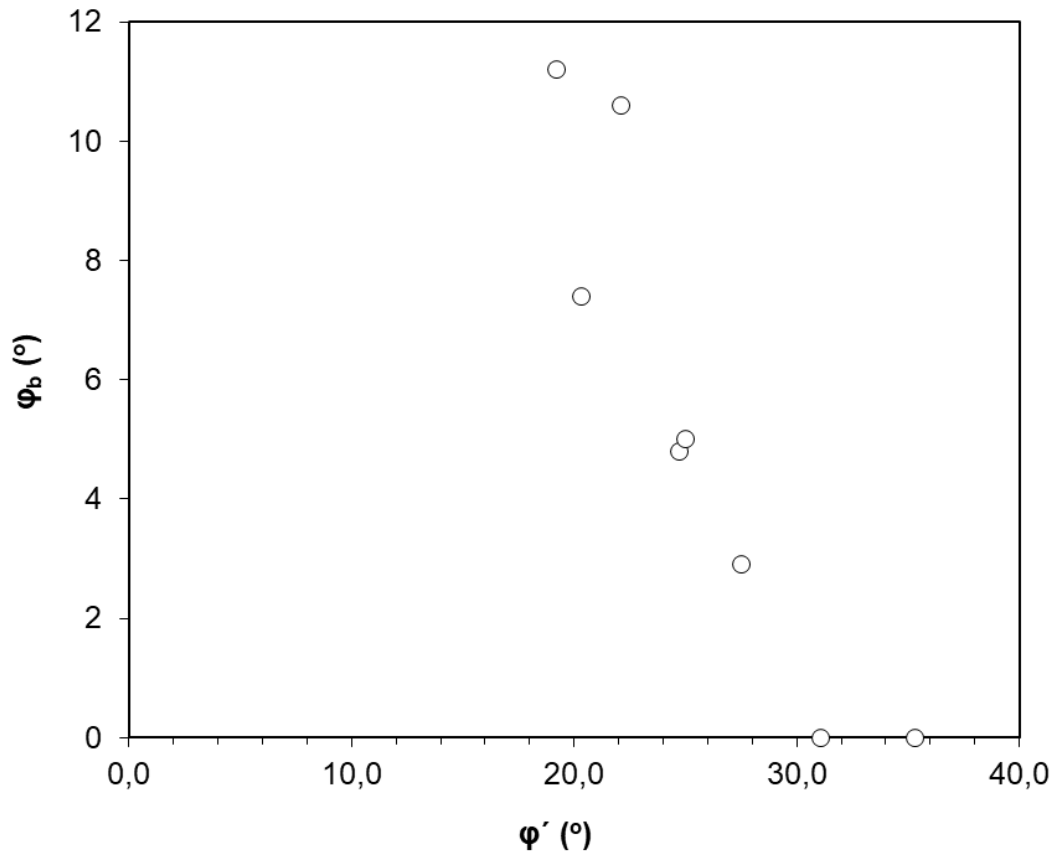
Σχήμα 4.3.2.19: Εξέλιξη της φαινόμενης συνοχής με τη μύζηση για την μπεντονιτική άργιλο Άρμου (Άξονας συνοχής και μύζησης σε γραμμική κλίμακα)

Βάσει του Σχήματος 4.3.2.19 και γνωρίζοντας από προηγούμενο πρόγραμμα του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ ότι η γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' της μπεντονιτικής άργιλο Άρμου ισούται 20.3° υπολογίστηκε η παράμετρος $\phi_b = 7.4^\circ$.

Συμπληρώνοντας τα δεδομένα του Κοκκοβιάδη (Κοκκοβιάδης, 2022) παρατίθεται ο Πίνακας 4.3.2.3 από τον οποίο παρήχθη το Σχήμα 4.3.2.20.

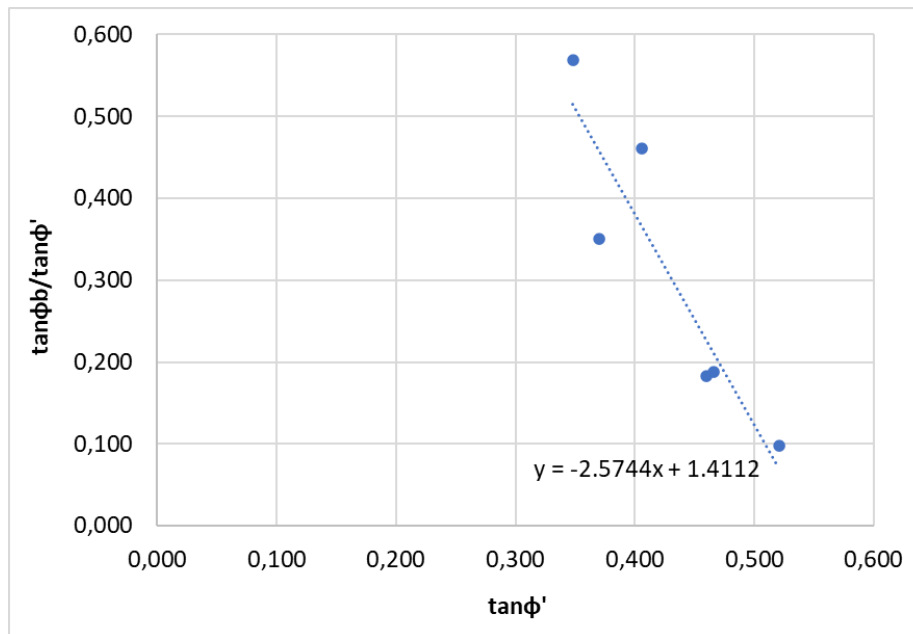
| | w_L | w_p | I_p | G_s | Άργιλος | Ιλύς | Άργιλος + Ιλύς | Λεπτή άμμος | Μέση άμμος | Χονδρή άμμος | Χάλικες | ϕ' | ϕ_b |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|---------|------|----------------|-------------|------------|--------------|---------|--------------|--------------|
| | (%) | (%) | (%) | - | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | ($^\circ$) | ($^\circ$) |
| 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 Κορινθίου | 30,5 | 25 | 5,5 | 2,67 | 6,5 | 84,7 | 91,2 | 8,8 | 0 | 0 | 0 | 27,5 | 2,9 |
| Άργιλοποιημένος 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 Χαλκουταίου | 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 |
| Μπεντονιτική Άργιλος Πάφου | 143 | 35 | 108 | 2,47 | 54 | 42 | 96 | 2,6 | 1,1 | 0,5 | 0 | 20,3 | 7,4 |

Πίνακας 4.3.2.3: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών κατάταξης και προσδιορισμού εξέλιξης αντοχής με τη μύζηση (Μπαρδάνης, 2016, αρχείο ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε., Κοκκοβιάδης, 2022)



Σχήμα 4.3.2.20: Εξέλιξη της γωνίας μεταβολής της αντοχής με τη μύζηση ϕ_b με τη γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' του αντίστοιχου πλήρως κορεσμένου εδαφικού υλικού (Κοκκοβιάδης, 2022 και συμπλήρωση αυτού με στοιχεία της παρούσας διπλωματικής)

Εξαιρώντας τις τιμές για κοκκώδη υλικά που αντιστοιχούν σε $\phi_b = 0$, το Σχήμα 4.3.2.20 αναμορφώθηκε στο Σχήμα 4.3.2.21, όπου στον κατακόρυφο άξονα υπάρχει η κανονικοποιημένη παράμετρος $\tan\phi_b/\tan\phi'$ και στον οριζόντιο άξονα η $\tan\phi'$.



Σχήμα 4.3.2.21: Εξέλιξη της γωνίας μεταβολής της αντοχής με τη μύζηση ϕ_b με τη γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' του αντίστοιχου πλήρως κορεσμένου εδαφικού υλικού εξαιρουμένων των κοκκωδών υλικών και με κανονικοποιημένο τον κατακόρυφο άξονα

Από το Σχήμα 4.3.2.21 προκύπτει η εμπειρική συσχέτιση που περιγράφεται από την Εξίσωση 4.3.2.1.

$$\frac{\tan\phi_b}{\tan\phi'} = 1.41 - 2.57 \cdot \tan\phi' \quad \text{Εξ. 4.3.2.1}$$

η οποία, με αναδιάταξη παίρνει τη μορφή της Εξίσωσης 4.3.2.2.

$$\tan\phi_b = \tan\phi' \cdot (1.41 - 2.57 \cdot \tan\phi') \quad \text{Εξ. 4.3.2.2}$$

Η Εξίσωση 4.3.2.2 έχει προκύψει μόλις από 6 πειραματικά σημεία. Η αξία της όμβης έγκειται στο ότι επιτρέπει την εκτίμηση της παραμέτρου ϕ_b αν είναι γνωστή η γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' για εδαφικά υλικά που έχουν ταξινομηθεί ως CL ή CH, δηλαδή για αργιλικά υλικά χαμηλής ή υψηλής πλαστικότητας.

Για παράδειγμα, αν έχει μετρηθεί η γωνία διατμητικής αντοχής ϕ' ενός πλήρως κορεσμένου υλικού και είναι ίση με 22° , από την Εξίσωση 4.3.2.2 προκύπτει η εκτιμώμενη τιμή $\phi_b = 8.5^\circ$.

Τονίζεται και πάλι ότι η Εξίσωση 4.3.2.2 προέκυψε από μόλις 6 πειραματικά σημεία και πρέπει να διερευνηθεί η ακρίβειά της και με επιπλέον πειραματικά σημεία στο μέλλον.

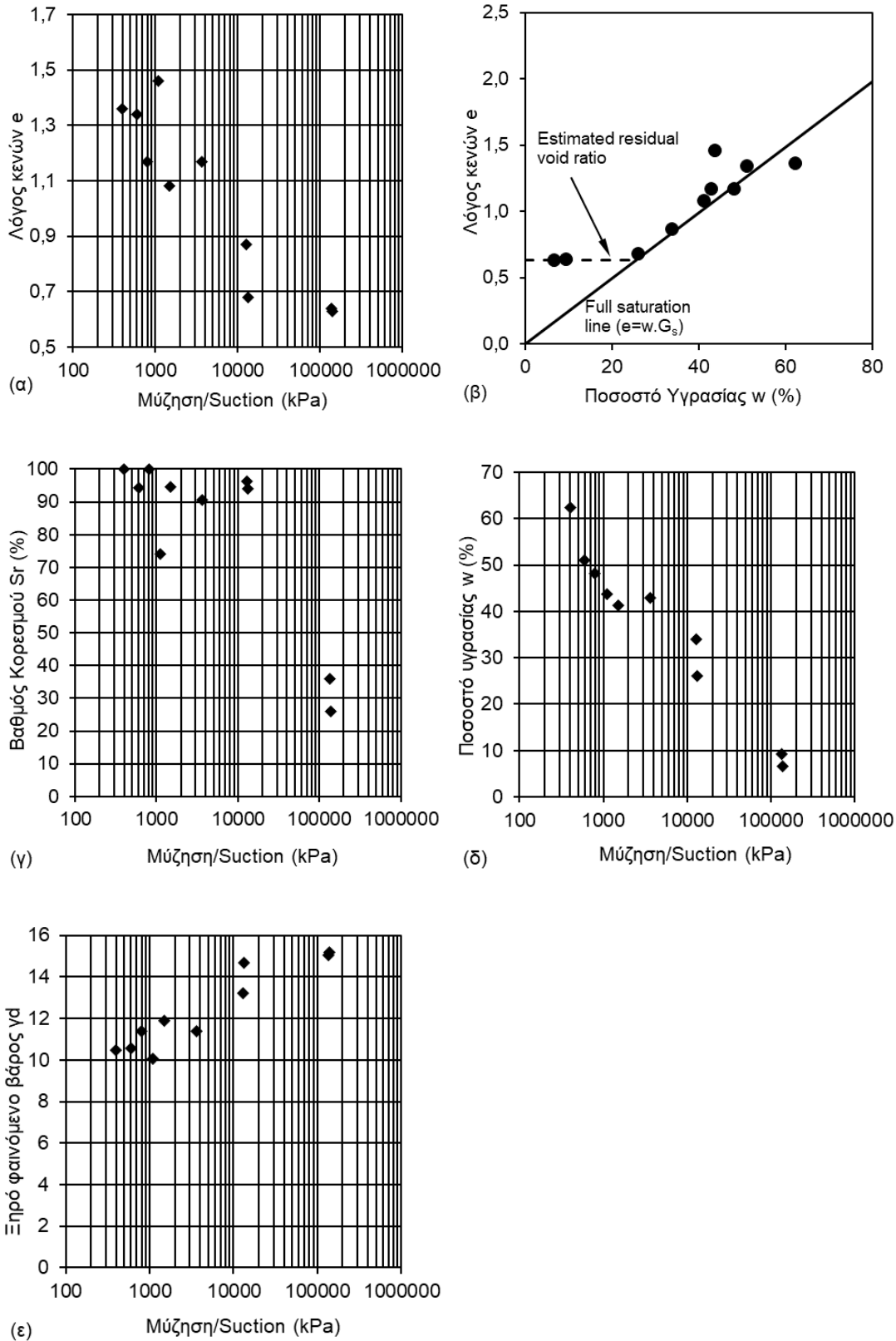
4.3.3 Προσδιορισμός φαινόμενου βάρους με παραφίνωση

Αφού πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές της ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα, τρίμματα του υλικού χρησιμοποιήθηκαν, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, για τον προσδιορισμό της ολικής μύζησης του υλικού με τη χρήση υγρόμετρου ψυχρού κατόπτρου. Επίσης, από τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές θλίψης κατά γενέτειρα (Brazilian), αλλά και από μερικά από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, κρατήθηκε τμήμα τους και παραφινώθηκε ώστε να μετρηθεί το φαινόμενο βάρος τους. Το δοκίμιο είναι απαραίτητο να παραφινωθεί απευθείας μετά την εκτέλεση της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης ή της θλίψης κατά γενέτειρα ώστε να μην υπάρξει απώλεια της υγρασίας του. Πραγματοποιώντας της διαδικασία της παραφίνωσης του δείγματος σωστά, η υγρασία του υλικού δεν μεταβάλλεται αλλά παραμένει σταθερή καθώς πλέον το δοκίμιο δεν είναι σε επαφή με την ατμόσφαιρα.

Η συγκεκριμένη δοκιμή πραγματοποιείται κατά το πρότυπο ΥΠΕΧΩΔΕ/ΚΕΔΕ Ε105-86/3. Αρχικά ζυγίζεται και καταγράφεται το βάρος του υγρού δείγματος, εφόσον έχει μορφωθεί, ενώ στη συνέχεια παραφινώνεται και παραμένει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι η παραφίνη να στεγνώσει πλήρως. Στη συνέχεια υπολογίζεται το βάρος του παραφινωμένου υγρού δείγματος και τέλος εμβαπτίζεται το παραφινωμένο δοκίμιο σε δοχείο απιονισμένου νερού όπου και ζυγίζεται υπό άνωση το βάρος του υλικού. Βάσει της διαδικασίας που περιεγράφηκε και με τους απαραίτητους υπολογισμούς, υπολογίστηκε το ξηρό φαινόμενο βάρος των δοκιμών γ_d , ο λόγος κενών e , όπως επίσης και ο βαθμός κορεσμού τους S_r .

Με τον προσδιορισμό των παραμέτρων που προαναφέρθηκαν, σχεδιάστηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους – νερού της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω στο Σχήμα 4.3.3.1. Συγκεκριμένα τα γραφήματα που παρατίθενται είναι τα: α) Λόγος κενών – Μύζηση, β) Λόγος κενών

- Ποσοστό υγρασίας, γ) Βαθμός κορεσμού - Μύζηση, δ) Ποσοστό υγρασίας - Μύζηση και ε) Ξηρό φαινόμενο βάρος - Μύζηση.



Σχήμα 4.3.3.1: Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους - νερού της αναζυμωμένης μπεντονιτικής αργίλου Άρμου

Βάσει του Σχήματος 4.3.3.1 α-ε προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα. Σε ό,τι αφορά το Σχήμα 4.3.3.1α, ο λόγος κενών e της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου μειώνεται συνεχώς και με σημαντικό ρυθμό με την αύξηση της μύζησης του υλικού και επομένως με την μείωση του ποσοστού υγρασίας του υλικού. Συγκεκριμένα, για χαμηλές τιμές μύζησης (400-1100 kPa) ο λόγος κενών κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.3 – 1.5 ενώ για πολύ υψηλές τιμές μύζησης (πάνω από 100,000 kPa) κυμαίνεται σε τιμές κοντά στο 0.63.

Στο Σχήμα 4.3.3.1β γίνεται αντιληπτό ότι όσο μειώνεται το ποσοστό υγρασίας του υλικού μειώνεται και ο λόγος κενών μέχρι μία τιμή. Ειδικότερα παρατηρείται αυτή η μεταβολή του λόγου κενών ως προς το ποσοστό υγρασίας μέχρι περίπου τιμές ποσοστού υγρασίας 25%. Στο εύρος αυτό φαίνεται από το σχήμα ότι τα δείγματα τείνουν να έχουν συμπεριφορά πλήρους κορεσμένου υλικού καθώς τα σημεία συμπίπτουν με την γραμμή πλήρους κορεσμού. Αντίθετα, για ποσοστό υγρασίας κάτω από 25% ο λόγος κενών τείνει να σταθεροποιηθεί στην τιμή 0.63 για την μπεντονική άργιλο Άρμου, ενώ παράλληλα παρατηρείται ότι τα σημεία με πολύ χαμηλά ποσοστά υγρασίας απομακρύνονται όλο και περισσότερο από την γραμμή πλήρους κορεσμού.

Αναφορικά με το Σχήμα 4.3.3.1γ, γίνεται αντιληπτό ότι για χαμηλές τιμές μύζησης της μπεντονιτικής αργίλου, μέχρι 15,000 kPa, ο βαθμός κορεσμού των δειγμάτων όχι μόνο αποκτά πολύ υψηλές τιμές, αλλά η πλειοψηφία των τιμών του κορεσμού είναι μεγαλύτερες από το 90%. Αντίθετα για πολύ υψηλές τιμές μύζησης, μεγαλύτερες των 130,000 kPa, είναι εμφανές ότι ο βαθμός κορεσμού μειώνεται σε μεγάλο βαθμός και πλέον οι τιμές S_r κυμαίνονται μεταξύ των ποσοστών 25-35%. Η σημαντικά χαμηλή τιμή του βαθμού κορεσμού για τιμή της μύζησης 1100 kPa οφείλεται προφανώς σε εργαστηριακό λάθος και δεν είναι πραγματική για αυτήν την τιμή της μύζησης. Εξαιρουμένης αυτής της τιμής, από την εξέλιξη των υπόλοιπων τιμών γίνεται εμφανές ότι με βάση την ακρίβεια της μεθόδου η μπεντονική άργιλος Άρμου διατηρείται πρακτικά πλήρως κορεσμένη ακόμα και για τιμές μύζησης 15 MPa και πρέπει να θεωρείται ότι έχει μύζηση αποκορεσμού αυτής της τάξης μεγέθους αν όχι και λίγο μεγαλύτερη.

Σχετικά με το Σχήμα 4.3.3.1δ, όσο αυξάνεται η μύζηση του υλικού παρατηρείται συνεχής και σταδιακή μείωση του ποσοστού υγρασίας. Τέλος, σε ό,τι αφορά το Σχήμα 4.3.3.1ε, συμπεραίνεται ότι αυξάνεται το ξηρό ειδικό/φαινόμενο βάρος της μπεντονιτικής αργίλου όσο ξηραίνεται το υλικό και επομένως όσο αυξάνεται η μύζηση του.

Συνεπώς, βάσει των παρατηρήσεων που προέκυψαν από τον σχολιασμό των χαρακτηριστικών καμπύλων εδάφους – νερού, με την συνεχή αύξηση της μύζησης και επομένως τη μείωση του ποσοστού υγρασίας της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου, παρατηρείται σταδιακή μείωση του λόγου κενών και σταδιακή αύξηση του ξηρού φαινόμενου βάρους. Η μύζηση αποκορεσμού είναι τουλάχιστον 15 MPa και ίσως και λίγο μεγαλύτερη και ο παραμένον λόγος κενών για αρχικές συνθήκες ξήρανσης του υλικού που αντιστοιχούν σε μορφή πολτού είναι περίπου 0.60-0.65.

4.3.4 Δοκιμή Δακτυλιοειδούς διάτμησης

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διπλωματικής, η διατμητική αντοχή ενός εδαφικού υλικού, υπό στραγγισμένες συνθήκες φόρτισης, περιγράφεται από το γενικευμένο κριτήριο Mohr-Coulomb. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της ορθής τάσης, αυξάνεται η διατμητική αντοχή του υλικού. Αναφορικά με την περιβάλλουσα διατμητικής αντοχής Mohr-Coulomb, περιγράφεται από τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής, δηλαδή τη συνοχή και τη γωνία διατμητικής αντοχής. Σε ό,τι αφορά τη διατμητική αντοχή, αποκτά τη μέγιστη τιμή της την πρώτη φορά που επέρχεται αστοχία στο εδαφικό υλικό, ενώ σημειώνει την ελάχιστη τιμή της μετά από πάρα πολύ μεγάλες παραμορφώσεις, όταν δηλαδή μεταβάλλεται η δομή του υλικού.

Στην κατάσταση παραμένουσας διατμητικής αντοχής ενός αργιλικού εδάφους, η συνοχή έχει τιμή μηδέν, ενώ η γωνία διατμητικής αντοχής είναι ίση με την γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής υπολογίζεται στο εργαστήριο με τη χρήση της δοκιμής δακτυλιοειδούς διάτμησης (ring shear test), η οποία επιτρέπει την εφαρμογή μεγάλων οριζόντιων παραμορφώσεων.

Η δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης είναι μια εξεζητημένη δοκιμή η οποία είναι χρήσιμη για να προσδιοριστεί η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής των αργιλικών εδαφών.

Απαραίτητο να αναφερθεί είναι το γεγονός ότι η διατμητική αντοχή περιγράφεται από συνθήκες που αντιστοιχούν στην κατάσταση παραμένουσας διατμητικής αντοχής, όταν αφορά την επιφάνεια ολίσθησης μίας κατολίσθησης. Πιο συγκεκριμένα, κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης μίας κατολίσθησης στην οποία έχουν προκληθεί μεγάλες παραμορφώσεις, η συνοχή αποκτά τιμή 0. Επομένως, η γωνία διατμητικής αντοχής αποτελεί τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής για την επιφάνεια ολίσθησης της συγκεκριμένης κατολίσθησης, η οποία προσδιορίζεται μέσω της δοκιμής δακτυλιοειδούς διάτμησης.

Για τη διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής δακτυλιοειδούς διάτμησης, μορφώνεται δακτυλιοειδές δοκίμιο αναζυμωμένου εδάφους το οποίο μορφώνεται εντός κυψέλης, υποδοχής του ίδιου σχήματος. Το κατώτερο τμήμα της κυψέλης αρχίζει να περιστρέφεται επιβάλλοντας την δακτυλιοειδή διάτμηση, ενώ το ανώτερο τμήμα της παραμένει σταθερό καθώς εφάπτεται ειδικά διαμορφωμένο καπάκι. Στις άκρες του καπακιού μετρούνται οι δυνάμεις αντίστασης αντίστροφα με την κυκλική κίνηση που πραγματοποιεί η κυψέλη. Συνεπώς, γνωρίζοντας τις δυνάμεις που προσδιορίζονται από το κάθε άκρο, υπολογίζεται η ροπή αντίστασης και έπειτα η διατμητική αντοχή επί της επιφάνειας του δοκιμίου και άρα η γωνία διατμητικής αντοχής, η οποία ισοδυναμεί με τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής όταν εφαρμοστούν στη συσκευή επαρκώς μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις.

Στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε., η δοκιμή εκτελέστηκε κατά τα πρότυπα ASTM D7608 και η διαδικασία εκτέλεσης καθώς και τα αποτελέσματα της δοκιμής παρατίθενται στη συνέχεια της παρούσας ενότητας.



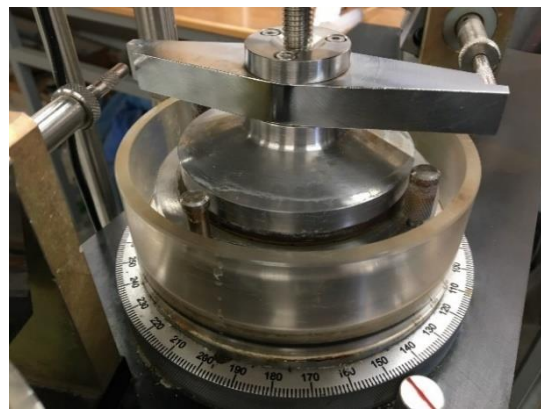
Φωτογραφία 4.3.4.1: Συσκευή δακτυλιοειδούς διάτμησης εργαστηρίου ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.



Φωτογραφία 4.3.4.2: Συσκευή δακτυλιοειδούς διάτμησης εργαστηρίου ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε.

Για τον υπολογισμό της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας στο υλικό της μπεντονιτικής αργίλου και συγκεκριμένα στο μίγμα Δ4-Δ5, πραγματοποιήθηκε η παραπάνω διαδικασία. Ειδικότερα, κατά την έναρξη της δοκιμής επιβλήθηκε φορτίο 150 kPa. Με τη φόρτιση του υλικού στα 150 kPa, ξεκίνησε και η συμπίεσή του. Το υλικό αφέθηκε σε συμπίεση μία ημέρα χωρίς την παρουσία νερού και μία ημέρα με την πλήρωση της κυψέλης με νερό. Μετά το πέρας των δύο ημερών, ξεκίνησε η διαδικασία της διάτμησης της αργίλου με ρυθμό 0.02°/min. Μετρήσεις καταγράφονταν ανά δύο λεπτά, μέχρι τα μηκυνσιόμετρα των δυναμομετρικών δακτυλίων να δείξουν την μέγιστη τιμή. Η διάτμηση της αργίλου για φόρτιση 150 kPa διήρκησε 14 ημέρες,

κατά τις οποίες καταγράφονταν συνεχώς μετρήσεις είτε χειρωνακτικά είτε με τη χρήση ειδικού αυτόματου καταγραφικού. Με την ολοκλήρωση της διάτμησης των 150 kPa, πραγματοποιήθηκε φόρτιση στα 300 kPa και ακολουθήθηκε η προαναφερθείσα διαδικασία. Η δοκιμή της δακτυλιοειδούς διάτμησης διήρκησε συνολικά περίπου 5 μήνες, κατά τους οποίους πραγματοποιήθηκε διάτμηση της μπεντονιτικής αργίλου στα 150, 300, 450, 600, 900 kPa και στη συνέχεια αποφόρτιση στα 300, 200 και 100 kPa. Τα αποτελέσματα 5 μηνών των δοκιμών δακτυλιοειδούς διάτμησης που πραγματοποιήθηκαν για την μπεντονιτική άργιλο Άρμου στο μίγμα Δ4-Δ5 όσο αυτό ήταν πλήρως κορεσμένο παρατίθενται στη συνέχεια της συγκεκριμένης ενότητας.



Φωτογραφίες 4.3.4.3 & 4.3.4.4: Αριστερά-Τοποθέτηση του δακτυλιοειδούς δοκιμίου στη συσκευή, Δεξιά- Η κυψέλη με το δοκίμιο μπεντονιτικής αργίλου Άρμου συναρμολογημένη.



Φωτογραφία 4.3.4.5 & 4.3.4.6: Αριστερά-Πλήρωση της κυψέλης με αποιονισμένο νερό κατά τη διαδικασία της συμπίεσης, Δεξιά-Διαδικασία φόρτισης της μπεντονιτικής αργίλου στα 150 kPa

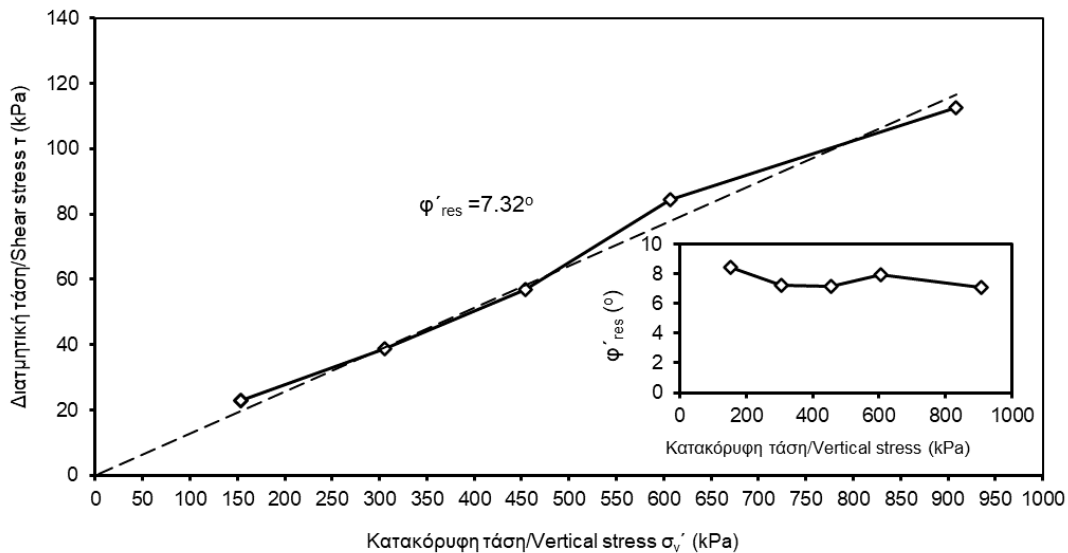
Απαραίτητο να αναφερθεί είναι ότι κατά την αποφόρτιση της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου από τα 900 kPa στα 300 kPa στόχος ήταν ο αποκορεσμός του υλικού μετά την αφαίρεση του νερού από την κυψέλη. Πριν επέλθει ο αποκορεσμός και επομένως η αφαίρεση του νερού από την κυψέλη, το υλικό παρέμεινε στο στάδιο της αποσυμπίεσης, αφού μειώθηκε το φορτίο που ασκούσαν από τα 900 στα 300 kPa, μέχρι να σταθεροποιηθούν οι τιμές των μηκυνσιομέτρων. Στη συνέχεια, αφαιρέθηκε όλο το νερό από την κυψέλη δακτυλιοειδούς διάτμησης στην οποία έχει τοποθετηθεί το δοκίμιο μέχρι η άργιλος να αποκτήσει το ποσοστό υγρασίας που αντιστοιχεί στη σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας του εργαστηρίου (κατά τις προβλέψεις του νόμου του Kelvin) και να ισορροπήσει η τιμή της διατμητικής της τάσης. Όταν επέλθει σταθεροποίηση της διατμητικής τάσης του υλικού, προστίθεται εκ νέου απιονισμένο νερό στην κυψέλη της δακτυλιοειδούς διάτμησης και εκτελείται η δακτυλιοειδής διάτμηση σε πλήρως κορεσμένο υλικό μέχρι την εκ νέου σταθεροποίηση της διατμητικής τάσης του υλικού. Η προαναφερθείσα διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για την αποφόρτιση του υλικού στα 200 kPa. Σε ό,τι αφορά το τελικό στάδιο της δακτυλιοειδούς διάτμησης και επομένως την αποφόρτιση του υλικού στα 100 kPa, πραγματοποιήθηκε αποκορεσμός της μπεντονιτικής αργίλου και πλήρης ξήρανση αυτής μέχρι την σταθεροποίηση της διατμητικής της τάσης. Δεν εκτελέστηκε εκ νέου διάτμηση και επομένως δεν προστέθηκε απιονισμένο νερό.

Στον παρακάτω πίνακα 4.3.4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δακτυλιοειδούς διάτμησης σε ό,τι αφορά τα στάδια των διατμήσεων και την φόρτιση της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου για φορτία 150, 300, 450 600 και 900 kPa.

| Στοιχεία δοκιμής / Test data | | | | |
|-------------------------------------|------------|---------------------|-----------------|--------|
| Σημείο | σ_v | $\tan\varphi_{res}$ | φ_{res} | τ |
| Point | (kPa) | - | ($^\circ$) | (kPa) |
| 150kPa | 153.1 | 0.149 | 8.5 | 22.8 |
| 300kPa | 305.6 | 0.127 | 7.2 | 38.7 |
| 450kPa | 454.0 | 0.125 | 7.1 | 56.9 |
| 600kPa | 606.5 | 0.139 | 7.9 | 84.4 |
| 900kPa | 908.4 | 0.124 | 7.1 | 112.7 |

Πίνακας 4.3.4.1: Πίνακας αποτελεσμάτων κατά το στάδιο της φόρτισης της μπεντονιτικής αργίλου στη δακτυλιοειδή διάτμηση

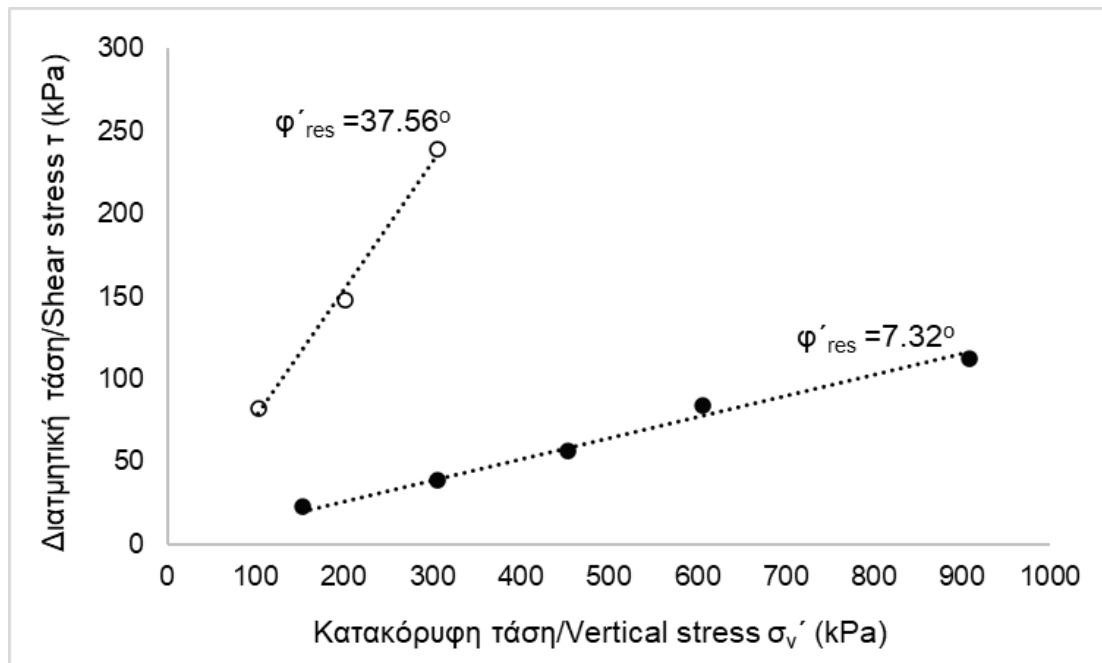
Βάσει των αποτελεσμάτων του Πίνακα 4.3.4.1 προσδιορίζεται στο Σχήμα 4.3.4.1 η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ_{res} και στο επισυναπτόμενο ένθετο, η εξέλιξη της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ_{res} με την παραμένουσα κατακόρυφη τάση.



Σχήμα 4.3.4.1: Περιβάλλουσα παραμένουσας διατμητικής αντοχής και εξέλιξης της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής με την κατακόρυφη τάση σε πλήρως κορεσμένη μπεντονιτική άργιλο

Από το Σχήμα 4.3.4.1 για τις αντίστοιχες τιμές διατμητικής τάσης και κατακόρυφης τάσης, προσδιορίστηκε η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ_{res} με τιμή ίση με 7.32° σε πλήρως κορεσμένη μπεντονιτική άργιλο. Η τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής τάσης που υπολογίστηκε από την εργαστηριακή δοκιμή της δακτυλιοειδούς διάτμησης, θα συγκριθεί σε επόμενο κεφάλαιο με την τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής που προσδιορίζεται από τις αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας.

Επιπλέον προσδιορίστηκε η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής στο στάδιο του αποκορεσμού για τιμές 100, 200 και 300kPa. Στο Σχήμα 4.3.4.2 παρουσιάζονται οι δύο τιμές της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής σε πλήρως κορεσμένο και μη κορεσμένο εδαφικό υλικό.



Σχήμα 4.3.4.2: Περιβάλλουσα παραμένουσας διατμητικής αντοχής σε πλήρως κορεσμένη μπεντονιτική άργιλο (πλήρεις κύκλοι) και σε μη κορεσμένη μπεντονιτική άργιλο (άδειοι κύκλοι)

Όπως γίνεται αντιληπτό και από το Σχήμα 4.3.4.2, η πλήρως κορεσμένη άργιλος έχει γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής 7.32° σε αντίθεση με τη μη κορεσμένη μπεντονιτική άργιλο που έχει τιμή γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής 37.56° .

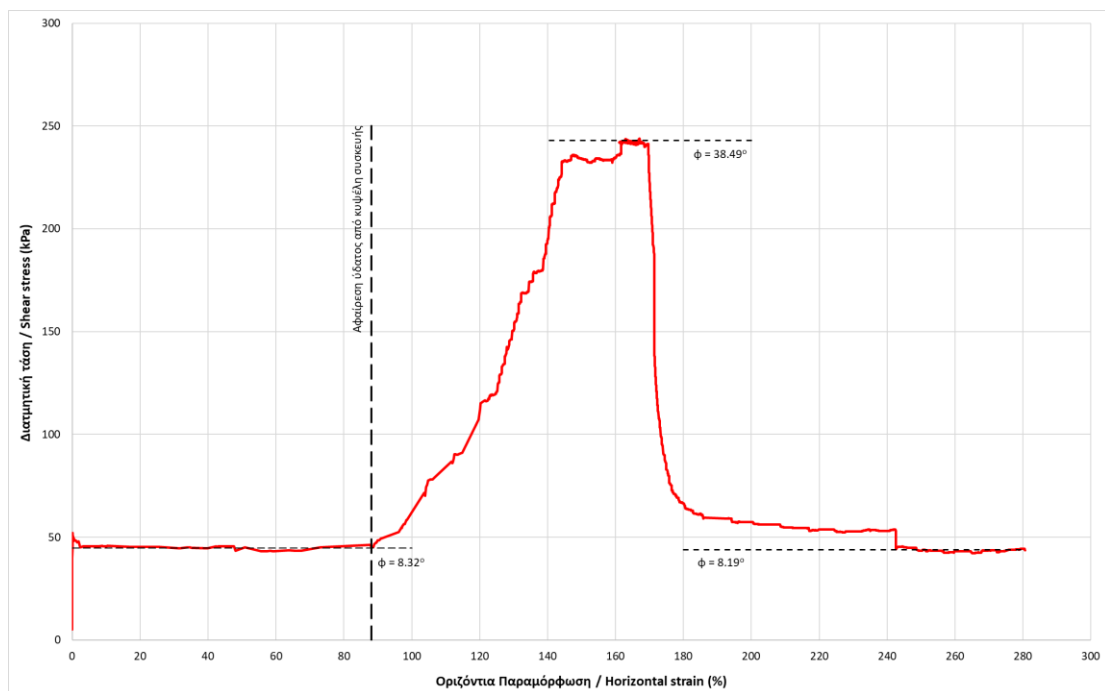
Συνεπώς, η παραμένουσα διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών επηρεάζεται από τον βαθμό κορεσμού και επομένως από τη μύζηση. Μείωση του βαθμού κορεσμού συνεπάγεται αύξηση της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής λόγω σχηματισμού πολύ ισχυρά συνδεδεμένων συσσωματωμάτων των αργιλικών πλακιδίων λόγω της ξήρανσης.

Τέλος απαραίτητο να αναφερθεί είναι ότι με το πέρας της δοκιμής μετρήθηκε με υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου η τιμή της ολικής μύζησης του ξηρού πλέον υλικού της μπεντονιτικής αργίλου μετά την φόρτισή της στα 100 kPa. Η τιμή της ολικής μύζησης προσδιορίστηκε ίση με 43.04 MPa. Κατά συνέπεια, η περιβάλλουσα παραμένουσας διατμητικής αντοχής του μη κορεσμένου υλικού στο Σχήμα 4.3.4.2 αντιστοιχεί σε παρουσία μύζησης περί τα 43 MPa.



Φωτογραφία 4.3.4.7 & 4.3.4.8: Δείγμα μπεντονιτικής αργίλου Άρμου μετά το πέρας της δοκιμής δακτυλιοειδούς διάτμησης

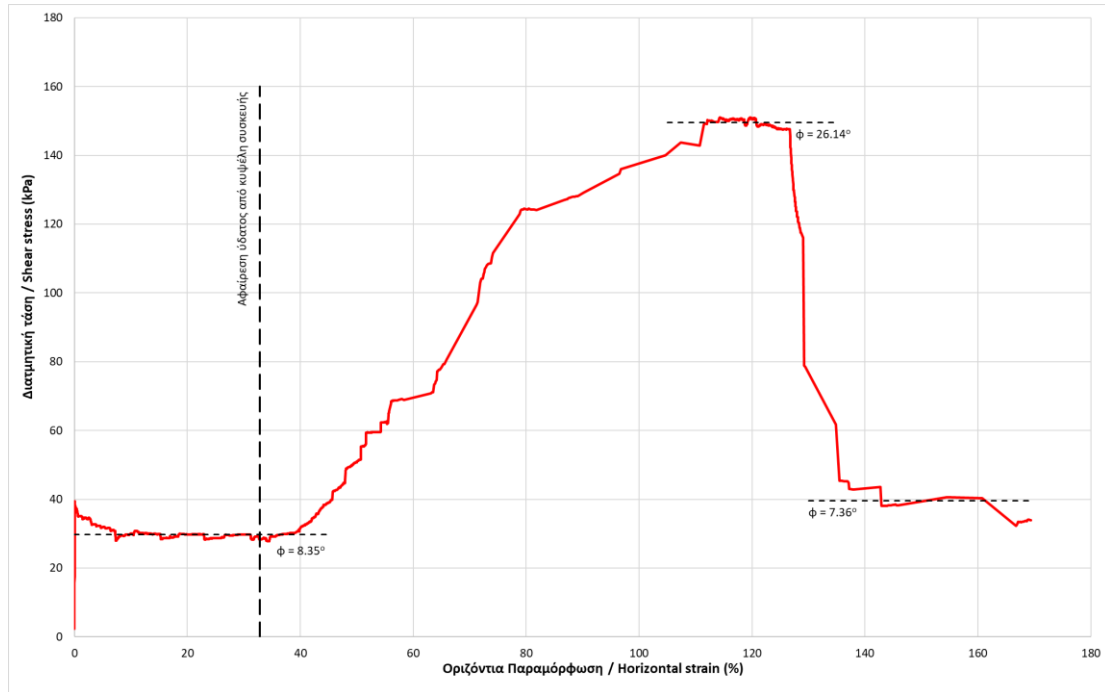
Τα αποτελέσματα από τα στάδια αποφόρτισης της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου από τα 900 kPa στα 300, 200 και 100 kPa αντίστοιχα παρουσιάστηκαν σε τρία διαφορετικά σχήματα υπό μορφή καμπυλών διατμητικής τάσης-οριζόντιας παραμόρφωσης με τα χαρακτηριστικά σημεία ξήρανσης και υδρεμποτισμού.



Σχήμα 4.3.4.3: Καμπύλη διατμητικής τάσης-Οριζόντιας παραμόρφωσης για αποφόρτιση της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου στα 300 kPa

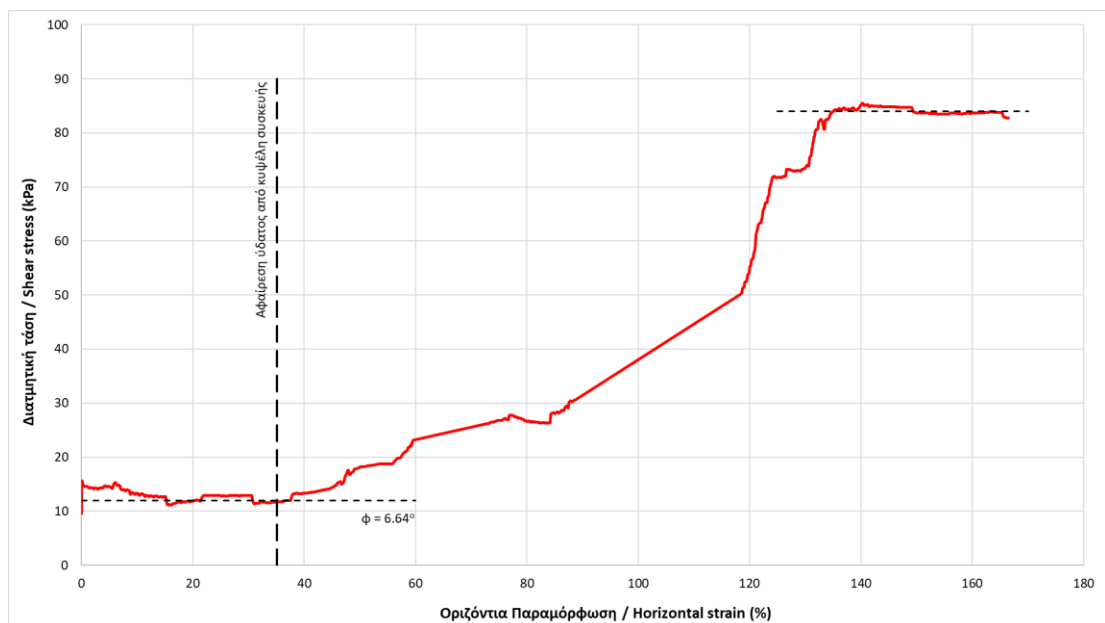
Από το Σχήμα 4.3.4.3 παρατηρείται το στάδιο αποκορεσμού του υλικού, δηλαδή το στάδιο κατά το οποίο αφαιρείται το απιονισμένο νερό από την κυψέλη του δείγματος, το οποίο αντιστοιχεί σε παραμόρφωση του υλικού σε ποσοστό περίπου 90%. Από την αφαίρεση του νερού και ύστερα παρατηρείται συνεχόμενη αύξηση της διατμητικής τάσης του υλικού μέχρι να αποκτήσει τη μέγιστη τιμή της και να σταθεροποιηθεί περίπου στα 243 kPa. Όταν επέλθει η ισορροπία στη μεταβολή της διατμητικής τάσης προστίθεται εκ νέου απιονισμένο νερό λαμβάνοντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα μετρήσεις. Από το γράφημα παρατηρείται ότι με την προσθήκη νερού στην κυψέλη της συσκευής (στάδιο υδρεμποτισμού), η διατμητική τάση μειώνεται απότομα και με πολύ μεγάλο ρυθμό, μέχρι να επέλθει εκ νέου σταθεροποίηση της διατμητικής τάσης. Από τον προσδιορισμό της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής στις περιοχές που ισορροπεί η τιμή της διατμητικής τάσης, κατά τον αρχικό και τελικό πλήρη κορεσμό του υλικού και κατά τον αποκορεσμό αυτού, παρατηρείται ότι η φ_{res} έχει παρόμοια τιμή κατά το αρχικό και τελικό στάδιο πλήρους κορεσμού. Συγκεκριμένα, αρχικά έχει τιμή ίση με 8.32° ενώ τελικά αποκτά τιμή 8.19° . Τέλος παρατηρείται ότι η τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής σε κατάσταση μερικού κορεσμού αποκτά τιμή ίση με 38.49° , τιμή πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που κατέχει σε κατάσταση πλήρους κορεσμού. Συνεπώς, συμπεραίνεται και από αυτό το σχήμα ότι η παραμένουσα διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών επηρεάζεται από τον βαθμό κορεσμού του υλικού και ειδικότερα, με τη μείωσή του συνεπάγεται αύξηση της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής.

Ομοίως, το Σχήμα 4.3.4.4 παρουσιάζει την συμπεριφορά της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου κατά την αποφόρτισή της από τα 300 στα 200 kPa. Όπως γίνεται αντιληπτό και από το Σχήμα 4.3.4.4, σε αρχική κατάσταση πλήρους κορεσμού η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής έχει τιμή 8.35° ενώ με την αφαίρεση του νερού από την κυψέλη, η διατμητική τάση αυξάνεται συνεχώς μέχρι να αποκτήσει τιμή περίπου 153 kPa, όπου και σταθεροποιείται. Η γωνία φ_{res} στην μη κορεσμένη περιοχή έχει τιμή 26.14° , ενώ στη συνέχεια παρατηρείται το στάδιο του υδρεμποτισμού κατά το οποίο το υλικό επανέρχεται σε κατάσταση πλήρους κορεσμού και αποκτά τιμή γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής 7.36° .



Σχήμα 4.3.4.4: Καμπύλη διατμητικής τάσης-Οριζόντιας παραμόρφωσης για αποφόρτιση της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου στα 200 kPa

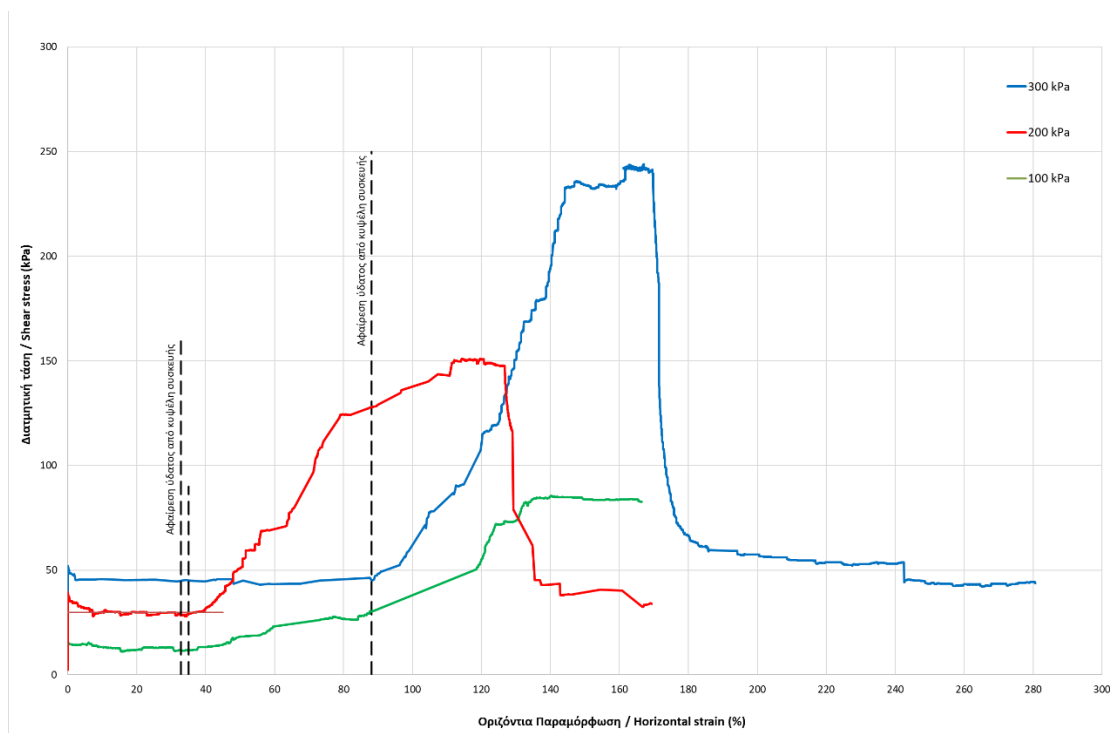
Τέλος παρατίθεται το Σχήμα 4.3.4.5 το οποίο αποτελεί την καμπύλη διατμητικής τάσης - οριζόντιας παραμόρφωσης για την αποφόρτιση του υλικού από τα 200 στα 100 kPa.



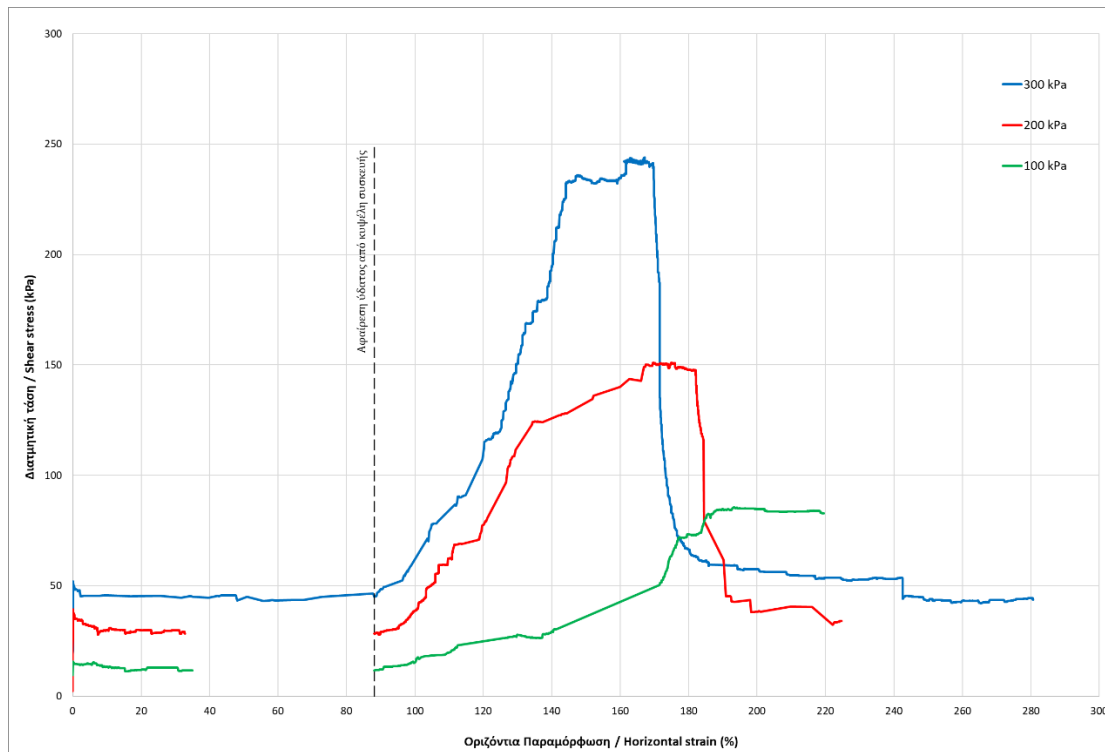
Σχήμα 4.3.4.5: Καμπύλη διατμητικής τάσης-Οριζόντιας παραμόρφωσης για αποφόρτιση της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου στα 100 kPa

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 4.3.4.5 πραγματοποιήθηκε ο αποκορεσμός του υλικού κατά τον οποίο η διατμητική αντοχή απέκτησε τη μέγιστη τιμή των 84 kPa περίπου, ωστόσο δεν πραγματοποιήθηκε το στάδιο του υδρεμποτισμού ώστε να μπορεί να γίνει η μέτρηση της μύζησης σε τεμάχιο του δοκιμίου που τοποθετήθηκε στο υγρόμετρο ψυχρού κατόπτρου. Μετά την σταθεροποίηση της διατμητικής τάσης σε κατάσταση μερικού κορεσμού, ολοκληρώθηκε η δοκιμή και μετρήθηκε η μύζηση του μη κορεσμένου υλικού ίση με 43.04 MPa. Σε ό,τι αφορά τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής παρατηρείται και εδώ πως σε κατάσταση πλήρους κορεσμού απέκτησε τιμή 6.64° ενώ σε κατάσταση μερικού κορεσμού απέκτησε τιμή 39.04°.

Τέλος, για την καλύτερη και ευκρινέστερη σύγκριση των τριών καμπυλών διατμητικής τάσης – οριζόντιας παραμόρφωσης με φορτίο 100, 200 και 300 kPa παρατίθενται τα παρακάτω Σχήματα 4.3.4.6 και 4.3.4.7 στα οποία παρουσιάζονται και οι τρεις καμπύλες.



Σχήμα 4.3.4.6: Καμπύλες διατμητικής τάσης-οριζόντιας παραμόρφωσης για τις 3 κατακόρυφες τάσεις με τα χαρακτηριστικά σημεία ξήρανσης και υδρεμποτισμού.



Σχήμα 4.3.4.7: Καμπύλες διατμητικής τάσης-οριζόντιας παραμόρφωσης για τις 3 κατακόρυφες τάσεις με τα χαρακτηριστικά σημεία ξήρανσης και υδρεμποτισμού, προσαρμοσμένες ώστε να συμπίπτει το στάδιο του αποκορεσμού.

Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.3.4.6 παρατίθενται οι καμπύλες των τριών τάσεων κατά την αποφόρτιση όπως ακριβώς παρουσιάστηκαν ξεχωριστά παραπάνω. Ωστόσο, επειδή παρατηρήθηκε ότι στις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των 100 και 200 kPa η αφαίρεση του νερού πραγματοποιήθηκε σε λιγότερο χρόνο απ' ό τι στην καμπύλη των 300 kPa, στο Σχήμα 4.3.4.7 προσαρμόστηκαν οι δύο καμπύλες ώστε να συμπίπτει το στάδιο του αποκορεσμού.

4.3.5 Σύνοψη μηχανικών χαρακτηριστικών του μίγματος Δ4-Δ5 της Άρμου

Συνοψίζοντας την παρούσα ενότητα, για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς του μίγματος Δ4-Δ5 της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου, μορφώθηκαν 6 ζευγάρια δειγμάτων στον θάλαμο μύζησης με τιμές μύζησης 400, 600, 800, 1100 και 1500 kPa, ενώ παράλληλα άλλα 4 ζευγάρια δοκιμών τα οποία αφέθηκαν να ξηραθούν στην ατμόσφαιρα, 2 εξ αυτών μέχρι σταθεροποίησης του βάρους τους και τα άλλα 2 μέχρι να αποκτήσουν ποσοστό υγρασίας 20 και 30% αντίστοιχα. Στα δοκίμια αυτά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα ώστε να εκτιμηθεί η επιρροή της μύζησης στις τιμές της διατμητικής αντοχής q_u και της εφελκυστικής αντοχής σ_t αντίστοιχα. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της μύζησης και επομένως τη μείωση του ποσοστού υγρασίας και του βαθμού κορεσμού του υλικού αυξάνεται η διατμητική και η εφελκυστική αντοχή, με τη διαφορά ότι η διατμητική αντοχή αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από την εφελκυστική. Έγινε επίσης αντιληπτό ότι τα δοκίμια που αφέθηκαν στην ατμόσφαιρα για να ξηραθούν απέκτησαν πολύ μεγαλύτερες τιμές μύζησης από αυτά που μορφώθηκαν στον θάλαμο μύζησης.

Για την εκτίμηση της εξέλιξης της διατμητικής αντοχής της μη κορεσμένης μπεντονιτικής αργίλου, χρησιμοποιήθηκαν οι κύκλοι Mohr που αντιστοιχούν στην ανεμπόδιστη θλίψη και τη θλίψη κατά γενέτειρα (Μπαρδάνης, 2016). Με τη χρήση των κύκλων Mohr υπολογίστηκαν οι τιμές της συνοχής και της γωνίας διατμητικής αντοχής για κάθε δοκίμιο.

Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, θλίψης κατά γενέτειρα καθώς και οι τιμές της συνοχής και της γωνίας διατμητικής αντοχής παρουσιάζονται στον συγκεντρωτικό πίνακα 4.3.2.2 στην ενότητα 4.3.2. Τέλος, από την παρατήρηση των Σχημάτων 4.3.2.15 και 4.3.2.16 παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται η μύζηση της μπεντονιτικής αργίλου αυξάνεται και η συνοχή του υλικού.

Στη συνέχεια προσδιορίστηκε το φαινόμενο βάρος των δοκιμών με παραφίνωση και σχεδιάστηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους – νερού. Από τις χαρακτηριστικές καμπύλες παρατηρήθηκε ότι με τη μείωση του λόγου των

κενών, ακολουθεί μείωση του ποσοστού υγρασίας και επομένως μείωση του βαθμού κορεσμού και αύξηση της μύζησης του υλικού. Τέλος παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση του ξηρού φαινόμενου βάρους του υλικού, αυξάνεται η μύζηση του και επομένως το υλικό γίνεται όλο και πιο ξηρό.

Τέλος πραγματοποιήθηκε η δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης μέσω της οποίας υπολογίστηκε η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής με μηδενική συνοχή, εφόσον το υλικό έχει ήδη αστοχήσει με αποτέλεσμα η ολισθαίνουσα μάζα να έχει κατολισθήσει. Για την διεξαγωγή της δοκιμής πραγματοποιήθηκε διάτμηση του υλικού, σε κατάσταση πλήρους κορεσμού, για φορτία 150, 300, 450, 600 και 900 kPa, ενώ στη συνέχεια ακολούθησε αποφόρτιση του υλικού στα 300, 200 και 100 kPa. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών και τα σχετικά διαγράμματα υπολογίστηκε η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής 7.32° σε πλήρη κορεσμό και 37.56° σε κατάσταση μερικού κορεσμού. Βάσει των αποτελεσμάτων αυτών συμπεραίνεται ότι η παραμένουσα διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών επηρεάζεται από τον βαθμό κορεσμού του υλικού και ειδικότερα, με τη μείωσή του συνεπάγεται αύξηση της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Στην ενότητα 4.3.4 παρουσιάζονται όλα τα σχετικά σχήματα για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του υλικού.

Κεφάλαιο 5

Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με τη χρήση λογισμικού προγράμματος Slide2

5.1 Εισαγωγή

Το πρόγραμμα Slide2 της εταιρίας Rocscience, αποτελεί λογισμικό γεωτεχνικής μηχανικής που χρησιμοποιεί τη μέθοδο οριακής ισορροπίας (limit equilibrium method) σε δισδιάστατες αναλύσεις ευστάθειας εδαφικών ή βραχωδών πρανών. Συγκεκριμένα το πρόγραμμα Slide2 προσδιορίζει τον συντελεστή ασφαλείας SF (Safety Factor) σε κυκλικές ή σύνθετες επιφάνειες αστοχίας ενός πρανού.

Η μέθοδος οριακής ισορροπίας θεωρείται μία από τις πιο γνωστές και ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους ανάλυσης ευστάθειας πρανών. Στόχος της μεθόδου είναι η αναζήτηση της κρίσιμης επιφάνειας ολίσθησης ενός πρανού για την οποία προκύπτει ο ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας. Απαραίτητο να αναφερθεί είναι ότι η συγκεκριμένη μέθοδος ανάλυσης έχει δυνατότητα εφαρμογής σε κορεσμένα και μη εδαφικά υλικά, υπό στραγγιζόμενες ή αστραγγιστες συνθήκες φόρτισης.

Η ανάλυση οριακής ισορροπίας βασίζεται στην εξέταση της ισορροπίας των δυνάμεων που ενεργούν σε τμήμα ενός πρανού οι οποίες τείνουν να προκαλέσουν τη μετακίνηση του (π.χ. δύναμη βαρύτητας, δυνάμεις από πιέσεις πόρων εντός του εδάφους, εξωτερικές δυνάμεις κ.α.) κατά μήκος μιας ορισμένης επιφάνειας ολίσθησης και των δυνάμεων εκείνων που αντιτίθεται στην ολίσθηση (π.χ. διατμητική αντοχή εδάφους). Αυτή η σχέση ισορροπίας, εκφράζεται με το συντελεστή ασφαλείας SF. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που ο συντελεστής ασφαλείας αποκτήσει τιμή ίση με τη μονάδα, το πρανές βρίσκεται σε κατάσταση οριακής ισορροπίας, ενώ για τιμές του SF μικρότερες της μονάδας αστοχεί. Γενικότερα, οι αποδεκτές τιμές του συντελεστή ασφαλείας για την ευστάθεια πρανών κυμαίνονται μεταξύ 1.4 – 1.5 για συνήθεις συνθήκες υπόγειου ορίζοντα

χωρίς την ύπαρξη σεισμικών φορτίσεων, ενώ με εφαρμογή σεισμικών φορτίσεων απαιτείται ελάχιστος συντελεστής ασφαλείας μεγαλύτερος της μονάδας.

Για την ανάλυση ευστάθειας πρανών, η μέθοδος οριακής ισορροπίας εφαρμόζεται μέσω της μεθόδου των λωρίδων, κατά την οποία σε μία γνωστή επιφάνεια αστοχίας, το τμήμα το οποίο ολισθαίνει υποδιαιρείται σε λεπτές κατακόρυφες λωρίδες και οι τάσεις που ασκούνται στην βάση της κάθε λωρίδας υπολογίζονται από τις εξισώσεις ισορροπίας (δυνάμεων και ροπών) της κάθε λωρίδας ξεχωριστά. Η επιφάνεια αστοχίας μπορεί να είναι πραγματική και γνωστή από κλισιόμετρα, ή υποθετική και να διερευνάται στο πλαίσιο της αυτόματης διερεύνησης που κάνει ένα πρόγραμμα δημιουργώντας διάφορες επιφάνειες ολίσθησης και υπολογίζει τον συντελεστή ασφαλείας κάθε μιας ώστε να αναφέρει τον ελάχιστο, ο οποίος και είναι αυτός που αντιστοιχεί στην κρίσιμη επιφάνεια ολίσθησης.

Οι αναλύσεις ευστάθειας πρανών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τις ευθείες και τις αντίστροφες αναλύσεις. Στις ευθείες αναλύσεις υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας, με γνωστές τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής του εδάφους (συνοχή και γωνία διατμητικής αντοχής), το ειδικό βάρος του εδάφους, τη θέση της επιφάνειας ολίσθησης (γνωστή από κλισιόμετρα ή υποθετική) και το βάθος του υπόγειου ορίζοντα. Αντίθετα, στις αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας το πρανές έχει ήδη αστοχήσει και επομένως έχει βρεθεί σε κατάσταση οριακής ισορροπίας. Σε αυτού του είδους τις αναλύσεις προσδιορίζεται κατά κύριο λόγο η παραμένουσα διατμητική αντοχή του εδάφους.

Στην περίπτωση των παλαιοκατολισθήσεων, δηλαδή κατολισθήσεις κατά τις οποίες έχει συμβεί τόσο μεγάλη παραμόρφωση κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης ώστε η διατμητική αντοχή του εδάφους να περιγράφεται από μηδενική τιμή της συνοχής και γωνία διατμητικής αντοχής ίση με την γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ'_{res} , πραγματοποιούνται αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας στις οποίες αναζητείται η τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ'_{res} , ώστε ο συντελεστής ασφαλείας να είναι ίσος με τη μονάδα έχοντας θέσει ταυτοχρόνως $c'=0$.

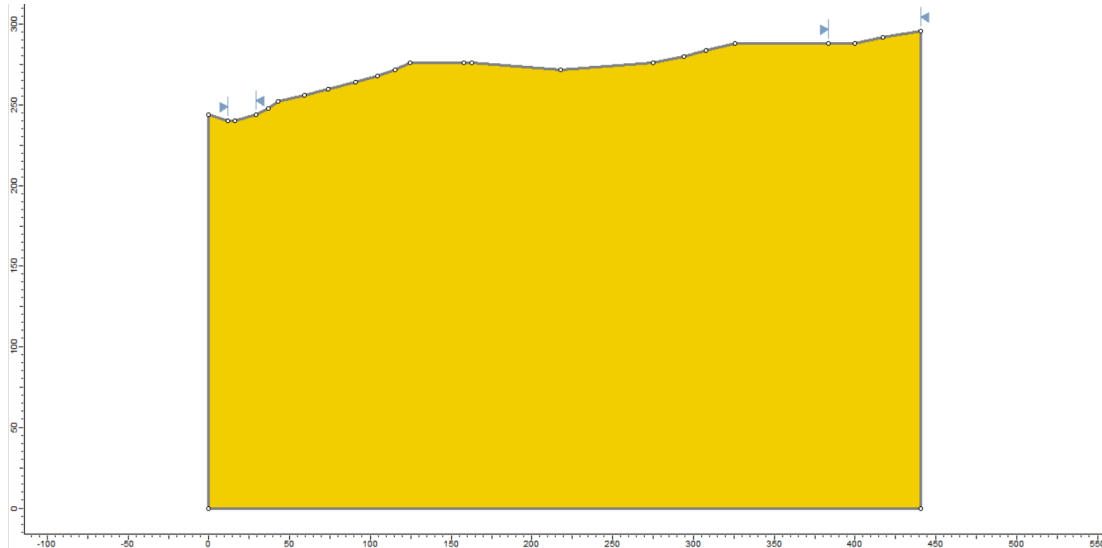
Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας εδαφικών πρανών της κατολίσθησης της Άρμου σύμφωνα με δύο μεθόδους οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο λωρίδων, την απλοποιημένη μέθοδο Bishop και την απλοποιημένη μέθοδο Janbu. Ειδικότερα, με τη μέθοδο Bishop ο συντελεστής ασφαλείας SF υπολογίζεται από την αναζήτηση της ισορροπίας ροπών των δυνάμεων που δρουν επί της ολισθαίνουσας επιφάνειας. Η μέθοδος Janbu είναι παρόμοια με τη μέθοδο Bishop με τη διαφορά ότι ο συντελεστής ασφαλείας SF υπολογίζεται από την αναζήτηση της ισορροπίας δυνάμεων στην οριζόντια διεύθυνση. Οι αναλύσεις ευστάθειας πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα Slide2 της έκδοσης 9.013 το οποίο και χρησιμοποιήθηκε κατόπιν αδειας από τη σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

5.2 Γεωμετρικό προσομοίωμα

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να προσδιοριστεί η επιρροή διαφόρων συνθηκών από υδατικές πιέσεις με τη χρήση του προγράμματος Slide2 της Rocscience. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθούν αναλύσεις ευστάθειας πρανούς σε μια διατομή της κατολίσθησης της περιοχής της Άρμου και συγκεκριμένα στην κεντροβαρική διατομή.

Η γεωμετρία του πρανούς της Άρμου και επομένως η κεντροβαρική διατομή του πρανούς (καταγράφεται από την Ιωάννου, 2020), η οποία ψηφιοποίησε στο πρόγραμμα Autocad της εταιρίας Autodesk σκαναρισμένα τοπογραφικά της Κτηματολογικής Υπηρεσίας Κύπρου.

Η κεντροβαρική διατομή της κατολίσθησης της Άρμου μετά τον σχεδιασμό της στο πρόγραμμα Autocad και την αποθήκευση του αρχείου ως dxf, εισάγεται στο Slide2. Η κεντροβαρική διατομή του πρανούς παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2.1 παρακάτω.



Σχήμα 5.2.3: Κεντροβαρική διατομή του πρανούς της Άρμου στο πρόγραμμα Slide2

Στο γεωμετρικό προσομοίωμα του Σχήματος 5.2.1 πραγματοποιήθηκαν οι διάφορες αναλύσεις ευστάθειας του πρανούς. Όπως παρουσιάζονται και στις ενότητες 5.3 και 5.4, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευστάθειας κατά τις οποίες δεν εισήχθησαν αρνητικές πιέσεις πόρων ή μύζηση (5.3) και αναλύσεις ευστάθειας κατά τις οποίες εισήχθησαν αρνητικές πιέσεις πόρων ή μύζηση (5.4).

5.3 Αναλύσεις ευστάθειας χωρίς την εισαγωγή αρνητικών πιέσεων πόρων ή μύζησης

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας κατά τις οποίες δεν εισήχθησαν αρνητικές πιέσεις πόρων αλλά ούτε και μύζηση. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές σειρές αναλύσεων με την μέθοδο οριακής ισορροπίας και συγκεκριμένα με τη μέθοδο Janbu και Bishop οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο των λωρίδων.

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για την διερεύνηση του βάθους του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα ώστε να ελεγχθεί η επιρροή που έχει στο μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης του πρανούς. Στη συνέχεια, υποθέτοντας ότι το πρανές είναι πλήρως κορεσμένο και επομένως η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα συμπίπτει με την επιφάνεια του εδαφικού πρανούς, πραγματοποιήθηκαν

αναλύσεις για τη διερεύνηση ύπαρξης ρωγμής, πληρωμένη με νερό, στο φρύδι της κατολίσθησης. Τέλος, υποθέτοντας ότι το εδαφικό πρανές είναι πλήρως κορεσμένο και η ρωγμή που υπάρχει στο φρύδι της κατολίσθησης έχει βάθος 7m, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για την διερεύνηση ύπαρξης νερού εντός της ρωγμής.

Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, όλες οι αναλύσεις έγιναν στο πρόγραμμα Slide2 και θεωρούνται αντίστροφες αναλύσεις.

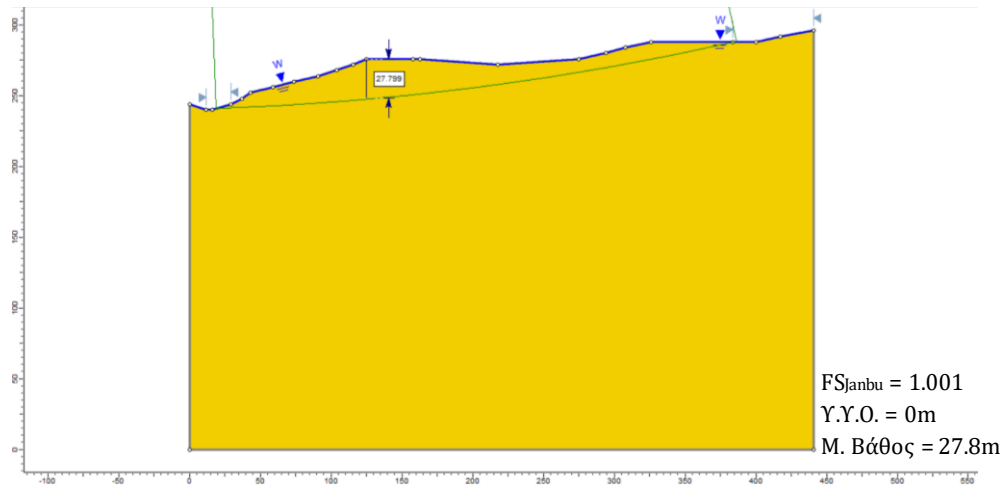
5.3.1 Αναλύσεις διερεύνησης Υδροφόρου ορίζοντα

Στην παρούσα ενότητα διερευνάται η επιρροή του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης του πρανούς της Άρμου σε σχέση με το βάθος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα από την επιφάνεια του εδάφους στην κεντροβαρική διατομή της Άρμου. Συγκεκριμένα με τη χρήση του προγράμματος Slide2 για διάφορα βάθη του υδροφόρου ορίζοντα (π.χ. 2.5m, 5m, 7.5m κλπ.) με αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας, δηλαδή στην κατάσταση οριακής ισορροπίας όπου ο συντελεστής ασφαλείας αποκτά την τιμή 1 ($SF = 1$), προσδιορίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής ϕ'_{res} και το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης θέτοντας τιμή της συνοχής ίση με το 0. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.1.1, ενώ παράλληλα παρατίθενται στιγμιότυπα οθόνης από τις αναλύσεις που έγιναν στο Slide2. Απαραίτητο να αναφερθεί είναι ότι το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης προσδιορίστηκε σύμφωνα με τον συντελεστή ασφαλείας που υπολογίζει η μέθοδος Janbu.

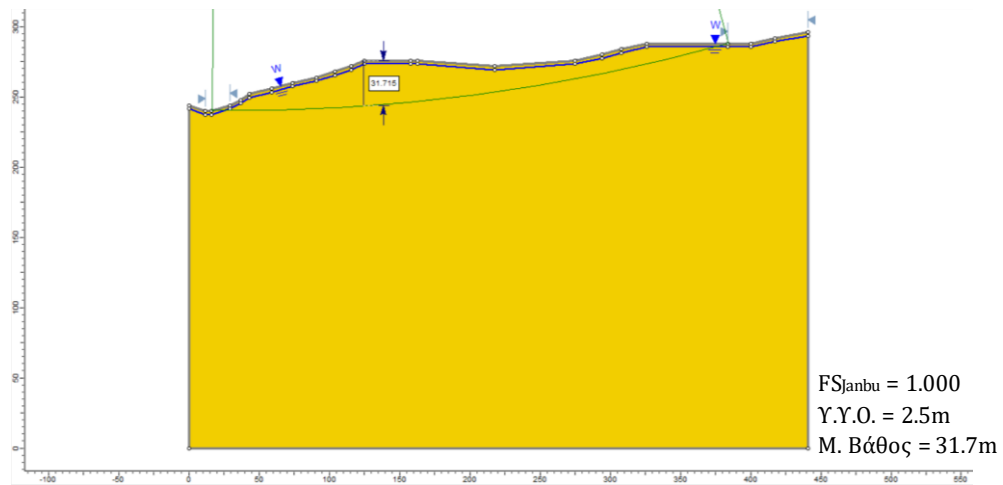
| Βάθος Υ.Υ.Ο. (m) | Φ'_{res} (°) / Bishop | Φ'_{res} (°) / Janbu | Μέγιστο βάθος (m) |
|-----------------------------|--|---|------------------------------|
| 0 | 12.99 | 13.06 | 27.8 |
| 2.5 | 11.26 | 11.19 | 31.7 |
| 5 | 10.23 | 10.26 | 41.8 |
| 7.5 | 9.54 | 9.59 | 48.9 |
| 10 | 8.98 | 9.11 | 57.7 |
| 15 | 8.16 | 8.67 | 74.2 |
| 20 | 7.58 | 7.81 | 74.2 |
| 25 | 7.14 | 7.65 | 75.3 |
| 30 | 6.63 | 7.27 | 89.2 |
| 40 | 6.63 | 6.63 | 28.6 |
| 50 | 6.63 | 6.68 | 28.6 |
| 60 | 6.63 | 6.63 | 28.6 |
| 75 | 6.63 | 6.68 | 28.6 |
| 100 | 6.63 | 6.63 | 28.6 |
| 150 | 6.63 | 6.63 | 28.6 |
| 200 | 6.63 | 6.63 | 28.6 |
| No water | 6.63 | 6.63 | 28.6 |

Πίνακας 5.3.1.1: Συγκεντρωτικός πίνακας που παραθέτει τις τιμές των γωνιών παραμένουσας διατμητικής αντοχής ϕ'_{res} κατά Janbu και Bishop καθώς και τα μέγιστα βάθη που αποκτά η επιφάνεια ολίσθησης για τα διάφορα βάθη του υδροφόρου ορίζοντα.

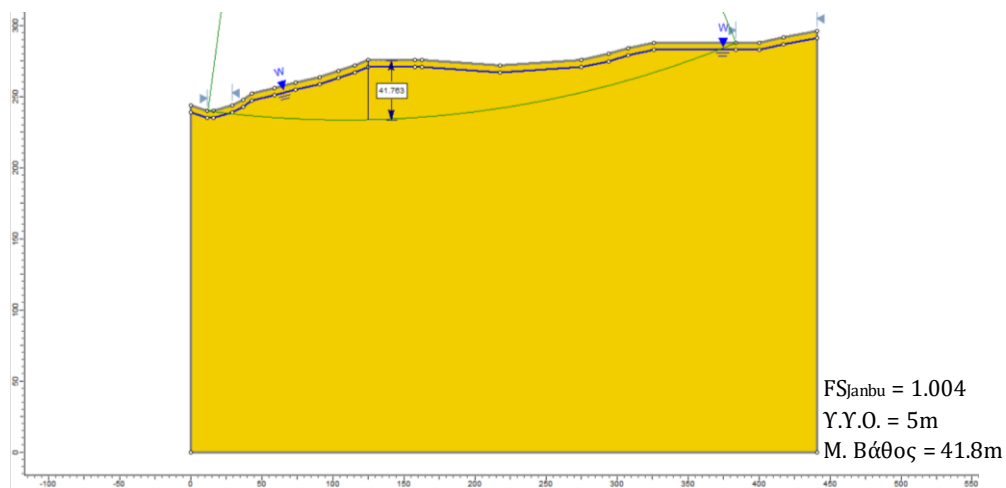
Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.3.1.1, παρατηρείται ότι μέχρι το βάθος του υπόγειου ορίζοντα των 30m το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης αυξάνεται συνεχώς. Συγκεκριμένα στα 30m, η επιφάνεια ολίσθησης αποκτά βάθος περίπου 89m. Αντίθετα, για βάθη του υδροφόρου ορίζοντα μεγαλύτερα των 30m παρατηρείται ότι το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης αποκτά μία σταθερή τιμή περίπου στα 29m και πολύ κοντινή σε αυτή για υπόγειο ορίζοντα στην επιφάνεια. Ο λόγος σταθεροποίησης του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης για βάθος Υ.Υ.Ο. μεγαλύτερο από 30m θα παρατηρηθεί από τα στιγμιότυπα οθόνης των αναλύσεων του προγράμματος Slide2.



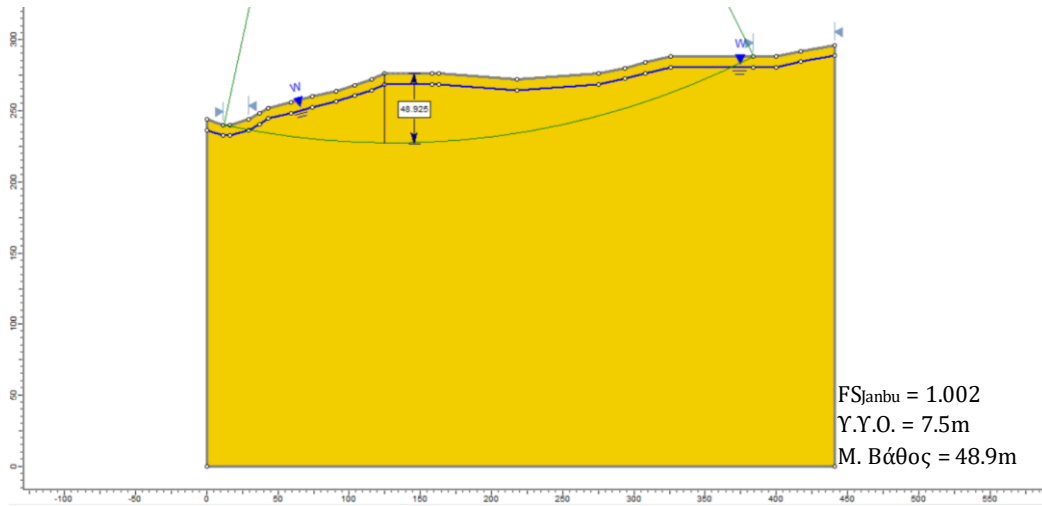
Σχήμα 5.3.1.4: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς στην περίπτωση που ο υδροφόρος ορίζοντας συμπίπτει με την επιφάνεια του εδάφους



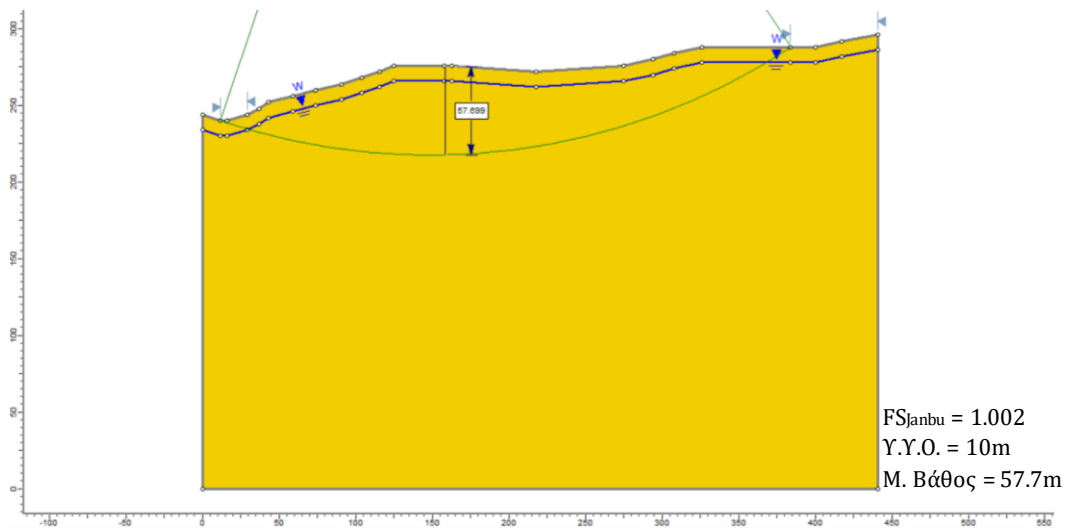
Σχήμα 5.3.1.5: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 2.5m



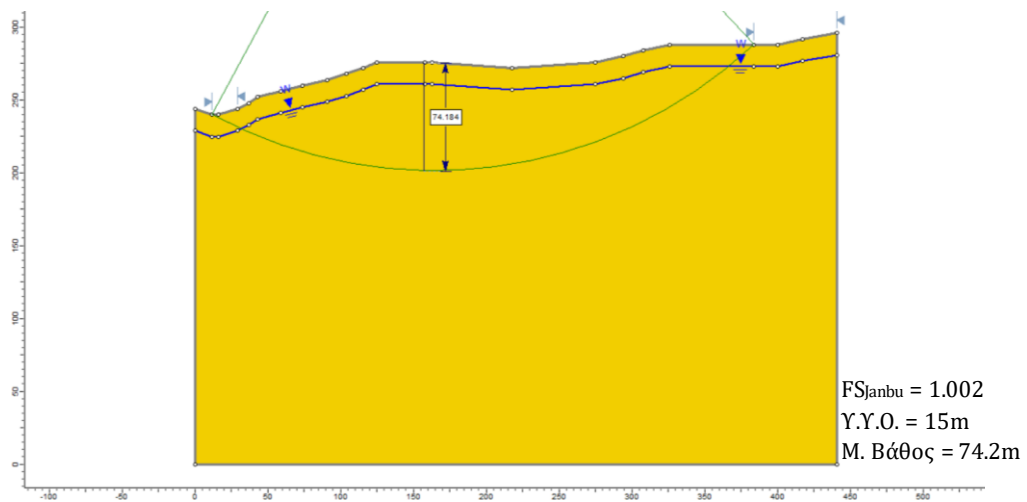
Σχήμα 5.3.1.6: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 5m



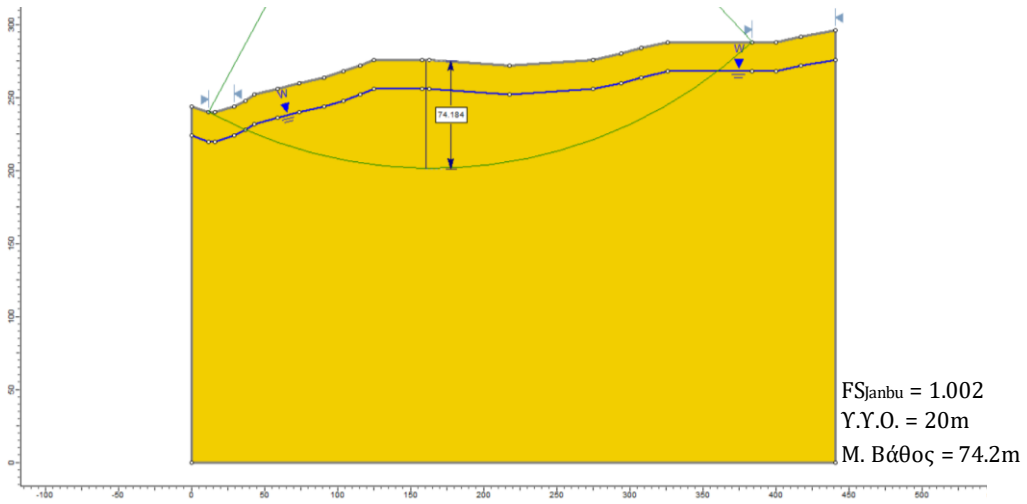
Σχήμα 5.3.1.7: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 7.5m



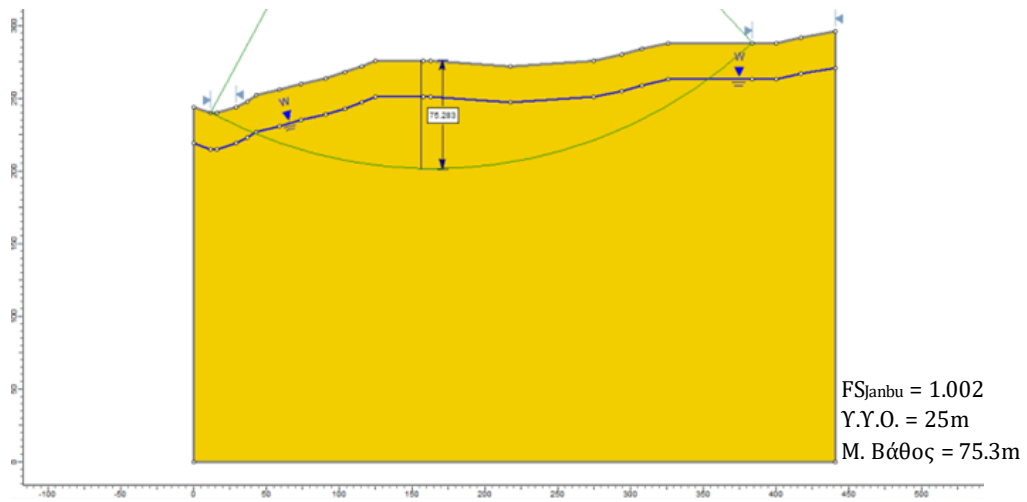
Σχήμα 5.3.1.8: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 10m



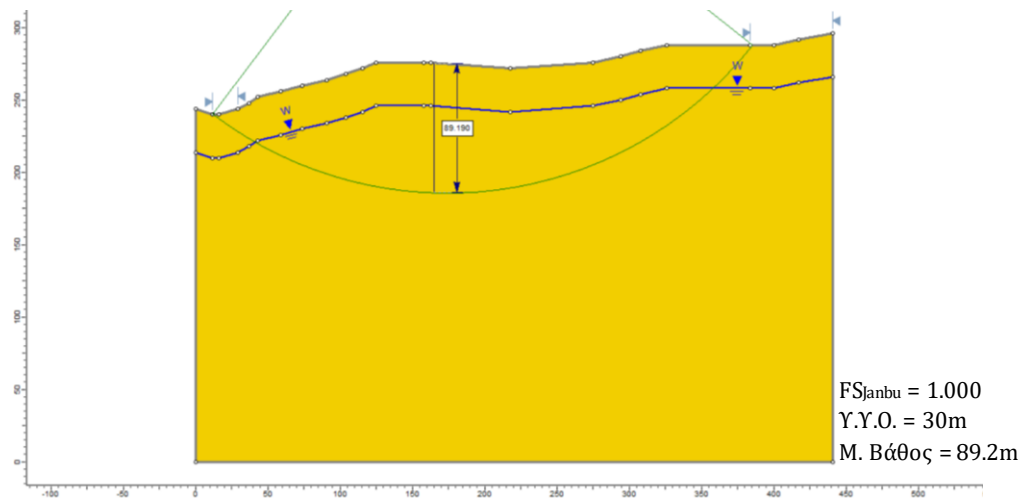
Σχήμα 5.3.1.9: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 15m



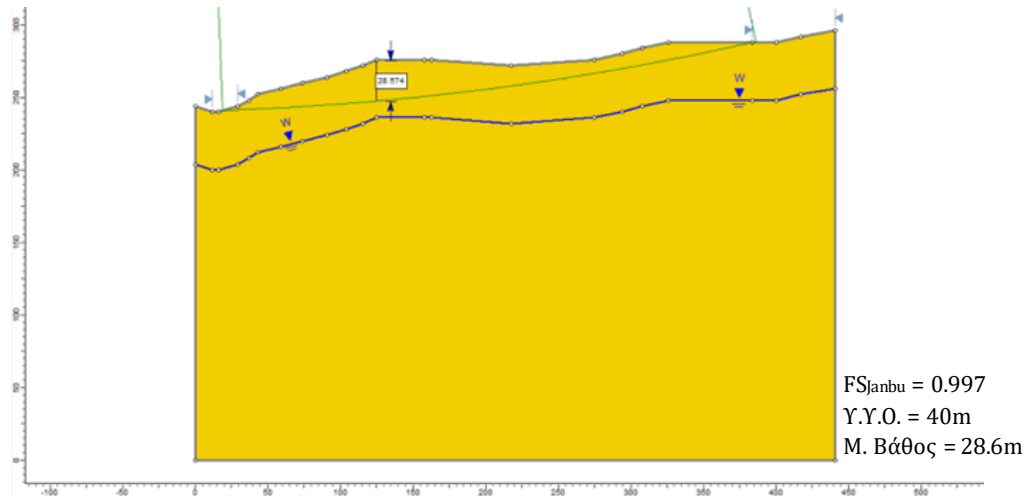
Σχήμα 5.3.1.10: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 20m



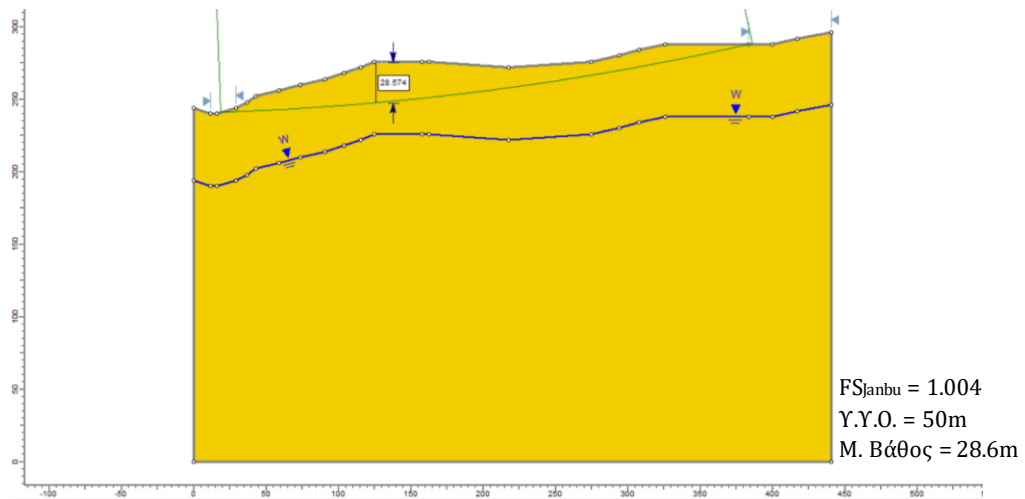
Σχήμα 5.3.1.11: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 25m



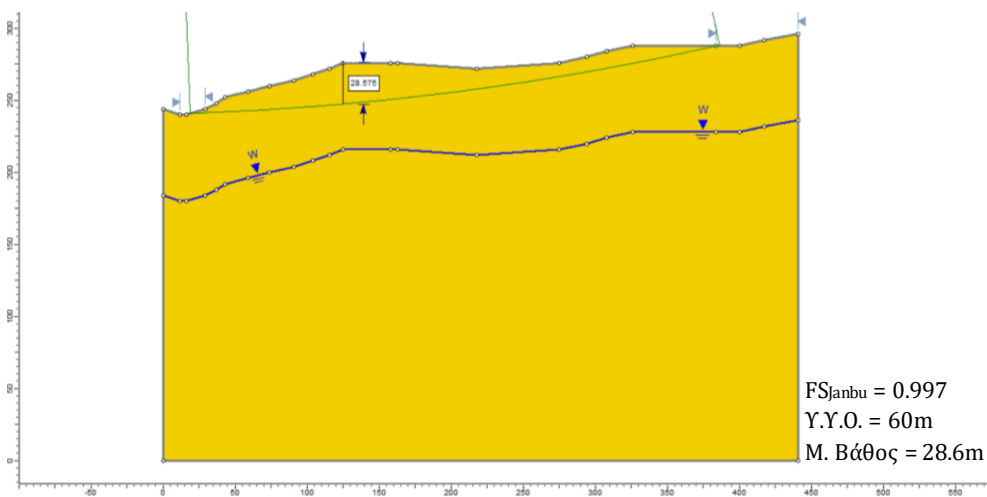
Σχήμα 5.3.1.12: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 30m



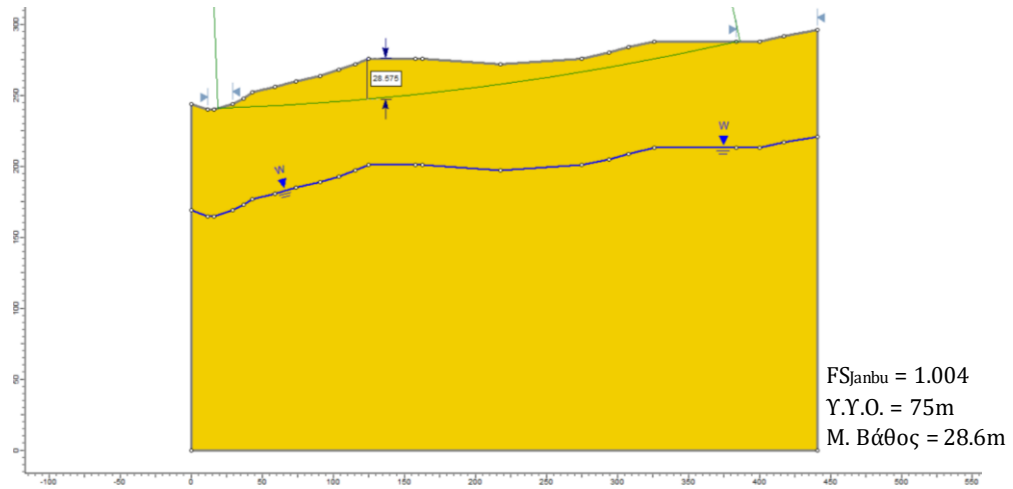
Σχήμα 5.3.1.13: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 40m



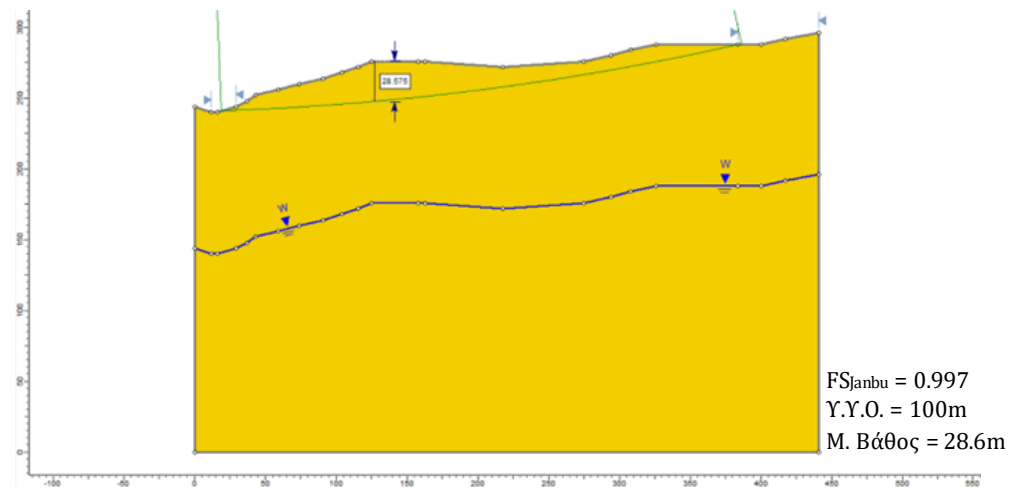
Σχήμα 5.3.1.14: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 50m



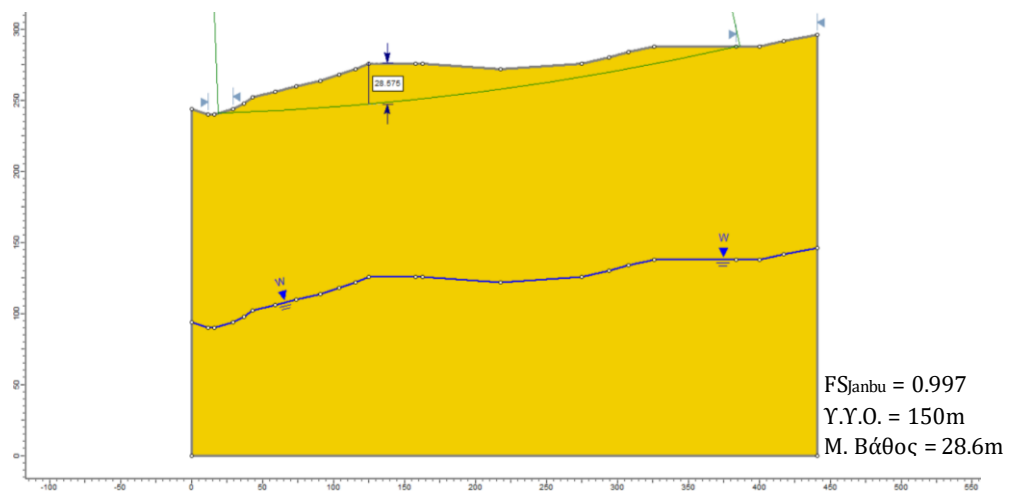
Σχήμα 5.3.1.15: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 60m



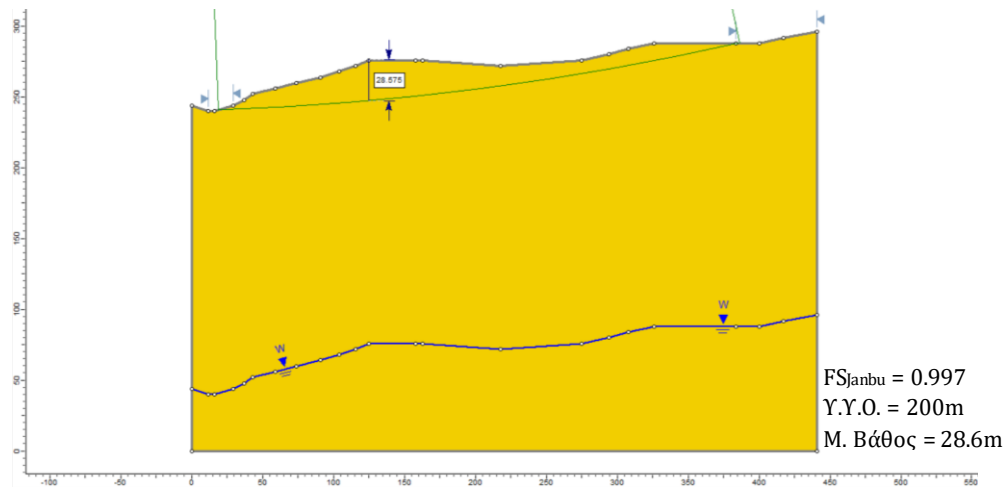
Σχήμα 5.3.1.16: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 75m



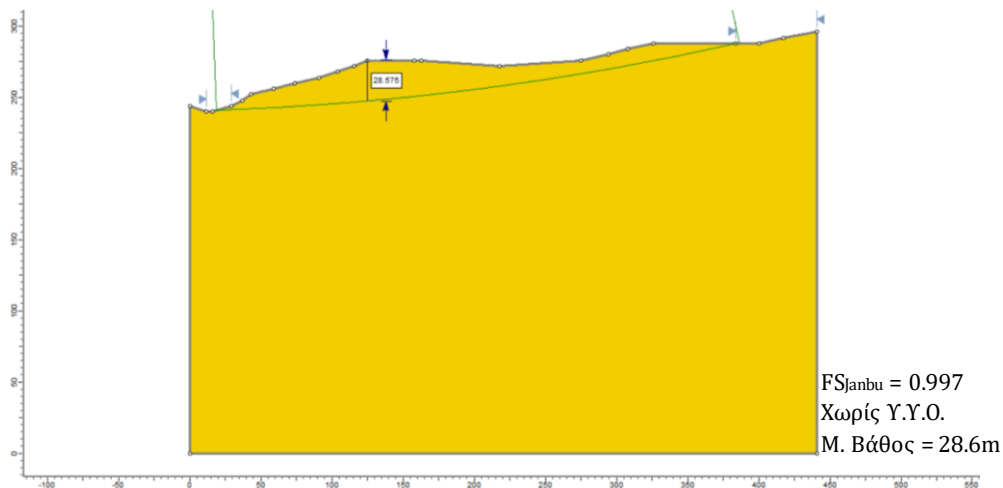
Σχήμα 5.3.1.17: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 100m



Σχήμα 5.3.1.18: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 150m



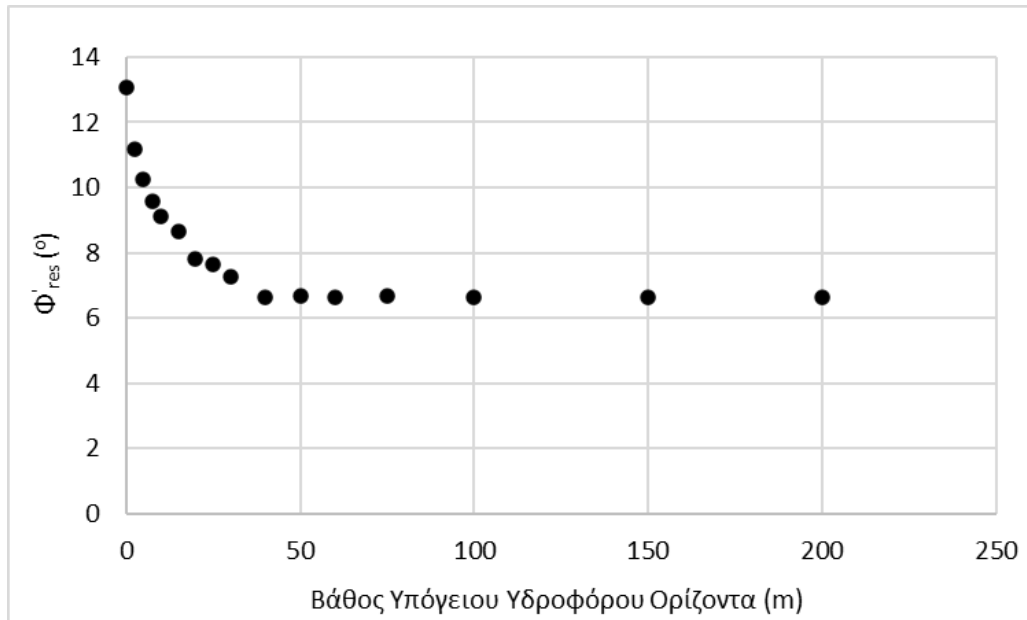
Σχήμα 5.3.1.19: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος υδροφόρου ορίζοντα 200m



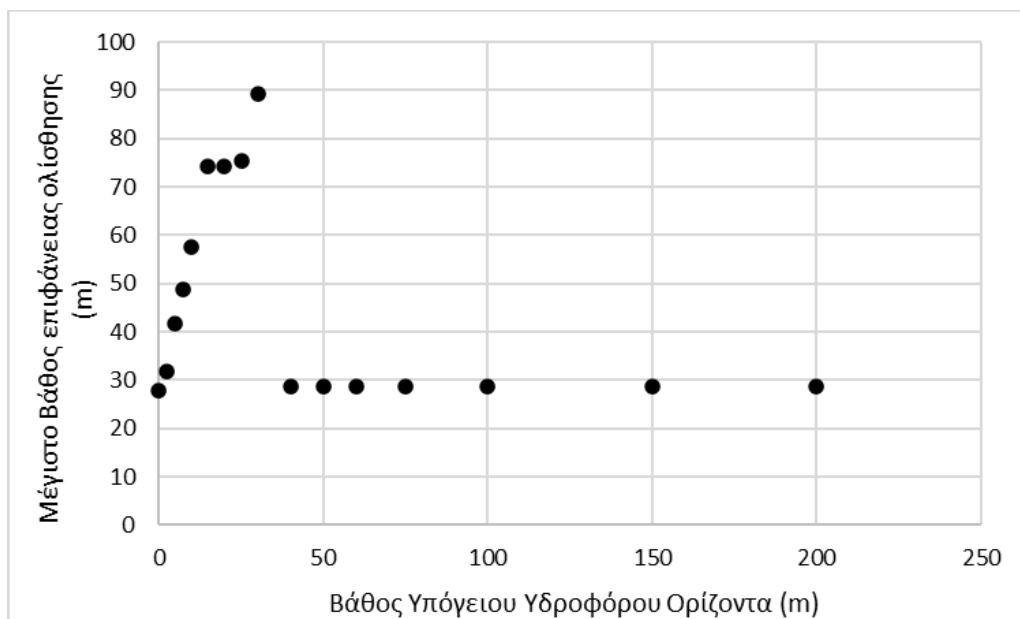
Σχήμα 5.3.1.20: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς χωρίς την ύπαρξη υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα

Βάσει των σχημάτων που παρατέθηκαν παραπάνω αλλά και του Πίνακα 5.3.1.1 παρατηρείται ότι για μικρά βάθη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, δηλαδή για βάθη μικρότερα των 30 μέτρων, η επιφάνεια ολίσθησης της κατολισθαίνουσας μάζας βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιρροή του επί της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής ϕ'_{res} . Σε αντίθετη περίπτωση για μεγαλύτερα βάθη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, δηλαδή για βάθη μεγαλύτερα των 40 μέτρων, η επιφάνεια ολίσθησης της κατολισθαίνουσας μάζας εκτείνεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα και μάλιστα παρατηρείται σταθεροποίηση του μέγιστου βάθους της επιφάνειας ολίσθησης στα 28.6m αφού πλέον δεν επηρεάζεται από τη στάθμη του υπόγειου ορίζοντα.

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής ϕ'_{res} και του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης σε σχέση με το βάθος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα παρατίθενται τα Σχήματα 5.3.1.1 και 5.3.1.2.



Σχήμα 5.3.1.18: Επιρροή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής ϕ'_{res} σε σχέση με το βάθος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα



Σχήμα 5.3.1.19: Επιρροή του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης σε σχέση με το βάθος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα

Από τα Σχήματα 5.3.1.18 και 5.3.1.19 συμπεραίνεται ότι η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ'_{res} επηρεάζεται από το βάθος του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα όσο η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Ειδικότερα, στην κατολίσθηση της Άρμου παρατηρείται ότι η τιμή της φ'_{res} μειώνεται συνεχώς μέχρι τα 30 μέτρα βάθους του υδροφόρου ορίζοντα. Αντίθετα για βάθη υδροφόρου ορίζοντα μεγαλύτερα των 30 μέτρων, όπου η επιφάνεια ολίσθησης εκτείνεται πάνω από τον υδροφόρο, σταθεροποιείται η τιμή της φ'_{res} . Συνεπώς, η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής δεν επηρεάζεται για βάθη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα μεγαλύτερα των 30 μέτρων αλλά παραμένει σταθερή με τιμή 6.6° .

Σε ό,τι αφορά την επιφάνεια ολίσθησης, παρατηρήθηκε ότι όσο βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, δηλαδή μέχρι τα 30 μέτρα βάθους του υδροφόρου, το μέγιστο βάθος της αυξάνεται συνεχώς και αποκτά τη μέγιστη τιμή των 89 μέτρων. Σε πιο μεγάλα βάθη του υδροφόρου, όπου η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται πάνω από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, το βάθος της επιφάνειας της ολίσθησης δεν επηρεάζεται από την παρουσία νερού και επομένως σταθεροποιείται στην τιμή των 29 μέτρων. Τέλος, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι το βάθος της επιφάνειας ολίσθησης είναι παρόμοιο και αποκτά τη μικρότερη τιμή του για πλήρως κορεσμένο έδαφος και πλήρως ξηρό έδαφος.

Συνοψίζοντας, στην περίπτωση της κατολίσθησης της Άρμου παρατηρήθηκε από τις αναλύσεις ευστάθειας ότι όταν ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο των 30 μέτρων δείχνει να μην επηρεάζει την επιφάνεια ολίσθησης ούτε ως προς το βάθος της αλλά ούτε και ως προς τη γωνία παραμένουσας διατμητικής της αντοχής φ'_{res} . Αντιθέτως, παρατηρήθηκε ότι όσο πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους βρίσκεται ο υδροφόρος ορίζοντας, μειώνεται το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης αλλά αυξάνεται η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ'_{res} .

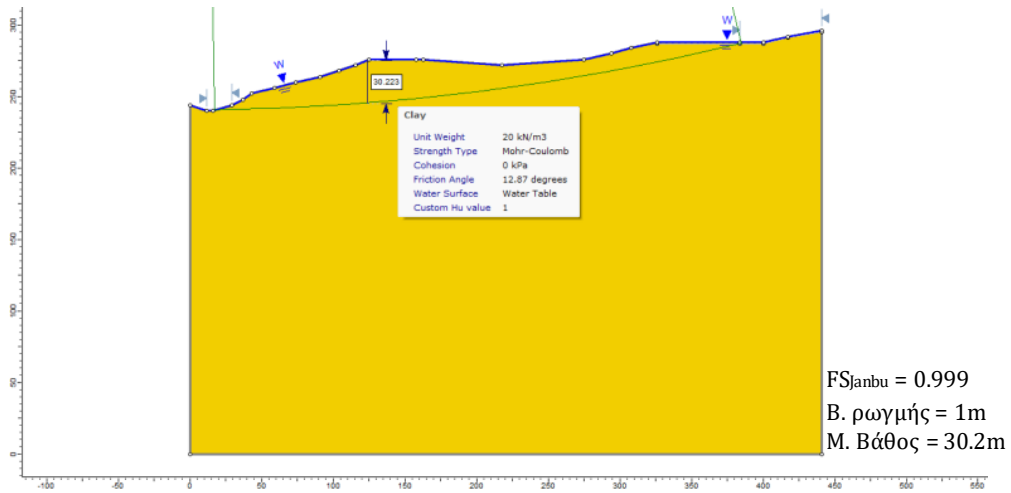
5.3.2 Αναλύσεις διερεύνησης ύπαρξης ρωγμής

Υποθέτοντας ότι ο υδροφόρος ορίζοντας ταυτίζεται με την επιφάνεια του εδάφους και επομένως το πρηνές βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους κορεσμού, διερευνάται η επιρροή που έχει η ύπαρξη ρωγμής και το βάθος αυτής (στο φρύδι της κατολίσθησης) στη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής ϕ'_{res} καθώς και στο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης. Ειδικότερα, στην παρούσα ενότητα μελετήθηκε η συμπεριφορά της ϕ'_{res} και του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης για βάθη ρωγμής 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 και 7m, πραγματοποιώντας αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας στο πρόγραμμα Slide2. Στην περίπτωση που δεν παρατηρείται ρωγή (βάθος ρωγμής 0m) τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται στο Σχήμα 5.3.1.1 της προηγούμενης ενότητας.

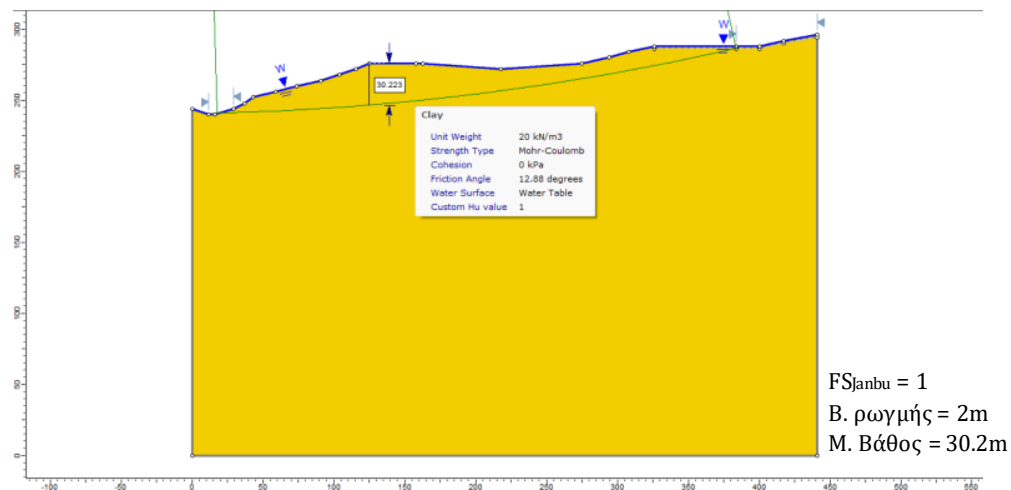
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.3.2.1, ενώ παράλληλα παρατίθενται στιγμιότυπα οθόνης από τις αντίστροφες αναλύσεις που έγιναν στο Slide2. Το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης προσδιορίστηκε, όπως και στην ενότητα 5.3.1, σύμφωνα με τον συντελεστή ασφαλείας που υπολογίζει η μέθοδος Janbu. Τέλος, θεωρείται ότι για οποιοδήποτε βάθος ρωγμής, η ρωγή είναι πληρωμένη με νερό.

| Βάθος ρωγμής (m) | ϕ'_{res} (°) / Janbu | Μέγιστο βάθος επιφάνειας ολίσθησης (m) |
|------------------|---------------------------|--|
| 0 | 13.06 | 27.8 |
| 1 | 12.87 | 30.2 |
| 2 | 12.88 | 30.2 |
| 3 | 12.90 | 29.7 |
| 4 | 12.55 | 30.8 |
| 5 | 12.37 | 31.9 |
| 6 | 12.07 | 34.6 |
| 7 | 11.90 | 40.1 |

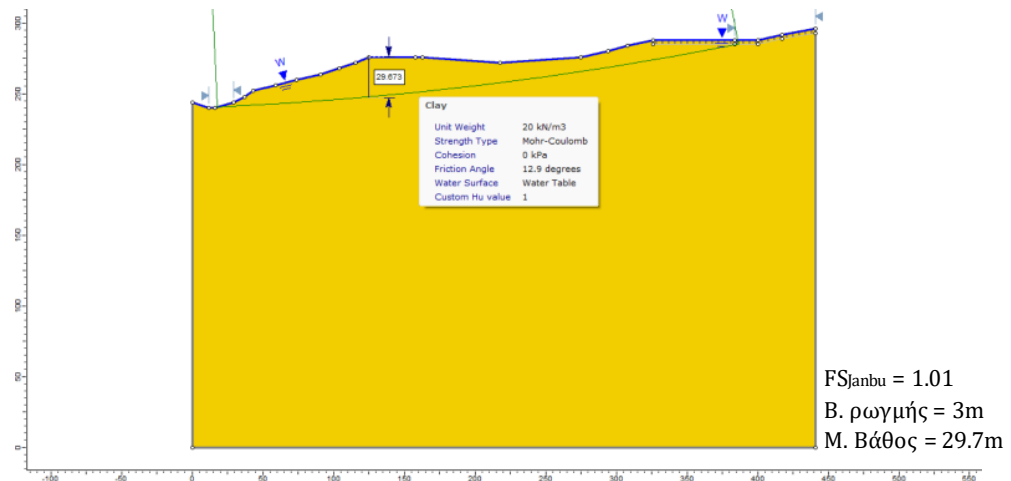
Πίνακας 5.3.2.1: Συγκεντρωτικός πίνακας που παραθέτει τις τιμές των γωνιών παραμένουσας διατμητικής αντοχής ϕ'_{res} κατά Janbu καθώς και τα μέγιστα βάθη που αποκτά η επιφάνεια ολίσθησης για κάθε βάθος ρωγμής



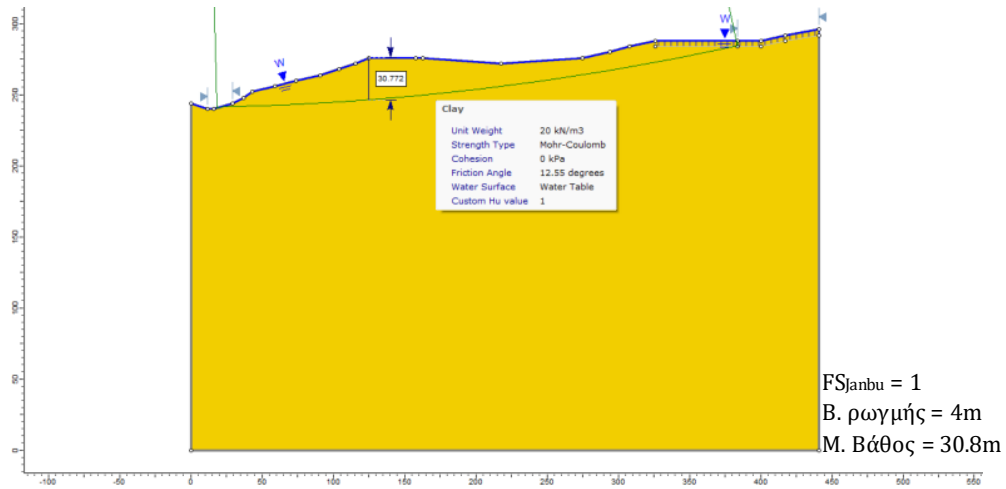
Σχήμα 5.3.2.1: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγή βάθους 1m, πληρωμένη με νερό



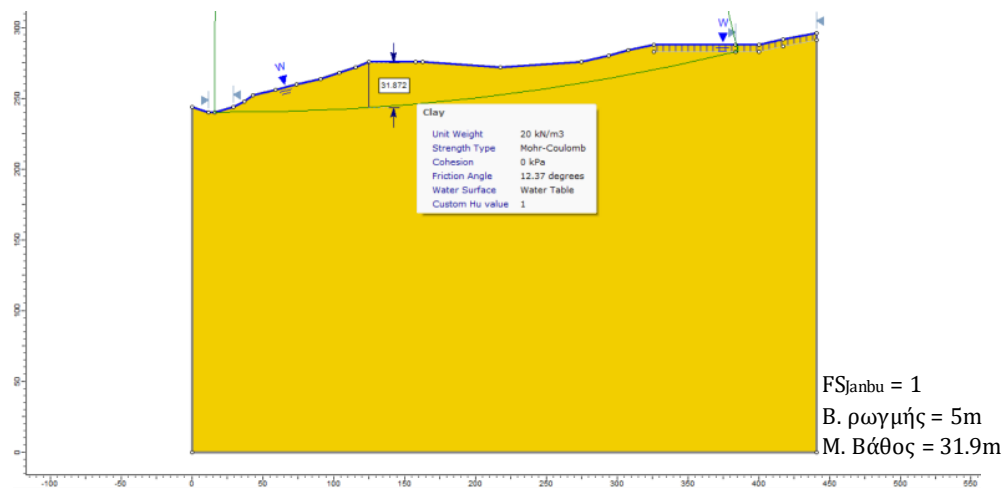
Σχήμα 5.3.2.2: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγή βάθους 2m, πληρωμένη με νερό



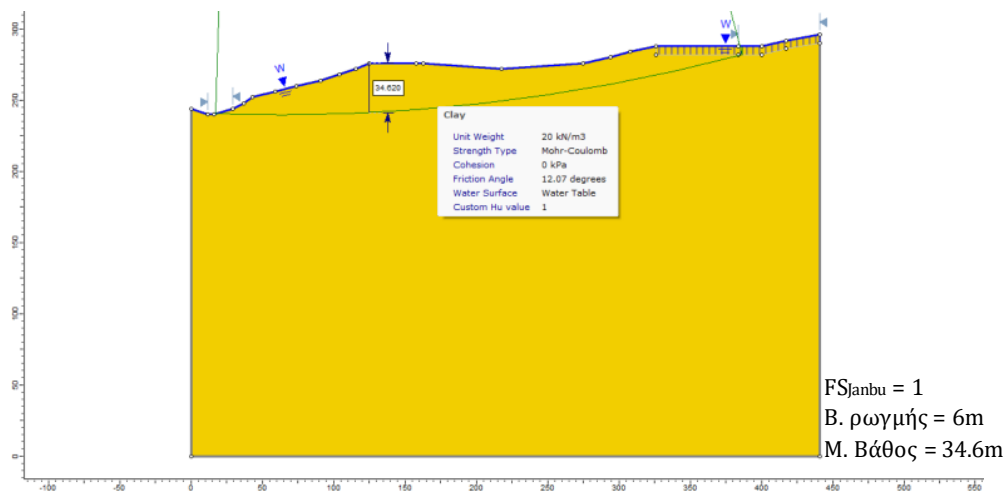
Σχήμα 5.3.2.3: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγή βάθους 3m, πληρωμένη με νερό



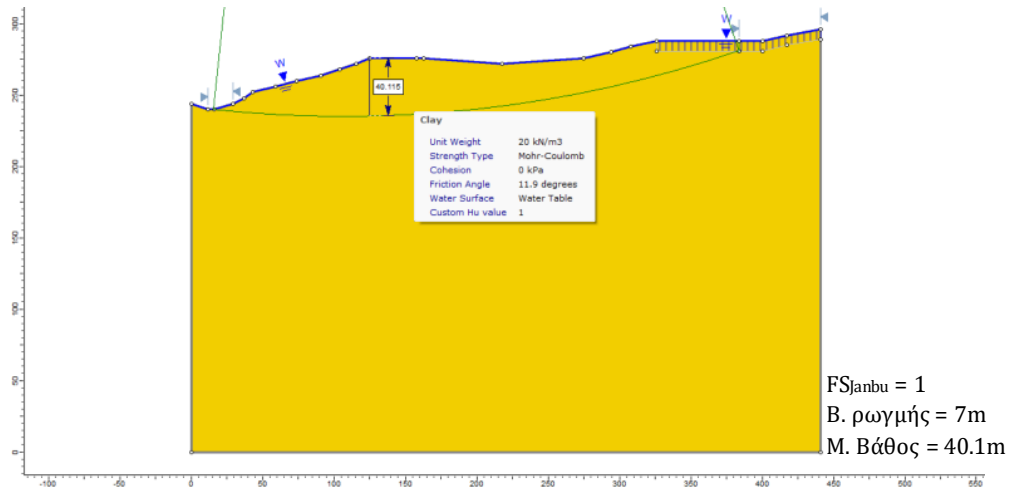
Σχήμα 5.3.2.4: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγή βάθους 4m, πληρωμένη με νερό



Σχήμα 5.3.2.5: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγή βάθους 5m, πληρωμένη με νερό

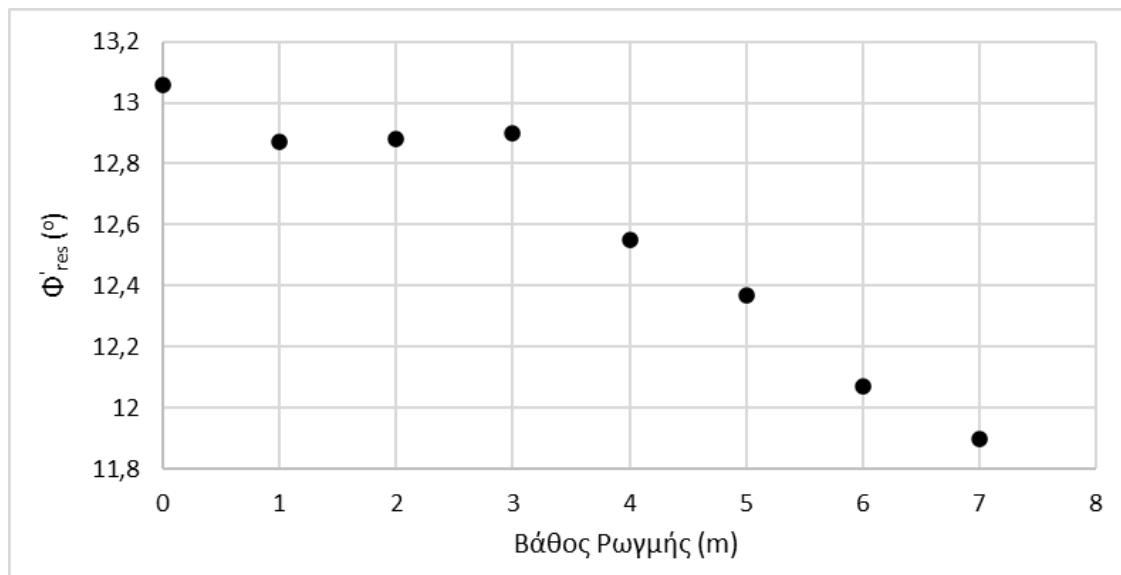


Σχήμα 5.3.2.6: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγή βάθους 6m, πληρωμένη με νερό

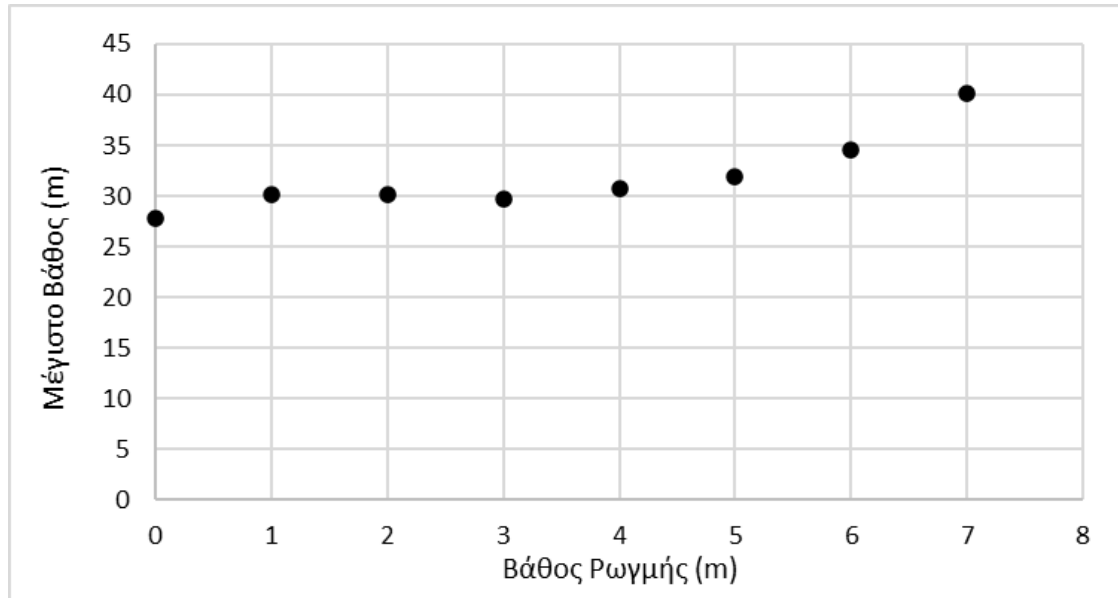


Σχήμα 5.3.2.7: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς με ρωγή βάθους 7m, πληρωμένη με νερό

Βάσει των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν και του συγκεντρωτικού Πίνακα 5.3.2.1 παρατηρείται με μία πρώτη ματιά ότι όσο αυξάνεται το βάθος της πληρωμένης με νερό ρωγμής, κατά κύριο λόγο αυξάνεται και το βάθος της επιφάνειας ολίσθησης και ταυτοχρόνως μειώνεται η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής ϕ'_{res} . Για την ευκρινέστερη παρατήρηση της συμπεριφοράς της ϕ'_{res} και του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης παρατίθενται τα Σχήματα 5.3.2.1 και 5.3.2.2, τα οποία θα σχολιαστούν στη συνέχεια.



Σχήμα 5.9.2.8: Επιρροή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής ϕ'_{res} σε σχέση με το βάθος ρωγμής



Σχήμα 5.3.2.9: Επιρροή του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης σε σχέση με το βάθος ρωγμής

Από τα Σχήματα 5.3.2.8 και 5.3.2.9 παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει το βάθος της πληρωμένης με νερό ρωγμής, μειώνεται η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής που προκύπτει από τις αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας κατά τη μέθοδο Janbu, ενώ αντίθετα αυξάνεται το βάθος της επιφάνειας που ολισθαίνει. Συνεπώς, η θέση της επιφάνειας ολίσθησης επηρεάζεται (αν δεν έχουν τεθεί άλλοι περιορισμοί) αφενός μεν από την ύπαρξη ρωγμής στο φρύδι της κατολίσθησης και αφετέρου από το βάθος της ρωγμής που παρατηρήθηκε.

Η αγνόηση ύπαρξης ρωγμών πληρωμένες με νερό, εφόσον αυτές είναι υπαρκτές, σε αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας, μπορεί υπό προϋποθέσεις να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής.

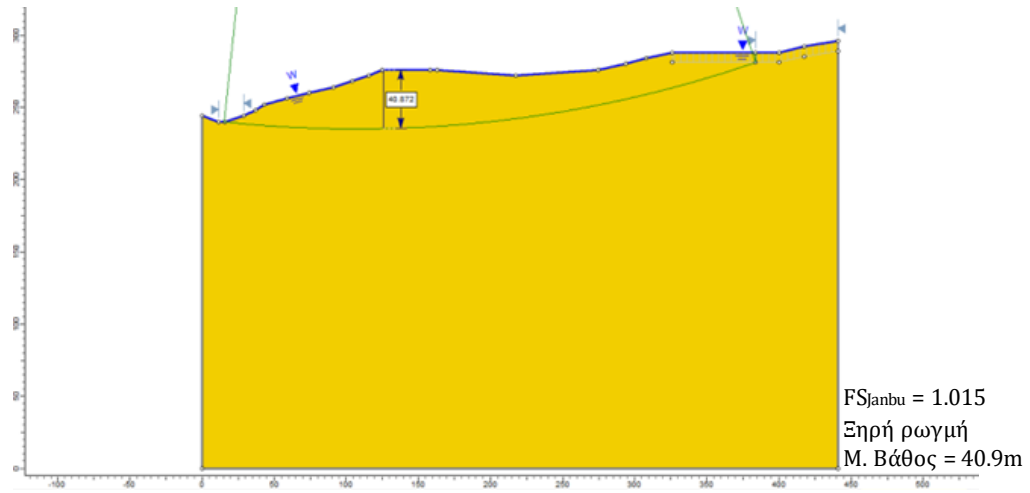
5.3.3 Αναλύσεις διερεύνησης πλήρωσης της ρωγμής με νερό

Στην ενότητα 5.3.2 παρουσιάστηκαν οι αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας που πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση ύπαρξης ρωγμής πληρωμένης με νερό, για διάφορα βάθη. Παρουσιάστηκε επίσης η επιρροή που ασκεί η ύπαρξη ρωγμής στη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ'_{res} και στο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης της κατολισθαίνουσας μάζας σε συνθήκες πλήρους κορεσμού.

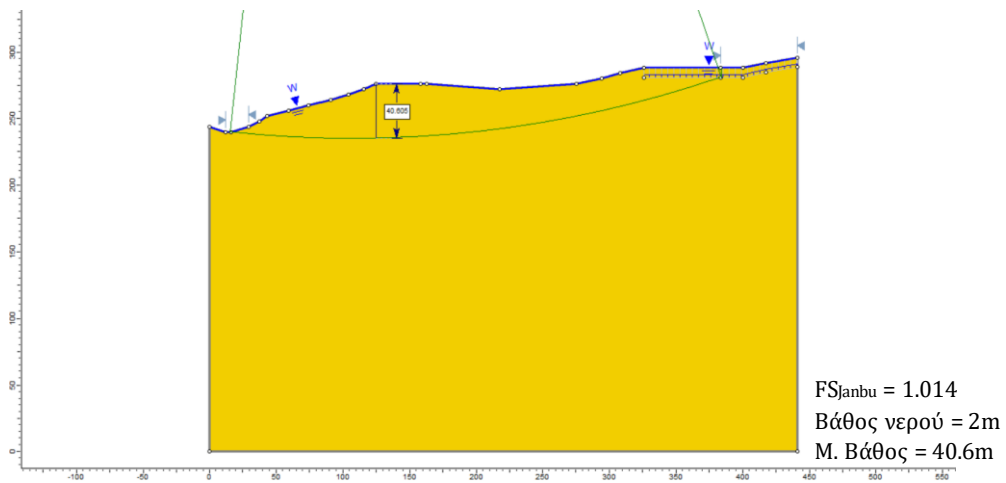
Στην συγκεκριμένη ενότητα εξετάστηκε το ενδεχόμενο ύπαρξης ρωγμής βάθους 7m στο φρύδι της κατολίσθησης, σε συνθήκες πλήρους κορεσμού, με τη διαφορά ότι η ρωγμή δεν θα είναι απαραίτητα πληρωμένη με νερό. Ειδικότερα, θα παρουσιαστούν αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας στην κεντροβαρική διατομή της κατολίσθησης της Άρμου, με την παρουσία ρωγμής στο φρύδι της κατολίσθησης βάθους 7 μέτρων, εντός της οποίας θα διερευνηθεί το βάθος του νερού. Συνεπώς, οι αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας πραγματοποιήθηκαν για 0m (πλήρως ξηρή ρωγμή), 2m, 4m, 5.5m και 7m (πληρωμένη με νερό) βάθος νερού εντός της ρωγμής 7m και παρατίθενται παρακάτω. Στην περίπτωση της πλήρωσης της ρωγμής με νερό μέχρι τα 7m, τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται στο Σχήμα 5.3.2.7 της προηγούμενης ενότητας. Τέλος, όπως και στις ενότητες 5.3.1 και 5.3.2, το μέγιστο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης προσδιορίστηκε σύμφωνα με τον συντελεστή ασφαλείας που υπολογίζει η μέθοδος Janbu.

| Βάθος νερού (m) | φ_{res} (°) / Janbu | Μέγιστο βάθος επιφάνειας ολίσθησης (m) |
|------------------------|---|---|
| 0 | 11.77 | 40.9 |
| 2 | 11.79 | 40.6 |
| 4 | 11.81 | 40.3 |
| 5.5 | 11.84 | 40.3 |
| 7 | 11.90 | 40.1 |

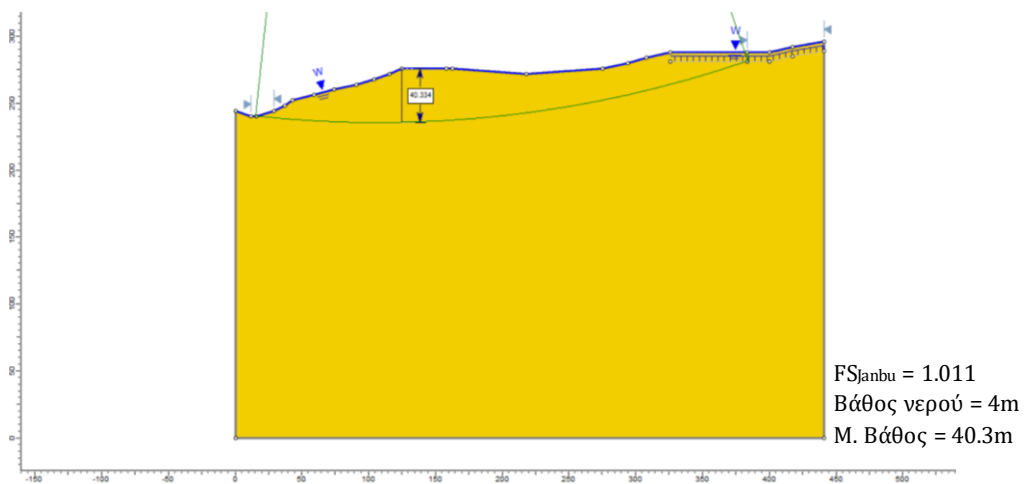
Πίνακας 5.3.3.1: Συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές των γωνιών παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ_{res} και τα μέγιστα βάθη της επιφάνειας ολίσθησης για τα διάφορα βάθη νερού εντός ρωγμής 7m



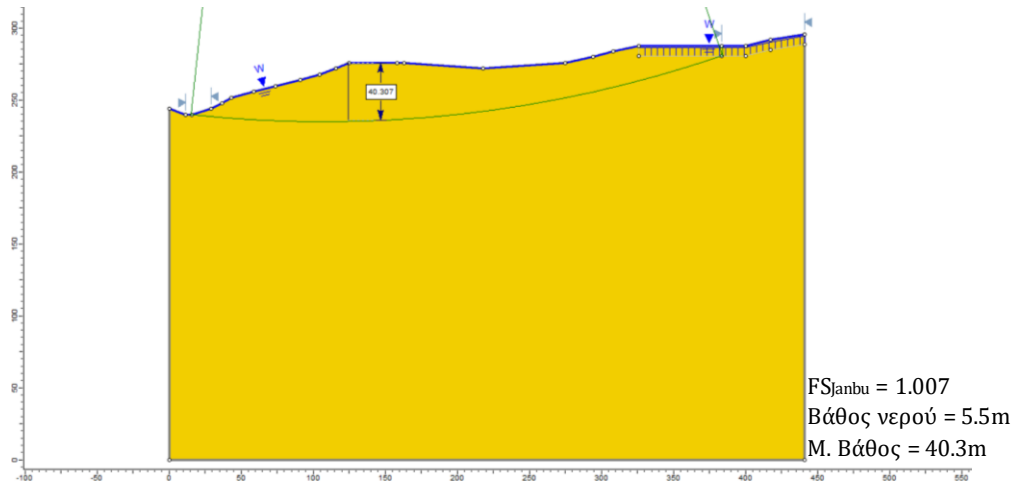
Σχήμα 5.3.3.1: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος νερού 0m εντός ρωγμής 7m (πλήρως ξηρή ρωγμή)



Σχήμα 5.3.3.2: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος νερού 2m εντός ρωγμής 7m

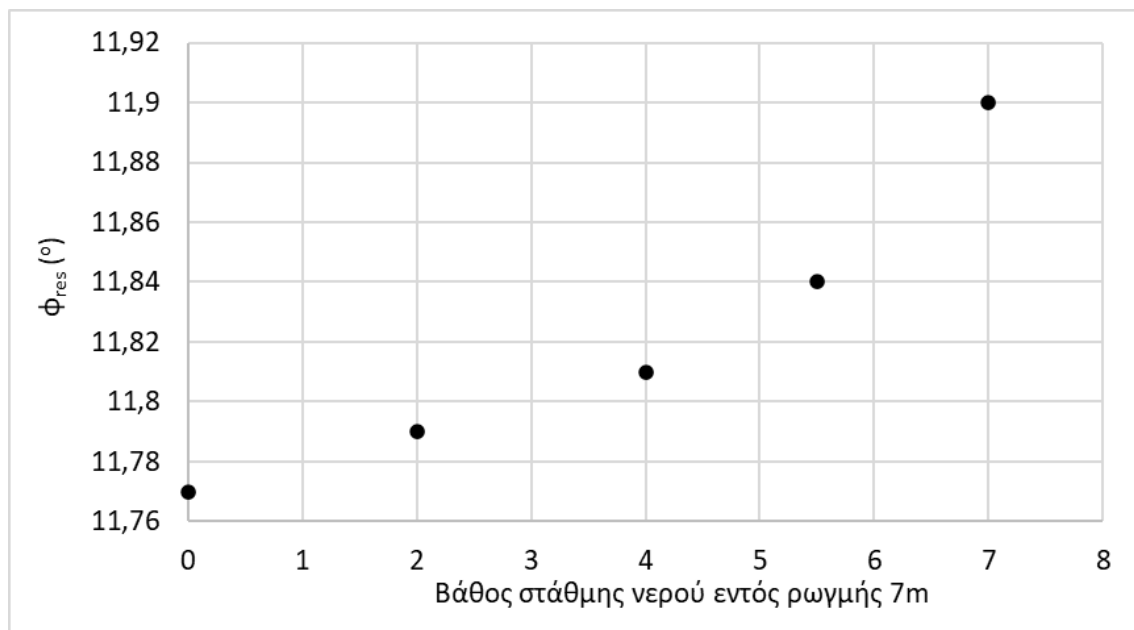


Σχήμα 5.3.3.3: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος νερού 4m εντός ρωγμής 7m

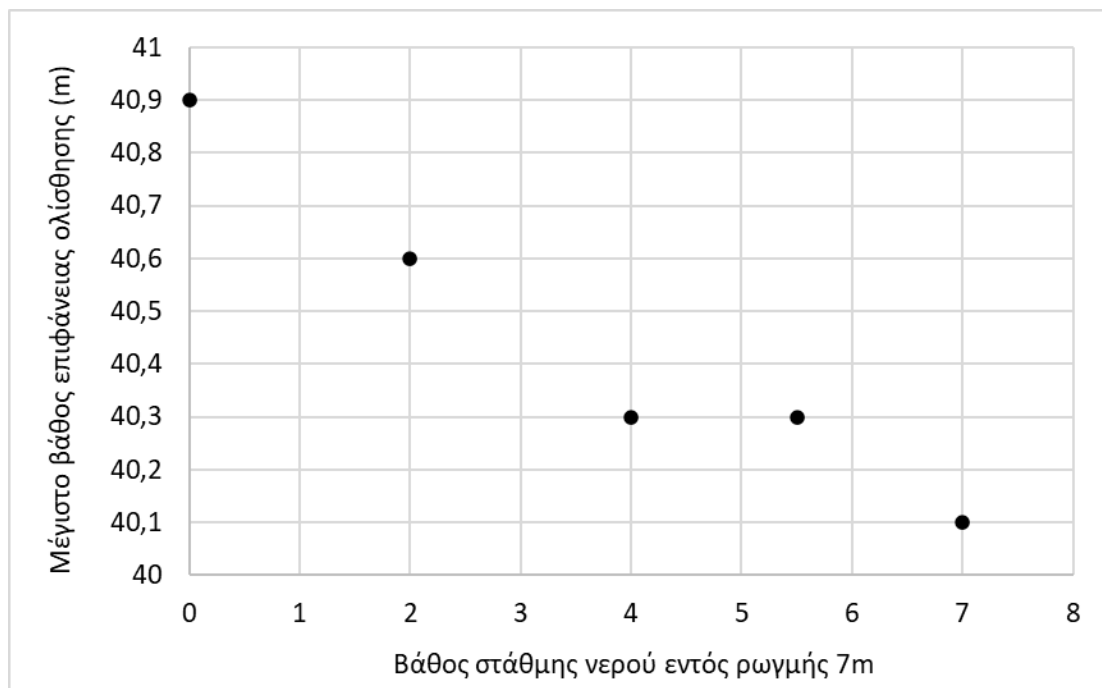


Σχήμα 5.3.3.4: Ανάλυση ευστάθειας πρανούς για βάθος νερού 5.5m εντός ρωγμής 7m

Με βάση τα παραπάνω σχήματα, τα οποία αποτελούν στιγμιότυπα οθόνης από τις αντίστροφες αναλύσεις, καθώς και βάσει του συγκεντρωτικού πίνακα 5.3.3.1 δημιουργήθηκαν τα Σχήματα 5.3.3.1 και 5.3.3.2. Τα σχήματα αυτά παρουσιάζουν την επιρροή που έχει στη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής ϕ'_{res} και στο βάθος της επιφάνειας ολίσθησης η πλήρωση της υπάρχουσας ρωγμής με νερό.



Σχήμα 5.3.3.5: Επιρροή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής ϕ'_{res} με το βάθος του νερού που παρατηρείται εντός της ρωγμής 7m



Σχήμα 5.3.3.6: Επιρροή του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης με το βάθος του νερού που παρατηρείται εντός της ρωγμής 7m

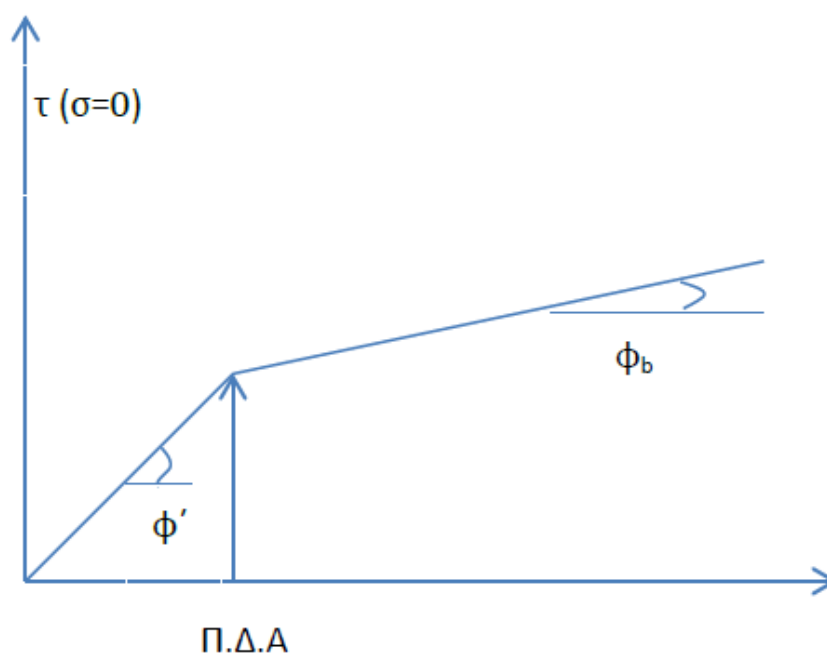
Από τα Σχήματα 5.3.3.5 και 5.3.3.6 όσο περισσότερη ποσότητα νερού υπάρχει εντός της ρωγμής των 7m, παρατηρείται μικρή μείωση του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης και παράλληλα ελάχιστη αύξηση της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής φ'_{res} .

5.4 Αναλύσεις ευστάθειας με την εισαγωγή αρνητικών πιέσεων πόρων ή μύζησης

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι αναλύσεις ευστάθειας κατά τις οποίες εισήχθησαν τιμές αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης. Συγκεκριμένα, λόγω περιορισμένου χρόνου πραγματοποιήθηκε μία σειρά αναλύσεων ευστάθειας με στόχο τη διερεύνηση της επιρροής της μύζησης και της επιρροής της πίεσης διείδυσης αέρα στον συντελεστή ασφαλείας SF.

Για την εισαγωγή της επιρροής της μύζησης, κατά τις αναλύσεις ευστάθειας, το πρόγραμμα Slide2 «διαβάζει» την τιμή της μύζησης. Αν αυτή είναι μικρότερη (κατ' απόλυτο τιμή) από την πίεση διείδυσης αέρα, υποθέτει ότι το υλικό είναι

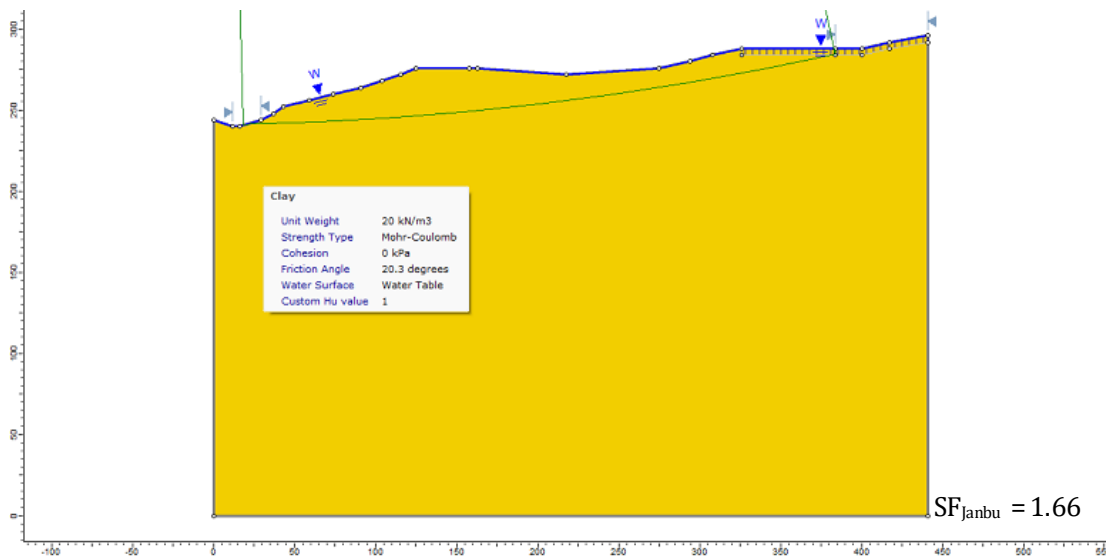
πλήρως κορεσμένο με αρνητική πίεση πόρων και χρησιμοποιεί την τιμή ϕ' στον υπολογισμό της πρόσθετης διατμητικής αντοχής λόγω αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης. Αν αυτή είναι μεγαλύτερη (κατ' απόλυτο τιμή) από την πίεση διείδυσης αέρα, υποθέτει ότι το υλικό είναι μη κορεσμένο με μύζηση και χρησιμοποιεί την τιμή ϕ_b στον υπολογισμό της πρόσθετης διατμητικής αντοχής λόγω αρνητικής πίεσης πόρων/μύζησης. Αυτή η θεώρηση από το πρόγραμμα επιδεικνύεται στο Σχήμα 5.4.1 από όπου γίνεται πιο κατανοητή.



Σχήμα 5.4.1: Συνθήκες (steady state) μόνιμης ροής (αλλαγή κλίσης στην τιμή πίεσης διείδυσης αέρα)
(Κοκκοβιάδης, 2022)

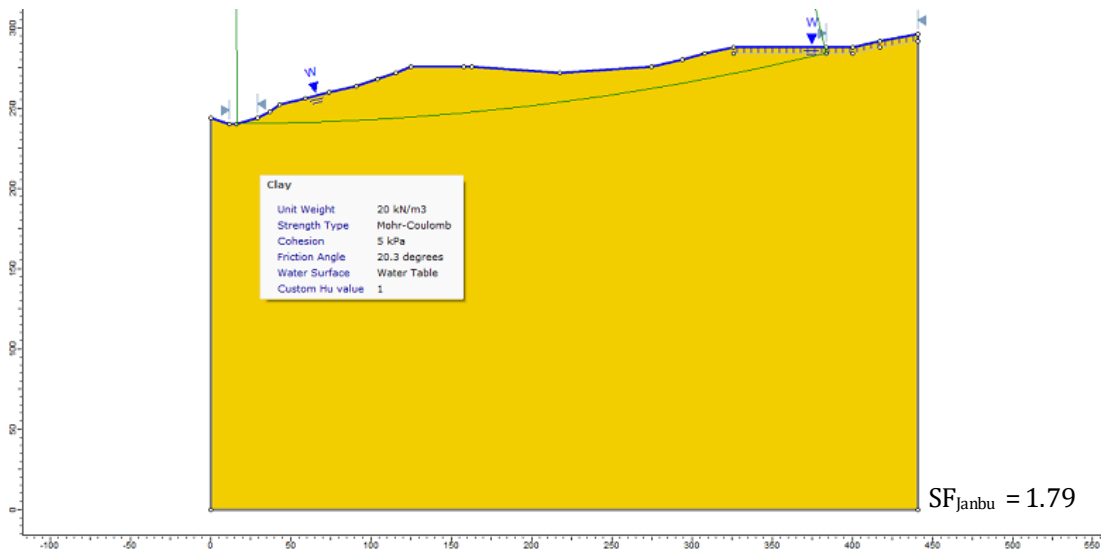
Η σειρά αναλύσεων που πραγματοποιήθηκε και θα παρουσιαστεί στη συνέχεια της ενότητας έγινε με αρχείο αναφοράς το αρχείο στο οποίο έγινε η αντίστροφη ανάλυση για στάθμη υπόγειου ορίζοντα στην επιφάνεια του εδάφους και βάθος ρωγμής 4 m, πληρωμένης με νερό (Σχήμα 5.3.2.4). Όπως αναφέρθηκε και στο υποκεφάλαιο 5.3, αυτή η αντίστροφη ανάλυση έδωσε γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής $\phi_{res} = 12.55^\circ$. Η επιλογή της παρούσας αντίστροφης ανάλυσης ως αρχείο αναφοράς στην παρούσα ενότητα δεν είχε κάποιον συγκεκριμένο σκοπό, απλώς θεωρήθηκε λογική.

Πρώτο στάδιο στην παρούσα ενότητα ήταν η αναπαραγωγή των συνθηκών που υπήρχαν πριν τη δημιουργία επιφάνειας ολίσθησης. Συγκεκριμένα, στο αρχείο αναφοράς, στη θέση συμπλήρωσης της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής $\varphi_{res} = 12.55^\circ$, εισήχθη η τιμή της γωνίας διατμητικής αντοχής $\varphi' = 20.3^\circ$. Η γωνία διατμητικής αντοχής φ' είναι γνωστή από προηγούμενο πρόγραμμα δοκιμών που είχαν εκτελεστεί στην μπεντονιτική άργιλο Άρμου στα εργαστήρια της ΕΔΑΦΟΣ και συγκεκριμένα από τη δοκιμή άμεσης διάτμησης στην αναζυμωμένη μπεντονιτική άργιλο Άρμου. Με αυτήν την προσθήκη και για μηδενική συνοχή, προέκυψε συντελεστής ασφαλείας SF κατά Janbu ίσος με 1.66. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4.2.



Σχήμα 5.4.2: Ανάλυση ευστάθειας για γωνία διατμητικής αντοχής $\varphi'=20.3^\circ$, μηδενική συνοχή και ρωγή στο φρύδι της κατολίθησης βάθους 4m πληρωμένη με νερό

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μία εκ νέου ανάλυση με τα χαρακτηριστικά της προηγούμενης ανάλυσης και ίδιο αρχείο αναφοράς, με τη διαφορά ότι εισήχθη τιμή συνοχής $c = 5\text{kPa}$, αντί για μηδενική συνοχή που είχε αρχικά. Η τιμή της συνοχής που επιλέχθηκε δεν αποτελεί την κορυφαία συνοχή του υλικού, αλλά μία συνοχή που είχε μετρηθεί σε αυτό το διαταραγμένο δείγμα. Πραγματοποιώντας την ανάλυση αυτή, προέκυψε συντελεστής ασφαλείας $SF = 1.79$ κατά Janbu. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4.3.

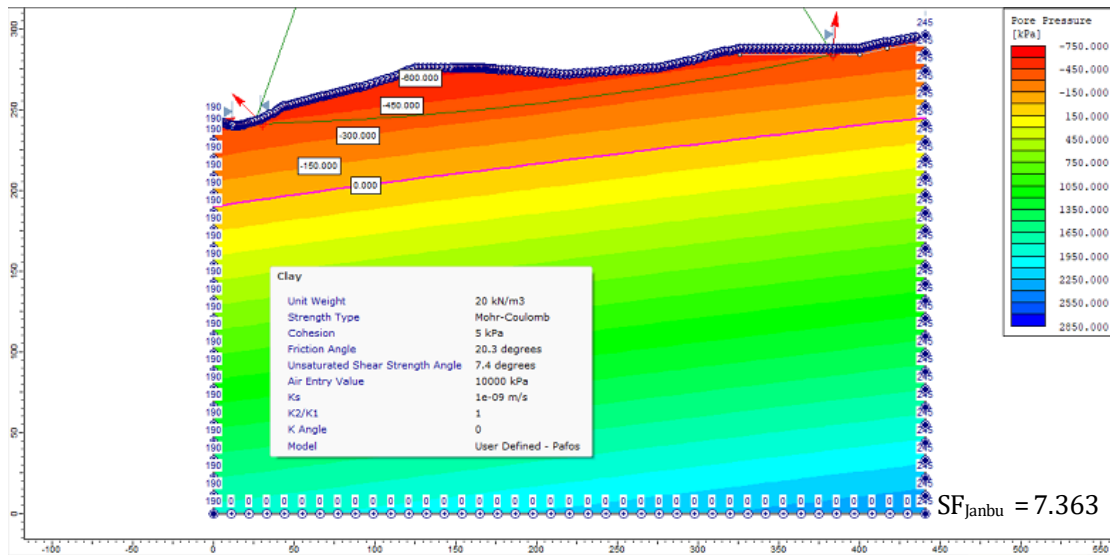


Σχήμα 5.4.3: Ανάλυση ευστάθειας για γωνία διατμητικής αντοχής $\phi' = 20.3^\circ$, συνοχή $c = 5 \text{ kPa}$ και ρωγμή στο φρύδι της κατολίθησης βάθους 4m πληρωμένη με νερό

Στη συνέχεια, για τη διερεύνηση της επιρροής του βαθμού κορεσμού πραγματοποιήθηκε εκ νέου η ανάλυση ευστάθειας με τα στοιχεία που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.4.3 με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Κύριος στόχος ήταν η δημιουργία ενός περιβάλλοντος με αρνητικές πιέσεις πόρων. Απαραίτητο να αναφερθεί είναι ότι το πεδίο τιμών που χρησιμοποιήθηκε στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων δόθηκε από τον επιβλέποντα και διευθυντή του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ, κ. Μιχάλη Μπαρδάνη. Το πεδίο τιμών που προβλέφθηκε από το μοντέλο δημιουργεί σημαντικές τιμές μύζησης και είναι πράγματι λογικές σε σημεία κοντά στην επιφάνεια του εδάφους καθώς είναι παρόμοιες με πραγματικές τιμές μύζησης που μετρήθηκαν (βλ. Bardanis, Loukidis, 2020).

Σε αυτή την ανάλυση που μόλις περιεγράφηκε και πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και η οποία αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.4.4, θεωρήθηκε ότι ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος 50m από την επιφάνεια του εδάφους. Με τη δημιουργία του πεδίου τιμών μύζησης, εισήχθη και η τιμή της γωνίας μεταβολής της αντοχής με τη μύζηση $\phi_b = 7.4^\circ$ που υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 4.3.2, σύμφωνα με την Εξίσωση 4.2 και η οποία αντιστοιχεί σε γωνία διατμητικής αντοχής $\phi' = 20.3^\circ$. Ταυτοχρόνως εισήχθη στο πρόγραμμα και η λογική τιμή της πίεσης διείδυσης αέρα που αντιστοιχεί στην

μπεντονιτική άργιλο Άρμου όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο των εργαστηριακών δοκιμών. Η τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα που εισήχθη είναι AEP (Air Entry Pressure) = 10,000 kPa. Η τιμή αυτή όπως παρατηρείται και από το Σχήμα 5.4.4 είναι μεγαλύτερη από τις μύζησεις του πεδίου τιμών οι οποίες έχουν μέγιστη τιμή τα 600 kPa.



Σχήμα 5.4.4: Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού υλικού με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi' = 20.3^\circ$, συνοχή $c = 5 \text{ kPa}$, $\phi_b = 7.4^\circ$ και Πίεση Διείσδυσης Αέρα 10,000 kPa

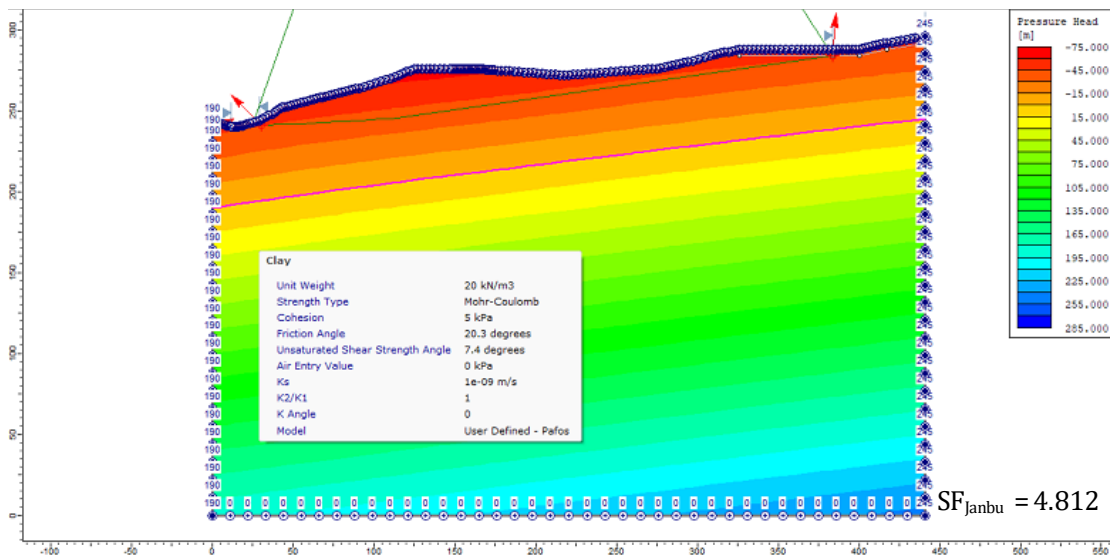
Στο Σχήμα 5.4.4 παρουσιάζεται με μωβ χρώμα ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας στο βάθος του οποίου (50m) παρατηρούνται μηδενικές πιέσεις πόρων. Όπως γίνεται αντιληπτό το εδαφικό υλικό που βρίσκεται βαθύτερα του υδροφόρου ορίζοντα αποκτά θετικές τιμές πίεσης πόρων καθώς είναι πλήρως κορεσμένο, ενώ το εδαφικό υλικό που είναι πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα έχει αρνητικές πιέσεις πόρων. Τέλος, παρατηρείται από το Σχήμα 5.4.4 ότι στην επιφάνεια ολίσθησης η πίεση πόρων, δηλαδή η μύζηση του μη κορεσμένου εδάφους σε αυτή την περιοχή αποκτά τιμή μύζησης μικρότερη των 450 kPa, ενώ ο συντελεστής ασφαλείας λόγω της προσθήκης μεγάλης τιμής πίεσης διείσδυσης αέρα προέκυψε $SF = 7.363$.

Παρόλο που το υπό μελέτη εδαφικό υλικό, η μπεντονιτική άργιλος Άρμου, έχει μία πολύ μεγάλη τιμή πίεσης διείσδυσης αέρα της τάξης των 10,000 kPa, πραγματοποιήθηκαν κάποιες αλλαγές, προκειμένου να επιδειχθεί ευκρινέστερα η

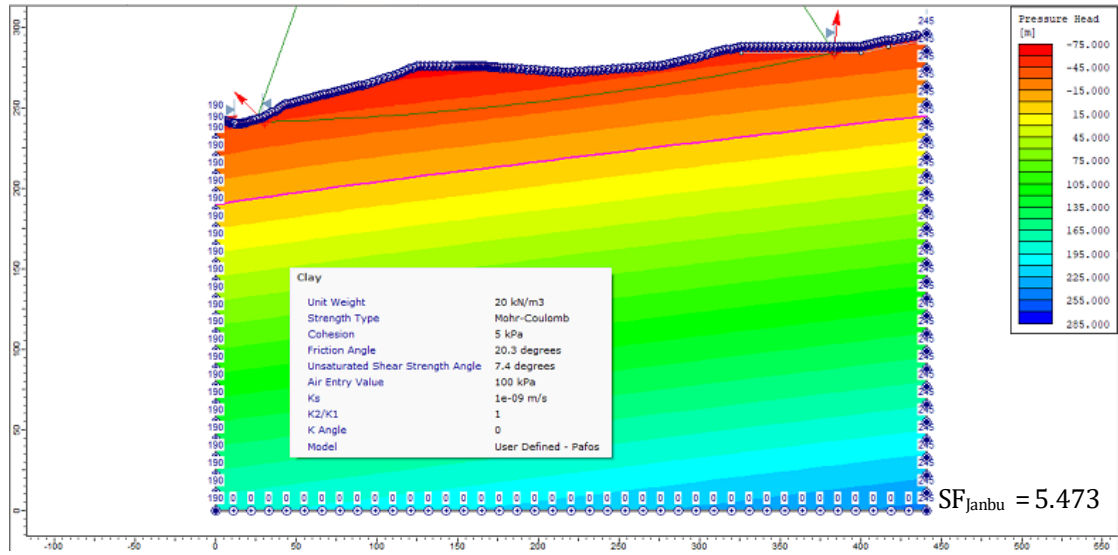
επιρροή του βαθμού κορεσμού. Συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας μία διαδικασία ανάλογη με αυτήν που έχει κάνει ο Κοκκοβιάδης (Κοκκοβιάδης, 2022) πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευστάθειας μεταβάλλοντας μόνο την τιμή της πίεσης διείσδυσης αέρα.

Στην παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε εισήχθησαν διαφορετικές τιμές πίεσης διείσδυσης αέρα θέτοντας τιμές 0, 100, 200, 300 και 450 kPa, κρατώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους. Όπως παρατηρείται και από το Σχήμα 5.4.4 η τιμή μύζησης $s = 450$ kPa είναι μεγαλύτερη από τις μέγιστες τιμές της μύζησης που εμφανίζονται στο πεδίο τιμών που τέθηκε και επομένως από την περιοχή που διέρχεται η επιφάνεια ολίσθησης.

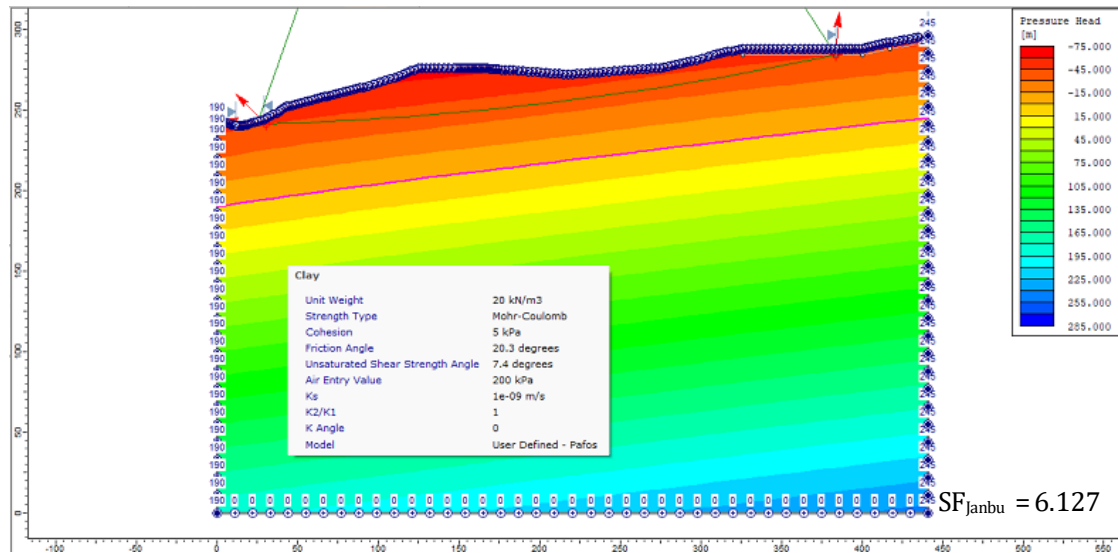
Παρακάτω παρατίθενται τα σχήματα στα οποία απεικονίζονται οι αναλύσεις ευστάθειας που πραγματοποιήθηκαν για τιμές πίεσης διείσδυσης αέρα (ΑΕΡ) 0, 100, 200, 300, 450 kPa, ο πίνακας με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα και το διάγραμμα εξέλιξης του συντελεστή ασφαλείας με την πίεση διείσδυσης αέρα.



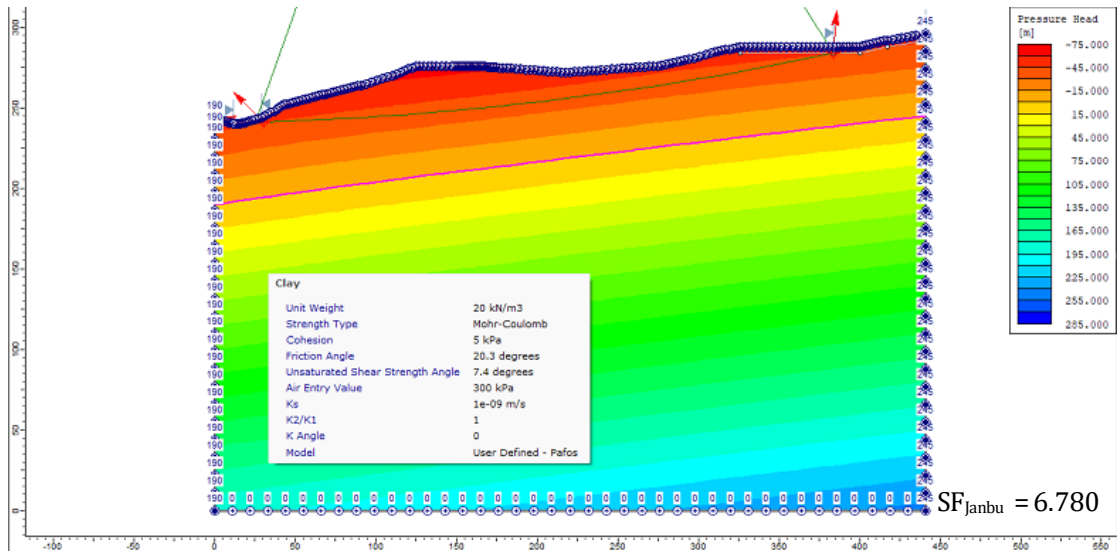
Σχήμα 5.4.5: Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού υλικού με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi' = 20.3^\circ$, συνοχή $c = 5$ kPa, $\phi_b = 7.4^\circ$ και μηδενική Πίεση Διείσδυσης Αέρα



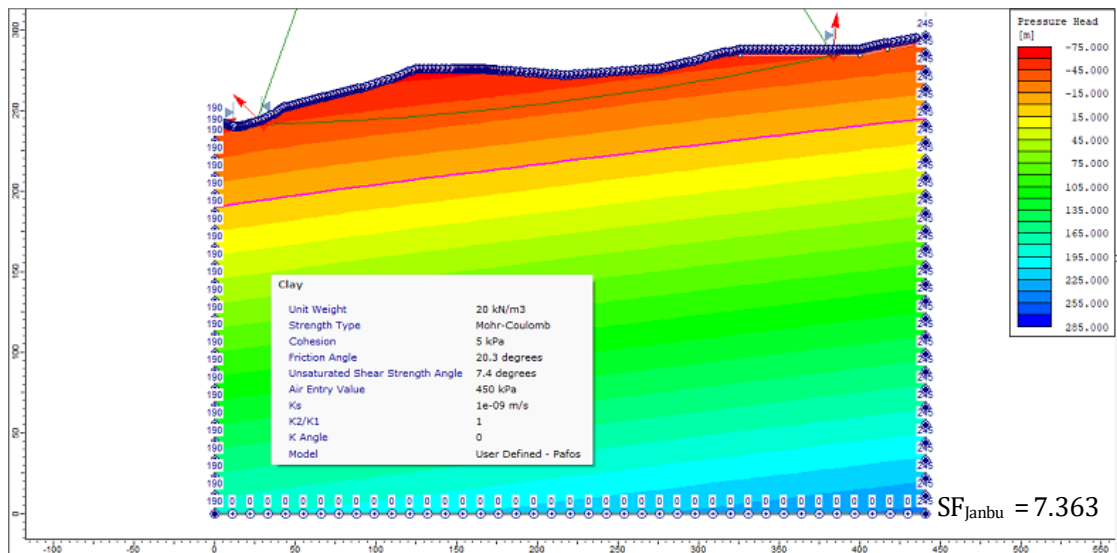
Σχήμα 5.4.6: Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού υλικού με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi' = 20.3^\circ$, συνοχή $c = 5\text{kPa}$, $\phi_b = 7.4^\circ$ και Πίεση Διείσδυσης Αέρα 100 kPa



Σχήμα 5.4.7: Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού υλικού με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi' = 20.3^\circ$, συνοχή $c = 5\text{kPa}$, $\phi_b = 7.4^\circ$ και Πίεση Διείσδυσης Αέρα 200 kPa



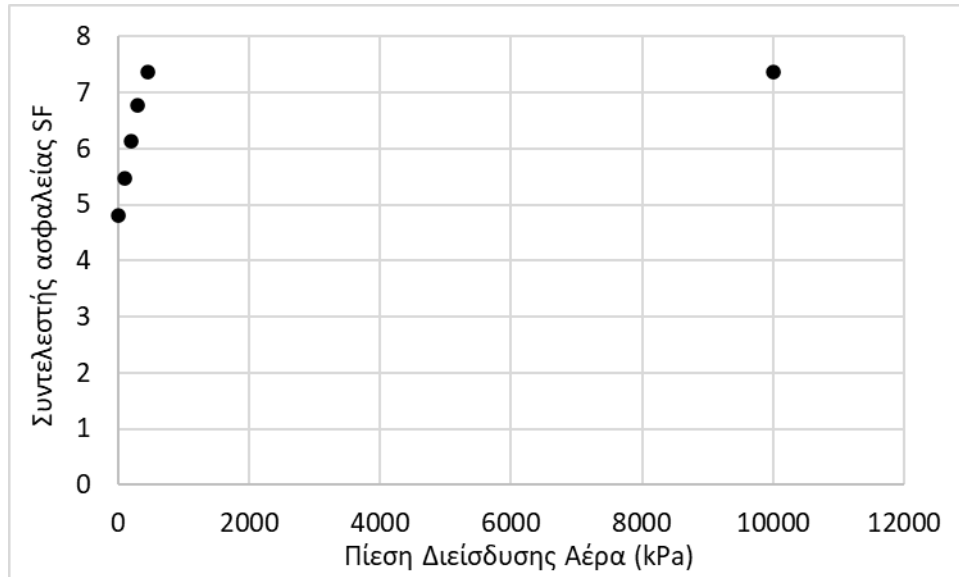
Σχήμα 5.4.8: Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού υλικού με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi' = 20.3^\circ$, συνοχή $c = 5 \text{ kPa}$, $\phi_b = 7.4^\circ$ και Πίεση Διείσδυσης Αέρα 300 kPa



Σχήμα 5.4.9: Ανάλυση ευστάθειας εδαφικού υλικού με γωνία διατμητικής αντοχής $\phi' = 20.3^\circ$, συνοχή $c = 5 \text{ kPa}$, $\phi_b = 7.4^\circ$ και Πίεση Διείσδυσης Αέρα 450 kPa

| Π.Δ.Α. (kPa) | SF |
|--------------|-------|
| 0 | 4,812 |
| 100 | 5,473 |
| 200 | 6,127 |
| 300 | 6,780 |
| 450 | 7,363 |
| 10000 | 7,363 |

Πίνακας 5.4.1: Πίνακας τιμών Πίεσης Διείσδυσης Αέρα σε kPa και τιμών συντελεστών ασφαλείας



Σχήμα 5.4.10: Διάγραμμα εξέλιξης του συντελεστή ασφαλείας με την Πίεση διείσδυσης αέρα

Από το Σχήμα 5.4.10 παρατηρείται ότι με την αύξηση της πίεσης διείσδυσης αέρα αυξάνεται και ο συντελεστής ασφαλείας, ο οποίος μεγιστοποιείται και επομένως σταθεροποιείται για τιμή πίεσης διείσδυσης αέρα $AEP = 450\text{kPa}$.

Όπως ακριβώς προέκυψε και από τις αναλύσεις του Κοκκοβιάδη φαίνεται ότι η παρουσία της μύζησης αυξάνει κατά μεγάλο βαθμό τον συντελεστή ασφαλείας. Επιπρόσθετα, προκύπτει ότι ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται τόσο περισσότερο όσο μεγαλώνει η πίεση διείσδυσης αέρα της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου. Στην πραγματικότητα, παρά την ύπαρξη αρνητικής πίεσης πόρων, το υλικό δεν είναι μη κορεσμένο αλλά πλήρως κορεσμένο με αρνητικές πιέσεις πόρων και επομένως η γωνία διατμητικής αντοχής στη βάση των λωρίδων δεν είναι το ϕ_b , το οποίο είναι μικρότερο από το ϕ' αλλά είναι καθαυτό το ϕ' .

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

6.1 Εισαγωγή

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία έγινε μια προσπάθεια διερεύνησης της επιρροής του βαθμού κορεσμού στη διατμητική αντοχή ενός υλικού. Το υλικό αυτό είναι η μπεντονιτική άργιλος Άρμου, της περιοχής της Πάφου, της Κύπρου, και αποτελεί επιφανειακή στρώση κατολισθαίνουσας μάζας. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκαν εργαστηριακά τα φυσικά χαρακτηριστικά και η μηχανική συμπεριφορά της μπεντονιτικής άργιλου υπό συνθήκες μερικού κορεσμού, ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκαν αντίστροφες και ευθείες αναλύσεις ευστάθειας πρηνούς κατά τις οποίες εισήχθησαν και αρνητικές πιέσεις πόρων / μύζηση και τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια. Η εργαστηριακή διερεύνηση πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο της εταιρίας ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. και η παραμετρική διερεύνηση έγινε με τη χρήση του προγράμματος Slide2.

Από τα θεωρητικά στοιχεία της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών που παρουσιάστηκαν στη διπλωματική εργασία είναι απαραίτητο να σημειωθούν μερικές παρατηρήσεις.

- Όταν ο βαθμός κορεσμού, δηλαδή ο λόγος του όγκου των κενών των πόρων του που πληρούνται με νερό προς τον συνολικό όγκο των κενών του, λαμβάνει τιμές από 0 έως 1, ή σε ποσοστιαία κλίμακα από 0% έως 100% τότε το υλικό βρίσκεται σε συνθήκες μερικού κορεσμού. Με τη συνύπαρξη της υγρής με την αέρια φάση στους πόρους του υλικού, το υλικό χαρακτηρίζεται είτε ως μη κορεσμένο είτε ως μερικώς κορεσμένο. Η διαφορά τους είναι ότι τα μη κορεσμένα ή ακόρεστα εδάφη χαρακτηρίζονται από ομοιογένεια ως προς τον βαθμό κορεσμού τους, δηλαδή το εδαφικό υλικό διαθέτει έναν κοινό βαθμό κορεσμού σε όλη του την έκταση, ενώ τα μερικώς κορεσμένα εδάφη χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια, καθώς ο βαθμός κορεσμού τους μεταβάλλεται κατά τόπους.
- Η έννοια της μύζησης έχει σημασία μόνο στα υλικά με μερικό κορεσμό, καθώς αποτελεί τη διαφορά της πίεσης που ασκείται στην υγρή φάση από την πίεση που ασκείται στην αέρια φάση. Πλήρως κορεσμένα εδάφη μπορούν πράγματι

να βρεθούν με αρνητικές πιέσεις πόρων μέσα τους, αλλά αυτές είναι αρνητικές πιέσεις πόρων και όχι μύζηση.

- Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού είναι κεντρικής σημασίας για την καλύτερη κατανόηση και μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφικών υλικών. Παρουσιάζει τη μεταβολή βαθμού κορεσμού σε σχέση με τη μύζηση.
- Από την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού φαίνεται ότι όταν αρχίζει η διαδικασία του αποκορεσμού του εδάφους, υπάρχει ένα πρώτο στάδιο κατά το οποίο δεν έχει εμφανιστεί αέρας μέσα στο έδαφος και επομένως η πίεση πόρων είναι αρνητική. Σε αυτό το στάδιο ο βαθμός κορεσμού του υλικού είναι 100% και υπάρχει νερό παντού γύρω από τους κόκκους του, με αποτέλεσμα το έδαφος να θεωρείται πλήρως κορεσμένο. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ο όρος «αρνητική πίεση πόρων». Όταν πλέον εμφανιστεί και αέρας μέσα στο έδαφος και ο βαθμός κορεσμού αποκτά τιμή μικρότερη από 100%, τότε οι κόκκοι του εδάφους δεν έρχονται σε επαφή ολόπλευρα με το νερό. Σε αυτήν την περίπτωση, όταν δηλαδή έχει επέλθει ο αποκορεσμός του υλικού χρησιμοποιείται ο όρος «μύζηση». Βάσει αυτών, διακρίνεται η χρήση των δύο όρων ώστε να γίνεται αντιληπτό αν έχει επέλθει αποκορεσμός μέσα στο εδαφικό υλικό.
- Τα μη κορεσμένα εδάφη επηρεάζονται σε πολύ σημαντικό βαθμό από την μεταβολή του όγκου τους. Σε ό,τι αφορά τα πλαστικά αργιλικά εδάφη τα οποία διαθέτουν υψηλή πυκνότητα και χαμηλές τάσεις διογκώνονται με την παροχή περίσσειας νερού ώστε να αποκτήσουν συμπεριφορά πλήρως κορεσμένου υλικού, ενώ κοκκώδη εδάφη χαμηλής πυκνότητας με την παροχή νερού έχουν την τάση να συρρικνώνονται.

6.2 Εργαστηριακή διερεύνηση των μη κορεσμένων εδαφών

Για τη διερεύνηση των φυσικών χαρακτηριστικών αλλά και της μηχανικής συμπεριφοράς της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου πραγματοποιήθηκε μία σειρά δοκιμών στο εργαστήριο της ΕΔΑΦΟΣ Α.Ε. από τα αποτελέσματα αυτής της εργαστηριακής διερεύνησης προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- Από την πλήρη κατάταξη των δειγμάτων του υλικού της Άρμου διαπιστώθηκε πως η μπεντονιτική άργιλος της περιοχής είναι μία μαλακή άργιλος, πολύ υψηλής πλαστικότητας (CH), με τιμή PL μεγαλύτερη από 110%.
- Η μέγιστη πίεση, δηλαδή η μέγιστη τιμή μύζησης που μπορεί να επιβληθεί στο υλικό εντός του θαλάμου μύζησης του εργαστηρίου της ΕΔΑΦΟΣ είναι τα 1500kPa (15Bar). Λόγω αυτού και για την ολοκληρωμένη εικόνα των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους – νερού, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ξήρανσης του υλικού στην ατμόσφαιρα για να επιβληθούν μεγαλύτερες τιμές μύζησης.
- Παραδοσιακά, στη διεθνή βιβλιογραφία (π.χ. Fredlund, Rahardjo, 1993) για τα μη κορεσμένα εδάφη, χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού καλείται το διάγραμμα σύμφωνα με το οποίο παρουσιάζεται η εξέλιξη του βαθμού κορεσμού σε σχέση με τη μύζηση του υλικού. Χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους – νερού ενός μη κορεσμένου εδάφους ονομάζονται τα τελευταία χρόνια οι καμπύλες που προκύπτουν κατά τον εργαστηριακό προσδιορισμό σε όλους τους όρους (π.χ. S_r - S , w - s , e - s , e - w κλπ.), (Dineen, 1997).
- Από τις δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρας που εκτελέστηκαν στην μπεντονιτική άργιλο Άρμου για τα δείγματα με τις διάφορες τιμές μύζησης, παρατηρήθηκε η εξέλιξη της διατμητικής αντοχής. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση της μύζησης και επομένως τη μείωση του ποσοστού υγρασίας και του βαθμού κορεσμού του υλικού αυξάνεται η διατμητική αντοχή όπως επίσης και η εφελκυστική αντοχή. Παρατηρήθηκε ακόμη ότι η διατμητική αντοχή αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από την εφελκυστική αντοχή σε σχέση με τη μύζηση του υλικού. Σε ό,τι αφορά τα δοκίμια που ξηράνθηκαν στην ατμόσφαιρα, αυτά απέκτησαν πολύ μεγαλύτερες τιμές μύζησης από αυτά που μορφώθηκαν στον θάλαμο μύζησης.
- Κατά την εκτέλεση των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα παρατηρήθηκε ότι τα δείγματα με υψηλές τιμές μύζησης ήταν αρκετά ψαθυρά, ενώ τα δείγματα με χαμηλές τιμές μύζησης ήταν όλκιμα. Επομένως με την αύξηση της μύζησης προκαλείται έντονη αύξηση της ψαθυρότητας του εδαφικού σχηματισμού και ταυτόχρονα μείωση της ολκιμότητάς του.

- Από τον συνδυασμό των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρας, διερευνήθηκε η εξέλιξη της συνοχής με την αύξηση της μύζησης. Συγκεκριμένα, η εκτίμηση της εξέλιξης συνοχής έγινε με την χρήση των κύκλων Mohr που αντιστοιχούν σε αυτές τις δοκιμές. Από αυτή τη διαδικασία και από τα σχετικά σχήματα εκτιμήθηκε ότι με την αύξηση της τιμής της μύζησης του υλικού αυξάνεται και η τιμή της συνοχής του υλικού.
- Από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εδάφους – νερού η αύξηση της μύζησης προκαλεί μείωση του λόγου κενών, του ποσοστού υγρασίας και του βαθμού κορεσμού και αύξηση του ξηρού φαινόμενου βάρους.
- Από τη δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης μπορεί να υπολογιστεί η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής εφόσον το εδαφικό υλικό έχει μηδενική συνοχή. Στην περίπτωση της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου, πρόκειται για εδαφικό υλικό που έχει αστοχήσει αφού έχει εκδηλωθεί κατολίσθηση και επομένως η συνοχή του υλικού είναι μηδενική κατά μήκος της επιφάνειας ολίσθησης. Επομένως είναι εφικτός ο προσδιορισμός της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής και τα σχετικά διαγράμματα υπολογίστηκε η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής ίση με 7.3° , σε πλήρη κορεσμό, και 37.6° σε κατάσταση μερικού κορεσμού. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η παραμένουσα διατμητική αντοχή των εδαφικών υλικών επηρεάζεται από τον βαθμό κορεσμού του υλικού και η μείωσή του συνεπάγεται την αύξηση της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής.

6.3 Παραμετρική διερεύνηση της επιρροής του πλήρους και μερικού κορεσμού στην ευστάθεια πρανών

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας εδαφικών πρανών της κατολίσθησης της Άρμου σύμφωνα με δύο μεθόδους οι οποίες βασίζονται στη μέθοδο λωρίδων, την απλοποιημένη μέθοδο Bishop και την απλοποιημένη μέθοδο Janbu. Σε αρχικό στάδιο, οι αναλύσεις ευστάθειας πραγματοποιήθηκαν σε πλήρως κορεσμένο έδαφος, ενώ σε επόμενο στάδιο εισήχθησαν αρνητικές πιέσεις πόρων και τιμές μύζησης στην παραμετρική διερεύνηση. Το γεωμετρικό προσομοίωμα που

χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις ευσταθείας είναι κεντροβαρική διατομή και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραμετρική διερεύνηση παρουσιάζονται παρακάτω.

- Σε πρώτο στάδιο συμπεραίνεται ότι η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής επηρεάζεται από το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα όσο η επιφάνεια ολίσθησης βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Αντίθετα για βάθη υδροφόρου ορίζοντα όπου η επιφάνεια ολίσθησης εκτείνεται πάνω από τον υδροφόρο, σταθεροποιείται η τιμή της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής και επομένως η τιμή της δεν επηρεάζεται. Στην παρούσα διπλωματική παρατηρήθηκε ότι η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής μειώνεται με την αύξηση του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα μέχρι το βάθος των 30m και σταθεροποιείται η τιμή της για μεγαλύτερα βάθη.
- Σε ό,τι αφορά το βάθος της επιφάνειας ολίσθησης αυξάνεται με την αύξηση του βάθους του υδροφόρου ορίζοντα μέχρι το βάθος των 30m. Παράλληλα παρατηρήθηκε ότι το βάθος της επιφάνειας ολίσθησης για πλήρως κορεσμένο έδαφος και πλήρως ξηρό έδαφος είναι παρόμοιο και αποκτά τη μικρότερη τιμή του.
- Παρατηρήθηκε επίσης ότι η ύπαρξης ρωγμής στο φρύδι της κατολίσθησης και το βάθος αυτής σε ένα πλήρως κορεσμένο πρανές επηρεάζει τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής. Ειδικότερα, παρατηρήθηκε ότι όσο μεγαλώνει το βάθος της πληρωμένης με νερό ρωγμής, μειώνεται η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής που προκύπτει από τις αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας κατά τη μέθοδο Janbu, ενώ αντίθετα αυξάνεται το βάθος της επιφάνειας που ολισθαίνει.
- Το βάθος της στάθμης του νερού που υπάρχει εντός μιας ρωγμής στο φρύδι της κατολίσθησης μπορεί να επιδεινώσει την ευστάθεια του πρανούς. Από τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική συμπεράθηκε ότι όσο περισσότερη ποσότητα νερού υπάρχει εντός της ρωγμής, παρατηρείται μικρή μείωση του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης και παράλληλα ελάχιστη αύξηση της γωνίας παραμένουσας διατμητικής αντοχής.
- Παρατηρήθηκε διαφορά στις τιμές παραμένουσας διατμητικής αντοχής που προέκυψαν από τις αναλύσεις ευστάθειας και από την τιμή της παραμένουσας

διατμητικής αντοχής που μετρήθηκε στο εργαστήριο συνθήκες πλήρους κορεσμού. Συγκεκριμένα η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής από την εργαστηριακή διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο είχε μικρότερη τιμή από αυτήν που υπολογίστηκε στις διάφορες αναλύσεις ευστάθειας που πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα Slide2. Η εμπειρία έχει δείξει ότι γενικά η γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής που μετριέται στο εργαστήριο, είναι πιο μικρή από τη γωνία παραμένουσας διατμητικής αντοχής που προκύπτει από τις αντίστροφες αναλύσεις ευστάθειας (Μπαρδάνης, 2019β, Καβουνίδης, 2020, Brandl, 1996).

- Από την παραμετρική διερεύνηση με τη εισαγωγή τιμών μύζησης, προέκυψε ότι η παρουσία της μύζησης αυξάνει κατά μεγάλο βαθμό τον συντελεστή ασφαλείας, ενώ παράλληλα ο τελευταίος αυξάνεται τόσο περισσότερο όσο μεγαλώνει η πίεση διείδυσης αέρα της μπεντονιτικής αργίλου Άρμου.

6.4 Σύνοψη

Με βάση όσα προαναφέρθηκαν, η παραδοχή των μη κορεσμένων εδαφών ως πλήρως κορεσμένα δεν οδηγεί στην ορθή μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς τους, αλλά αντιθέτως δημιουργεί οικονομικές επιπτώσεις και υπό περιπτώσεις προβλήματα σχετικά με την ασφάλεια. Αντιθέτως καθίσταται σημαντική η ανάγκη μελέτης των μη κορεσμένων εδαφών ως προς τη μηχανική τους συμπεριφορά και ειδικά την επιτόπου μέτρηση και παρακολούθηση της μύζησης τους. Ωστόσο για την αξιοπιστία της επιρροής της μύζησης στη διατμητική αντοχή του εδάφους είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση συστηματικών και μακροχρόνιων μετρήσεων της μύζησης και της συσχέτισης αυτής με την χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού και τα μετεωρολογικά φαινόμενα της υπό μελέτης περιοχής.

Από την εργαστηριακή διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα σε ό,τι αφορά την επιρροή της μύζησης στη μηχανική συμπεριφορά του υλικού. Βάσει αυτού, θα ήταν αρκετά σημαντική η διερεύνηση της συμπεριφοράς και άλλων εδαφικών υλικών, διαφορετικών φυσικών χαρακτηριστικών μεταξύ τους, υπό συνθήκες μερικού κορεσμού και καταγραφή

των σχετικών τιμών παραμέτρων στη βιβλιογραφία. Τέλος, θα ήταν ενδιαφέρουσα η συσχέτιση των τιμών παραμέτρων που προέκυψαν από τη μέθοδο συνδυασμού των κύκλων Mohr της ανεμπόδιστης θλίψης και θλίψης κατά γενέτειρα με τις τιμές που προκύπτουν από τις δοκιμές άμεσης διάτμησης και τριαξονικής θλίψης με ελεγχόμενη μύζηση.

Τέλος, σε ό,τι αφορά την παραμετρική διερεύνηση, είναι σκόπιμο, στο πλαίσιο μελλοντικών εργασιών, να διερευνηθούν αναλύσεις ευστάθειας πρανούς με την εισαγωγή αρνητικών πιέσεων πόρων και τιμών μύζησης σε πλήθος εδαφικών υλικών.

Βιβλιογραφία

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

Bardanis, M., 2022, *Examples of mechanical properties and slope stabilities in expansive soils in Cyprus*, an online lecture delivered at the University of Cyprus, Nicosia, 11th of July 2022.

Bardanis, M., Loukidis, D., 2020, Long-term suction measurements in Greece & Cyprus. A continuous update, Proc. 4th Eur. Conf. on Unsaturated Soils, Lisbon, Portugal, 19-21 October, 2020.

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.

Brandl, H., 1996, Stabilization of multiple progressive slope failures, proc. 7th Int. Symp. On Landslides, Trondheim, Norway, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 1661-1666.

Dineen, K., 1997, The influence of soil suction on compressibility and swelling, PhD Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London.

Escario, V., Sáez, J., 1986, *The shear strength of partly saturated soils*, *Géotechnique*, Vol. 36, 3, pp. 453-456.

Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., Widger, R. A., 1978, The shear strength of unsaturated soils, *Can. Geot. J.*, Vol. 15, pp. 313-321.

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., 1993, Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons, New York, N.Y., p. 517.

<https://besafenet.net/el/hazards/landslides/>

Janbu, N. (1973). Slope stability computations, Embankment-Dam Engineering—Casagrande Volume, Wiley, New York, pp. 47–86.

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.

MailOnline, 20/5/2019, *British couple is suing the Cypriot government after their two-year-old villa was wrecked by landslides.*

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

Καβουνίδης, Σ, *Κατολισθήσεις στη Ελλάδα, Εδαφομηχανική στην πράξη*, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2020, σελ. 110.

Κοκοβιάδης, Δ, 2022, *Πρόσθετη αντοχή εδαφικών υλικών λόγω μερικού κορεσμού: Εργαστηριακή διερεύνηση και επιρροή στην ευστάθεια πρανών*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κούκης, Γ. Χ. - Σαμπατάκης, Ν. Σ., *Τεχνική Γεωλογία*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2^η Έκδοση, Αθήνα 2019.

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

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

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

Παπαχαρίσης, Ν., Γραμματικόπουλος, Ι., Μάνου-Ανδρεάδη, Ν., 2015, *Γεωτεχνική Μηχανική*, Β' Έκδοση, Εκδόσεις Κυριακίδη.

Τσιαμπούση Αικ., 2019, *Η χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού και η σημασία της*, Πρακτικά 8ου Πανελληνίου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, Αθήνα, 6-8 Νοεμβρίου 2019, σελ. 43-66.

Τσότσος, Σ., 1991, *Εδαφομηχανική Θεωρία Μέθοδοι Εφαρμογές*, Εκδόσεις Φ. Βερβερίδης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Χατζηγώγος, Ν. Θ., 2019, *Διερεύνηση της Διατμητικής Αντοχής Γεωυλικών σε Ακόρεστες Συνθήκες*, Πρακτικά Εσπερίδας Μη Κορεσμένων Εδαφών, ΕΕΕΕΓΜ, σελ. 67-81.

Χρηστάρας, Β., 2015, *Σημειώσεις: Συνοπτική περιγραφή των συνηθέστερων εργαστηριακών δοκιμών Βραχομηχανικής – Εδαφομηχανικής*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.