



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΒΑΙΟΣ Χ. ΒΛΑΧΟΣ
Πτυχιούχος Πολιτικός Μηχανικός Τ.Ε.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2015

ΒΑΙΟΣ Χ. ΒΛΑΧΟΣ

Πτυχιούχος Πολιτικός Μηχανικός Τ.Ε.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ
ΕΔΑΦΩΝ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού
Προγράμματος Σπουδών "Τεχνική Γεωλογία και Υδρογεωλογία"

Τομέας Γεωλογίας

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 13/11/2015

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Καθηγητής Χρηστάρας Βασίλειος, Επιβλέπων

Καθηγητής Χατζηγώγος Θεόδωρος, Μέλος

Επίκουρος Καθηγητής Μαρίνος Βασίλειος, Μέλος

© Βάιος Χ. Βλάχος, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All right reserved.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην επιτυχή εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Βασίλειο Χρηστάρα για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής και τους κυρίους Βασίλειο Μαρίνο και Θεόδωρο Χατζηγώγο για την ευκαιρία που μου έδωσαν να την εκπονήσω στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης.

Στη συνέχεια, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον διδάκτορα και επιστημονικό συνεργάτη του πανεπιστημίου κ. Νικόλαο Χατζηγώγο για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε και την πολύτιμη βοήθεια του κατά την εκπόνηση της, καθώς ήταν πάντα διαθέσιμος να ασχοληθεί με κάθε απορία μου. Τον ευχαριστώ θερμά για τις ιδέες που μου πρόσφερε για την εργασία και για όλες τις ερευνητικές συζητήσεις που κάναμε.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να δώσω το μεγαλύτερο ευχαριστήσω στους γονείς μου και την οικογένεια μου για την αδιάκοπτη στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια και τους αφιερώνω την παρούσα εργασία.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	I
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	II
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	IV
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	VII
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	IX
ABSTRACT.....	X
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	1
1.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	5
2.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ	5
2.1.1 Γεωλογία Της Ευρύτερης Περιοχής	6
2.1.2 Υδρογεωλογικές Συνθήκες.....	8
2.2 ΕΔΑΦΙΚΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	9
2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ.....	21
3.1 ΟΙ ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΚΟΡΕΣΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	21
3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΑΚΟΡΕΣΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ	22
3.3 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	24
3.4 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΚΟΡΕΣΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ.....	27
3.5 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ	31
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	31
4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ.....	37
5.1 ΑΝΑΓΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ	37
5.2 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ	38
5.3 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ	39
5.3.1 Άμεση Διάτμηση Σε Κορεσμό.....	43
5.3.2 Άμεση Διάτμηση Με Έλεγχο πίεσης Αέρα και Νερού των Πόρων.....	43

5.3.3 Προσομοίωση Κύκλων Ξήρανσης - Ύγρυνσης του Εδάφους	43
5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ.....	45
6.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	47
6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	52
6.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΝ ΞΗΡΑΝΣΗΣ-ΥΓΡΑΝΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ (ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΥΖΗΣΗΣ)	67
7.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	67
7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	71
7.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	81
8.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ	82
8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	82
8.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	96
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	101
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	103

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Άποψη του Τεμένους Βαγιαζήτ από Βορειοδυτικά (Google Earth, 2015)	5
Εικόνα 2. Κάτοψη Τεμένους με επισήμανση των θέσεων έρευνας (τροποποιημένη από Χατζηγώγο, 2015 ως προς τα χρώματα και το υπόμνημα).	6
Εικόνα 3. Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδας (τροποποιημένη από Μπορνόβα - Ροντογιάννη, 1983) σε κλίμακα 1 : 500.000. Περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής με κόκκινο χρώμα.	7
Εικόνα 4. Εδαφικό προφίλ γεώτρησης Γ-1 (Χατζηγώγος, 2015), με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.	10
Εικόνα 5. Εδαφικό προφίλ γεώτρησης Γ-2 (Χατζηγώγος, 2015), με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.	11
Εικόνα 6. Εδαφικό προφίλ γεώτρησης Γ-3 (Χατζηγώγος, 2015), με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.	12
Εικόνα 7. Εδαφικό προφίλ γεώτρησης Γ-4 (Χατζηγώγος, 2015), με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.	13
Εικόνα 8. Εδαφικό προφίλ γεώτρησης Γ-5 (Χατζηγώγος, 2015), με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.	14
Εικόνα 9. Κάτοψη Τεμένους με επισήμανση των γεωλογικών τομών που δημιουργήθηκαν (τροποποιημένη από Χατζηγώγο, 2015 ως προς τις θέσεις των τομών, τα χρώματα και το υπόμνημα).	15
Εικόνα 10. Χαρακτηριστική τομή γεωτρήσεων Γ5 - Γ3 διεύθυνσης ΝΑ - ΒΔ (Χατζηγώγος, 2015) , με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.	16
Εικόνα 11. Χαρακτηριστική τομή γεωτρήσεων Γ4 - Γ1 διεύθυνσης ΝΑ - ΒΔ (Χατζηγώγος, 2015) , με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.	17
Εικόνα 12. Διαφορές φάσεων μεταξύ κορεσμένου και ακόρεστου εδάφους. (α) Διάγραμμα συστήματος κορεσμένου εδάφους δύο φάσεων, (β) Απλοποιημένο διάγραμμα τριών φάσεων ακόρεστου εδάφους, (γ) Διάγραμμα συστήματος ακόρεστου εδάφους τεσσάρων φάσεων (τροποποιημένη από Χατζηγώγο, 2015 ως προς τα χρώματα, το υπόμνημα και την προσθήκη του α σχήματος).	22
Εικόνα 13. Στοιχείο ακόρεστου εδάφους με εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα (τροποποιημένη από Χατζηγώγο, 2015 ως προς τα χρώματα και το υπόμνημα).	22
Εικόνα 14. Φαινόμενο επιφανειακής έλξης στη διεπαφή αέρα-νερού. (α) Ενδομοριακές δυνάμεις στη συσταλτική στοιβάδα και στο νερό, (β) Πιέσεις και επιφανειακή έλξη σε καμπυλωμένη δισδιάστατη μεμβράνη (τροποποιημένη από Χατζηγώγο, 2015 ως προς τη διάταξη των σχημάτων).	24
Εικόνα 15. Περιγραφή της εντατικής κατάστασης στοιχείου μοναδιαίου όγκου ενός ακόρεστου εδάφους σε ένα σημείο (Fredlund & Morgenstern, 1977).	28
Εικόνα 16. Καταστατικές επιφάνειες του δείκτη κενών και της περιεχόμενης υγρασίας ακόρεστου εδάφους (κατά Fredlund & Rahardjo, 1993, εικόνα από Χατζηγώγο, 2015).	32
Εικόνα 17. Καταστατικές επιφάνειες μεταβολής όγκου σε συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης για ακόρεστο έδαφος σταθερής δομής (κατά Fredlund & Rahardjo, 1993, εικόνα από Χατζηγώγο, 2015).	33
Εικόνα 18. Καταστατικές επιφάνειες μεταβολής όγκου σε συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης για ακόρεστο έδαφος μετά-σταθερής δομής (κατά Fredlund & Rahardjo, 1993, εικόνα από Χατζηγώγο, 2015).	33
Εικόνα 19. Τυπικές Χαρακτηριστικές Καμπύλες Μύζησης Εδάφους (κατά Fredlund & Rahardjo, 1993, εικόνα από Χατζηγώγο, 2015).	34

Εικόνα 20. Διάταξη συσκευής άμεσης διάτμησης κλειστού τύπου με δυνατότητα ελέγχου των πιέσεων των πόρων (τροποποιημένη από GDS Specification Datasheet, 2009 ως προς τα χρώματα και το υπόμνημα).	39
Εικόνα 21. (α) Ηλεκτρονικός ελεγκτής υψηλής ακρίβειας νερού "Standard Pressure/Volume Controller (STDDPC) v2", (β) Πνευματικός ελεγκτής υψηλής ακρίβειας αέρα "Pneumatic Pressure Controller (GDSPPC)".	40
Εικόνα 22. Ηλεκτρονικός μετατροπέας υψηλής ακρίβειας (transducer) για τον έλεγχο των μετρήσεων μέσα στο θάλαμο.	41
Εικόνα 23. Συνολική πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και αποτελείται από: (α)Συσκευή διάτμησης, (β)Ελεγκτή πιέσεων νερού, (γ)Ελεγκτή πιέσεων αέρα, (δ)Κονσόλα δεδομένων οχτώ (8) καναλιών, (ε)Γεννήτρια συμπίεσης αέρα και (στ)Ηλεκτρονικό υπολογιστή.	42
Εικόνα 24. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κοκκομετρικών καμπυλών για τα δείγματα του έκτου (6 ^{ου}) κεφαλαίου, (δεδομένα από Πίνακες 43, 44, 46 και 47, Παράρτημα).	46
Εικόνα 25. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ2 (6,60-7,00) στα 120 kPa.	53
Εικόνα 26. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ2 (6,60-7,00) στα 120 kPa.	53
Εικόνα 27. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ2 (6,60-7,00) στα 240 kPa.	55
Εικόνα 28. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ2 (6,60-7,00) στα 240 kPa.	55
Εικόνα 29. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ2 (6,60-7,00) στα 360 kPa.	57
Εικόνα 30. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ2 (6,60-7,00) στα 360 kPa.	57
Εικόνα 31. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τα δείγματα της γεώτρησης Γ2 (6,60-7,00).	59
Εικόνα 32. Συγκεντρωτικό διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τα δείγματα της γεώτρησης Γ2 (6,60-7,00).	59
Εικόνα 33. Αποτελέσματα των δοκιμών διάτμησης σε κορεσμό στα δείγματα της γεώτρησης Γ2 (6,60-7,00).	60
Εικόνα 34. Επίδραση της ύπαρξης δεσμών στον υπολογισμό της συνοχής από μία περιβάλλουσα αστοχίας σε συνθήκες αποστράγγισης (Vargas, 1974), (από Χατζηγώγο, 2015).	61
Εικόνα 35. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 200 kPa.	63
Εικόνα 36. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 200 kPa.	63
Εικόνα 37. Παράδειγμα εξισορρόπησης της πίεσης των πόρων (αέρα - νερού) κατά την κατασκευή της ΧΚΜΕ για τα στάδια της ξήρανσης.	71
Εικόνα 38. Παράδειγμα εξισορρόπησης της πίεσης των πόρων (αέρα - νερού) κατά την κατασκευή της ΧΚΜΕ για τα στάδια της ύγρανσης (συμπεριφορά αποβολής νερού από το δείγμα).	72
Εικόνα 39. Παράδειγμα εξισορρόπησης της πίεσης των πόρων (αέρα - νερού) κατά την κατασκευή της ΧΚΜΕ για τα στάδια της ύγρανσης (συμπεριφορά εισόδου νερού στο δείγμα).	73
Εικόνα 40. Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης του στρώματος S1 σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία για πλήρη κύκλο ξήρανσης - ύγρανσης.	75

Εικόνα 41. Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης του στρώματος S1 σε σχέση με τον βαθμό κορεσμού για πλήρη κύκλο ξήρανσης - ύγρυνσης.	75
Εικόνα 42. Διάγραμμα λόγου κενών και μύζησης.	76
Εικόνα 43. Διάγραμμα λόγου κενών και περιεχόμενης υγρασίας.	76
Εικόνα 44. Διάγραμμα λόγου κενών και βαθμού κορεσμού.	76
Εικόνα 45. Αξονική μετατόπιση κατά τη διαδικασία κατασκευής της ΧΚΜΕ.	77
Εικόνα 46. Ανάλυση της ΧΚΜΕ ως προς την τιμή εισόδου του αέρα, τη μεταβατική ζώνη και την παραμένουσα ζώνη.	78
Εικόνα 47. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 106 kPa.	84
Εικόνα 48. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 106 kPa.	84
Εικόνα 49. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 212 kPa.	86
Εικόνα 50. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 212 kPa.	86
Εικόνα 51. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 300 kPa.	88
Εικόνα 52. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 300 kPa.	88
Εικόνα 53. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τα δείγματα της γεώτρησης Γ5 (10,50 - 10,90).	90
Εικόνα 54. Συγκεντρωτικό διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τα δείγματα της γεώτρησης Γ5 (10,50 - 10,90).	90
Εικόνα 55. Αποτελέσματα των δοκιμών διάτμησης σε φυσική υγρασία στα δείγματα της γεώτρησης Γ5 (10,50 - 10,90)).	91
Εικόνα 56. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για δείγματα με διαφορετική τιμή μύζησης.	92
Εικόνα 57. Συνδυαστικό διάγραμμα μηχανικών παραμέτρων για τις περιπτώσεις κορεσμού και φυσικής υγρασίας στα δείγματα.	93

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Στοιχεία γεωτεχνικής έρευνας (Χατζηγώγος, 2015).	9
Πίνακας 2. Πλήθος δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της διατριβής.	18
Πίνακας 3. Πλήθος δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν κατά τη γεωτεχνική αξιολόγηση.	19
Πίνακας 4. Πλήθος δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής.	19
Πίνακας 5. Σημαντικές αναφορές του 20 ^{ου} αιώνα για τη θεωρία της εδαφικής μύζησης.	25
Πίνακας 6. Έρευνες προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής ακόρεστων εδαφών.	29
Πίνακας 7. Περιορισμοί και προδιαγραφές που ακολουθήθηκαν κατά την εκπόνηση των δοκιμών.	38
Πίνακας 8. Πλήθος και χαρακτηριστικά δειγμάτων 6 ^{ου} κεφαλαίου.	45
Πίνακας 9. Φυσικές ιδιότητες δειγμάτων κατά τη δειγματοληψία των γεωτρήσεων.	46
Πίνακας 10. Παράδειγμα καταχώρησης δεδομένων κατά τη διαδικασία του κορεσμού, το σύνολο των καταχωρήσεων συνοδεύει τη διατριβή σε ηλεκτρονική μορφή (βλ. cd-rom).	49
Πίνακας 11. Παράδειγμα καταχώρησης δεδομένων κατά τη διαδικασία της στερεοποίησης, το σύνολο των καταχωρήσεων συνοδεύει τη διατριβή σε ηλεκτρονική μορφή (βλ. cd-rom).	50
Πίνακας 12. Παράδειγμα καταχώρησης δεδομένων κατά τη διαδικασία της διάτμησης, το σύνολο των καταχωρήσεων συνοδεύει τη διατριβή σε ηλεκτρονική μορφή (βλ. cd-rom).	51
Πίνακας 13. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ2 (6,60-7,00) στα 120 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 42, Παράρτημα.	52
Πίνακας 14. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ2 (6,60-7,00) στα 120 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 42, Παράρτημα.	52
Πίνακας 15. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ2 (6,60-7,00) στα 240 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 42, Παράρτημα.	54
Πίνακας 16. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ2 (6,60-7,00) στα 240 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 42, Παράρτημα.	54
Πίνακας 17. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ2 (6,60-7,00) στα 360 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 42, Παράρτημα.	56
Πίνακας 18. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ2 (6,60-7,00) στα 360 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 42, Παράρτημα.	56
Πίνακας 19. Υπολογισμός μηχανικών παραμέτρων για τα δείγματα της γεώτρησης Γ2 (6,60m - 7,00m) με βάση τις δοκιμές διάτμησης.	60
Πίνακας 20. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 200 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.	62
Πίνακας 21. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 200 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.	62
Πίνακας 22. Συνολικός όγκος δεδομένων για το στάδιο του κορεσμού στο 6 ^ο κεφάλαιο.	64
Πίνακας 23. Συνολικός όγκος δεδομένων για το στάδιο της στερεοποίησης στο 6 ^ο κεφάλαιο.	64
Πίνακας 24. Συνολικός όγκος δεδομένων για το στάδιο της διάτμησης στο 6 ^ο κεφάλαιο.	65
Πίνακας 25. Στάδια δημιουργίας της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης του στρώματος S1.	69
Πίνακας 26. Παράδειγμα καταχώρησης δεδομένων κατά τη διαδικασία της εξισορρόπησης του νερού και του αέρα των πόρων, κατά τη δημιουργία της ΧΚΜΕ. Το σύνολο των καταχωρήσεων συνοδεύει τη διατριβή σε ηλεκτρονική μορφή (βλ. cd-rom).	70
Πίνακας 27. Συνολικά στοιχεία κάθε σταδίου για την κατασκευή της ΧΚΜΕ.	74
Πίνακας 28. Πλήθος και χαρακτηριστικά δειγμάτων 8 ^{ου} κεφαλαίου.	82
Πίνακας 29. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 106 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.	83

Πίνακας 30. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 106 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.	83
Πίνακας 31. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 212 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.	85
Πίνακας 32. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 212 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.	85
Πίνακας 33. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 300 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.	87
Πίνακας 34. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 300 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.	87
Πίνακας 35. Υπολογισμός μηχανικών παραμέτρων για τα δείγματα της γεώτρησης Γ5 (10,50 - 10,90) με βάση τις δοκιμές διάτμησης.	91
Πίνακας 36. Υπολογισμός γωνίας τριβής ϕ^b με βάση τις εργαστηριακές δοκιμές.	92
Πίνακας 37. Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού χαρακτηριστικών του εδάφους από τη δοκιμή SPT.	94
Πίνακας 38. Συνοπτικά αποτελέσματα γεωτεχνικής έρευνας στην περιοχή θεμελίωσης του Τεμένους Βαγιαζίτ με βάση τη δοκιμή SPT (Χατζηγώγος, 2015).	94
Πίνακας 39. Συγκριτικά αποτελέσματα μηχανικών παραμέτρων για το στρώμα S1.	94
Πίνακας 40. Συνολικός όγκος δεδομένων για το στάδιο της στερεοποίησης στο 8 ^ο κεφάλαιο.	95
Πίνακας 41. Συνολικός όγκος δεδομένων για το στάδιο της διάτμησης στο 8 ^ο κεφάλαιο.	95
Πίνακας 42. Προσδιορισμός αρχικής υγρασίας και φαινόμενου βάρους Γ2 (6,60m - 7,00m).	103
Πίνακας 43. Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα Γ2 (6,60m - 7,00m).	103
Πίνακας 44. Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο Γ2 (6,60m - 7,00m).	104
Πίνακας 45. Προσδιορισμός αρχικής υγρασίας και φαινόμενου βάρους Γ5 (10,50m - 10,90m).	104
Πίνακας 46. Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα Γ5 (10,50m - 10,90m).	105
Πίνακας 47. Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο Γ5 (10,50m - 10,90m).	106

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο γεωτεχνικός σχεδιασμός των τεχνικών έργων βασίζεται στη γενική παραδοχή της κλασσικής εδαφομηχανικής με βάση την οποία τα εδάφη θεωρούνται κορεσμένα και η μηχανική τους συμπεριφορά καθορίζεται από την ενεργό τάση. Παρά το γεγονός πως η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι συντηρητική ως προς τον σχεδιασμό, παρατηρούμενες αστοχίες τεχνικών έργων τα τελευταία χρόνια έχουν οδηγήσει την επιστημονική έρευνα σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά εδαφών να επικεντρώνεται στη συμπεριφορά των γεωυλικών σε ακόρεστες συνθήκες, στους μηχανισμούς απομειώσης της αντοχής αυτών και της αυξημένης διάβρωσης τους που ενεργοποιούνται από διαδοχικές μεταβολές της υγρασίας τους, ειδικά στις εύκρατες ζώνες με διακριτές υγρές και ξηρές περιόδους.

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής εδαφών σε ακόρεστες συνθήκες απαιτεί τη δυνατότητα ελέγχου το βαθμού κορεσμού και την θεώρηση των μεταβολών του ως μεταβολές της εντατικής κατάστασης. Η παρούσα διπλωματική εργασία ερευνά τα χαρακτηριστικά αντοχής σε κορεσμένες και ακόρεστες συνθήκες μη συνεκτικών εδαφών με τη χρήση μιας προηγμένης, πλήρως αυτοματοποιημένης συσκευής άμεσης διάτμησης με δυνατότητα ελέγχου της μύζησης.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής έγιναν κάτω από σταθερό αξονικό φορτίο και ρυθμό διάτμησης για κορεσμένες και ακόρεστες συνθήκες. Οι ακόρεστες συνθήκες προσομοιάστηκαν μέσω της εφαρμογής σταθερών τιμών πιέσεων αέρα και νερού στους πόρους ώστε να ελέγχεται η τιμή της μύζησης (διαφορά πίεσης πόρων αέρα και νερού) μέσα στο δείγμα. Επιπρόσθετα υπολογίστηκε η Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης για το γεωυλικό που εξετάστηκε και η μεταβολή του όγκου για έναν πλήρη κύκλο ξήρανσης-ύγρυνσης.

ABSTRACT

The geotechnical design of engineering structures is based on the principal assumption of the classical soil mechanics which soils are considered saturated and their mechanical behavior is determined by the effective stress. Despite the fact that this design approach is conservative, observed failures of engineering structures the last few years have led the scientific research to focus on the behavior of soils in unsaturated conditions, on the mechanisms of the *in situ* decrease of shear strength and the increase of erodability activated by successive changes of their moisture content, especially in arid areas with distinct wet and dry periods.

The laboratory determination of the soil shear strength in unsaturated conditions requires the ability to control the degree of saturation and the interpretation of these changes as changes in stress state via the measurement of matric suction. This master thesis attempts to investigate shear strength behavior in saturated and unsaturated conditions of non-cohesive soils using an advanced, fully automated direct shearbox with control of suction.

The experiments were performed under the same net normal stress for saturated and unsaturated conditions. The unsaturated conditions were simulated using the axis translation technique by applying constant pore-air and pore-water pressure in order to control the suction in the sample. Furthermore, we calculated the Soil - Water Characteristic Curve of the geo-material tested and the volumetric change for a complete drying - wetting circle.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Κατά την εκπόνηση οποιασδήποτε γεωτεχνικής μελέτης με βάση την υπάρχουσα νομοθεσία είναι απαραίτητο να υπάρχει διαχωρισμός των σχηματισμών (βραχωδών ή εδαφικών) ως προς τις φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες, τόσο ποιοτικός, όσο και ποσοτικός. Ιδιαίτερα ο ποσοτική περιγραφή ενός σχηματισμού σε μία τεχνικογεωλογική αξιολόγηση είναι σημαντική διότι καθορίζει τα όρια του υλικού και με ποιους τρόπους μπορούμε να παρέμβουμε σε αυτό (π.χ. μέθοδος εκσκαφής μετώπου σήραγγας, μέτρα αντιστήριξης πρανούς, διαστασιολόγηση θεμελίωσης, και άλλα). Ο ποσοτικός χαρακτηρισμός πραγματοποιείται με μία σειρά δοκιμών για τον προσδιορισμό φυσικών και μηχανικών παραμέτρων του σχηματισμού. Οι φυσικές παράμετροι που προσδιορίζονται είναι:

- η φυσική υγρασία του δείγματος,
- το υγρό φαινόμενο βάρος,
- το ξηρό φαινόμενο βάρος,
- η κοκκομετρική σύσταση,
- τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας (όρια Atterberg),
- η συμπίεστότητα.

Οι μηχανικές παράμετροι, ή μηχανικές σταθερές, μας δίνουν την αντοχή του υλικού σε θλίψη, εφελκυσμό, κάμψη και διάτμηση με τη μορφή των παραμέτρων συνοχής και γωνίας τριβής. Οι δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών παραμέτρων γίνονται μέσω:

- της τριαξονικής θλίψης και
- της άμεσης διάτμησης.

Η παρούσα διατριβή έχει ως αντικείμενο της την προσομοίωση των συνθηκών άμεσης διάτμησης υπό κορεσμένες και ακόρεστες συνθήκες. Οι περισσότερες δοκιμές άμεσης διάτμησης εδαφών πραγματοποιούνται σε δείγματα είτε κορεσμένα είτε με περιεχόμενη υγρασία τροποποιημένη από τη φυσική, λόγω της διατάραξης κατά τη δειγματοληψία, της μεταφοράς του στο εργαστήριο και σε αρκετές περιπτώσεις λόγω της παραμονής του δείγματος σε διαφορετικές συνθήκες μέχρι την εκτέλεση της δοκιμής. Τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων δοκιμών δεν συμβαδίζουν με τις πραγματικές παραμέτρους του εδάφους με αποτέλεσμα ο ποσοτικός χαρακτηρισμός των διαφόρων υλικών που χρησιμοποιείται στο

γεωτεχνικό σχεδιασμό ενός τεχνικού έργου να αποκλίνει από την πραγματικότητα. Σε θεωρητικό επίπεδο η κλασσική εδαφομηχανική προσδιορίζει τη διατμητική αντοχή με την παραδοχή ότι τα εδάφη είναι κορεσμένα, ενώ στην πραγματικότητα το πλέγμα τους μπορεί να είναι μερικώς κορεσμένο με νερό και μερικώς κορεσμένο με άλλα ρευστά (π.χ. αέρα).

Στα περισσότερα επιφανειακά έργα (π.χ. θεμελιώσεις, ανοιχτή οδοποιία) και στις περιπτώσεις όπου το τεχνικό μας έργο εδράζεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα τα εδάφη βρίσκονται σε ακόρεστες συνθήκες (ή μερικώς κορεσμένες). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι διαφορές των παραμέτρων σχεδιασμού, ιδιαίτερα όταν βρισκόμαστε σε οριακές καταστάσεις ισορροπίας, χρειάζονται ιδιαίτερη προσοχή.

Η ανάγκη για τη διερεύνηση των παραμέτρων σχεδιασμού σε ακόρεστες συνθήκες οδήγησε στην εκπόνηση της παρούσας διατριβής μέσω της διάτμησης δειγμάτων υπό τον έλεγχο του ποσοστού μύζησης αυτών.

1.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Κύριος στόχος της διατριβής αποτελεί η εγκατάσταση, η βαθμονόμηση και η εκτέλεση δοκιμών σε πειραματική διάταξη που επιτρέπει την εκτέλεση δοκιμής άμεσης διάτμησης με έλεγχο της μύζησης καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Η εγκατάσταση μιας τέτοιας διάταξης στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του ΑΠΘ στοχεύει στη διερεύνηση της διατμητικής αντοχής μη συνεκτικών εδαφών σε σχέση με τις μεταβολές της μύζησης καθώς και τον προσδιορισμό της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης Εδάφους. Η τεχνογνωσία σχετικά με την εκτέλεση δοκιμών σε ακόρεστες συνθήκες δίνει την προοπτική συνέχισης της έρευνας στο γνωστικό αντικείμενο της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών.

Στην παρούσα διατριβή εφαρμόζεται η παραπάνω τεχνογνωσία στην εργαστηριακή προσομοίωση της διατμητικής αντοχής δειγμάτων από αμμώδη εδάφη του νομού Έβρου, και πιο συγκεκριμένα της περιοχής του Τεμένους Βαγιαζήτ στην πόλη του Διδυμοτείχου, σε ακόρεστες και κορεσμένες συνθήκες. Υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά αντοχής (συνοχή και γωνία τριβής), η Χαρακτηριστική καμπύλη μύζησης και οι μεταβολές όγκου σε σχέση με μεταβολές του βαθμού κορεσμού. Οι δοκιμές διάτμησης πραγματοποιήθηκαν σε δείγματα της ίδιας ενότητας (ενότητα S1) της περιοχής όπως αυτή διαχωρίστηκε στρωματογραφικά (βλ. κεφάλαιο 2.2) και τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν μεμονωμένα, συγκεντρωτικά και συγκριτικά μεταξύ των διαφόρων δοκιμών. Η παραπάνω διαδικασία είχε σαν τελικό σκοπό τη

σύγκριση των παραμέτρων σχεδιασμού για το ίδιο υλικό σε κορεσμένες και ακόρεστες συνθήκες.

Όλες οι παραπάνω δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., το διάστημα 10 / 7 / 2015 με 10 / 11 / 2015 με βάση την προϋπάρχουσα τεχνογνωσία στην εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών σε ακόρεστες συνθήκες (Χατζηγώγος, 2015).

Η διατριβή χωρίζεται θεματικά σε δύο (2) κύριες ενότητες, οργανωμένες σε εννέα (9) κεφάλαια. Η πρώτη ενότητα αναφέρεται στην υφιστάμενη έρευνα των ακόρεστων εδαφών σε θεωρητικό επίπεδο, ενώ η δεύτερη ενότητα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εργαστηριακής προσομοίωσης διάτμησης εδαφικών δειγμάτων σε κορεσμένες και ακόρεστες συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα:

- Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης. Αναφέρονται τα γενικά γεωλογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία της ευρύτερης περιοχής, καθώς στη συνέχεια αναλύεται η γεωτεχνική αξιολόγηση που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή με τελικό στόχο τη διάκριση των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν και τους λόγους για τους οποίους επιλέχθηκαν τα συγκεκριμένα δείγματα.
- Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της εδαφομηχανικής των ακόρεστων εδαφών με εισαγωγικά στοιχεία για την ανάγκη διερεύνησης των ακόρεστων συνθηκών, την ανάλυση των φάσεων του ακόρεστου εδάφους σε σύγκριση με το κορεσμένο και των ιδιοτήτων τους, καθώς και μία γενική παρουσίαση της θεωρίας της μύζησης. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση των μεταβλητών εντατικής κατάστασης και της συμπεριφοράς των μεταβολών όγκου και διατμητικής αντοχής σε ακόρεστες συνθήκες.
- Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της χαρακτηριστικής καμπύλης μύζησης με τον ορισμό, τη χρησιμότητά της στην εδαφομηχανική των ακόρεστων εδαφών και τέλος τις πληροφορίες που προκύπτουν από την καμπύλη μύζησης.
- Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των δοκιμών με το θεωρητικό μέρος της ανάγκης προσομοίωσης διάτμησης ακόρεστων εδαφών και τις προδιαγραφές που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια αναλύονται οι περιπτώσεις προσομοίωσης που εκπονήθηκαν κατά τη διάρκεια της διατριβής και οι διαφορές αυτών.

- Στο 6^ο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά την εκπόνηση των δοκιμών σε κορεσμένες συνθήκες, τα δείγματα στα οποία έγιναν οι δοκιμές και τα αποτελέσματα των δοκιμών. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται πίνακες και διαγράμματα που προέκυψαν από τα δεδομένα των δοκιμών. Τέλος, σχολιάζονται τα διάφορα συμπεράσματα - προβληματισμοί που προκύπτουν.
- Στο 7^ο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάθε σταδίου ξεχωριστά, καθώς και η τελική καμπύλη συνοδευόμενη από τις απαραίτητες παρατηρήσεις-συμπεράσματα.
- Στο 8^ο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν κατά την εκπόνηση των δοκιμών σε ακόρεστες συνθήκες τόσο με τη μέθοδο διάτμησης στην φυσική υγρασία του, όσο και με τη μέθοδο ελέγχου του ποσοστού μύζησης. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και των δύο (2) δοκιμών. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται πίνακες και διαγράμματα που προέκυψαν από τα δεδομένα των δοκιμών. Τέλος, γίνεται η σύγκριση μεταξύ των δύο (2) μεθόδων, καθώς σχολιάζονται και τα διάφορα συμπεράσματα - προβληματισμοί που προκύπτουν.
- Τέλος στο 9^ο κεφάλαιο συνοψίζονται και αξιολογούνται συνολικά τα ξεχωριστά συμπεράσματα κάθε κεφαλαίου, ενώ παράλληλα γίνεται μία αποτίμηση της διατριβής και ποιές προοπτικές συνέχισης της έρευνας υπάρχουν στο αναφερόμενο γνωστικό αντικείμενο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ, ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

2.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

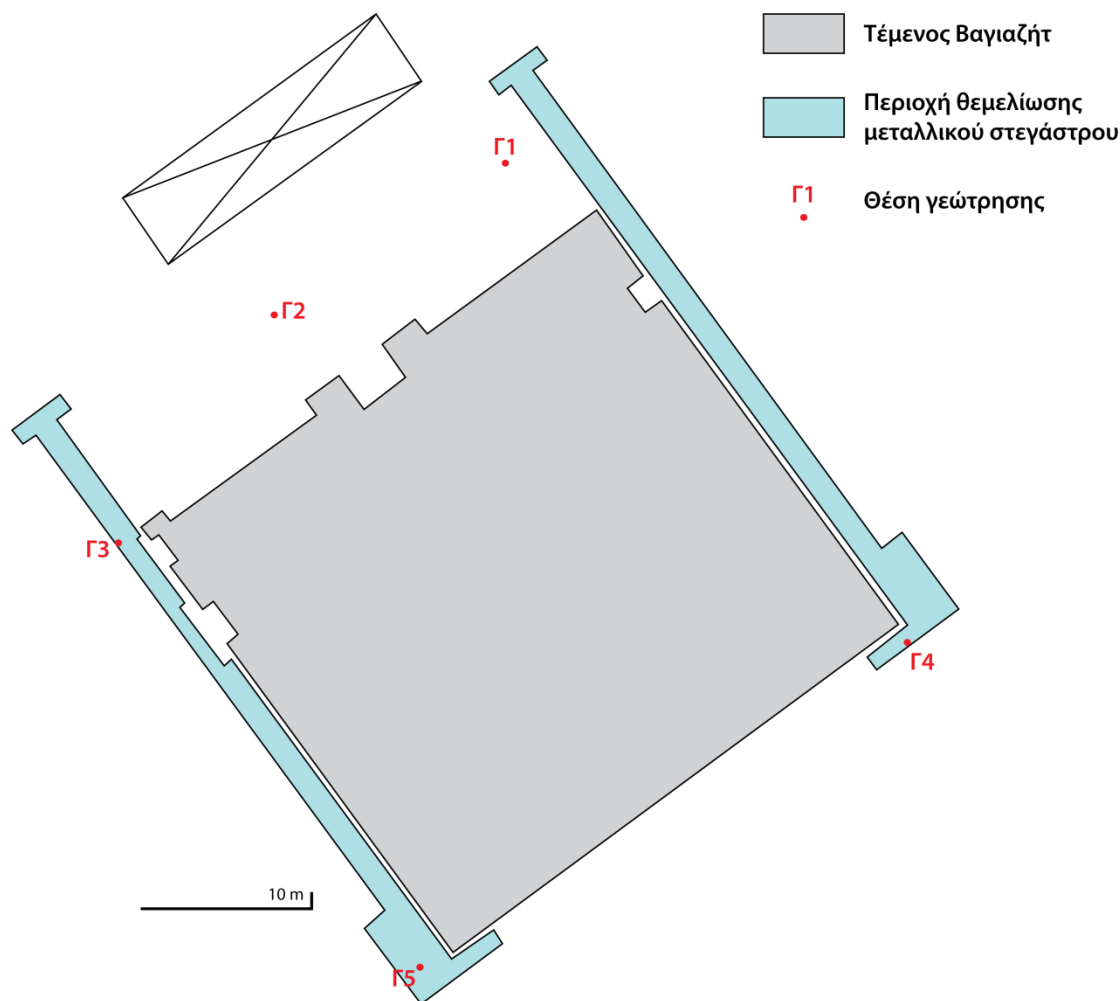
Για το πειραματικό σκέλος της διατριβής επιλέχθηκε να γίνουν δοκιμές άμεσης διάτμησης στις διάφορες συνθήκες που θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια, καθώς και δοκιμή για τον προσδιορισμό χαρακτηριστικής καμπύλης μύζησης συγκεκριμένου υλικού. Για την πραγματοποίηση των παραπάνω δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δείγματα από δειγματοληπτικές γεωτρήσεις στη περιοχή του Διδυμοτείχου στο νομό Έβρου κατά τη διεξαγωγή γεωτεχνικής έρευνας στην περιοχή θεμελίωσης του Τεμένους Βαγιαζήτ Διδυμοτείχου.

Πιο συγκεκριμένα η γεωτεχνική έρευνα - μελέτη εκπονήθηκε από το Δρ. Χατζηγώγο Νικόλαο, MSc Τεχνικό Γεωλόγο, από τον Ιούνιο έως τον Ιούλιο του 2015 στα πλαίσια του σχεδιασμού και της υλοποίησης των έργων της δομικής και μορφολογικής αποκατάστασης του μνημείου (Χατζηγώγος, προσωπ. επικοινωνία, 2015). Τα παρακάτω στοιχεία αναφορικά με την περιοχή μελέτης βασίζονται κατά μεγάλο βαθμό στην παραπάνω μελέτη, η οποία παραχωρήθηκε από τον μελετητή.



Εικόνα 1. Αποψη του Τεμένους Βαγιαζήτ από Βορειοδυτικά (Google Earth, 2015)

Στόχος της γεωτεχνικής έρευνας αποτέλεσε η διερεύνηση και ο προσδιορισμός των εδαφικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή θεμελίωσης του προς κατασκευή μεταλλικού στεγάστρου προστασίας που κρίθηκε αναγκαία η κατασκευή του, έπειτα από σημαντικές ζημιές που υπέστη η οροφή του (Εικόνα 1), περιοχή με μπλε χρώμα Νοτιοδυτικά και Βορειοανατολικά του Τεμένους). Με βάση τα παραπάνω εκτελέστηκαν πέντε δειγματοληπτικές γεωτρήσεις (Γ1 - Γ5) όπως φαίνονται στο τοπογραφικό σχέδιο στην εικόνα(2) και εγκαταστάθηκε πιεζόμετρο τύπου Standpipe σε μία εξ' αυτών (Γ5).

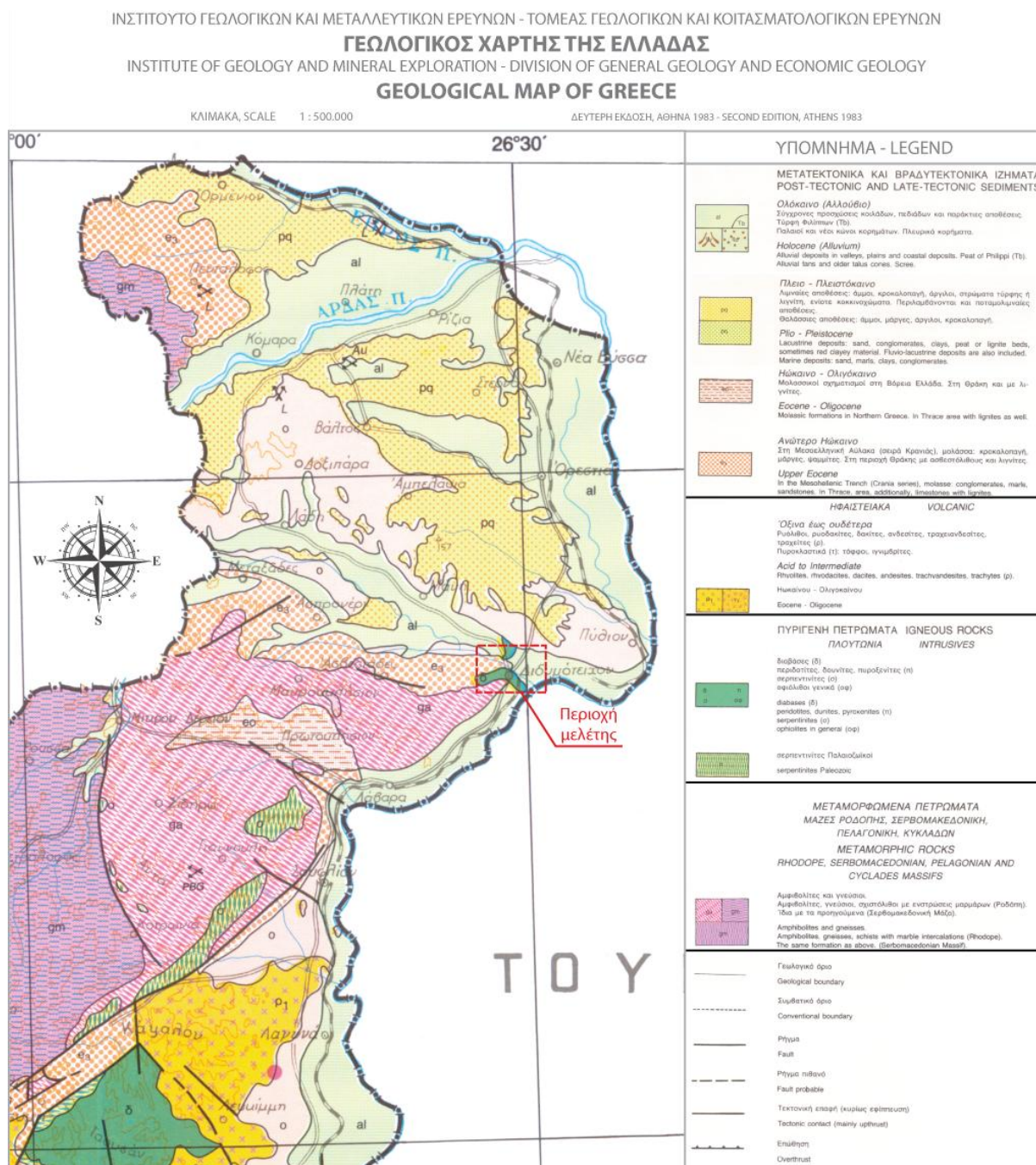


Εικόνα 2. Κάτοψη Τεμένους με επισήμανση των θέσεων έρευνας (τροποποιημένη από Χατζηγώγο, 2015 ως προς τα χρώματα και το υπόμνημα).

2.1.1 Γεωλογία Της Ευρύτερης Περιοχής

Σύμφωνα με το απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη της Ελλάδος (κλίμακα 1:500.000) το υπόβαθρο της ευρύτερης περιοχής αποτελείται από τα ιζήματα ηλικίας Παλαιογενούς που εντοπίζονται περιμετρικά της λεκάνης απορροής του Ερυθροποτάμου. Τα ιζήματα αυτά αποτελούνται από κροκαλοπαγή, αδρόκοκκους ψαμμίτες σε εναλλαγές με ενστρώσεις

αργίλων και μαργών. Ακολουθούν χαλαρά και μη συνεκτικά λατυποπαγή και στη συνέχεια ακολουθεί η ψαμμιτική σειρά. Μεγάλη έκταση καταλαμβάνουν οι αργιλομάργες, ψαμμιτομάργες, λεπτόκοκκοι ψαμμίτες και ασβεστολιθικοί ορίζοντες. Τα παραπάνω ιζήματα σχετίζονται με το λοφώδες - ημιλοφώδες μορφολογικό ανάγλυφο της περιοχής και εμφανίζονται συνεκτικά έως πολύ συνεκτικά με σαφή στρώση.



Εικόνα 3. Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη της Ελλάδας (τροποποιημένη από Μπορνόβα - Ροντογιάννη, 1983) σε κλίμακα 1 : 500.000. Περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής με κόκκινο χρώμα.

Η γενική εικόνα της περιοχής του τεμένους από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε μέσω των γεωτρήσεων έδειξε ότι:

- επιφανειακά συναντούμε τεχνητές επιχώσεις σε μέσο βάθος δύο (2) μέτρων,
- βαθύτερα, έως και τα τέσσερα (4) μέτρα περίπου, εντοπίζονται πρακτικά αδιαπέρατες αργιλώδεις ιλύες που πιθανός αποτελεί το μανδύα αποσάθρωσης των ιζημάτων του Παλαιογενούς που συναντούμε βαθύτερα,
- έως το βάθος των εννέα (9) μέτρων, ακολουθούν στρώματα με τη μορφή ψαμμιτικών και μαργαϊκών εναλλαγών και
- βαθύτερα, έως και το μέγιστο βάθος της έρευνας (περίπου εικοσιπέντε (25) μέτρα), συναντούμε έναν πολύ συνεκτικό λεπτοστρωματώδη ιλυόλιθο με συμπεριφορά βραχώδους σχηματισμού.

Η στρωματογραφία στην περιοχή είναι πρακτικά οριζόντια.

Η παρούσα διατρίβη παρουσιάζει νέες αναλύσεις εδαφικών δειγμάτων στη συγκεκριμένη περιοχή, οι οποίες λειτουργούν συμπληρωματικά στην υπάρχουσα τεχνική μελέτη. Συγκεκριμένα η παρούσα εργασία εστιάζει στο στρώμα, "S1" με κατάταξη κατά USCS: SM - SW, που βρίσκεται σε μέσο βάθος έξι και μισό (6,5) μέτρων και με πάχος έως και τα δύο (2) μέτρα. Αποτελείται από αμμώδη σχηματισμό με πιθανή υπό πίεση υδροφορία.

2.1.2 Υδρογεωλογικές Συνθήκες

Τα παλαιογενή ιζήματα που συναντώνται στη περιοχή παρουσιάζουν ποικίλες υδροφορίες διάφορου δυναμικού που εξαρτώνται από τη λιθολογία, γεωλογική δομή και τις συνθήκες τροφοδοσίας. Η λεκάνη απορροής του Ερυθροποτάμου, όπου τα παλαιογενή ιζήματα καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση, αναπτύσσει υπόγειους υδροφορείς οι οποίοι δεν είναι ενιαίοι. Αναπτύσσονται επάλληλα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα στα αδρόκοκκα ιζήματα (όπως το αμμώδες που θα εξεταστεί στα επόμενα κεφάλαια). Η παρουσία λεπτόκοκκων αδιαπέρατων στρωμάτων, παρότι δημιουργεί τοπικά ανάσχεση της ροής ως προς την κατακόρυφο συνιστώσα της, δεν προκαλεί πλήρη διακοπή της υδραυλικής επικοινωνίας μεταξύ των υδροφοριών που αναπτύσσονται εκατέρωθεν αυτών. Στην περιοχή μελέτης εντοπίστηκε υπό πίεση υδροφορία με πιεζομετρική στάθμη δύο έως τριών μέτρων βάθος από την επιφάνεια του εδάφους.

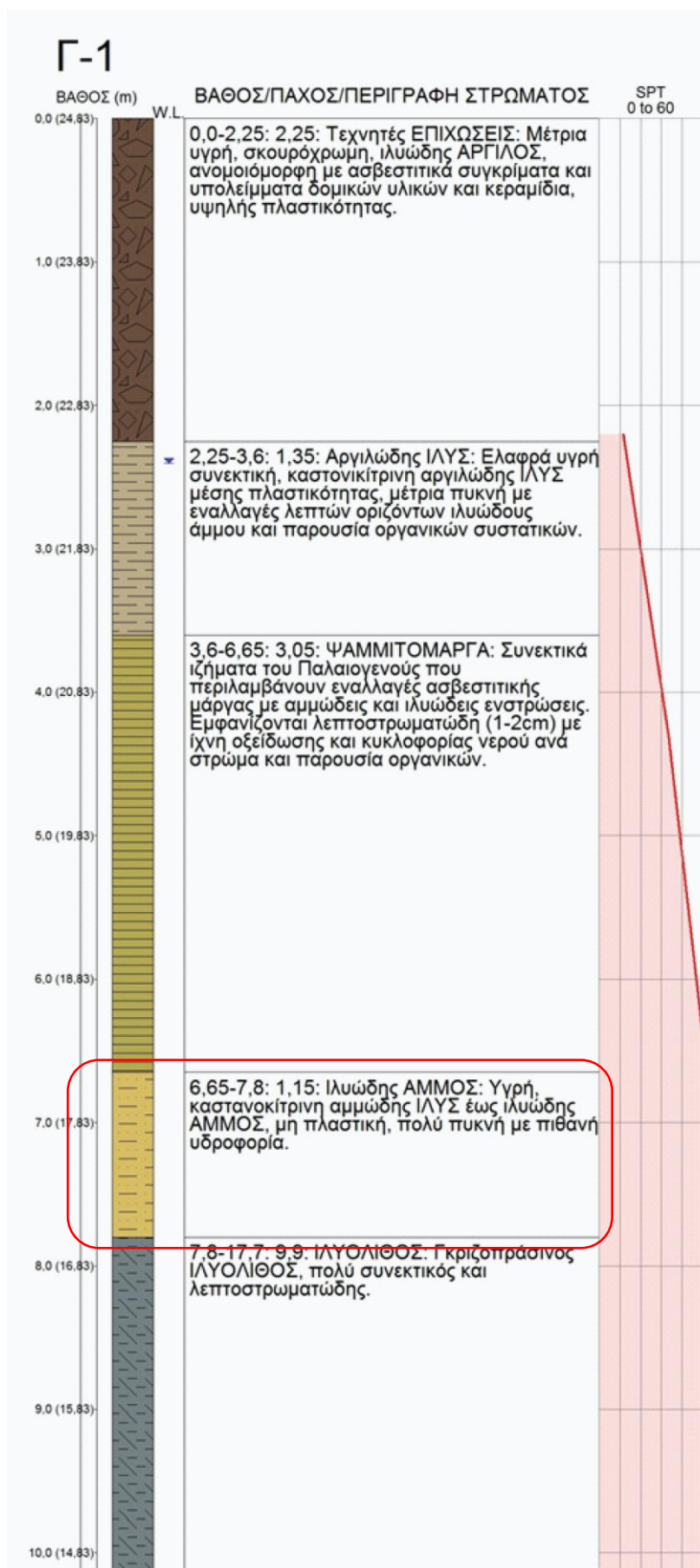
2.2 ΕΛΑΦΙΚΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στα πλαίσια της γεωτεχνικής έρευνας πραγματοποιήθηκαν πέντε γεωτρήσεις με στοιχεία και συντεταγμένες που δίνονται στον πίνακα (1). Οι γεωτρήσεις πραγματοποιήθηκαν με συνεχή δειγματοληψία αντιπροσωπευτικών δειγμάτων εδάφους και η τεχνική δειγματοληψίας που ακολουθήθηκε ήταν με μονό δειγματολήπτη (καροταρία) καρβιδίων.

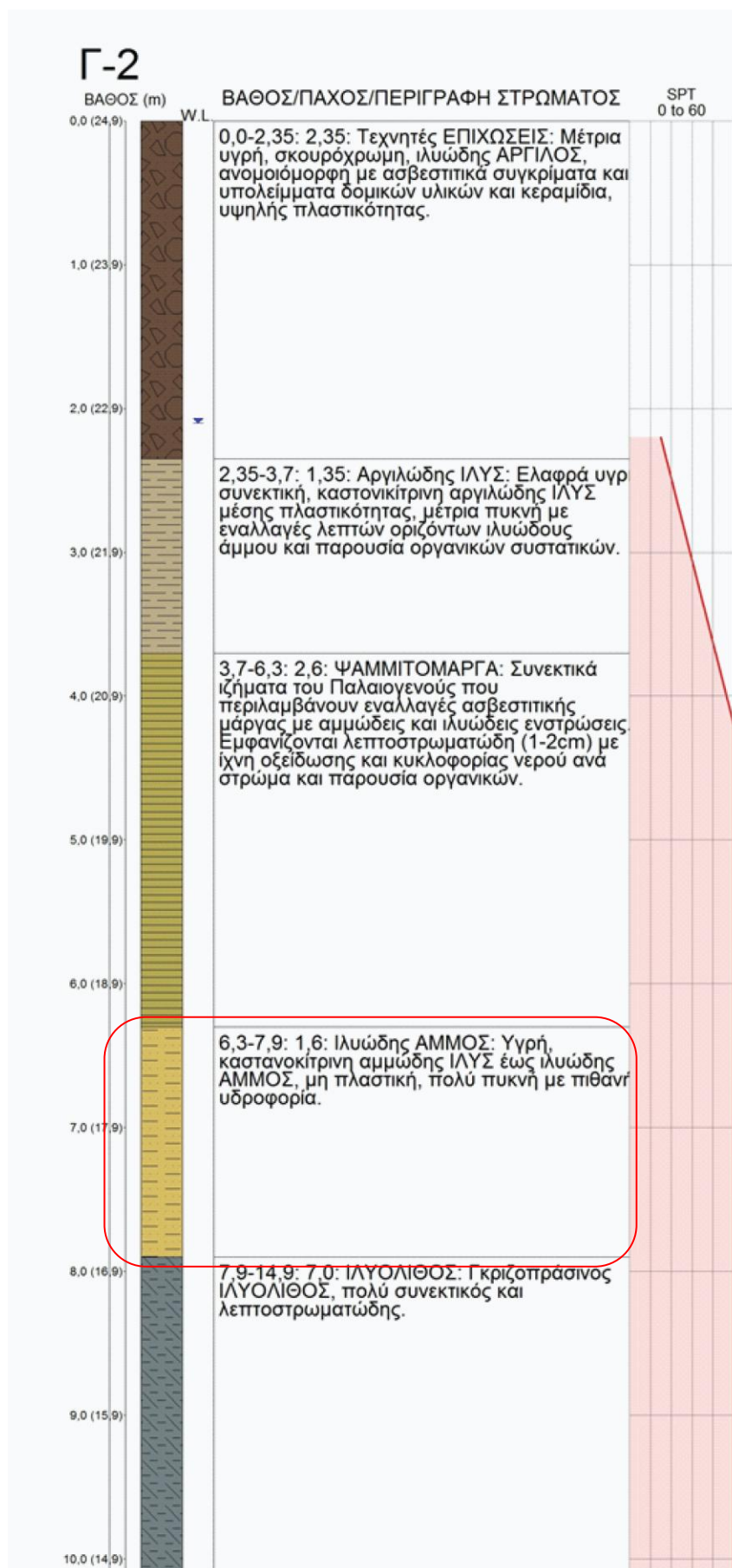
Πίνακας 1. Στοιχεία γεωτεχνικής έρευνας (Χατζηγώγος, 2015).

Γεωτρήσεις	Υψόμετρο (m)	Βάθος έρευνας (m)	Στάθμη υπόγειου υδάτινου ορίζοντα (m)	x	ψ
Γ-1	24,83	17,70	2,40 (22,42)	708476,52	4580244,81
Γ-2	24,91	14,90	2,10 (22,71)	708464,01	4580237,19
Γ-3	24,67	19,70	2,75 (21,91)	708452,49	4580224,42
Γ-4	24,73	21,50	2,80 (21,93)	708498,59	4580216,59
Γ-5	26,25	24,40	3,05 (23,20)	708469,25	4580197,19

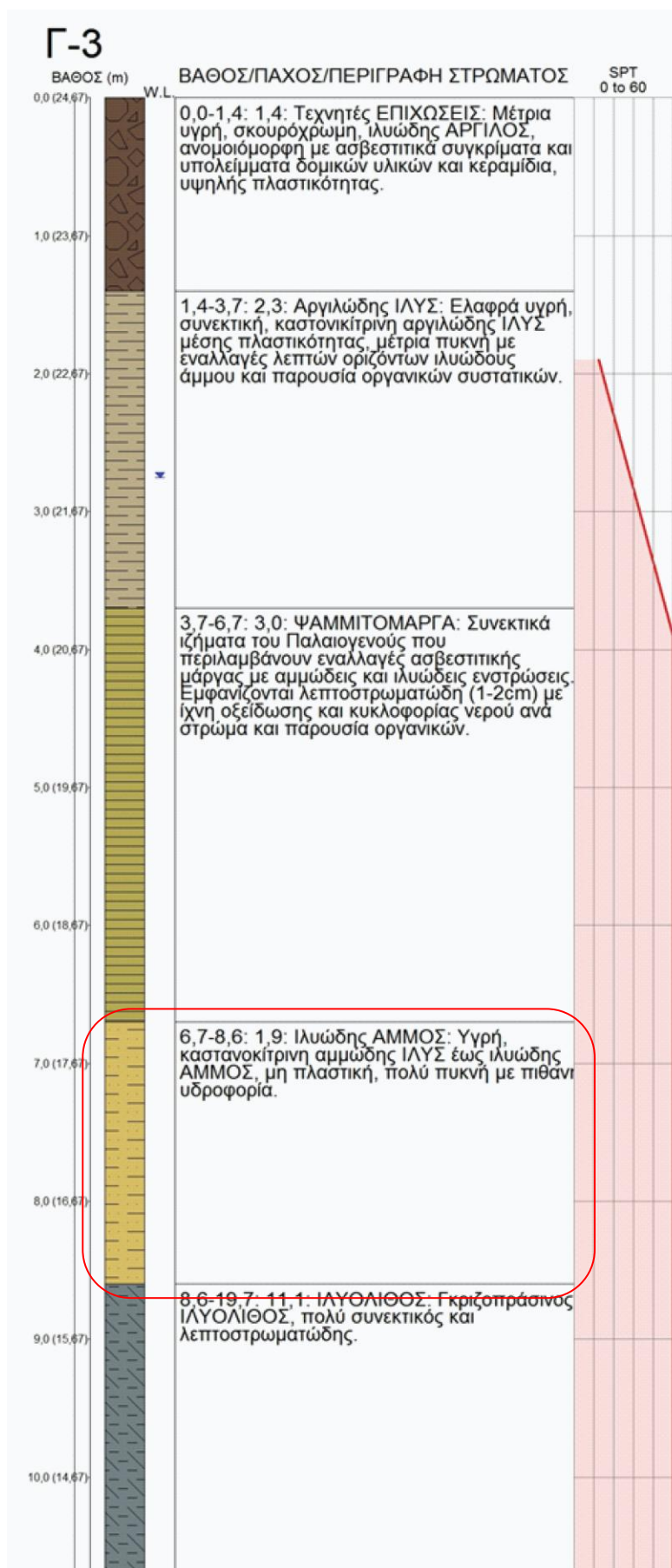
Η αξιολόγηση των γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκε επί τόπου μέσω της παρατήρησης και σε συνδυασμό με τις επί τόπου δοκιμές SPT μας δίνουν τα εδαφικά προφίλ κάθε γεώτρησης με σκοπό τη δημιουργία γεωλογικών τομών. Στις εικόνες (4), (5), (6), (7) και (8) δίνονται τα εδαφικά προφίλ των Γ1, Γ2, Γ3, Γ4 και Γ5 γεωτρήσεων αντίστοιχα.



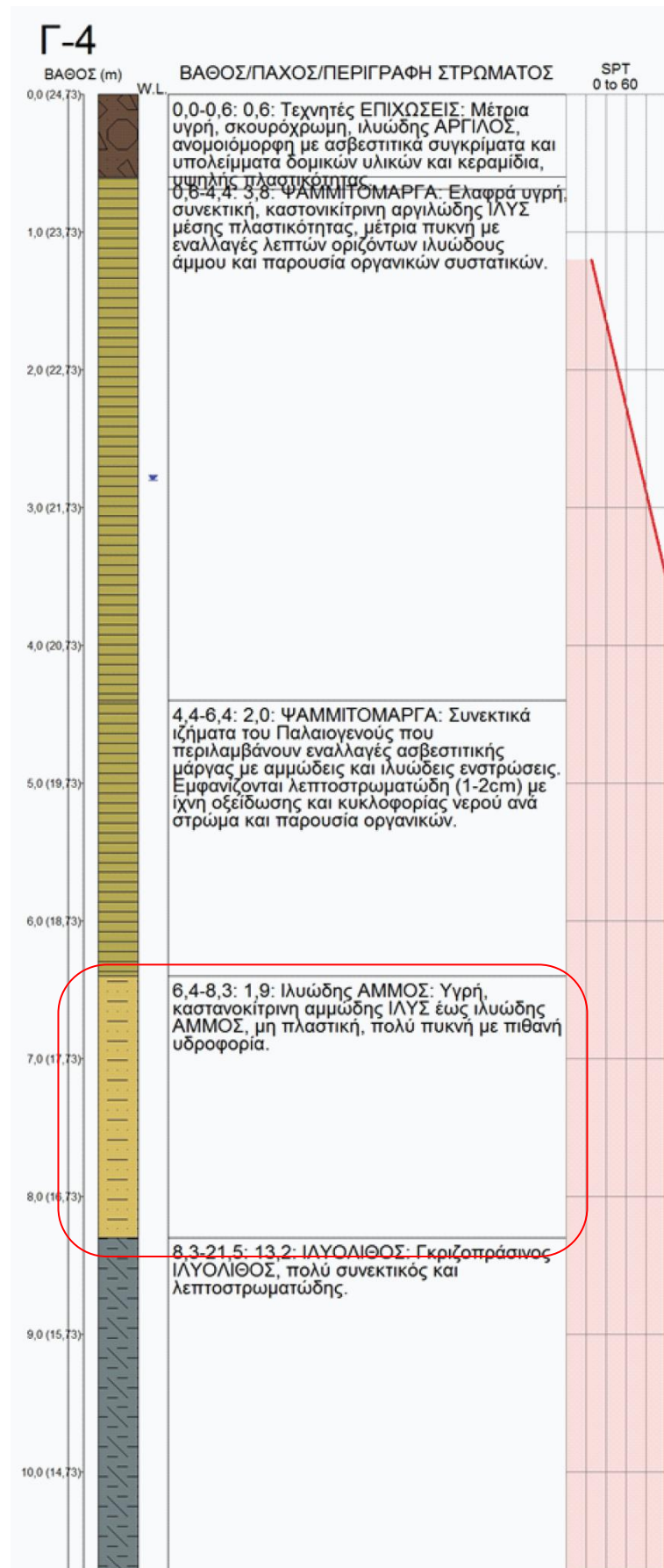
Εικόνα 4. Εδαφικό προφίλ γεώτρησης Γ-1 (Χατζηγώγος, 2015), με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.



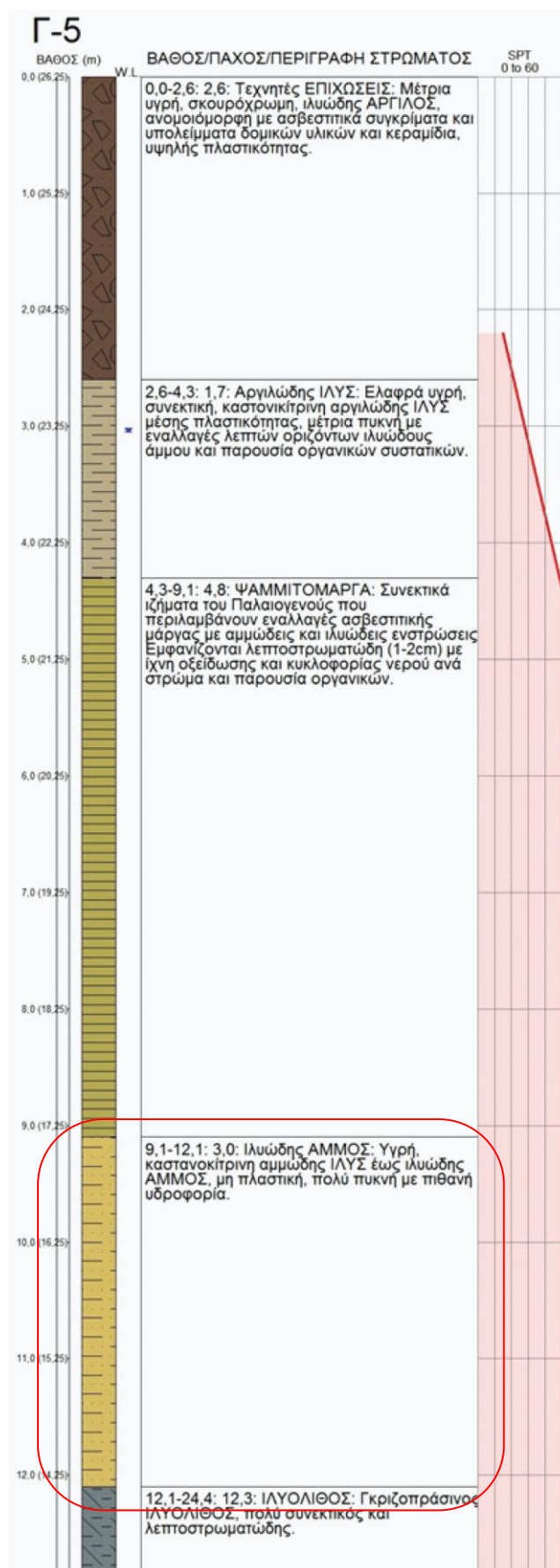
Εικόνα 5. Εδαφικό προφίλ γεώτρησης Γ-2 (Χατζηγώγος, 2015), με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.



Εικόνα 6. Εδαφικό προφίλ γεώτρησης Γ-3 (Χατζηγώγος, 2015), με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.

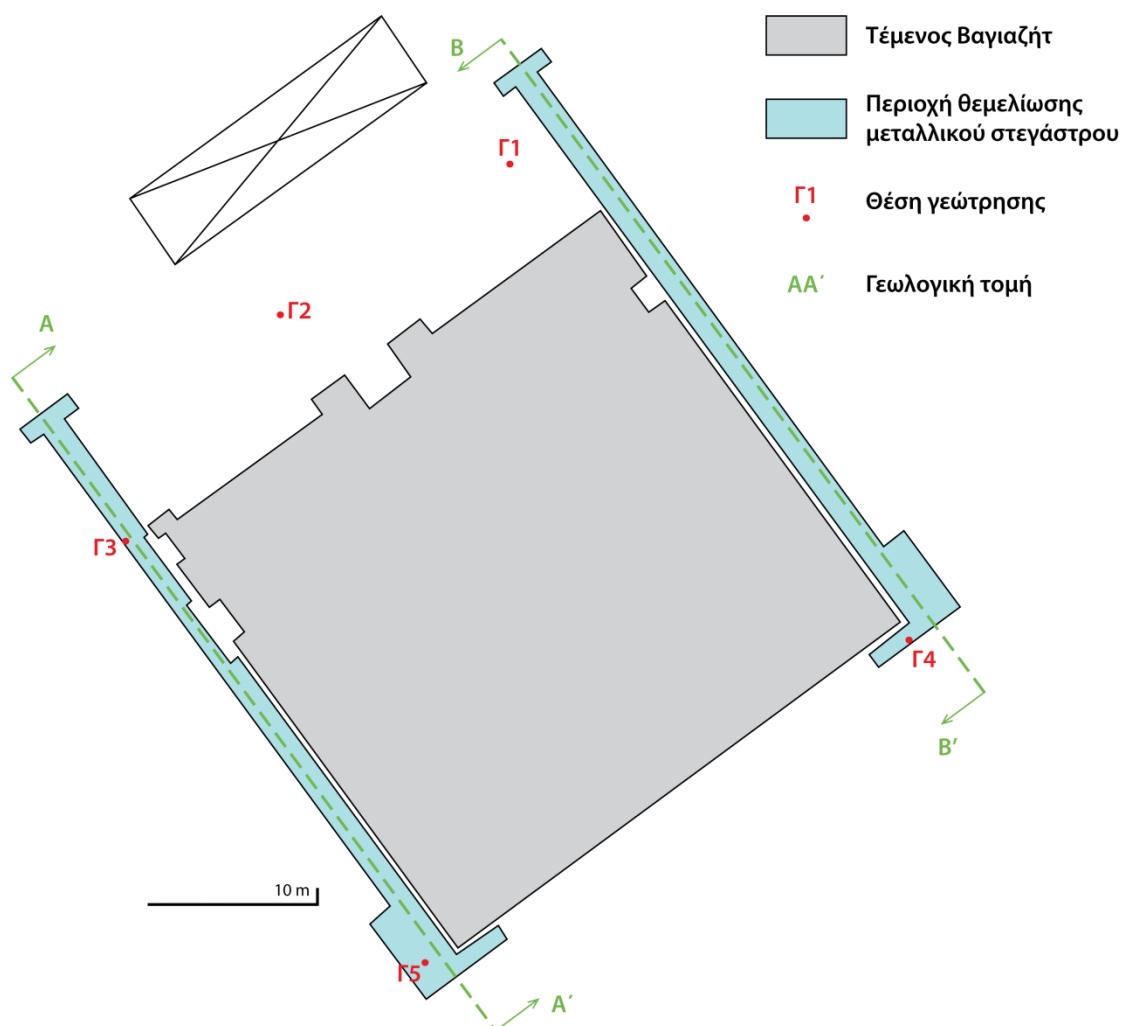


Εικόνα 7. Εδαφικό προφίλ γεώτρησης Γ-4 (Χατζηγώγος, 2015), με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.



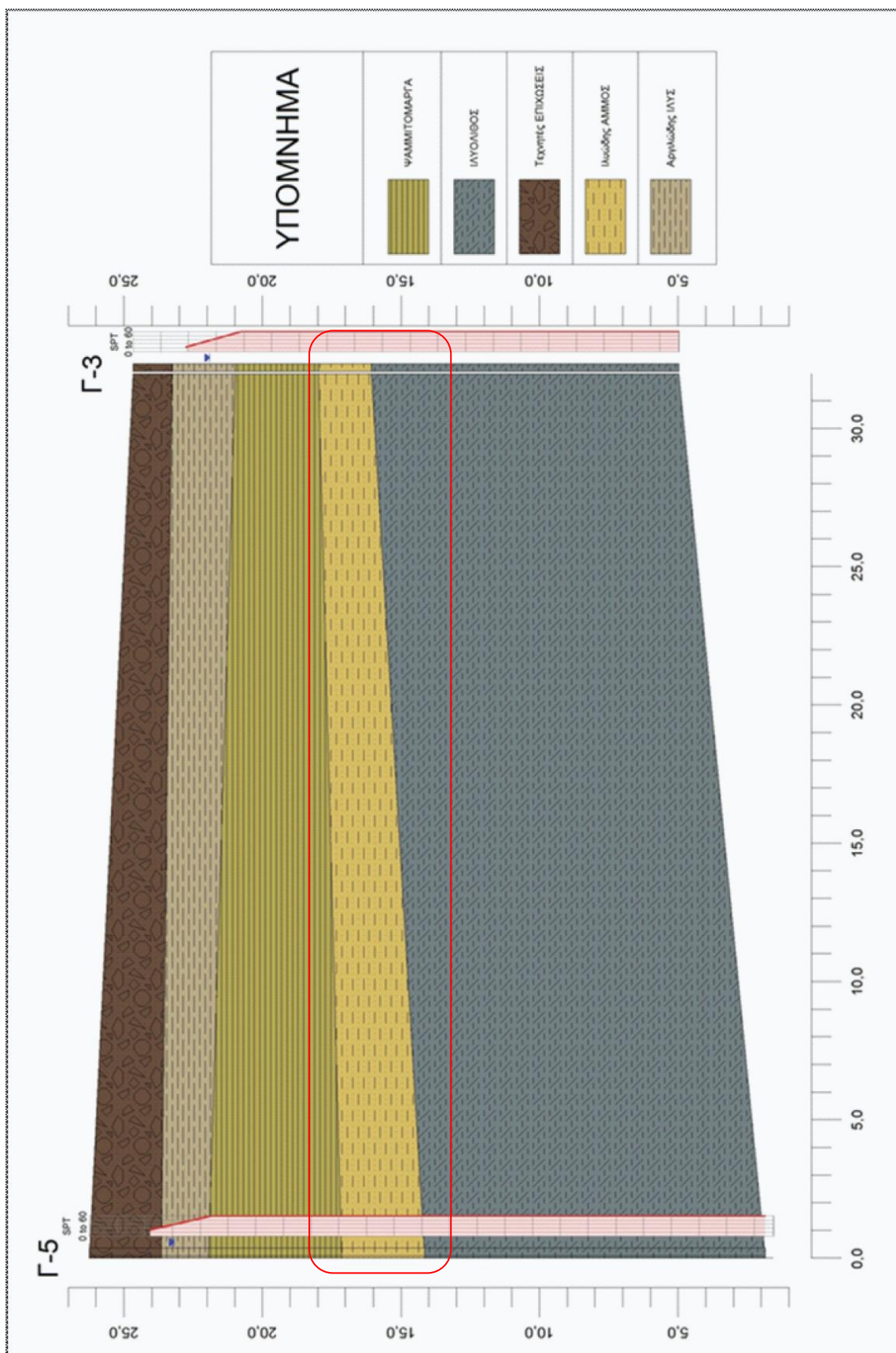
Εικόνα 8. Εδαφικό προφίλ γεώτρησης Γ-5 (Χατζηγώγος, 2015), με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.

Για τις ανάγκες της μελέτης έγιναν οι γεωλογικές τομές κατά μήκος της έδρασης του στεγάστρου, δηλαδή οι τομές AA' (εικόνα) και BB' (εικόνα), όπως δίνονται στην εικόνα (9).



Εικόνα 9. Κάτοψη Τεμένους με επισήμανση των γεωλογικών τομών που δημιουργήθηκαν (τροποποιημένη από Χατζηγώγο, 2015 ως προς τις θέσεις των τομών, τα χρώματα και το υπόμνημα).

Οι δοκιμές που έγιναν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αφορούν το στρώμα "S1" (σημειώνεται στις παραπάνω τομές) που χαρακτηρίζεται ως υγρή, καστανοκίτρινη αμμώδης ΙΛΥΣ έως ιλυώδης ΑΜΜΟΣ, μη πλαστική, πολύ πυκνή με πιθανή υπό πίεση υδροφορία. (κατάταξη κατά USCS: SM - SW). Αποτελεί την αδρόκοκη φάση της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς του στρώματος "C2". Πιο συγκεκριμένα στον πίνακα (2) φαίνονται τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικά.



Εικόνα 10. Χαρακτηριστική τομή γεωτρήσεων Γ5 - Γ3 διεύθυνσης ΝΑ - ΒΔ (Χατζηγώγος, 2015) , με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.



Εικόνα 11. Χαρακτηριστική τομή γεωτρήσεων Γ4 - Γ1 διεύθυνσης ΝΑ - ΒΔ (Χατζηγώγος, 2015) , με κόκκινο χρώμα το στρώμα S1.

Πίνακας 2. Πλήθος δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της διατριβής.

Αριθμός δείγματος	Πλήθος δειγμάτων	Κατάταξη δείγματος	Γεώτρηση	Βάθος
1	4	S1 (USCS: SM-SW)	Γ2	6.60 - 7.00
2	1	S1 (USCS: SM-SW)	Γ3	7.00 - 7.60
3	1	S1 (USCS: SM-SW)	Γ5	8.00 - 8.50
4	6	S1 (USCS: SM-SW)	Γ5	10.50 - 10.90

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σε επιλεγμένα βάθη των γεωτρήσεων εκτελέστηκαν επί τόπου Πρότυπες Δοκιμές Διείσδυσης (SPT), καθώς και ένα πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών που σε δείγματα του υπεδάφους περιλαμβάνουν:

- Δοκιμές κατάταξης του εδάφους (κοκκομετρικές αναλύσεις με κόσκινα και αραιόμετρο, μετρήσεις ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας)
- Δοκιμές προσδιορισμού φυσικών χαρακτηριστικών (φυσική υγρασία, φαινόμενο βάρος και εξ αυτών προσδιορισμό λόγου κενών και του βαθμού κορεσμού του εδάφους)
- Δοκιμές προσδιορισμού των παραμέτρων συμπίεστότητας (δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης)
- Δοκιμές προσδιορισμού των παραμέτρων αντοχής (δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, δοκιμή άμεσης διάτμησης)

Αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών δίνονται στον πίνακα (3), ενώ στον πίνακα (4) δίνονται τα δείγματα που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή ή που δημιουργήθηκαν από αυτή, καθώς και οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Οι εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής εκτελέστηκαν στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. από τον Ιούνιο έως τον Ιούλιο του 2015 κατά τρόπο σύμφωνο με τις σχετικές Δημόσιες Τεχνικές Προδιαγραφές (ΥΠΕΧΩΔΕ, Ε101-83, Ε106-86).

Πίνακας 3. Πλήθος δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν κατά τη γεωτεχνική αξιολόγηση.

Γεώτρηση	Εδαφικά Δείγματα											
	Δοκιμές Κατάταξης			Φυσικές Ιδιότητες					Μηχανικές Σταθερές			
	Κοκκομετρική Ανάλυση	Όρια Atterberg	Κατάταξη κατά USCS	Περιεχόμενη Υγρασία	Υγρό φαινόμενο βάρος	Ξηρό φαινόμενο βάρος	Αρχικός λόγος κενών	Βαθμός Κορεσμού	Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης	Τριαξονική δοκιμή	Δοκιμή βραδείας άμεσης διάτμησης με στερεοποίηση και αποστράγγιση	Δοκιμή στερεοποίησης
Γ1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	-	-	-
Γ2	1	1	1	5	5	5	5	5	4	-	1	-
Γ3	4	3	4	5	5	5	5	5	2	-	-	2
Γ4	2	2	2	5	5	5	5	5	-	-	-	1
Γ5	3	3	3	3	3	3	3	3	1	-	2	1
Σύνολο	12	11	12	20	20	20	20	20	8	0	3	4

Πίνακας 4. Πλήθος δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

Γεώτρηση	Εδαφικά Δείγματα						
	Δοκιμές Κατάταξης			Φυσικές Ιδιότητες			Μηχανικές Σταθερές
	Κοκκομετρική Ανάλυση	Όρια Atterberg	Κατάταξη κατά USCS	Περιεχόμενη Υγρασία	Υγρό φαινόμενο βάρος	Ξηρό φαινόμενο βάρος	Δοκιμή άμεσης διάτμησης
Γ2	1	-	1	8	1	1	4
Γ3	1	1	1	1	1	1	-
Γ5	2	1	2	3	2	2	7
Σύνολο	4	2	4	12	4	4	11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

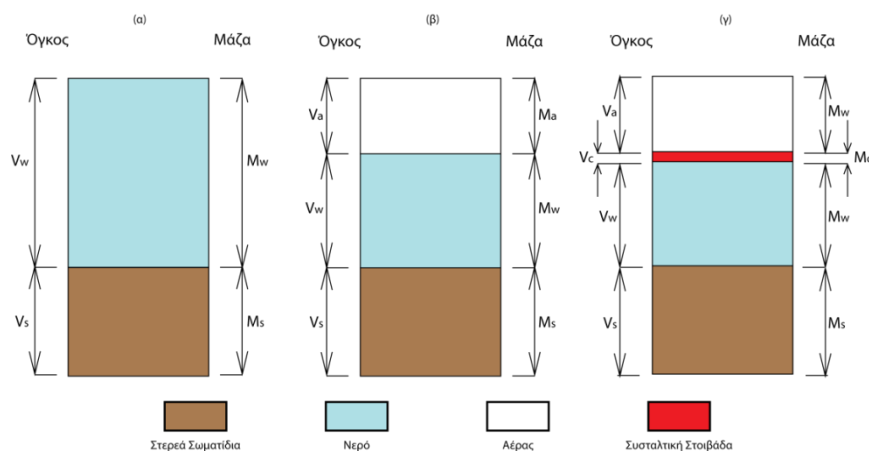
3.1 ΟΙ ΦΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΑΚΟΡΕΣΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η κλασσική εδαφομηχανική όπως ορίζεται από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα βασίζει τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών στην παραδοχή πως το κάθε έδαφος αποτελείται από δύο φάσεις, τη στερεή και την υγρή, δηλαδή πως κάθε κενό είναι κορεσμένο με νερό. Με την πάροδο των χρόνων όμως, και όσο το φάσμα των γεωτεχνικών μελετών άρχισε να διευρύνεται, παρατηρήθηκε πως υπάρχει ακόμα ένας τύπος εδάφους όπου ένα ποσοστό των κενών του είναι πληρωμένο με αέρα, δηλαδή αποτελείται από τρεις φάσεις: στερεή, υγρή και αέρια. Η παρουσία αέρα μέσα στα κενά των πόρων καθιστά το ρευστό των πόρων συμπιεστό. Τα εδάφη αυτά ονομάζονται μερικώς κορεσμένα ή ακόρεστα. Εκτός των τριών φάσεων έχει αναγνωριστεί και μία τέταρτη, αυτή της διεπαφής υγρής και αέριας φάσης που διεθνώς αναφέρεται ως *contractile skin* (Fredlund & Morgenstern, 1977). Αυτή η ορολογία στα ελληνικά μπορεί να αποδοθεί ως συσταλτική στοιβάδα. Εκτός από τη διαφοροποίηση στον αριθμό των φάσεων μεταξύ κορεσμένων και ακόρεστων εδαφών βασικό κριτήριο διαχωρισμού είναι το είδος της πίεσης των πόρων όπου, στα κορεσμένα εδάφη είναι θετικές σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση, ενώ στα ακόρεστα εδάφη η πίεση γίνεται αρνητική. Αποτέλεσμα των διαφορετικών πιέσεων και φάσεων είναι η διαφορετική μηχανική συμπεριφορά των εδαφών.

Σύμφωνα με το Χατζηγώγο (2015:110; και συμπ. αναφορές):

— *"Για τη διεξαγωγή της ανάλυσης των τάσεων, το ακόρεστο έδαφος θεωρείται ως ένα σύστημα τεσσάρων φάσεων (Fredlund & Morgenstern, 1977). Από τις τέσσερις φάσεις θεωρείται ότι οι δύο (στερεή φάση και συσταλτική στοιβάδα) έρχονται σε κατάσταση ισορροπίας κάτω από την εφαρμοζόμενη τάση και οι άλλες δύο (υγρή και αέρια φάση) βρίσκονται σε κατάσταση ροής. Αναφορικά με τη σχέση μάζας-όγκου σε ένα ακόρεστο έδαφος, αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα τριών φάσεων διότι ο όγκος της συσταλτικής στοιβάδας είναι μικρός και η μάζα της μπορεί να θεωρηθεί σαν μέρος της μάζας του νερού. Παρόλα αυτά, κατά την ανάλυση των τάσεων ενός πολυφασικού συνεχούς μέσου, η διεπαφή αέρα-νερού συμπεριφέρεται ως μία ανεξάρτητη φάση."*

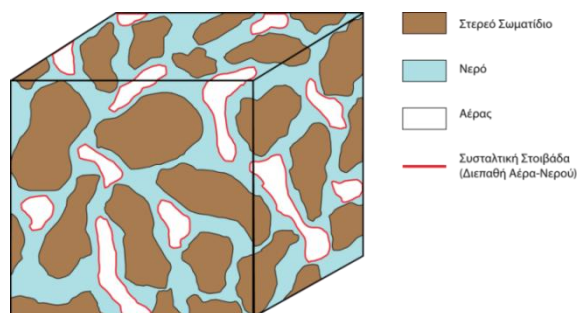
Οι διαφορές μεταξύ των φάσεων του κορεσμένου και ακόρεστου εδάφους (τεσσάρων και απλοποιημένο τριών) δίνονται στην εικόνα (12) σε δισδιάστατη απεικόνιση.



Εικόνα 12. Διαφορές φάσεων μεταξύ κορεσμένου και ακόρεστου εδάφους. (α) Διάγραμμα συστήματος κορεσμένου εδάφους δύο φάσεων, (β) Απλοποιημένο διάγραμμα τριών φάσεων ακόρεστου εδάφους, (γ) Διάγραμμα συστήματος ακόρεστου εδάφους τεσσάρων φάσεων (τροποποιημένη από Χατζηγώγο, 2015 ως προς τα χρώματα, το υπόμνημα και την προσθήκη του α σχήματος).

3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΤΟΥ ΑΚΟΡΕΣΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Οι τέσσερις φάσεις του ακόρεστου εδάφους μπορούν να αποδοθούν σε στοιχείο μοναδιαίου όγκου όπως στην εικόνα (13) όταν η αέρια φάση βρίσκεται υπό τη μορφή εγκλωβισμένων φυσαλίδων με αποτέλεσμα το ρευστό να γίνεται έντονα συμπιεστό. Στην περίπτωση που η αέρια φάση είναι συνεχής τότε η διεπαφή αλληλεπιδρά με τα εδαφικά σωματίδια και αλλάζει τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους (Χατζηγώγος, 2015). Στην εικόνα (13) μπορούμε να διακρίνουμε την κάθε φάση και συγκεκριμένα (με κόκκινο χρώμα) τη διεπαφή αέρα - νερού και τον όγκο που καταλαμβάνει σε σχέση με τις υπόλοιπες φάσεις.



Εικόνα 13. Στοιχείο ακόρεστου εδάφους με εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα (τροποποιημένη από Χατζηγώγο, 2015 ως προς τα χρώματα και το υπόμνημα).

Σύμφωνα με το Χατζηγώγο (2015:112-113; και συμπ. αναφορές):

— "Μια σημαντική ιδιότητα της διεπαφής αέρα-νερού είναι η επιφανειακή έλξη ή επιφανειακή τάση. Το φαινόμενο είναι αποτέλεσμα των ενδομοριακών δυνάμεων που ασκούνται στα μόρια της συσταλτικής στοιβάδας. Οι δυνάμεις αυτές διαφέρουν από αυτές που δρουν ανάμεσα στα μόρια στο εσωτερικό της φάσης του νερού [...] Ένα μόριο στο εσωτερικό του νερού ασκεί ίσες δυνάμεις προς όλες τις κατευθύνσεις με αποτέλεσμα να αλληλοαναιρούνται οι δυνάμεις σε κατάσταση ισορροπίας. Τα μόρια της συσταλτικής στοιβάδας δέχονται δυνάμεις προς το εσωτερικό του νερού και για να επέλθει ισορροπία προκαλείται εφελκυσμός της. Η ιδιότητα αυτή της συσταλτικής στοιβάδας ονομάζεται επιφανειακή έλξη T_s και μετριέται σε μονάδες εφελκυστικής δύναμης ανά μέτρο μήκους της συσταλτικής στοιβάδας (N/m). Η T_s εφάπτεται στην επιφάνεια της συσταλτικής στοιβάδας και την κάνει να συμπεριφέρεται σα μία ελαστική μεμβράνη. Η συμπεριφορά αυτή είναι ίδια με αυτήν ενός φουσκωμένου μπαλονιού, το οποίο έχει μεγαλύτερη πίεση εσωτερικά από ότι εξωτερικά."

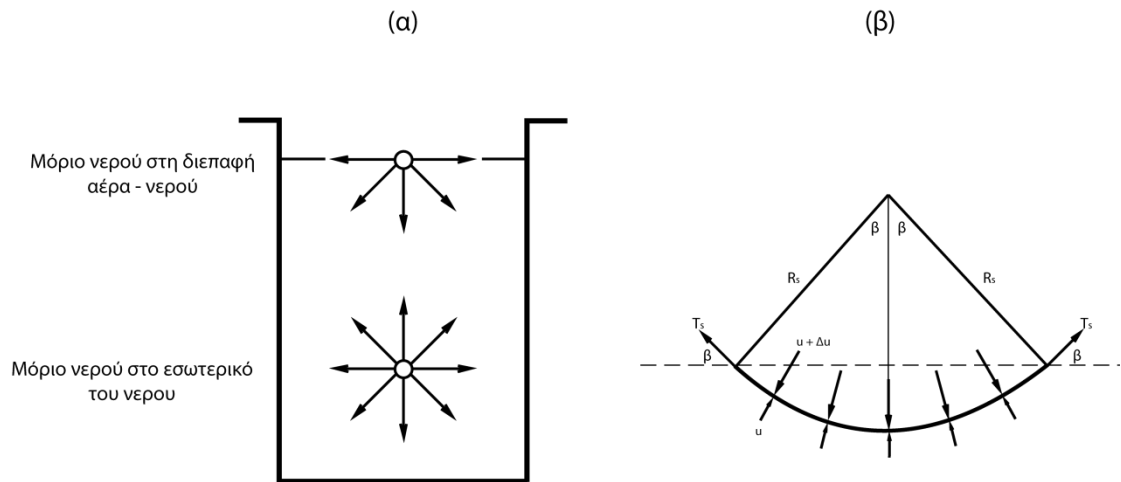
Ο παραπάνω ορισμός δίνεται σχηματικά στην εικόνα (14) όπου έχουμε τις δυνάμεις που ασκούνται σε ένα μόριο νερού στο εσωτερικό του και στη διεπαφή του με τον αέρα, καθώς και τις πιέσεις που ασκούνται και προκαλούν την καμπύλωση της μεμβράνης σε δισδιάστατη απεικόνιση. Οι επιφανειακές τάσεις σε τρισδιάστατο μοντέλο έχουν αναλυθεί από τους Fredlund & Rahardjo (1993) με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$(u_a - u_w) = \frac{2 * T_s}{R_s}, \quad (1)$$

όπου:

- $(u_a - u_w) = H$ διαφορά μεταξύ της πίεσης του αέρα και της πίεσης του νερού των πόρων που εφαρμόζονται στη συσταλτική στοιβάδα ενός ακόρεστου εδάφους (μύζηση).
- T_s , R_s υπολογίζονται από το σχήμα (β) της εικόνας (14).

Η παραπάνω εξίσωση αναφέρεται ως η εξίσωση του τριχοειδούς μοντέλου Kelvin (Fredlund & Rahardjo, 1993) δίνοντας μας έτσι μία αρκετά ρεαλιστική απεικόνιση για την διαφορετική τέταρτη φάση του ακόρεστου εδάφους.



Εικόνα 14. Φαινόμενο επιφανειακής έλξης στη διεπαφή αέρα-νερού. (α) Ενδομοριακές δυνάμεις στη συστατική στοιβάδα και στο νερό, (β) Πιέσεις και επιφανειακή έλξη σε καμπυλωμένη δισδιάστατη μεμβράνη (τροποποιημένη από Χατζηγώγο, 2015 ως προς τη διάταξη των σχημάτων).

3.3 ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ

Η θεωρητική έννοια της εδαφικής μύζησης ήταν κατανοητή από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα παράλληλα με την ανάπτυξη της εδαφομηχανικής σε θεωρητικό επίπεδο. Η σπουδαιότητα όμως της ερμηνείας της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών φαίνεται στον πίνακα (5), όπου δίνονται οι πρώτες σημαντικές αναφορές και δημοσιεύσεις που αφορούν την εδαφική μύζηση μέσω κατασκευαστικών προβλημάτων που δημιουργήθηκαν και γενικά της ανάπτυξης της μηχανικής των εδαφών.

Πίνακας 5. Σημαντικές αναφορές του 20^{ου} αιώνα για τη θεωρία της εδαφικής μύζησης.

Χρονολογία	Ερευνητές	Αποτελέσματα
1943	Edlefsen & Anderson	Αναφέρουν την εδαφική μύζηση ως η συνθήκη ελεύθερης ενέργειας του νερού του εδάφους.
1954	Croney & Coleman	Από τον οργανισμό Road Research Laboratory στην Αγγλία τονίστηκε η συμπεριφορά των ακόρεστων εδαφών σε σχέση με τεχνικά προβλήματα.
1965	Richards B. G.	Η συνθήκη ελεύθερης ενέργειας του νερού του εδάφους των Edlefsen & Anderson μετρήθηκε σε σχέση με την πίεση των υδρατμών του εδαφικού νερού.
1965	Aitchison	Δημοσίευσε ποσοτικές ερμηνείες της εδαφικής μύζησης και των συνιστωσών της σε θεωρητικά θερμοδυναμικό πλαίσιο.
1972	Krahn & Fredlund	Οι παραπάνω ερμηνείες γίνονται αποδεκτές ως έννοιες της μηχανικής των εδαφών.

Οι παραπάνω έρευνες είχαν ως αποτέλεσμα την μέτρηση της εδαφικής (ή ολικής) μύζησης με την ακόλουθη σχέση (Richards B. G., 1965):

$$\psi = -\frac{RT}{u_w * \omega_v} \ln\left(\frac{\bar{u}_v}{\bar{u}_{v0}}\right), \quad (2)$$

όπου:

ψ = Εδαφική ή ολική μύζηση (kPa)

R = Παγκόσμια σταθερά αερίων [8,31432 J/(mol K)]

T = Απόλυτη θερμοκρασία [$T=(273,16+t^\circ)$ K]

u_w = Ειδικός όγκος νερού ($1/\rho_w$) (m^3/kg)

ρ_w = Πυκνότητα νερού (988 kg/m³ σε $t^\circ=20^\circ C$)

ω_v = Μοριακή μάζα υδρατμού (18,016 kg/kmol)

u_v = Μερική πίεση υδρατμών νερού των πόρων (kPa)

u_{v0} = Κορεσμένη πίεση υδρατμών σε μία επίπεδη επιφάνεια νερού στην ίδια θερμοκρασία (kPa)

Στην εξίσωση () σύμφωνα με το Χατζηγώγο (2015:116; και συμπ. αναφορές):

— "ο όρος $\bar{u}_v/\bar{u}_{v0}$ είναι η σχετική υγρασία RH (%). Η εδαφική μύζηση ψ για σχετική υγρασία 100% είναι μηδέν και επομένως οποιαδήποτε τιμή της RH κάτω

από 100% υποδηλώνει την παρουσία εδαφικής μύζησης. Η εδαφική μύζηση όπως ποσοτικοποιείται σε σχέση με τη σχετική υγρασία ονομάζεται ολική μύζηση (total suction) και έχει δύο συνιστώσες, την 'οσμωτική' μύζηση (osmotic suction) και την 'ελκτική' μύζηση (matric suction). Ο όρος μύζηση στην εδαφομηχανική αναφέρεται στη δεύτερη συνιστώσα της ολικής μύζησης (δηλ. στη matrix suction), καθώς αυτή επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά των ακόρεστων εδαφών. Οι συνιστώσες της μύζησης μπορούν να ορισθούν ως εξής (κατά Aitchison, 1965):

- *Ελκτική ή τριχοειδής συνιστώσα της ελεύθερης ενέργειας: Είναι η ισοδύναμη μύζηση που προκύπτει από τη μερική πίεση των υδρατμών σε ισορροπία με το εδαφικό νερό, σε σχέση με αυτήν που προκύπτει από τη μερική πίεση των υδρατμών σε ισορροπία με διάλυμα ίδιας σύστασης με το εδαφικό νερό.*
- *Οσμωτική συνιστώσα της ελεύθερης ενέργειας: Είναι η ισοδύναμη μύζηση που προκύπτει από τη μέτρηση της μερικής πίεσης των υδρατμών σε ισορροπία με διάλυμα ίδιας σύστασης με το εδαφικό νερό, σε σχέση με τη μερική πίεση των υδρατμών σε ισορροπία με το ελεύθερο νερό.*
- *Ολική μύζηση ή ελεύθερη ενέργεια του εδαφικού νερού: Είναι η ισοδύναμη μύζηση που προκύπτει από τη μέτρηση της μερικής πίεσης των υδρατμών σε ισορροπία με το εδαφικό νερό, σε σχέση με τη μερική πίεση των υδρατμών σε ισορροπία με το ελεύθερο νερό."*

Τελικά ως ολική μύζηση με βάση τους παραπάνω όρους και την εξίσωση (3) μπορεί να ορισθεί η ελεύθερη ενέργεια του εδαφικού νερού με συνιστώσες την ελκτική και οσμωτική μύζηση που συνδέονται μεταξύ τους από την εξίσωση (3) (Richards B. G., 1965):

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi, \quad (3)$$

όπου:

$(u_a - u_w)$ = Ελκτική μύζηση (ή μύζηση)

u_a = Πίεση του αέρα των πόρων

u_w = Πίεση του νερού των πόρων

π = Οσμωτική μύζηση

3.4 ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΚΟΡΕΣΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους για να περιγραφεί ως ένα τρισδιάστατο στοιχείο χρειάζεται κάποιες μεταβλητές εντατικής κατάστασης που να είναι ανεξάρτητες από τις φυσικές του ιδιότητες. Ο αριθμός των φάσεων που λαμβάνουν μέρος σε ένα έδαφος καθορίζει και το πλήθος των μεταβλητών που θα το περιγράψουν. Στα κορεσμένα εδάφη η ενεργός τάση ($\sigma - u_w$) μπορεί να περιγράψει τη συμπεριφορά τους, καθώς έχει αποδειχθεί (χωρίς να είναι φυσικός νόμος) πως είναι η μοναδική μεταβλητή που μπορεί να ελέγξει τη συμπεριφορά τους. Με την ανάπτυξη της θεωρίας των ακόρεστων εδαφών δημιουργήθηκε η ανάγκη να περιγραφεί και η μηχανική τους συμπεριφορά.

Όπως αναφέρεται στο Χατζηγάγο (2015:117; και συμπ. αναφορές):

— *"Οι Fredlund και Morgenstern (1977) παρουσίασαν μία θεωρητική ανάλυση τάσεων ενός ακόρεστου εδάφους στη βάση της πολυφασικής μηχανικής συνεχούς μέσου. Το ακόρεστο έδαφος θεωρήθηκε ως ένα χημικά αδρανές σύστημα τεσσάρων φάσεων και οι εδαφικοί κόκκοι ασυμπίεστοι. Οι παραπάνω υποθέσεις είναι σε συμφωνία με αυτές που χρησιμοποιούνται στην Εδαφομηχανική κορεσμένων εδαφών. Στην ανάλυση αυτή προτείνεται η περιγραφή της εντατικής κατάστασης ενός ακόρεστου εδάφους με τη χρήση δύο τανυστών τάσης με δύο ανεξάρτητες μεταβλητές ορθής τάσης."*

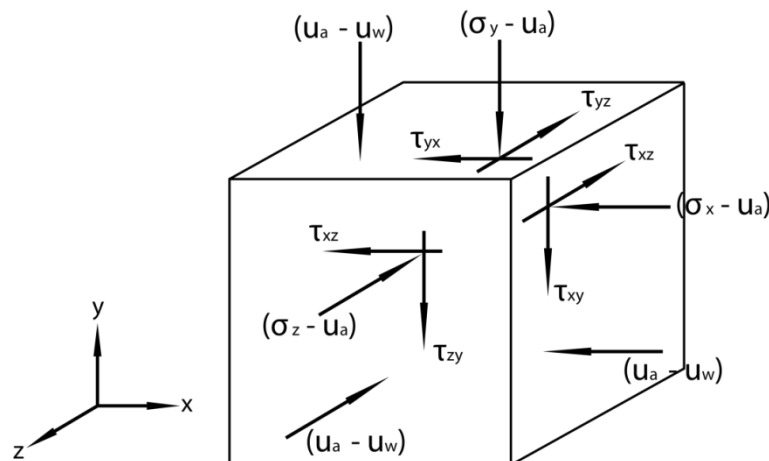
Οι δύο ανεξάρτητες μεταβλητές είναι η ενεργός τάση ($\sigma - u_w$) και η μύζηση ($u_a - u_w$), και αναλύονται στην εξίσωση (4).

$$\begin{bmatrix} \sigma_x - u_a & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - u_a & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - u_a \end{bmatrix} \quad \text{και} \quad \begin{bmatrix} u_a - u_w & 0 & 0 \\ 0 & u_a - u_w & 0 \\ 0 & 0 & u_a - u_w \end{bmatrix}, \quad (4)$$

Η παραπάνω ανάλυση δίνεται σχηματικά στην εικόνα (15), όπου θεωρούμε ένα στοιχείο μοναδιαίου όγκου και εφαρμόζουμε στις τρεις του διαστάσεις τις μεταβλητές.

Το διαφορετικό στα ακόρεστα εδάφη ως προς τις μεταβλητές είναι ότι η ολική τάση και η πίεση του νερού των πόρων δεν παράγουν ισοδύναμες αντιδράσεις, με αποτέλεσμα να διαφοροποιούνται από τα κορεσμένα εδάφη τόσο στη διατμητική αντοχή, όσο και στη συμπεριφορά μεταβολής όγκου. Αν προσθέσουμε ότι η πίεση του

αέρα των πόρων παραμένει σταθερή τότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι, όταν μεταβαίνουμε από την ακόρεστη στην κορεσμένη κατάσταση, η πίεση του αέρα εξισώνεται με αυτή του νερού των πόρων όταν γίνεται κορεσμός με αποτέλεσμα η τιμή της μύζησης να μηδενίζεται ($u_a = u_w \Rightarrow u_a - u_w = 0$) και μοναδική μεταβλητή παραμένει η ενεργός τάση.



Εικόνα 15. Περιγραφή της εντατικής κατάστασης στοιχείου μοναδιαίου όγκου ενός ακόρεστου εδάφους σε ένα σημείο (Fredlund & Morgenstern, 1977).

3.5 ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΛΑΦΩΝ

Το δύσκολο πρόβλημα προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής ακόρεστων εδαφών απασχόλησε αρκετούς ερευνητές για πάνω από 40 χρόνια (Πίνακας 6). Όλες οι εξισώσεις, που δίνονται συγκεντρωτικά στο πίνακα (6), αφορούσαν την έκφραση της διατμητικής αντοχής σε σχέση με την ενεργό τάση, ή καλύτερα, σε σχέση με τις προτεινόμενες μεταβλητές της εντατικής κατάστασης.

Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω ερευνών έδειξαν ότι η αύξηση της διατμητικής αντοχής ενός ακόρεστου εδάφους εξαρτάται από την κλίση της επιφάνειας αστοχίας στο επίπεδο διατμητικής τάσης - μύζησης (ϕ^b) και από την ελκτική μύζηση ($u_a - u_w$).

Όπως αναφέρεται στο Χατζηγώγο (2015:124-125; και συμπ. αναφορές):

— "Ο όρος ϕ^b θεωρείται πως έχει χαρακτηριστική τιμή για κάθε εδαφικό σχηματισμό, η οποία είναι σταθερή μόνο για ένα εύρος τιμών της μύζησης, που καλύπτει όμως τα περισσότερα γεωτεχνικά προβλήματα. Μπορεί να υπολογισθεί

πειραματικά [...] ή και έμμεσα με τη χρήση της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης."

Πίνακας 6. Έρευνες προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής ακόρεστων εδαφών.

Χρονολογία	Ερευνητές	Αποτελέσματα	Τυπολόγιο προσδιορισμού διατμητικής αντοχής
1960	Bishop, Alpan, Blight & Donald	Από τις πρώτες προσεγγίσεις όπου περιλαμβάνει μεταβλητές όπως η εδαφική παράμετρος χ που εξαρτάται από το βαθμό κορεσμού, το είδος, την εντατική κατάσταση και την υστερητική κατάσταση υγρασίας του εδάφους.	$\tau = c' + [\sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi'$
1978	Fredlund, Morgenstern & Widger	Προστέθηκε στην εξίσωση προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής η μεταβλητή ϕb που είναι η κλίση της επιφάνειας αστοχίας στο επίπεδο διατμητικής τάσης - μύζησης και αποτελεί χαρακτηριστική παράμετρο του εδάφους.	$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \phi b$
1986	Escario & Saez	Απέδειξαν πών η υπόθεση ότι η τιμή της ϕb είναι σταθερή δεν είναι ρεαλιστική	
1987	Fredlund, Rhardjo & Gan	Επιβεβαίωσαν ότι η τιμή της ϕb είναι ίση με αυτήν της φ' σε μικρές τιμές μύζησης και στη συνέχεια μειώνεται σημαντικά σε μία σταθερή, μικρή τιμή για μεγάλες τιμές μύζησης.	
1989	Escario, Juca & Coppe	Πρότειναν ότι σε υψηλές τιμές μύζησης η τιμή ϕb γίνεται αρνητική, αναφέροντας ότι σε τέτοιες τιμές μύζησης η φαινόμενη συνοχή λόγω της μύζησης τείνει προς το μηδέν, καθώς το έδαφος ξεραίνεται τελείως.	$x = \frac{\tan \phi b}{\tan \varphi'}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ, ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν θεωρητικά στοιχεία για τη χρησιμότητα της μοναδικής χαρακτηριστικής καμπύλης μύζησης για κάθε διαφορετικό εδαφικό σχηματισμό (ΧΚΜΕ) στον υπολογισμό της μεταβλητής ϕ^b , που είναι η κλίση της επιφάνειας αστοχίας στο επίπεδο διατμητικής τάσης - μύζησης, η οποία μπορεί να προσδιορίσει τη διατμητική αντοχή ενός ακόρεστου εδάφους. Το θεωρητικό πλαίσιο της ΧΚΜΕ βασίζεται στη συμπιεστότητα του ρευστού ενός ακόρεστου εδάφους, άρα και στις μεταβολές του όγκου του ρευστού. Οι μεταβολές του όγκου περιγράφονται από την παρακάτω εξίσωση (Fredlund & Rahardjo, 1993), κάτω από ισοτροπική φόρτιση, μεταξύ του όγκου και των μεταβολών του δείκτη κενών:

$$\Delta_e = a_t * d(\sigma_c - u_a) + a_m * d(u_a - u_w), \quad (5)$$

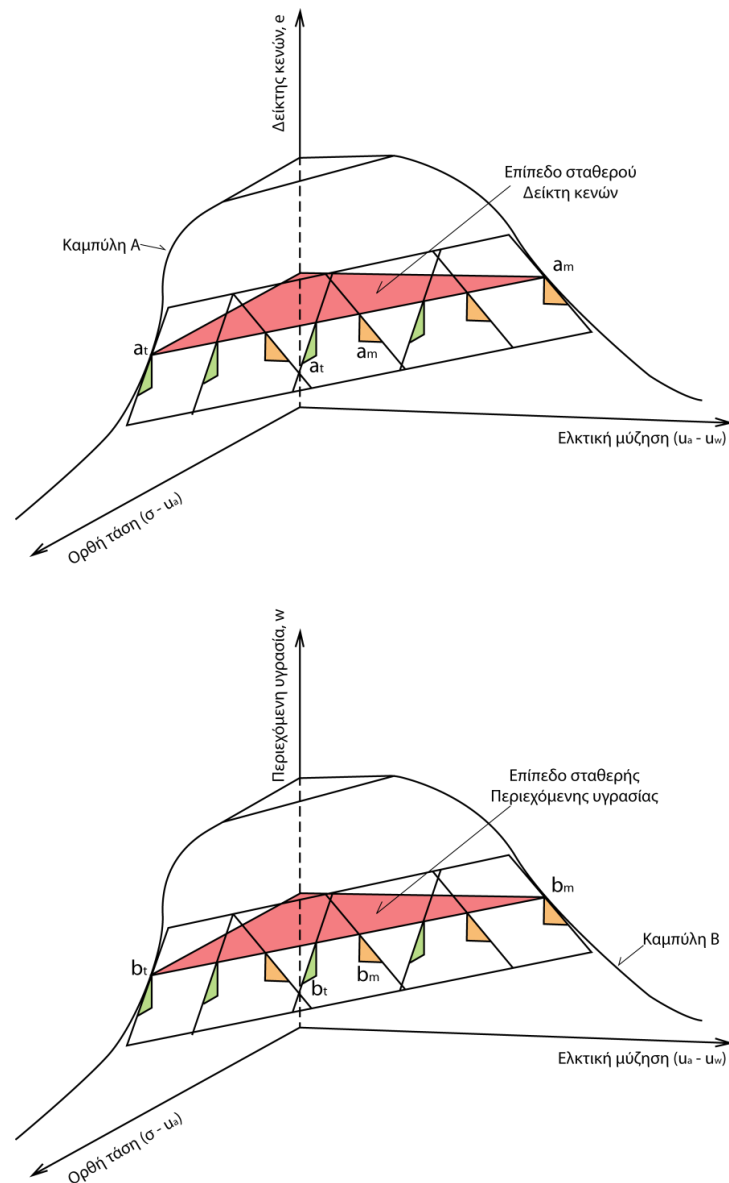
Στη συνέχεια διαπιστώθηκε (Fredlund & Rahardjo, 1993) πώς η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας (ή βαθμού κορεσμού) είναι ανεξάρτητη παράμετρος, επομένως η σχέση όγκου - μάζας σε ακόρεστο έδαφος περιγράφεται πλήρως από την εξίσωση :

$$\Delta_w = b_t * d(\sigma_c - u_a) + b_m * d(u_a - u_w), \quad (6)$$

Η εξήγηση των σχέσεων (5) και (6) δίνεται από τις τρισδιάστατες γραφικές παραστάσεις των καταστατικών επιφανειών του δείκτη κενών (e) και της περιεχόμενης υγρασίας (m) της εικόνας () (Fredlund & Rahardjo, 1993) όπου σύμφωνα με το Χατζηγώγο (2015:120; και συμπ. αναφορές):

— " Όταν η μύζηση του εδάφους είναι μηδέν, τότε οι μεταβολές του δείκτη κενών είναι ισοδύναμες με τις μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας σε σχέση με την απόκριση τους σε μεταβολές της ολικής τάσης. "

Στην εικόνα (16) παρατηρούμε ότι τόσο στο δείκτη κενών, όσο και στην περιεχόμενη υγρασία υπάρχει μία επιφάνεια σταθεροποίησης λόγω της ισοτροπικής φόρτισης.



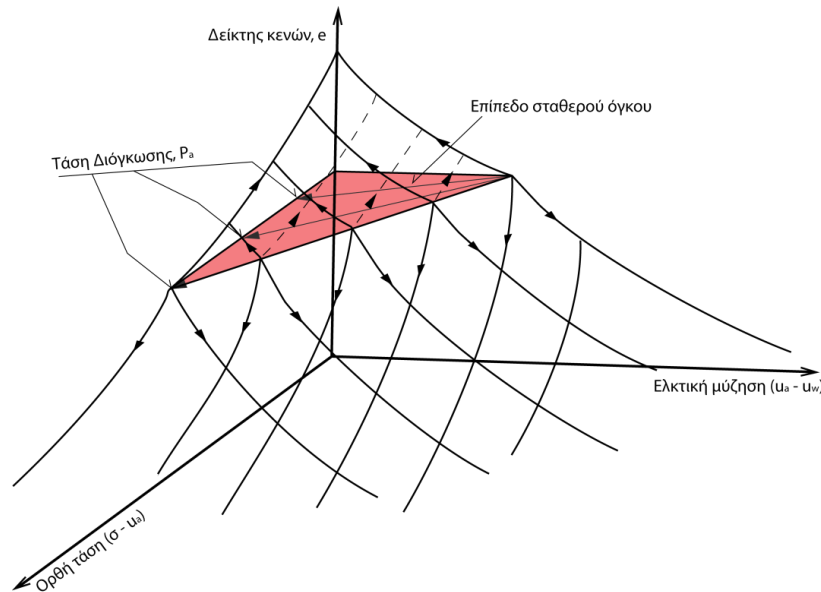
Εικόνα 16. Καταστατικές επιφάνειες του δείκτη κενών και της περιεχόμενης υγρασίας ακόρεστου εδάφους (κατά Fredlund & Rahardjo, 1993, εικόνα από Χατζηγώγο, 2015).

Στην περίπτωση που το έδαφος έχει σταθερή δομή οι καταστατικές επιφάνειες, σε συνθήκες φόρτισης - αποφόρτισης, του λόγου κενών δίνονται στην εικόνα (17) (Fredlund & Rahardjo, 1993). Όταν το έδαφος δεν έχει σταθερή, αλλά μετά-σταθερή δομή σύμφωνα με το Χατζηγώγο (2015:120; και συμπ. αναφορές):

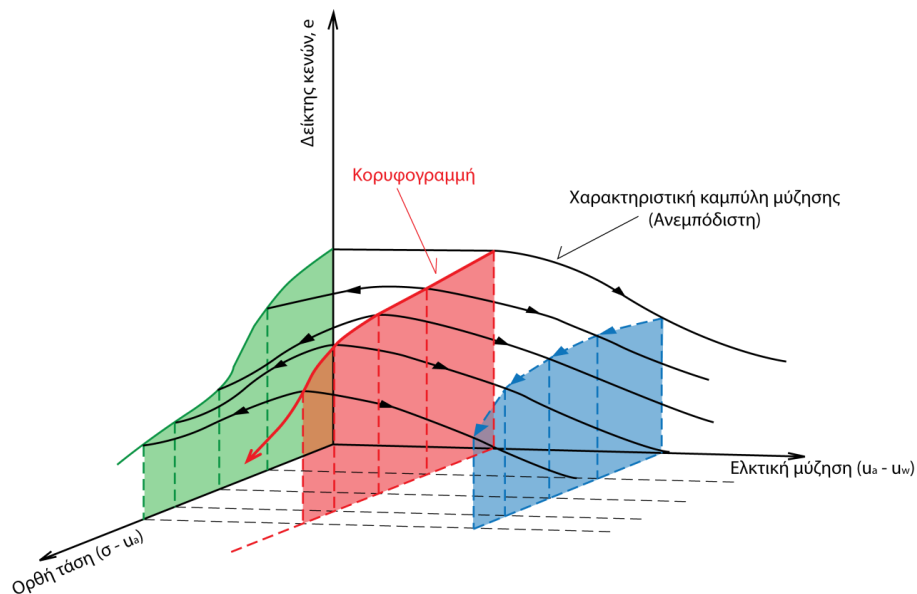
— " Παρατηρείται πώς η συμπεριφορά της μεταβολής όγκου του εδάφους μετά-σταθερής δομής διαφέρει σημαντικά στο γεγονός ότι τόσο η αύξηση όσο και η

μείωση της μύζησης οδηγούν σε μείωση του όγκου με την εμφάνιση μίας 'κορυφογραμμής' κατά μήκος των καταστατικών επιφανειών."

Ο παραπάνω ορισμός δίνεται σχηματικά στην εικόνα (18) (Fredlund & Rahardjo, 1993), όπου πρόκειται για μία τρισδιάστατη γραφική παράσταση στην οποία παρατηρείται η 'κορυφογραμμή' κατά μήκος των επιφανειών (κόκκινο χρώμα).



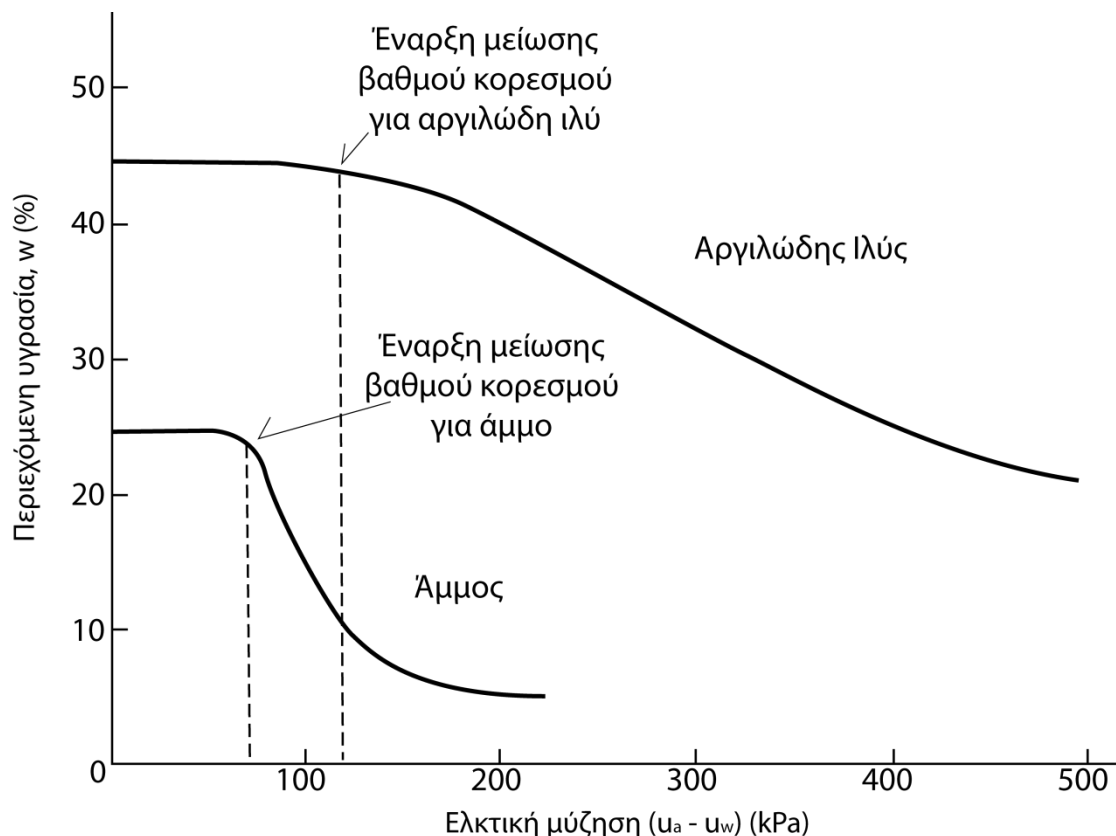
Εικόνα 17. Καταστατικές επιφάνειες μεταβολής όγκου σε συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης για ακόρεστο έδαφος σταθερής δομής (κατά Fredlund & Rahardjo, 1993, εικόνα από Χατζηγώγο, 2015).



Εικόνα 18. Καταστατικές επιφάνειες μεταβολής όγκου σε συνθήκες φόρτισης και αποφόρτισης για ακόρεστο έδαφος μετά-σταθερής δομής (κατά Fredlund & Rahardjo, 1993, εικόνα από Χατζηγώγο, 2015).

4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΥΖΗΣΗΣ

Όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις του υποκεφαλαίου 4.1 των εντατικών καταστάσεων ενός ακόρεστου εδάφους φανερώνουν ότι είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας σχέσης που να μπορεί να αποδώσει σχηματικά τη μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας (ή του βαθμού κορεσμού) με την τιμή της μύζησης. Η σχέση αυτή είναι χαρακτηριστική για κάθε εδαφικό σχηματισμό και ονομάζεται Χαρακτηριστική Καμπύλη Εδάφους - Νερού ή Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης Εδάφους (ΧΚΜΕ). Στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία αναφέρεται ως Soil - Water Characteristic Curve. Η καμπύλη είναι χαρακτηριστική για κάθε σχηματισμό, όπως φαίνεται στην εικόνα (19), και η γνώση της είναι απαραίτητη για την ποσοτική απόδοση της ακόρεστης συμπεριφοράς του εδάφους.



Εικόνα 19. Τυπικές Χαρακτηριστικές Καμπύλες Μύζησης Εδάφους (κατά Fredlund & Rahardjo, 1993, εικόνα από Χατζηγώγο, 2015).

Η γνώση της ΧΚΜΕ δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της τιμής της μύζησης του εδάφους μέσω της απλής εργαστηριακής μέτρησης της περιεχόμενης υγρασίας ή του βαθμού κορεσμού. Η τιμή της μύζησης του εδάφους σε συνδυασμό με την τιμή ϕ_b

οδηγεί σε εκτίμηση των χαρακτηριστικών αντοχής του εδάφους και της μεταβολής τους σε σχέση με τις μεταβολές του βαθμού κορεσμού με χρήση των εξισώσεων του πίνακα (6).

Στα επόμενα κεφάλαια περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής Ιλυώδους ΑΜΜΟΥ από την περιοχή του Διδυμοτείχου, προσομοιώνοντας κορεσμένες και ακόρεστες συνθήκες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

5.1 ΑΝΑΓΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Τις τελευταίες δεκαετίες η έρευνα εδαφών σε ακόρεστες συνθήκες και ο προσδιορισμός των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών τους έχει διευρυνθεί, ανοίγοντας ένα μεγάλο πεδίο έρευνας λόγω της ανάπτυξης πειραματικών διατάξεων με δυνατότητες ελέγχου των πιέσεων του αέρα και του νερού στους πόρους ενός εδαφικού δείγματος. Το πεδίο αυτό αφορά την εργαστηριακή προσομοίωση της μύζησης ακόρεστων εδαφών σε συνδυασμό με τη διεξαγωγή δοκιμών (τριαξονική και άμεση διάτμηση) στις συγκεκριμένες συνθήκες. Οι ανάγκες της παρούσας έρευνας αφορούν:

- Την κατανόηση και αριθμητική προσέγγιση των αρνητικών πιέσεων που δημιουργούνται σε ένα ακόρεστο έδαφος. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της άμεσης ή έμμεσης μέτρησης της εδαφικής μύζησης.
- Τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δοκιμών με την υπάρχουσα υγρασία, κατά τον κορεσμό και κάτω από συγκεκριμένη τιμή μύζησης που να προσομοιώνει το έδαφος στις πραγματικές του συνθήκες. Η σύγκριση αυτή μπορεί να μας δώσει πολύ χρήσιμα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του εδάφους και τις αποκλίσεις που μπορεί να υπάρχουν, ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά κατά τον σχεδιασμό του τεχνικού έργου, μεταξύ των συνθηκών (κορεσμένες - ακόρεστες).
- Τη δημιουργία εργαστηριακής προσομοίωσης κύκλων στατικής φόρτισης του εδάφους, όπου προσομοιώνονται οι μεταβολές του εντατικού πεδίου εξαιτίας των εποχιακών αλλά και τυχαίων μεταβολών του βαθμού κορεσμού των εδαφών. Αυτό μπορεί να μας δώσει χρήσιμα συμπεράσματα ως προς το σχεδιασμό, τη συντήρηση και το χρόνο ζωής του τεχνικού έργου.
- Τέλος την καταχώρηση πληροφοριών σχετικά με τη Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης Εδάφους. Αυτό αφορά τόσο στη δημοσίευση ΧΚΜΕ για

όσο το δυνατόν περισσότερους εδαφικούς σχηματισμούς (γεωυλικά), όσο και στον εμπλουτισμό βάσεων δεδομένων προγραμμάτων γεωτεχνικών υπολογισμών, όπου με την πάροδο των χρόνων θα μπορούν να δώσουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

5.2 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή και θα αναλυθεί στο κεφάλαιο (5.3) δίνει τη δυνατότητα εκτέλεσης δοκιμών: μονοδιάστατης στερεοποίησης μέσω της εφαρμογής επιθυμητού αξονικού φορτίου σε κορεσμό (ή όχι) του εδαφικού δείγματος, προσομοίωσης των ακόρεστων συνθηκών μέσω της εξισορρόπησης της πίεσης του νερού σε σχέση με την πίεση του αέρα των πόρων στην επιθυμητή τιμή μύζησης και άμεσης διάτμησης σε οποιαδήποτε από τις παραπάνω συνθήκες. Οι παραπάνω διαδικασίες (δοκιμές) για να θεωρηθούν έγκυρες και να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα τους με παρόμοιες δημοσιευμένες δοκιμές πρέπει να πληρούν ορισμένες προδιαγραφές όπως ορίζουν διάφοροι παγκόσμιοι οργανισμοί προτύπων, μεταξύ αυτών οι μεγαλύτερες: American Society of Testing and Materials (ASTM) και American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

Κατά την εκτέλεση των δοκιμών της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν οι περιορισμοί/προδιαγραφές που δίνονται στον πίνακα (7):

Πίνακας 7. Περιορισμοί και προδιαγραφές που ακολουθήθηκαν κατά την εκπόνηση των δοκιμών.

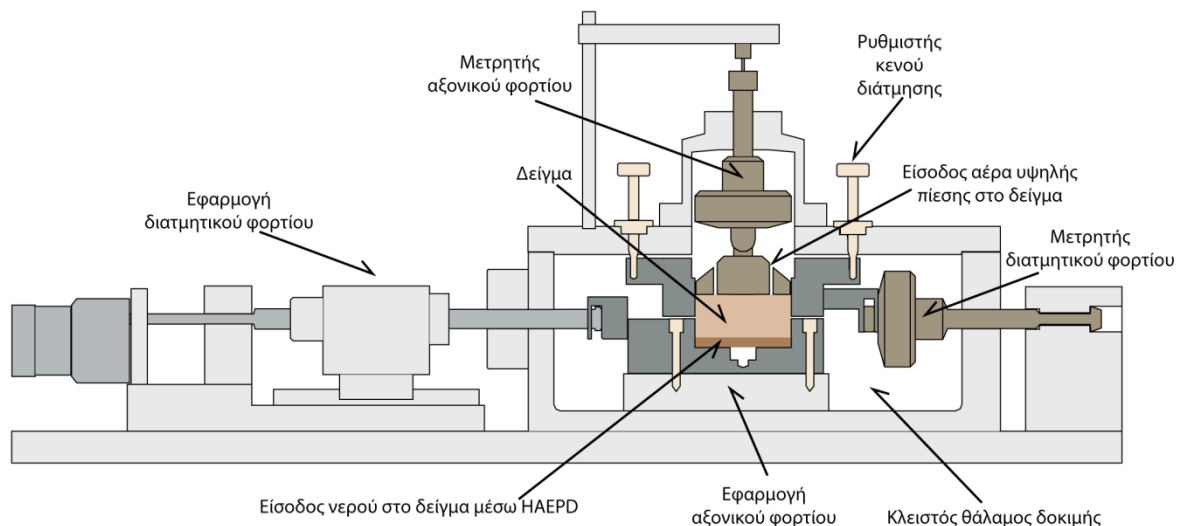
Περιορισμοί και προδιαγραφές των δοκιμών της παρούσας διατριβής		
1	Διάρκεια κορεσμού δείγματος	τουλάχιστον για εικοσιτέσσερις (24) ώρες με πίεση του νερού των πόρων 50 kPa και έλεγχος ολοκλήρωσης της διαδικασίας με παρατήρηση της ανώτερης επιφάνειας του δείγματος.
2	Στερεοποίηση του δείγματος	μέχρι να σταματήσει η αποστράγγιση του δείγματος και αξονική μετατόπιση να έχει μεταβολή $< 0,01$ mm/d.
3	Αστοχία δείγματος κατά τη διάτμηση	όταν επιτευχθεί 20% διατμητική παραμόρφωση στο δείγμα (ASTM D3080-90).
4	Ταχύτητα διάτμησης	από 0,0025 έως 1,00 mm/min. (ASTM D3080-90).
5	Ολοκλήρωση σταδίου για τη δημιουργία της ΧΚΜΕ	όταν η μεταβολή του όγκου του νερού των πόρων είναι $30 \text{ mm}^3/\text{d}$ (απόκλιση ελεγκτή πίεσης νερού).

5.3 ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής για την εκτέλεση των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η αυτοματοποιημένη συσκευή δοκιμών άμεσης διάτμησης κλειστού τύπου με δυνατότητα ελέγχου των πιέσεων των πόρων της GDS (μοντέλο: Saturated/Unsaturated Back Pressured Shearbox "GDSBPS") που διαθέτει το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., που επιτρέπει τον έλεγχο της ελκτικής μύζησης κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της άμεσης διάτμησης.

Η διάταξη της συσκευής δίνεται στην εικόνα (20) σε τομή όπου παρατηρούνται βασικά χαρακτηριστικά όπως:

- ο κλειστός θάλαμος ελέγχου της πίεσης του αέρα,
- η θέση του δείγματος που βρίσκεται σε επαφή με τον πυρόλιθο υψηλής πίεσης εισόδου αέρα (HAEPD) 500 kPa (5 bar),
- η είσοδος του νερού μέσω του HAEPD στο δείγμα,
- η εφαρμογή του αξονικού φορτίου και ο μετρητής της αξονικής μετατόπισης/δύναμης/πίεσης,
- η εφαρμογή του διατμητικού φορτίου και ο μετρητής της οριζόντιας μετατόπισης/δύναμης/πίεσης.

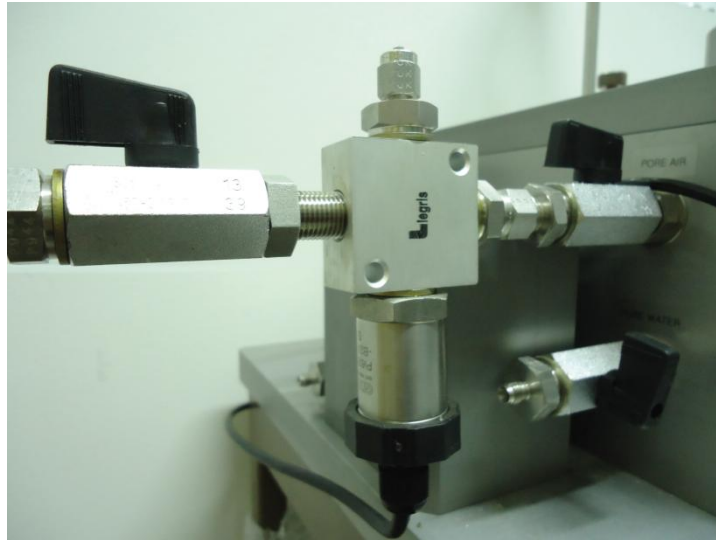


Εικόνα 20. Διάταξη συσκευής άμεσης διάτμησης κλειστού τύπου με δυνατότητα ελέγχου των πιέσεων των πόρων (τροποποιημένη από GDS Specification Datasheet, 2009 ως προς τα χρώματα και το υπόμνημα).

Ο έλεγχος της ελκτικής μύζησης από την υπάρχουσα συσκευή γίνεται μέσω της μεταβολής της αξονικής αναφοράς των πιέσεων, δηλαδή, η πίεση του αέρα και του νερού των πόρων που εφαρμόζεται το δοκίμιο ελέγχονται από ηλεκτρονικούς ελεγκτές υψηλής ακρίβειας (controllers), όπως φαίνονται στην εικόνα (21). Για την αποφυγή σφαλμάτων λόγω διαφορετικών πιέσεων μέσα στο θάλαμο γίνεται έλεγχος των πιέσεων που ασκούνται στο δείγμα, μετά από τους ελεγκτές και πριν από το θάλαμο, μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών υψηλής ακρίβειας (transducers), όπως φαίνονται στην εικόνα (22).



Εικόνα 21. (α) Ηλεκτρονικός ελεγκτής υψηλής ακρίβειας νερού "Standard Pressure/Volume Controller (STDDPC) v2", (β) Πνευματικός ελεγκτής υψηλής ακρίβειας αέρα " Pneumatic Pressure Controller (GDSPPC)".



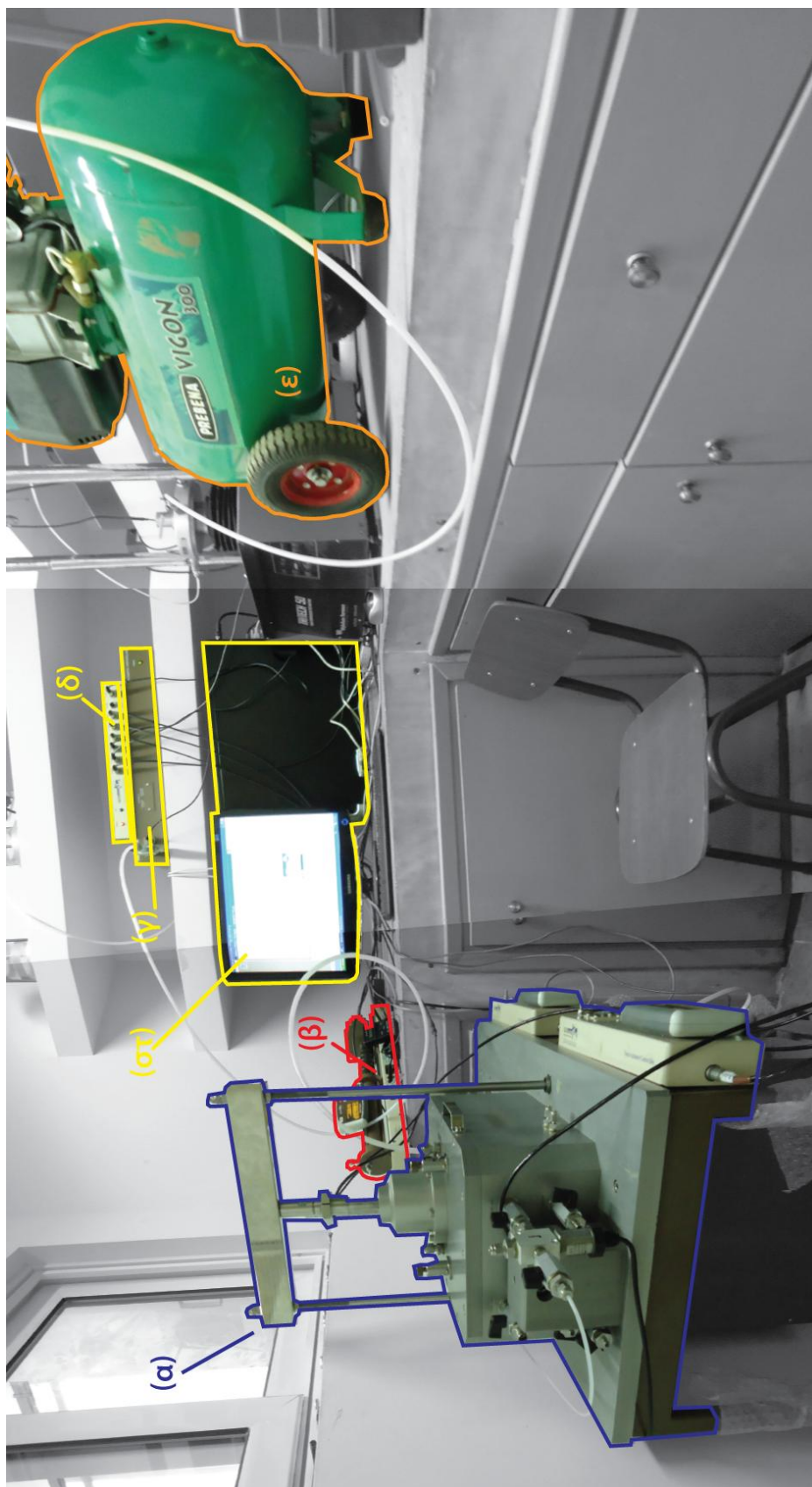
Εικόνα 22. Ηλεκτρονικός μετατροπέας υψηλής ακρίβειας (transducer) για τον έλεγχο των μετρήσεων μέσα στο θάλαμο.

Η εφαρμογή της πίεσης του αέρα στο δείγμα γίνεται από γεννήτρια συμπίεσης αέρα μέγιστης πίεσης 800 kPa (8 bar), ο οποίος στη συνέχεια αποθηκεύεται σε θάλαμο τριακοσίων (300) λίτρων. Η εισαγωγή του αέρα στον θάλαμο ρυθμίζεται από τον πνευματικό ελεγκτή (εικόνα 21 (α)) με μέγιστη πίεση στην εξαγωγή 2000 kPa (20 bar) και ακρίβεια μέτρησης $\pm 0,1$ kPa.

Η υποβολή του νερού γίνεται μέσω δυναμικού εμβολοφόρου ελεγκτή (εικόνα 21 (α)) με χωρητικότητα 200cc, εύρος 2000 kPa (20 bar) και ακρίβεια μέτρησης $\leq 0,25\%$ ή $\pm 30\text{mm}^3$.

Η συνολική πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε (εικόνα 23) βρίσκεται στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. σε ξεχωριστό κλειστό θάλαμο με έλεγχο της θερμοκρασίας του χώρου κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Η καταγραφή των δεδομένων, από κάθε ελεγκτή και μετατροπέα, έγινε σε κονσόλα οχτώ (8) καναλιών που μεταφέρει τα δεδομένα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η αποτύπωση των δεδομένων και ο χειρισμός της πειραματικής διάταξης έγινε μέσω του προγράμματος GDSLAB που συνοδεύεται από κλειδί γνησιότητας.

Σε όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν αναζυμωμένα εδαφικά δείγματα στη φυσική τους υγρασία και κορεσμένα με μέτρηση πριν και μετά από κάθε δοκιμή.



Εικόνα 23. Συνολική πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε και αποτελείται από: (α)Συσκευή διάτμησης, (β)Ελεγκτή πιέσεων νερού, (γ)Ελεγκτή πιέσεων αέρα, (δ)Κονσόλα δεδομένων οχτώ (8) καναλιών, (ε)Γεννήτρια συμπίεσης αέρα και (στ)Ηλεκτρονικό υπολογιστή.

5.3.1 Άμεση Διάτμηση Σε Κορεσμό

Πρόκειται για βραδεία δοκιμή διάτμησης όπου έχει προηγηθεί κορεσμός και στερεοποίηση του δοκιμίου. Ο κορεσμός επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής αντιπίεσης νερού στο δείγμα με την παράλληλη εφαρμογή αξονικού φορτίου ελαφρώς μεγαλύτερου της πίεσης του νερού ώστε να μην έχουμε διόγκωση του δείγματος. Εφόσον πραγματοποιηθεί ο κορεσμός ακολουθεί η στερεοποίηση του δείγματος, σε αποστραγγιζόμενες συνθήκες, με το επιθυμητό αξονικό φορτίο ανά περίπτωση. Μετά τη στερεοποίηση και όταν επιτευχθεί ισορροπία στο δείγμα (σταθεροποίηση της αξονικής μετατόπισης) πραγματοποιείται διάτμηση μέχρι το 20% της διατμητικής παραμόρφωσης του δείγματος. Από το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης υπολογίζεται η μέγιστη (peak) και υπολειμματική (residual) αντοχή (τ , τ_r) του δείγματος.

5.3.2 Άμεση Διάτμηση Με Έλεγχο πίεσης Αέρα και Νερού των Πόρων

Πρόκειται για δοκιμή με στάδια όπως αυτά της διάτμησης σε κορεσμό (υποκεφάλαιο 5.3.1) με τη διαφορά πως η διάτμηση πραγματοποιείται για συγκεκριμένη τιμή μύζησης. Τα στάδια του κορεσμού και της στερεοποίησης πραγματοποιούνται όπως αναφέρθηκαν στο υποκεφάλαιο (5.3.1). Στη συνέχεια υπολογίζεται η διαφορά πίεσης αέρα - νερού που πρέπει να εφαρμοστεί στο δείγμα ώστε να προσομοιώνεται η τιμή της μύζησης που θα πραγματοποιηθεί η διάτμηση. Εφαρμόζονται οι πιέσεις και αφήνεται το δείγμα να ισορροπήσει. Τέλος πραγματοποιείται διάτμηση όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο (5.3.1).

5.3.3 Προσομοίωση Κύκλων Ξήρανσης - Ύγρανσης του Εδάφους

Η συγκεκριμένη δοκιμή αφορά τη δημιουργία Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης με αύξηση της τιμής μύζησης μέχρι το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο του δίσκου υψηλής πίεσης εισόδου αέρα στη βάση της συσκευής και επαναφορά του στο αρχικό. Με αυτό τον τρόπο με ένα δείγμα είναι δυνατό να δημιουργηθούν δύο (2) καμπύλες που θεωρητικά πρέπει να δώσουν παρόμοια αποτελέσματα. Όσον αφορά τη διαδικασία, η οποία πραγματοποιείται σε σταθερή θερμοκρασία για)αρχικά πραγματοποιείται κορεσμός και στερεοποίηση του δείγματος όπως αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο (5.3.1). Στη συνέχεια πρέπει να δημιουργηθούν οι αρχικές συνθήκες ισορροπίας των πιέσεων νερού και αέρα των πόρων μέσα στο δείγμα. Στο αρχικό αυτό

στάδιο θα πρέπει η διαφορά πίεσης αέρα-νερού να είναι 5-10(kPa), δηλαδή ο βαθμός κορεσμού του δείγματος να βρίσκεται λίγο κάτω από το 100%.

Όταν επέλθει η ισορροπία του αρχικού σταδίου επιλέγεται ο αριθμός των σημείων που θεωρείται αναγκαίος για τη δημιουργία της καμπύλης και υπολογίζεται η διαφορά των πιέσεων σε κάθε στάδιο. Εφαρμόζονται οι πιέσεις και αφήνεται το δείγμα να ισορροπήσει. Το κάθε σημείο της καμπύλης αποτελείται από την τιμή της μύζησης και από τον τελικό όγκο του νερού που έχασε το δείγμα. Ο όγκος του νερού μεταφράζεται σε ποσοστό υγρασίας, ή βαθμού κορεσμού, για να χρησιμοποιηθεί στην καμπύλη. Για κάθε στάδιο επαναλαμβάνεται η διαδικασία.

Όταν επιτευχτεί η μέγιστη τιμή μύζησης επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία ανάποδα μέχρι την αρχική τιμή μύζησης. Η δεύτερη καμπύλη ονομάζεται καμπύλη επαναφοράς.

5.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύθηκαν οι δυνατότητες της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή για το πειραματικό σκέλος της και πως αυτές μπορούν βοηθήσουν στις ανάγκες της έρευνας των ακόρεστων εδαφών. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών ολοκληρώθηκε μία σειρά διαδικασιών, κυρίως όσον αφορά στην εγκατάσταση και βαθμονόμηση της συσκευής για κάθε διαφορετική εργαστηριακή δοκιμή, και αποκτήθηκε η τεχνογνωσία της χρήσης μιας τόσο καινοτόμου συσκευής. Σημειώνεται πως απαιτήθηκε η εκτέλεση περισσότερων δοκιμών από αυτές που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή για την πλήρη κατανόηση της χρήσης της εν λόγω συσκευής.

Στα επόμενα τρία (3) κεφάλαια αναλύονται οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ανά κατηγορία, τα αποτελέσματα και η ερμηνεία τους μέσω διαγραμμάτων, καθώς και τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΣΕ ΚΟΡΕΣΜΕΝΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Βασικός σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η πραγματοποίηση δοκιμών για τη σύγκριση των μηχανικών παραμέτρων ενός γεωυλικού σε διαφορετικές φάσεις (κορεσμένη, ακόρεστη), και ο συσχετισμός των παραμέτρων αυτών με τις διαφορετικές συνθήκες που μπορεί να βρεθεί το υλικό επί τόπου. Ο συσχετισμός των παραμέτρων αναλύεται στο κεφάλαιο των συμπερασμάτων (Κεφάλαιο 9^ο). Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύονται δοκιμές σε κορεσμό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μεμονωμένα και συνολικά, και σχολιάζονται τα διάφορα συμπεράσματα και οι προβληματισμοί που προκύπτουν.

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον πίνακα (8) με τα βασικά χαρακτηριστικά της κάθε δοκιμής. Πρόκειται για δείγματα ίδιας σύστασης (κατάταξη κατά USCS: SM-SW) από δύο (2) διαφορετικές γεωτρήσεις.

Πίνακας 8. Πλήθος και χαρακτηριστικά δειγμάτων 6^{ου} κεφαλαίου.

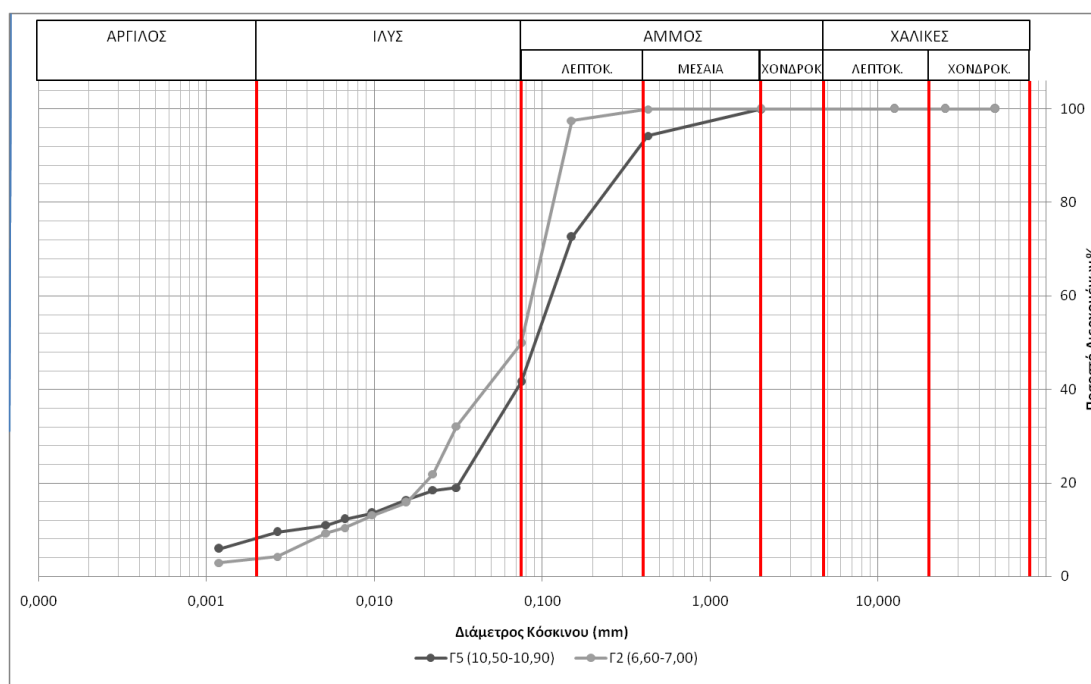
Αριθμός δείγματος	Πλήθος δειγμάτων	Είδος δοκιμής	Αξονικό φορτίο δοκιμής (kPa)	Κατάταξη δείγματος	Γεώτρηση	Βάθος
1	3	Διάτμηση σε κορεσμένες, στραγγιζόμενες συνθήκες	120 240 360	S1 (USCS: SM-SW)	Γ2	6.60 - 7.00
2	1		200	S1 (USCS: SM-SW)	Γ5	10.50 - 10.90

Η δοκιμή διάτμησης σε κορεσμό της γεώτρησης Γ5, σε βάθος 10,50-10,90 μέτρα, με αξονική φόρτιση 200 kPa πραγματοποιήθηκε για τη σύγκριση με τη δοκιμή δείγματος ίδιας σύστασης σε ακόρεστες συνθήκες με ίδιο αξονικό φορτίο που θα αναλυθεί στο κεφάλαιο 7.

Οι δοκιμές της γεώτρησης Γ2, σε βάθος 6,60-7,00 μέτρα, πραγματοποιήθηκαν με σκοπό το χαρακτηρισμό και τον προσδιορισμό των μηχανικών παραμέτρων υπό κορεσμένες συνθήκες και την σύγκριση αυτών υπό ακόρεστες στο κεφάλαιο 7.

Η κοκκομετρία των υλικών που πραγματοποιήθηκαν δοκιμές δίνονται στην εικόνα (24) (δεδομένα από Πίνακες 43, 44, 46 και 47, Παράρτημα), όπου πρόκειται για το στρώμα "S1" (βλ. κεφ. 2.2) και στις δύο (2) περιπτώσεις με παρόμοια κοκκομετρία, πιο συγκεκριμένα πρόκειται για ιλυώδη ΑΜΜΟ με ποσοστό άμμου πενήντα (50) έως εξήντα (60) τις εκατό και ποσοστό αργίλου μικρότερο του πέντε (5) τις εκατό.

Οι φυσικές ιδιότητες κατά τις δειγματοληψίες των γεωτρήσεων δίνονται στον πίνακα (9), ενώ οι φυσικές ιδιότητες κάθε δείγματος, πριν και μετά τη δοκιμή, συνοδεύουν τα διαγράμματα κάθε δοκιμής στο υποκεφάλαιο 6.2.



Εικόνα 24. Συγκεντρωτικό διάγραμμα κοκκομετρικών καμπυλών για τα δείγματα του έκτου (6^{ου}) κεφαλαίου, (δεδομένα από Πίνακες 43, 44, 46 και 47, Παράρτημα).

Πίνακας 9. Φυσικές ιδιότητες δειγμάτων κατά τη δειγματοληψία των γεωτρήσεων.

Γ2 (6,60 - 7,00)				
Φυσική Υγρασία	Φαινόμενο Βάρος	Ξηρό φαινόμενο Βάρος		Λόγος κενών
m (%): 29.30	γ (gr/cm ³): 1.81	γ _d (gr/cm ³): 1.40	ε _{αρχ} :	0.93
Γ5(10,50 - 10,90)				
Φυσική Υγρασία	Φαινόμενο Βάρος	Ξηρό φαινόμενο Βάρος		Λόγος κενών
m (%): 21.10	γ (gr/cm ³): 1.96	γ _d (gr/cm ³): 1.62	ε _{αρχ} :	0.67

6.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε σε όλα τα δείγματα του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η εξής:

- **Προετοιμασία και τοποθέτηση του δείγματος**

Όπως προαναφέρθηκε σε όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν αναζυμωμένα δείγματα λόγω το ότι δεν ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί δειγματοληψία αδιατάρακτου δείγματος. Η αναζύμωση του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε στη φυσική του υγρασία. Σκοπός της αναζύμωσης ήταν η διάσπαση όσο το δυνατόν περισσότερων συσσωματωμάτων (σε γουδί) για την καλύτερη τοποθέτηση του δείγματος στη συσκευή.

Η τοποθέτηση του δείγματος πραγματοποιήθηκε σε στρώσεις, οι οποίες διαμορφώθηκαν με ειδικό εργαλείο για την καλύτερη δυνατή πλήρωση του δοκιμίου. Κατά την τοποθέτηση του δείγματος αφαιρείται ποσότητα για τον προσδιορισμό της φυσικής υγρασίας του δείγματος πριν τη δοκιμή. Όταν επιτευχθεί το επιθυμητό ύψος, μετρίεται έμμεσα από το συνολικό ύψος του δειγματολήπτη (βλ. εικόνα 20 κεφ. 5.3) και σφραγίζεται η συσκευή.

- **Κορεσμός**

Εφόσον έχει τοποθετηθεί το δείγμα και η συσκευή έτοιμη για τη διεξαγωγή της δοκιμής ελέγχονται και μηδενίζονται, όσες είναι απαραίτητο, οι ενδείξεις των μετρήσεων που πρόκειται να καταγραφούν.

Το πρώτο στάδιο αφορά τον κορεσμό του δείγματος, ο οποίος πραγματοποιείται μέσω της επιβολής αντιπίεσης του νερού των πόρων στο κάτω μέρος ταυτόχρονα με την επιβολή αξονικού φορτίου στο πάνω μέρος του δείγματος. Σε όλες τις δοκιμές ο κορεσμός πραγματοποιήθηκε με πίεση του νερού στα σαράντα (40) kPa και αξονικό φορτίο στα πενήντα (50) kPa.

Ο χρόνος κορεσμού σε κάθε περίπτωση ήταν μεγαλύτερος από εικοσιτέσσερις (24) ώρες όπου: σταματούσε η δοκιμή, αποσυναρμολογούταν η συσκευή και γινόταν παρατήρηση για το αν υπήρχε περίσσεια νερού στην ανώτερη επιφάνεια του δείγματος. Το στάδιο του κορεσμού για κάθε δείγμα έχει καταγραφεί και παρατίθεται σε ηλεκτρονική μορφή (cd-rom).

Ο πίνακας (10) αποτελεί απόσπασμα από την καταγραφή δεδομένων κατά τη φάση κορεσμού του δοκιμίου και από την πλήρη καταγραφή δεκαεπτά (17) παραμέτρων παρουσιάζονται στο παράδειγμα οι επτά (7) που μεταβάλλονται κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία.

- **Στερεοποίηση**

Η στερεοποίηση πραγματοποιήθηκε με την επιβολή αξονικού φορτίου στα δείγματα και δυνατότητα αποστράγγισης του νερού των πόρων.

Το αξονικό φορτίο μεταβαλλόταν κάθε φορά ανάλογα με τις ανάγκες προσομοίωσης του δείγματος. Τα δείγματα υποβλήθηκαν σε στερεοποίηση με τα εξής φορτία: στο δείγμα Γ5 (10,50m - 10,90m) 200 kPa και στο δείγμα Γ2 (6,60m - 7,00m) 120, 240 και 360 kPa.

Το συγκεκριμένο στάδιο διήρκησε μέχρι η καταγραφή της αξονικής μετατόπισης να παρουσιάζει μεταβολή μικρότερη από 0,001 mm/d. Το στάδιο της στερεοποίησης για κάθε δείγμα έχει καταγραφεί και παρατίθεται σε ηλεκτρονική μορφή (cd-rom).

Ο πίνακας (11) αποτελεί απόσπασμα από την καταγραφή δεδομένων κατά τη φάση στερεοποίησης του δοκιμίου και από την πλήρη καταγραφή δεκαεπτά (17) παραμέτρων παρουσιάζονται στο παράδειγμα οι τέσσερις (4) που μεταβάλλονται κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία.

- **Διάτμηση**

Η διάτμηση σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκε με σταθερή ταχύτητα διάτμησης στα 0,002 mm/sec (0,12 mm/min). Από τις καταχωρήσεις των δεδομένων προκύπτει η μέγιστη οριζόντια πίεση που ασκείται στο δείγμα ή μέγιστη διατμητική αντοχή του. Το στάδιο της διάτμησης για κάθε δείγμα έχει καταγραφεί και παρατίθεται σε ηλεκτρονική μορφή (cd-rom).

Ο πίνακας (12) αποτελεί απόσπασμα από την καταγραφή δεδομένων κατά τη φάση διάτμησης του δοκιμίου και από την πλήρη καταγραφή δεκαεπτά (17) παραμέτρων παρουσιάζονται στο παράδειγμα οι επτά (7) που μεταβάλλονται κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία.

Πίνακας 10. Παράδειγμα καταχώρησης δεδομένων κατά τη διαδικασία του κορεσμού, το σύνολο των καταχωρήσεων συνοδεύει τη διατριβή σε ηλεκτρονική μορφή (βλ. cd-rom).

Stage Number	Time since start of stage (s)	Axial Displacement (mm)	Axial Load (kN)	Pore Water Pressure (kPa)	Back Pressure (kPa)	Back Volume (mm ³)	Axial Strain (%)	Normal Stress (kPa)
1	0	3.9485	0.226	0.0182	40	-1	15.1865	40.6547
1	10	3.9893	0.276	0.0182	40	-263	15.3435	49.6491
1	20	4.0096	0.277	0.0182	40	-291	15.4215	49.829
1	30	4.024	0.277	0.0182	40	-313	15.4769	49.829
1	40	4.0368	0.278	0.0182	39	-336	15.5262	50.0089
1	50	4.0466	0.277	3.6622	40	-354	15.5638	49.829
1	60	4.0542	0.277	3.6622	40	-371	15.5931	49.829
1	70	4.0617	0.277	3.6622	40	-391	15.6219	49.829
1	80	4.0678	0.277	0.0182	40	-410	15.6454	49.829
1	90	4.0731	0.277	0.0198	40	-429	15.6658	49.829
1	100	4.0784	0.277	0.0182	39	-446	15.6862	49.829
1	110	4.0829	0.278	0.0182	40	-464	15.7035	50.0089
1	120	4.0867	0.277	40.0003	40	-486	15.7181	49.829
1	130	4.0904	0.277	40.0003	40	-501	15.7323	49.829
1	140	4.095	0.277	40.0003	40	-521	15.75	49.829
1	150	4.0987	0.278	40.0003	40	-543	15.7642	50.0089
1	160	4.1018	0.277	40.0003	40	-558	15.7762	49.829
1	170	4.1055	0.277	40.0003	40	-575	15.7904	49.829
1	180	4.1086	0.277	40.0003	40	-593	15.8023	49.829
1	190	4.1116	0.277	40.0003	40	-540	15.8138	49.829
1	200	4.1146	0.278	40.0003	40	-558	15.8254	50.0089
1	210	4.1169	0.277	40.0003	40	-549	15.8342	49.829
1	260	4.1206	0.26	40.0003	39	-675	15.8485	46.7709
1	270	4.1252	0.277	40.0003	39	-694	15.8662	49.829

Πίνακας 11. Παράδειγμα καταχώρησης δεδομένων κατά τη διαδικασία της στερεοποίησης, το σύνολο των καταχωρήσεων συνοδεύει τη διατριβή σε ηλεκτρονική μορφή (βλ. cd-rom).

Stage Number	Time since start of stage (s)	Axial Displacement (mm)	Axial Load (kN)	Axial Strain (%)	Normal Stress (kPa)
2	20	7.2884	1.0980	28.0323	199.5214
2	40	7.3956	1.0990	28.4446	199.7031
2	60	7.4522	1.0990	28.6623	199.7031
2	80	7.4900	1.0990	28.8077	199.7031
2	100	7.5164	1.1000	28.9092	199.8848
2	120	7.5391	1.1000	28.9965	199.8848
2	140	7.5557	1.1000	29.0604	199.8848
2	160	7.5700	1.1000	29.1154	199.8848
2	180	7.5806	1.1000	29.1562	199.8848
2	200	7.5897	1.1000	29.1912	199.8848
2	220	7.5987	1.1000	29.2258	199.8889
2	240	7.6063	1.1000	29.2550	199.8848
2	260	7.6116	1.1000	29.2754	199.8848
2	280	7.6168	1.1000	29.2954	199.8889
2	300	7.6206	1.1000	29.3100	199.8848
2	320	7.6244	1.1010	29.3246	200.0706
2	340	7.6274	1.1010	29.3362	200.0665
2	360	7.6304	1.1000	29.3477	199.8848
2	380	7.6335	1.1000	29.3596	199.8848
2	400	7.6357	1.1000	29.3681	199.8848
2	420	7.6387	1.1000	29.3796	199.8848
2	440	7.6410	1.1000	29.3885	199.8848
2	460	7.6433	1.1000	29.3973	199.8848
2	480	7.6448	1.1010	29.4031	200.0665
2	500	7.6463	1.1000	29.4088	199.8848
2	520	7.6478	1.1000	29.4146	199.8848
2	540	7.6486	1.1000	29.4177	199.8889
2	560	7.6501	1.1010	29.4235	200.0665
2	580	7.6516	1.1000	29.4292	199.8848

Πίνακας 12. Παράδειγμα καταχώρησης δεδομένων κατά τη διαδικασία της διάτμησης, το σύνολο των καταχωρήσεων συνοδεύει τη διατριβή σε ηλεκτρονική μορφή (βλ. cd-rom).

Stage Number	Time since start of stage (s)	Axial Displacement (mm)	Axial Load (kN)	Horizontal Displacement (mm)	Horizontal Load (kN)	Horizontal Stroke (mm)	Horizontal Strain (%)	Horizontal Stress (kPa)
3	0	7.7618	1.1250	0.0015	-0.0100	0.1000	0.0082	-1.7778
3	20	7.7618	1.1260	0.0015	-0.0090	0.1000	0.0082	-1.6000
3	120	7.7618	1.1260	0.0015	-0.0060	0.1000	0.0082	-1.0667
3	240	7.7581	1.1130	0.0015	-0.0310	0.1000	0.0082	-5.5112
3	340	7.7581	1.1230	0.0015	-0.0280	0.0000	0.0082	-4.9779
3	380	7.8222	0.9530	0.7537	-0.3510	-0.8760	4.1463	-63.0334
3	400	7.8389	1.1120	0.7537	-0.3610	-0.8770	4.1501	-64.8293
3	420	7.8509	1.1130	0.7750	-0.3830	-0.8970	4.2702	-68.7998
3	440	7.8577	1.1130	0.7932	-0.3970	-0.9170	4.3721	-71.3322
3	460	7.8645	1.1130	0.8145	-0.4080	-0.9370	4.4912	-73.3297
3	480	7.8698	1.1120	0.8358	-0.4180	-0.9570	4.6100	-75.1486
3	500	7.8743	1.1120	0.8540	-0.4240	-0.9770	4.7115	-76.2460
3	540	7.8789	1.0770	0.8692	-0.3990	-0.9900	4.7966	-71.7650
3	560	7.8842	1.1110	0.8981	-0.4430	-1.0190	4.9576	-79.7101
3	580	7.8902	1.1100	0.9376	-0.4590	-1.0590	5.1773	-82.6330
3	600	7.8978	1.1100	0.9817	-0.4680	-1.0990	5.4231	-84.3035
3	620	7.9045	1.1090	1.0197	-0.4740	-1.1380	5.6351	-85.4281
3	640	7.9121	1.1090	1.0592	-0.4810	-1.1790	5.8558	-86.7361
3	660	7.9212	1.1080	1.1032	-0.4890	-1.2190	6.1022	-88.2312
3	680	7.9302	1.1070	1.1443	-0.4950	-1.2590	6.3327	-89.3634
3	700	7.9385	1.1070	1.1853	-0.5020	-1.2980	6.5626	-90.6775
3	720	7.9461	1.1060	1.2263	-0.5080	-1.3390	6.7924	-91.8123
3	740	7.9536	1.1050	1.2674	-0.5130	-1.3790	7.0230	-92.7677
3	760	7.9619	1.1050	1.3084	-0.5170	-1.4180	7.2535	-93.5430
3	780	7.9680	1.1040	1.3509	-0.5210	-1.4590	7.4917	-94.3211
3	800	7.9755	1.1040	1.3950	-0.5280	-1.4990	7.7395	-95.6457
3	820	7.9823	1.1030	1.4360	-0.5350	-1.5390	7.9699	-96.9677
3	840	7.9891	1.1030	1.4740	-0.5380	-1.5790	8.1839	-97.5619
3	860	7.9967	1.1020	1.5211	-0.5440	-1.6190	8.4490	-98.7132

6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

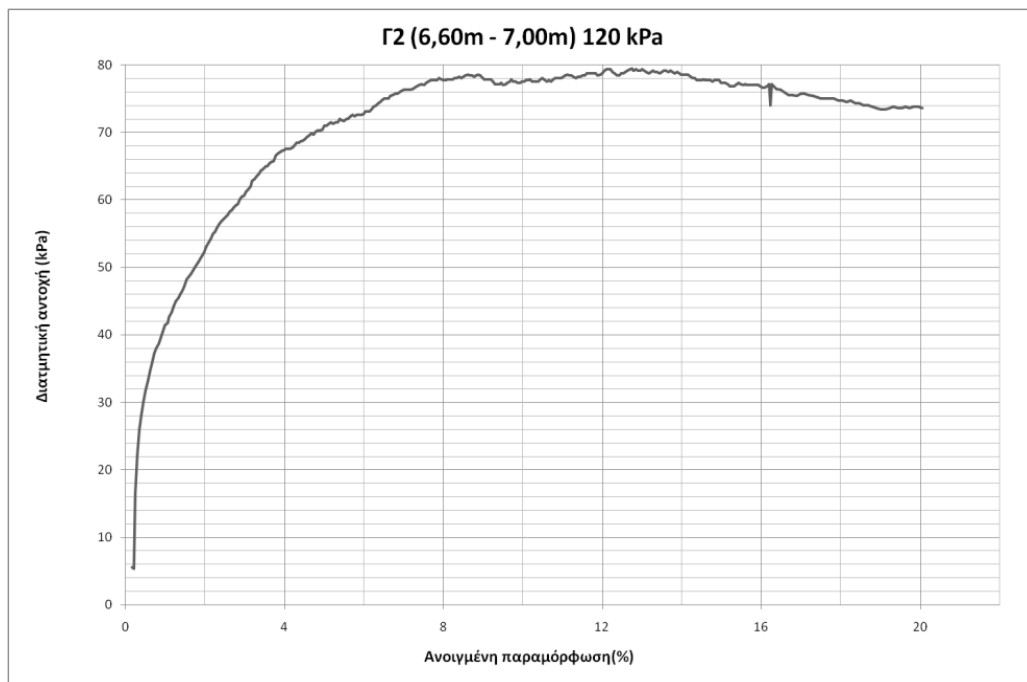
- **Για τα δείγματα της γεώτρησης Γ2 (6,60-7,00) πραγματοποιήθηκαν:**
 1. Διάτμηση σε κορεσμένες συνθήκες για στερεοποίηση στα 120 kPa. Στους πίνακες (13) και (14) παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά του δείγματος πριν και μετά τη δοκιμή αντίστοιχα, ενώ στις εικόνες (25) και (26) τα διαγράμματα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης και μεταβολής αξονικής μετατόπισης - παραμόρφωσης αντίστοιχα. Από το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης παρατηρείται ότι η μέγιστη διατμητική αντοχή (peak shear strength) είναι 80 kPa και αντιστοιχεί σε 13% παραμόρφωση, ενώ η παραμένουσα διατμητική αντοχή (residual shear strength) είναι 74 kPa για τιμές παραμόρφωσης πάνω από 18%. Στο διάγραμμα μεταβολής αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης παρατηρείται συρρίκνωση του δείγματος και από το σημείο που η διατμητική αντοχή φτάνει στη μέγιστη τιμή της η μετατόπιση του δείγματος παραμένει σταθερή.

Πίνακας 13. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ2 (6,60-7,00) στα 120 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 42, Παράρτημα.

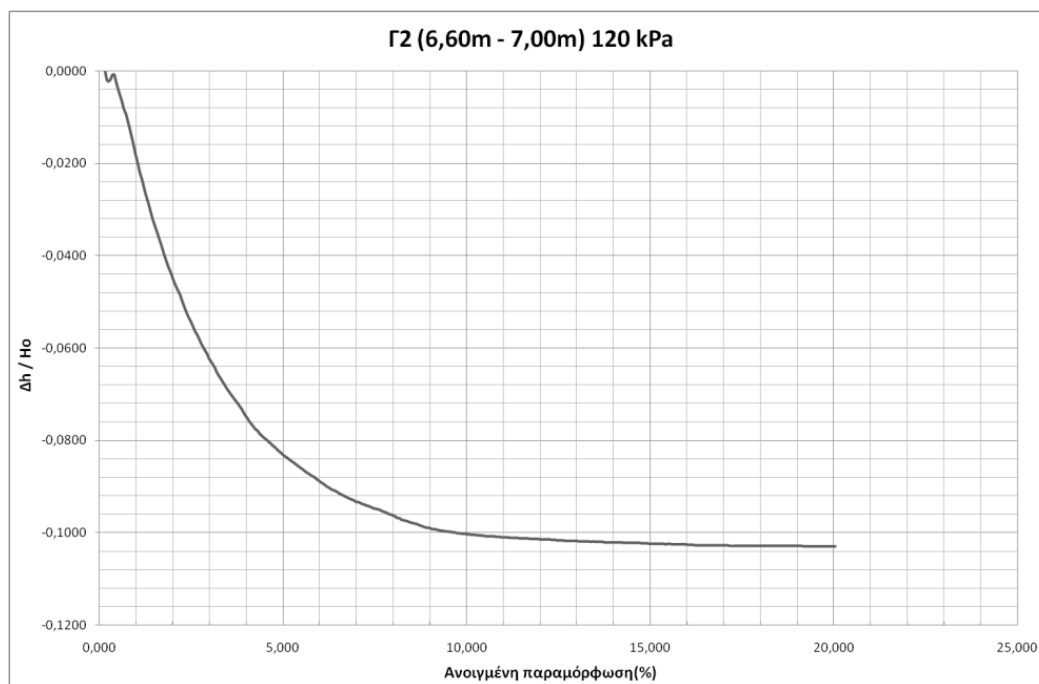
Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Αρχικό βάρος δείγματος	Αρχικός λόγος κενών
Ύψος (cm):	2.80	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm ³):	157.50	Ws (gr): 241.95	e _{αρχ} : 0.76
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος			Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		
m (%):			γ (gr/cm ³):		γ _d (gr/cm ³):		
20.88			1.86		1.54		

Πίνακας 14. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ2 (6,60-7,00) στα 120 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 42, Παράρτημα.

Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Βάρος δείγματος		Λόγος κενών
Ύψος (cm):	2.11	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm ³):	118.68	W: 295.59	A: 213.01	e: 0.50
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος				Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		
m (%):				γ (gr/cm ³):		γ _d (gr/cm ³):		
27.94				2.30		1.79		



Εικόνα 25. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ2 (6,60-7,00) στα 120 kPa.



Εικόνα 26. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ2 (6,60-7,00) στα 120 kPa.

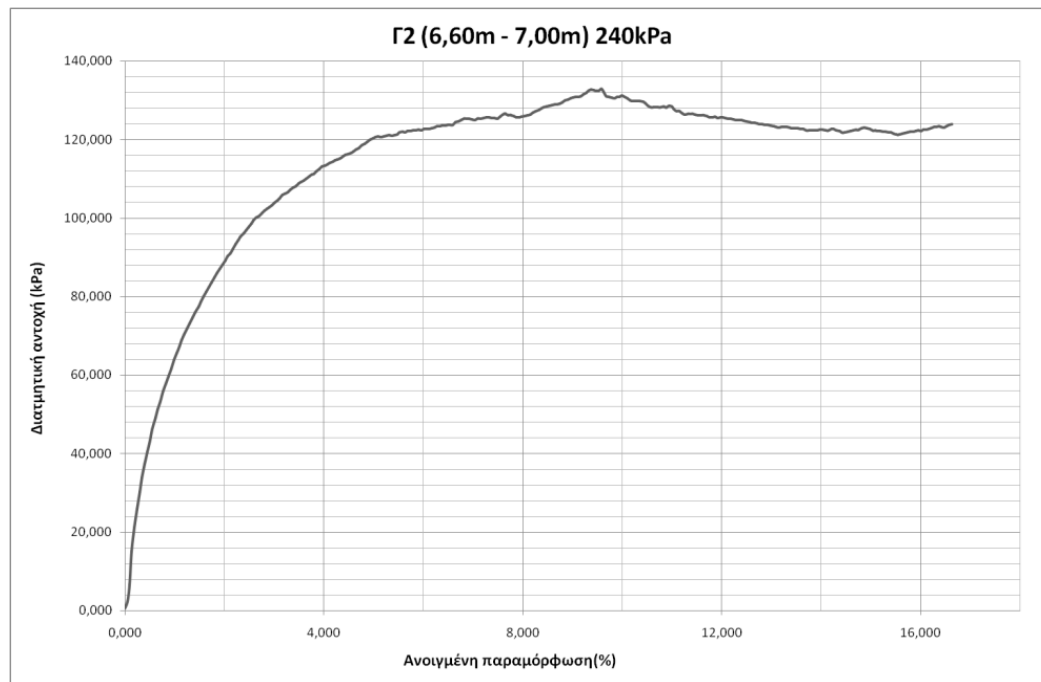
2. Διάτμηση σε κορεσμένες συνθήκες για στερεοποίηση στα 240 kPa. Στους πίνακες (15) και (16) παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά του δείγματος πριν και μετά τη δοκιμή, ενώ στις εικόνες (27) και (28) τα διαγράμματα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης και μεταβολής αξονικής μετατόπισης - παραμόρφωσης αντίστοιχα. Από το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης παρατηρείται ότι η μέγιστη διατμητική αντοχή είναι 133 kPa και αντιστοιχεί σε 9% παραμόρφωση, ενώ η παραμένουσα διατμητική αντοχή είναι 124 kPa για τιμές παραμόρφωσης πάνω από 13%. Στο διάγραμμα μεταβολής όγκου - παραμόρφωσης παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της διάτμησης στα 120 kPa, όμως αντί για σταθεροποίηση του όγκου παρατηρείται συνεχόμενη αύξηση με μειωμένη κατά πολύ κλίση. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι στο διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης δεν έχει επιτευχθεί πλήρως η παραμένουσα αντοχή. Στο διάγραμμα μεταβολής αξονικής μετατόπισης - παραμόρφωσης παρατηρείται συρρίκνωση του δείγματος και από το σημείο που η διατμητική αντοχή φτάνει στη μέγιστη τιμή της η μετατόπιση του δείγματος παραμένει σταθερή.

Πίνακας 15. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ2 (6,60-7,00) στα 240 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 42, Παράρτημα.

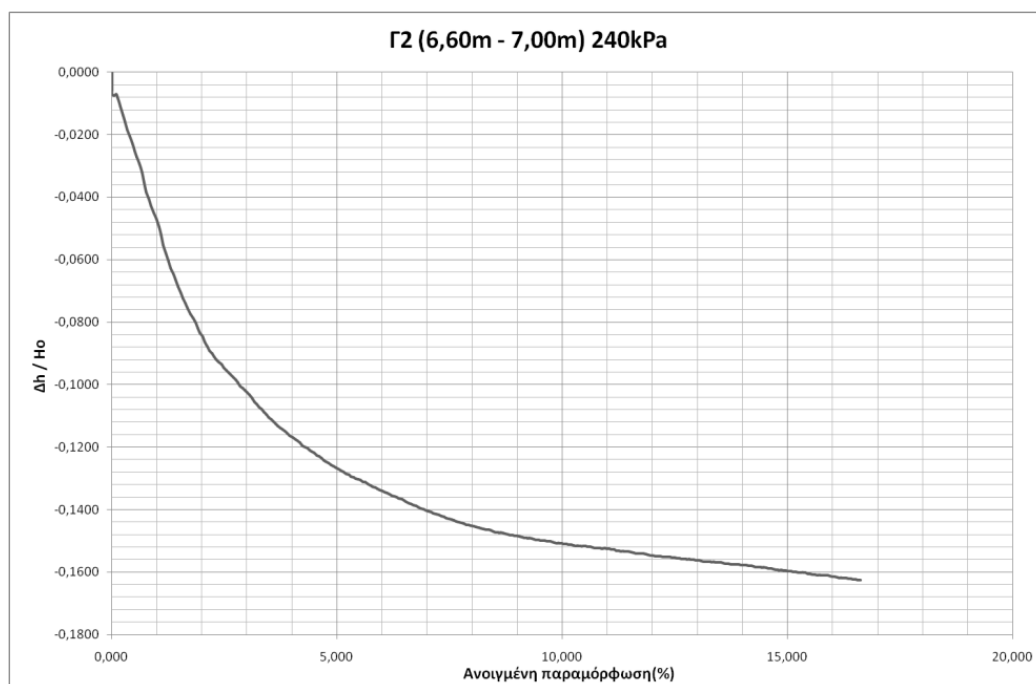
Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Αρχικό βάρος δείγματος	Αρχικός λόγος κενών
Ύψος (cm):	3.10	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm ³):	174.38	Ws (gr): 267.33	e _{αρχ} : 0.76
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος			Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		
m (%):			γ (gr/cm ³):		γ _d (gr/cm ³):		
21.13			1.86		1.53		

Πίνακας 16. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ2 (6,60-7,00) στα 240 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 42, Παράρτημα.

Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Βάρος δείγματος		Λόγος κενών
Ύψος (cm):	2.66	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm ³):	149.88	W: 362.90	W _d : 260.79	e: 0.55
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος				Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		
m (%):				γ (gr/cm ³):		γ _d (gr/cm ³):		
28.14				2.23		1.74		



Εικόνα 27. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ2 (6,60-7,00) στα 240 kPa.



Εικόνα 28. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ2 (6,60-7,00) στα 240 kPa.

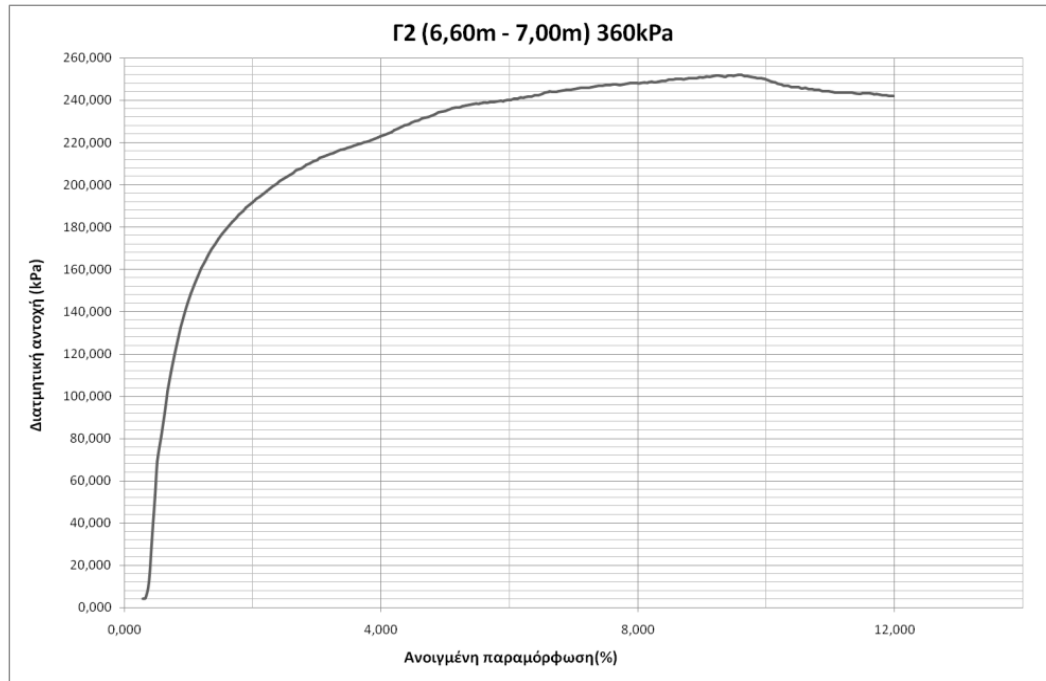
3. Διάτμηση σε κορεσμένες συνθήκες για στερεοποίηση στα 360 kPa . Στους πίνακες (17) και (18) παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά του δείγματος πριν και μετά τη δοκιμή, ενώ στις εικόνες (29) και (30) τα διαγράμματα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης και μεταβολής αξονικής μετατόπισης - παραμόρφωσης αντίστοιχα. Από το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης παρατηρείται ότι η μέγιστη διατμητική αντοχή είναι 252 kPa και αντιστοιχεί σε 9% παραμόρφωση, ενώ η παραμένουσα διατμητική αντοχή είναι 240 kPa για τιμές παραμόρφωσης πάνω από 11%. Στο διάγραμμα μεταβολής αξονικής μετατόπισης - παραμόρφωσης παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με τις δύο παραπάνω περιπτώσεις, όμως παρατηρείται μία μικρή διόγκωση του όγκου μετά το μέγιστο σημείο. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο αυξημένο αξονικό φορτίο, σε σχέση με τις δύο (2) προηγούμενες περιπτώσεις, το οποίο διατηρείται σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

Πίνακας 17. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ2 (6,60-7,00) στα 360 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 42, Παράρτημα.

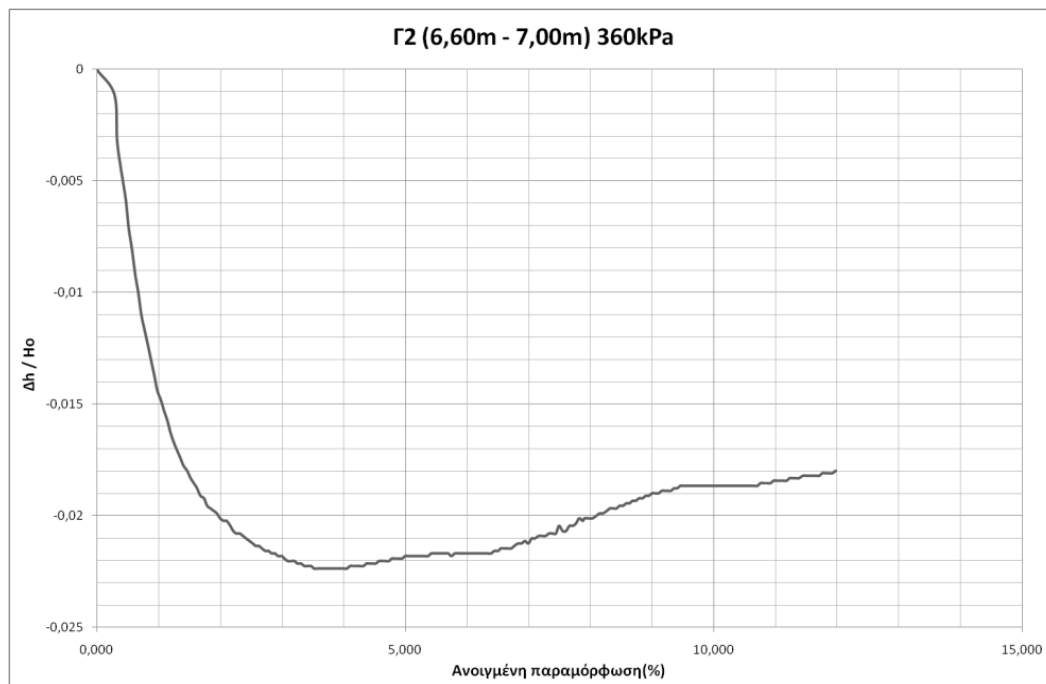
Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Αρχικό βάρος δείγματος	Αρχικός λόγος κενών
Ύψος (cm):	3.00	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm ³):	168.75	Ws (gr): 257.93	e _{αρχ} : 0.77
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος			Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		
m (%):			γ (gr/cm ³):		γ _d (gr/cm ³):		
21.49			1.86		1.53		

Πίνακας 18. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ2 (6,60-7,00) στα 360 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 42, Παράρτημα.

Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Βάρος δείγματος		Λόγος κενών
Ύψος (cm):	2.11	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm ³):	118.91	W: 320.48	W _d : 222.28	e: 0.44
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος				Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		
m (%):				γ (gr/cm ³):		γ _d (gr/cm ³):		
30.64				2.44		1.87		



Εικόνα 29. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ2 (6,60-7,00) στα 360 kPa.

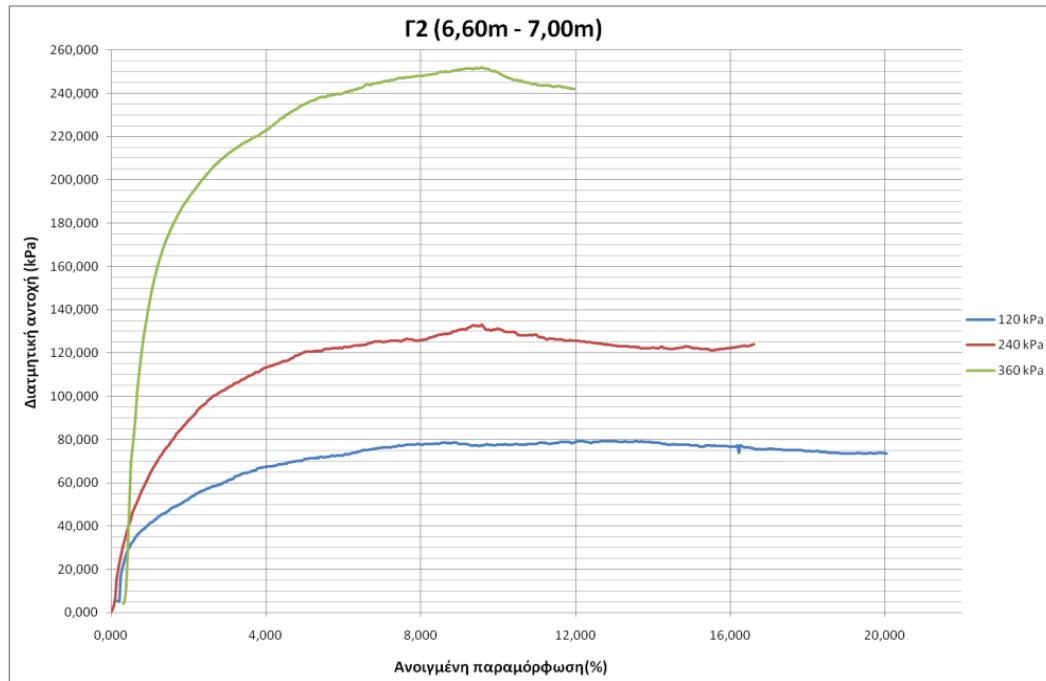


Εικόνα 30. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ2 (6,60-7,00) στα 360 kPa.

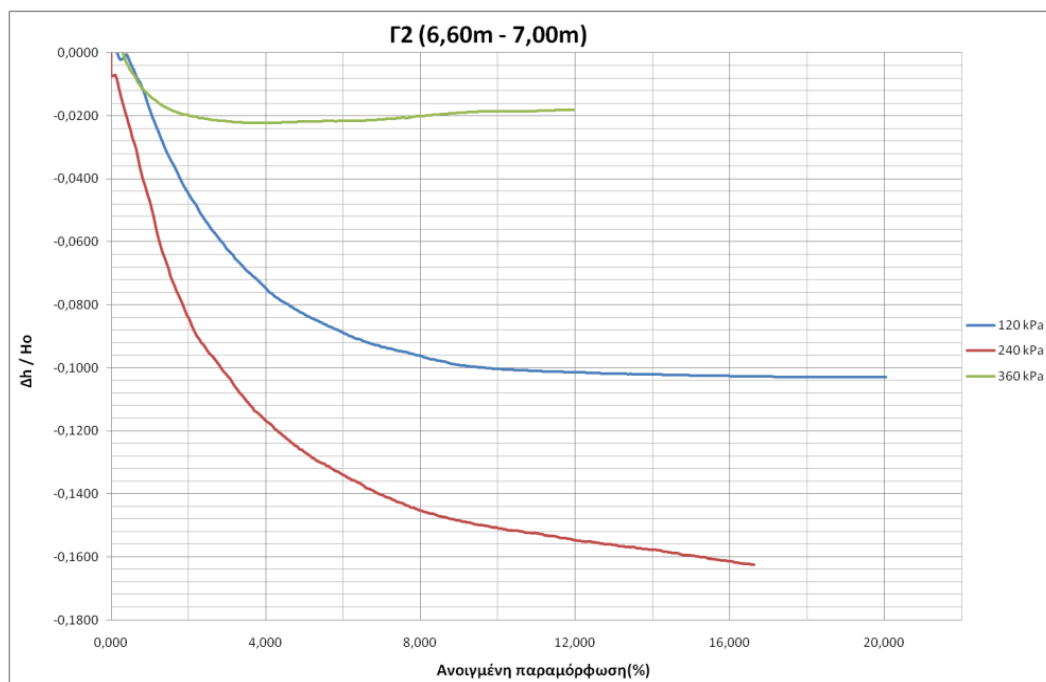
4. Από τις παραπάνω δοκιμές με εφαρμογή διαφορετικής αξονικής τάσης προκύπτουν τα συγκεντρωτικά διαγράμματα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης και μεταβολής αξονικής μετατόπισης - παραμόρφωσης στις εικόνες (31) και (32) αντίστοιχα. Στο διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης παρατηρείται η αναμενόμενη αύξηση της διατμητικής αντοχής αναλογικά με την αύξηση του αξονικού φορτίου στο δείγμα.

Στο διάγραμμα μεταβολής αξονικής μετατόπισης - παραμόρφωσης παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τάση προστερεοποίησης που επιβάλλεται στο δείγμα τόσο μικρότερη είναι η συρρίκνωση του δείγματος κατά τη διάτμηση.

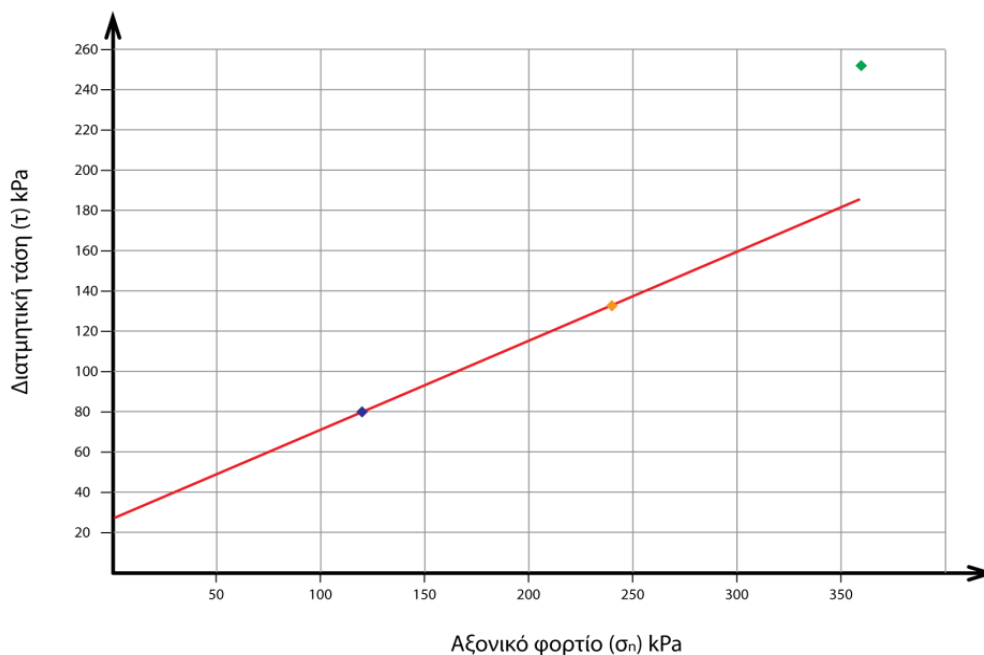
Οι μέγιστες τιμές της διατμητικής τάσης σε σχέση με την αξονική τάση μας δίνουν στην εικόνα (33) τα μέγιστα σημεία των κύκλων Mohr από τους οποίους υπολογίζονται οι μηχανικές παράμετροι του υλικού. Στην εικόνα (33) παρατηρούμε ότι η τιμή της διατμητικής αντοχής για αξονική τάση 360 kPa βρίσκεται εκτός της περιβάλλουσας (κόκκινο χρώμα) διότι κατά τη διαδικασία της στερεοποίησης το δείγμα υπέστη επιπλέον φορτίο για μικρό χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα να δώσει μεγαλύτερη διατμητική αντοχή. Για το λόγο αυτό δεν γίνεται να συμπεριληφθεί η συγκεκριμένη τιμή στον υπολογισμό της συνοχής και της γωνίας τριβής. Οι υπόλοιπες δύο (2) δοκιμές είναι σωστές και στον πίνακα (19) δίνονται η συνοχή και η γωνία τριβής με βάση τις δοκιμές αυτές.



Εικόνα 31. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τα δείγματα της γεώτρησης Γ2 (6,60-7,00).



Εικόνα 32. Συγκεντρωτικό διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τα δείγματα της γεώτρησης Γ2 (6,60-7,00).



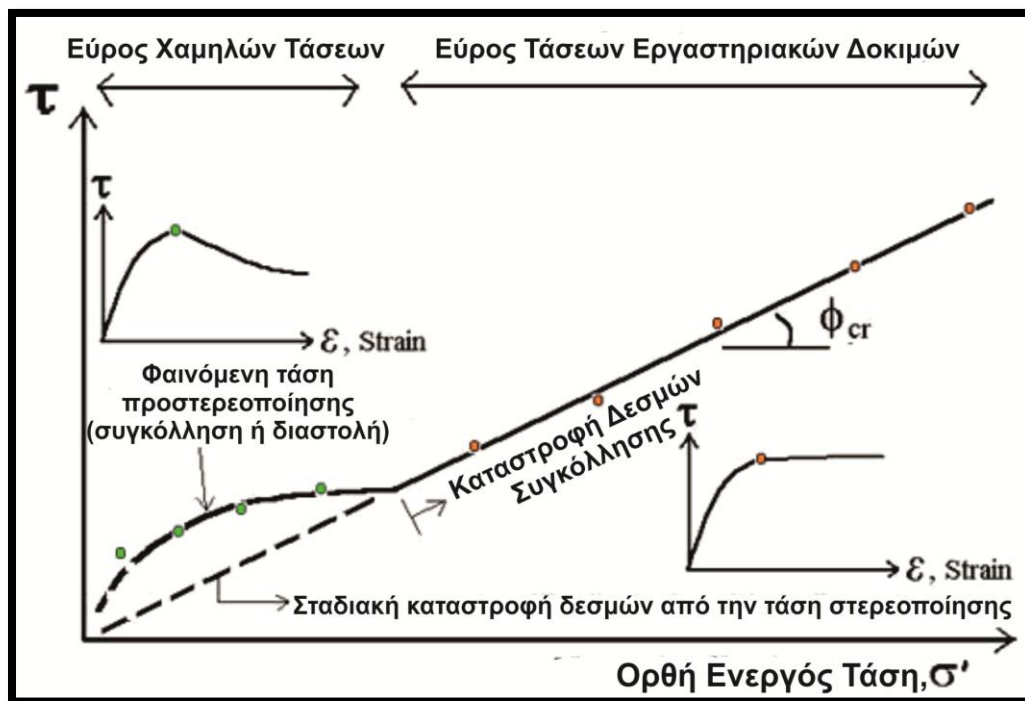
Εικόνα 33. Αποτελέσματα των δοκιμών διάτμησης σε κορεσμό στα δείγματα της γεώτρησης Γ2 (6,60-7,00).

Πίνακας 19. Υπολογισμός μηχανικών παραμέτρων για τα δείγματα της γεώτρησης Γ2 (6,60m - 7,00m) με βάση τις δοκιμές διάτμησης.

Α/Α	σ_n (kPa)	τ (kPa)	Μηχανικές Παράμετροι		
			$c :$	27.00	(kPa)
1	120	80	$\phi :$	23.83	($^\circ$)
2	240	133			
3	360	252			

Η αύξηση της διατμητικής αντοχής με την επιβολή αυξημένου αξονικού φορτίου για μικρό χρονικό διάστημα και η μη επαναφορά της σε φυσιολογικά επίπεδα μπορεί, ίσως, να αποδοθεί στην επίδραση της ύπαρξης δεσμών στον υπολογισμό της συνοχής από μία περιβάλλουσα αστοχίας σε συνθήκες αποστράγγισης (Vargas, 1974) όπως φαίνεται και στην εικόνα (34), να βρισκόμαστε δηλαδή στα όρια των χαμηλών τάσεων (πράσινο χρώμα) με αυτών των εργαστηριακών δοκιμών (κόκκινο χρώμα), όπου λόγω των υψηλών τάσεων που μπορούμε να προσομοιώσουμε στο εργαστήριο καταστρέφονται οι δεσμοί συγκόλλησης του δείγματος και υπολογίζουμε μία γωνία τριβής χωρίς καθόλου συνοχή. Για να επαληθευτεί η παραπάνω θεώρηση

υπολογίστηκε η γωνία τριβής ϕ^{cr} από την τελευταία δοκιμή σε κορεσμό στα 360 kPa αξονικό φορτίο θεωρώντας μηδενική συνοχή, και βρέθηκε στις 35°. Η συγκεκριμένη γωνία θα συγκριθεί στα αποτελέσματα του 8^{ου} κεφαλαίου (βλ. σσ.89).



Εικόνα 34. Επίδραση της ύπαρξης δεσμών στον υπολογισμό της συνοχής από μία περιβάλλουσα αστοχίας σε συνθήκες αποστράγγισης (Vargas, 1974), (από Χατζηγάγο, 2015).

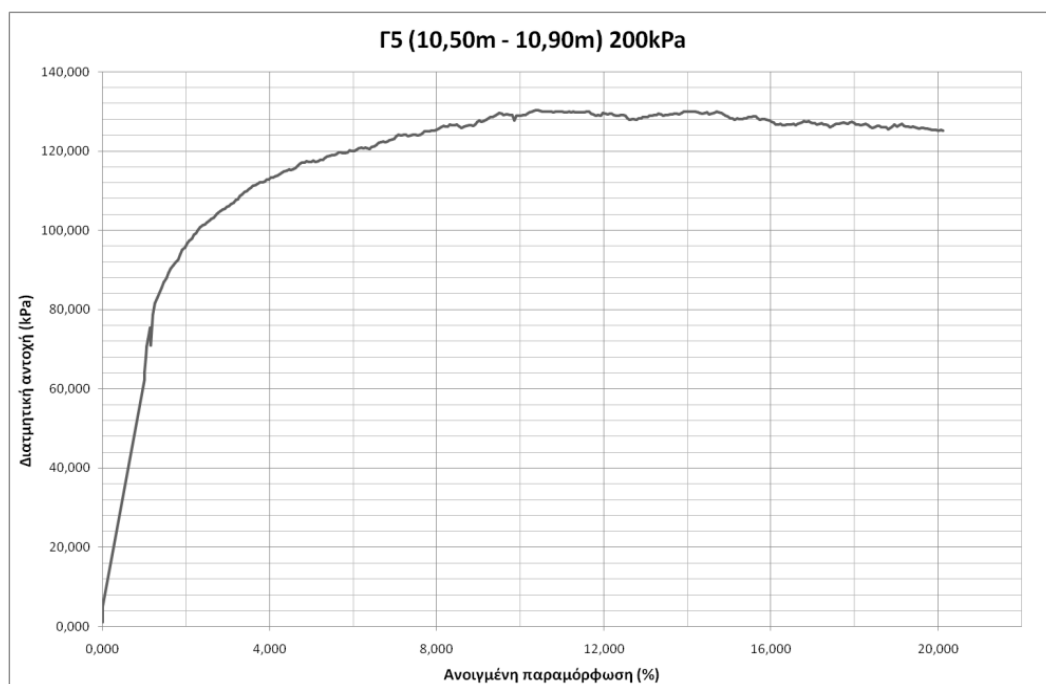
5. Για το δείγμα της γεώτρησης Γ5 (10,50-10,90) πραγματοποιήθηκε διάτμηση σε κορεσμένες συνθήκες για στερεοποίηση στα 200 kPa. Στους πίνακες (20) και (21) παρατηρούμε τα φυσικά χαρακτηριστικά του δείγματος πριν και μετά τη δοκιμή, ενώ στις εικόνες (35) και (36) τα διαγράμματα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης και μεταβολής αξονικής μετατόπισης - παραμόρφωσης αντίστοιχα. Από το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης παρατηρείται ότι η μέγιστη διατμητική αντοχή είναι 130 kPa και αντιστοιχεί σε 10% παραμόρφωση, ενώ η παραμένουσα διατμητική αντοχή είναι 125 kPa για τιμές παραμόρφωσης πάνω από 19%. Στο διάγραμμα μεταβολής όγκου - παραμόρφωσης παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με τις δοκιμές της γεώτρησης Γ2.

Πίνακας 20. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 200 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.

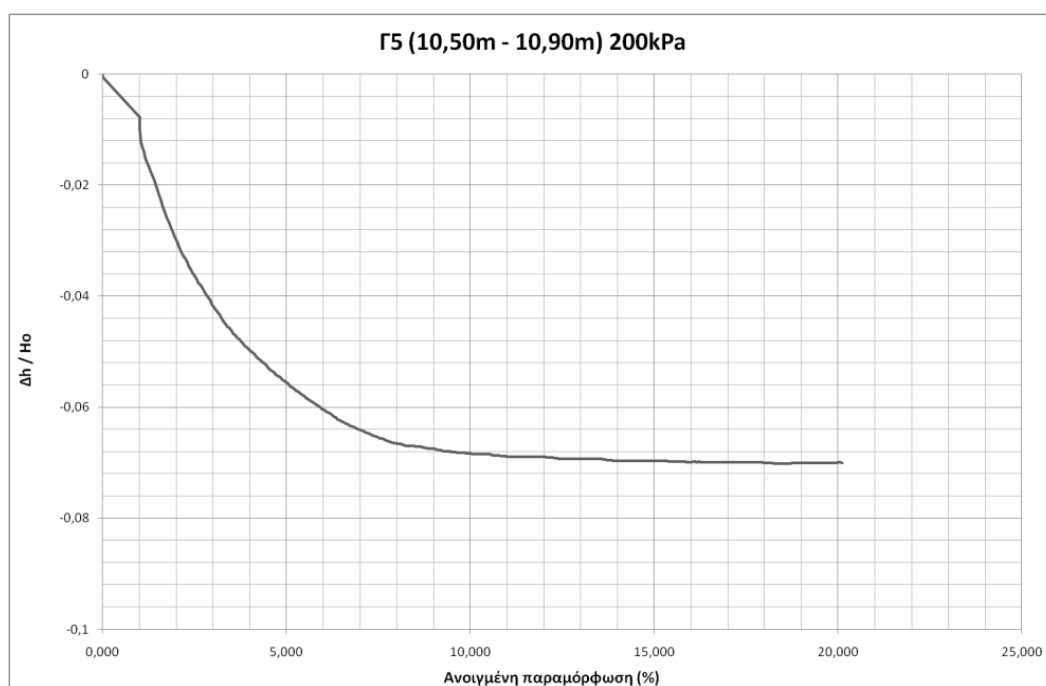
Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Αρχικό βάρος δείγματος	Αρχικός λόγος κενών
Ύψος (cm):	3.00	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm ³):	168.75	Ws (gr): 286.95	e _{αρχ} : 0.59
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος			Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		
m (%):			γ (gr/cm ³):		γ _d (gr/cm ³):		
18.44			2.01		1.70		

Πίνακας 21. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 200 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.

Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Βάρος δείγματος		Λόγος κενών
Ύψος (cm):	2.22	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm ³):	125.10	W: 336.87	W _d : 228.30	e: 0.48
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος				Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		
m (%):				γ (gr/cm ³):		γ _d (gr/cm ³):		
32.23				2.41		1.82		



Εικόνα 35. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 200 kPa.



Εικόνα 36. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 200 kPa.

Ο όγκος των δεδομένων που επεξεργάστηκε στην παρούσα διατριβή για το συγκεκριμένο κεφάλαιο δίνεται στους πίνακες (22), (23) και (24) και όλα τα δεδομένα παρατίθενται σε ηλεκτρονική μορφή (cd-rom).

Πίνακας 22. Συνολικός όγκος δεδομένων για το στάδιο του κορεσμού στο 6^ο κεφάλαιο.

Δεδομένα που καταγράφονται	Κορεσμός													
	Axial Displacement (mm)	Axial Load (kN)	Horizontal Load (kN)	Pore Water Pressure (kPa)	Back Pressure (kPa)	Back Volume (mm³)	Lower Chamber Vol (mm³)	Axial Strain (%)	Normal Stress (kPa)	Horizontal Strain (%)	Horizontal Stress (kPa)	Horizontal Eff Stress (kPa)	Effective Area (mm²)	Normal Effective Stress (kPa)
Πλήθος δεδομένων	Γ5 (10,50-10,90) 200kPa													
Μέγιστο	14.15	0.50	0.030	43.33	41	96991	6.20	54.43	89.58	13.75	5.40	5.38	5559.47	69.58
Μέση τιμή	5.29	0.28	-0.030	40.00	40	-40912	5.47	20.35	50.01	4.23	-5.40	-45.22	5559.35	10.01
Ελάχιστο	3.95	0.23	-0.129	0.02	39	-117312	0.69	15.19	40.65	3.99	-23.44	-63.44	5502.37	6.49

Πίνακας 23. Συνολικός όγκος δεδομένων για το στάδιο της στερεοποίησης στο 6^ο κεφάλαιο.

Στερεοποίηση														
Δεδομένα που καταγράφονται	Axial Displacement (mm)	Axial Load (kN)	Horizontal Displacement (mm)	Horizontal Load (kN)	Back Pressure (kPa)	Lower Chamber Vol (mm³)	Pore Air Pressure (kPa)	Axial Strain (%)	Normal Stress (kPa)	Horizontal Strain (%)	Horizontal Stress (kPa)	Horizontal Eff Stress (kPa)	Effective Area (mm²)	Normal Effective Stress (kPa)
Γ5 (10,50-10,90) 200kPa														
Πλήθος δεδομένων	588													
Μέγιστο	6.92	0.68	0.099	0.14	142874	3	555.44	24.72	120.16	0.47	25.46	25.46	5617.94	120.16
Μέση τιμή	6.89	0.67	0.097	0.14	134790	3	553.06	24.60	119.98	0.46	24.39	24.39	5617.70	119.98
Ελάχιστο	5.66	0.28	0.094	0.01	-40698	2	551.87	20.21	50.20	0.43	1.60	1.60	5617.59	50.20
Γ2(6,60-7,00) 120kPa														
Πλήθος δεδομένων	215													
Μέγιστο	4.35	1.35	-0.002	0.15	-105	5	554.95	14.04	240.19	-0.01	26.13	26.13	5624.88	240.19
Μέση τιμή	4.06	1.35	-0.003	0.09	-155	4	552.66	13.09	240.01	-0.01	15.65	15.65	5624.77	240.01
Ελάχιστο	1.62	0.28	-0.005	-0.01	-177	2	551.84	5.22	50.14	-0.02	-1.96	-1.96	5624.66	50.14
Γ2(6,60-7,00) 240kPa														
Πλήθος δεδομένων	1214													
Μέγιστο	8.86	2.02	6.107	0.13	41	5	55189.79	29.53	403.57	28.81	29.69	29.69	5625.00	403.57
Μέση τιμή	8.75	1.94	-3.054	0.07	40	5	55119.56	29.18	359.90	-14.37	13.71	13.71	5395.95	359.90
Ελάχιστο	2.91	0.28	-15.267	0.05	39	2	55073.76	9.70	50.13	-72.14	8.00	8.00	4480.01	50.13
Γ2(6,60-7,00) 360kPa														
Πλήθος δεδομένων	4134													
Μέγιστο	7.78	1.13	1.629	0.00	41	3	0.46	29.91	200.25	8.92	0.36	0.36	5625.00	200.25
Μέση τιμή	7.76	1.10	1.626	-0.10	40	3	0.45	29.86	200.07	8.91	-17.81	-17.81	5503.06	200.07
Ελάχιστο	7.29	1.07	0.000	-0.11	0	2	0.43	28.03	194.45	0.00	-20.72	-20.72	5502.83	194.43

Πίνακας 24. Συνολικός όγκος δεδομένων για το στάδιο της διάτμησης στο 6^ο κεφάλαιο.

Διάτμηση											
Δεδομένα που καταγράφονται	Axial Displacement (mm)	Axial Load (kN)	Horizontal Displacement (mm)	Horizontal Load (kN)	Axial Strain (%)	Normal Stress (kPa)	Horizontal Strain (%)	Horizontal Stress (kPa)	Horizontal Eff Stress (kPa)	Effective Area (mm ²)	Normal Effective Stress (kPa)
<i>Γ5 (10,50-10,90) 200kPa</i>											
Πλήθος δεδομένων	367										
Μέγιστο	8.306	1.126	15.086	-0.006	31.947	200.215	85.260	-1.067	-1.067	5624.9	200.215
Μέση τιμή	8.293	1.008	7.742	-0.712	31.895	199.959	43.724	-145.114	-145.114	5044.3	199.959
Ελάχιστο	7.758	0.899	0.002	-0.733	29.839	171.142	0.008	-156.953	-156.953	4493.5	171.142
<i>Γ2(6,60-7,00) 120kPa</i>											
Πλήθος δεδομένων	337										
Μέγιστο	7.634	0.673	15.033	-0.030	27.265	120.149	73.816	-5.345	-5.345	5615.9	120.149
Μέση τιμή	7.609	0.612	6.899	-0.430	27.176	119.934	33.834	-85.745	-85.745	5107.6	119.934
Ελάχιστο	6.906	0.539	0.122	-0.447	24.665	119.695	0.577	-92.157	-92.157	4497.5	119.695
<i>Γ2(6,60-7,00) 240kPa</i>											
Πλήθος δεδομένων	314										
Μέγιστο	5.062	1.349	12.468	0.007	16.330	240.051	48.069	1.245	1.245	5624.9	240.051
Μέση τιμή	4.991	1.238	6.175	-0.690	16.100	239.781	23.741	-138.515	-138.515	5161.9	239.781
Ελάχιστο	4.355	1.124	-0.002	-0.748	14.047	239.571	-0.006	-148.618	-148.618	4689.9	239.571
<i>Γ2(6,60-7,00) 360kPa</i>											
Πλήθος δεδομένων	223										
Μέγιστο	13.445	2.000	8.987	0.101	44.816	356.669	53.503	18.001	18.001	5610.9	356.669
Μέση τιμή	13.175	1.884	4.551	-1.354	43.915	356.446	27.017	-256.263	-256.263	5283.6	356.446
Ελάχιστο	13.144	1.765	0.189	-1.417	43.814	356.263	1.139	-278.699	-278.699	4951.0	356.263

6.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι δοκιμές που εκτελέστηκαν σε κορεσμό. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάστηκαν: τα φυσικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, η διαδικασία της κάθε δοκιμής και τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών. Από τα παραπάνω υπολογίστηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της υπό εξέταση Ιλυώδους ΑΜΜΟΥ για κορεσμένες συνθήκες (συντηρητική προσέγγιση).

Όλες οι δοκιμές εκτελέστηκαν με πανομοιότυπη διαδικασία και έδωσαν αναμενόμενα αποτελέσματα, εκτός από τη δοκιμή του δείγματος Γ2 (6,60-7,00 m) στα 360 kPa όπου υπήρξε σφάλμα κατά τη στερεοποίηση με αποτέλεσμα να δώσει αυξημένη διατμητική αντοχή στο δείγμα. Η συγκεκριμένη δοκιμή παρουσιάζεται στα αποτελέσματα με σκοπό την ανάδειξη της σωστής λειτουργίας της συσκευής, καθώς ο μεγαλύτερος βαθμός στερεοποίησης έδωσε μεγαλύτερη διατμητική αντοχή, όμως δεν λαμβάνει μέρος στον υπολογισμό των μηχανικών παραμέτρων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΥΚΛΩΝ ΞΗΡΑΝΣΗΣ-ΥΓΡΑΝΣΗΣ ΕΔΑΦΩΝ (ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΥΖΗΣΗΣ)

Το επόμενο βήμα για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των ακόρεστων εδαφών είναι η προσομοίωση των τεσσάρων (4) φάσεων του εδάφους (βλ. Κεφάλαιο 3) στην πειραματική διάταξη. Μέχρι πρόσφατα δοκιμή διάτμησης σε ακόρεστο έδαφος θεωρούνταν η δοκιμή στη φυσική υγρασία του δείγματος ύστερα από στερεοποίηση. Έχει παρατηρηθεί όμως πως κατά τη στερεοποίηση του δείγματος και τη διάτμηση, η μεταβολή του όγκου των κενών για την ίδια ποσότητα νερού σε αυτά οδηγεί σε αύξηση του βαθμού κορεσμού. Η ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια εργαστηριακών διατάξεων που ελέγχουν το βαθμό κορεσμού κατά τη διάρκεια των δοκιμών επιλύει το παραπάνω πρόβλημα. Η συγκεκριμένη διαδικασία πρόκειται να αναλυθεί στο Κεφάλαιο 8.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της προσομοίωσης των κύκλων φόρτισης ενός γεωυλικού υπολογίζεται η Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης για δείγμα της γεώτρησης Γ2, σε βάθος 6,60-7,00 μέτρα, που πρόκειται για ιλυώδη ΑΜΜΟ με κατάταξη κατά USCS: SM-SW και κοκκομετρία που δίνεται στην Εικόνα (24) (Κεφάλαιο 6).

Η κατασκευή της καμπύλης μας επιτρέπει να πραγματοποιήσουμε στη συνέχεια (Κεφάλαιο 8) ρεαλιστικές, μη μεταβαλλόμενες ακόρεστες συνθήκες στο δείγμα για οποιαδήποτε τιμή μύζησης.

7.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή της καμπύλης περιλαμβάνει την προετοιμασία και τοποθέτηση του δείγματος, τον κορεσμό του, καθώς και την στερεοποίηση με επιβολή αξονικού φορτίου στα 120 kPa όπως ακριβώς αναλύθηκαν για τις δοκιμές σε κορεσμένες συνθήκες στο Κεφάλαιο 6 (βλ. σελ.47-48).

Μετά τη στερεοποίηση του κορεσμένου δείγματος αρχίζει η παραγωγή της καμπύλης που βασίζεται στη μέτρηση της απώλειας όγκου νερού μέσα από το δείγμα σε στάδια, με τη χρήση των ελεγκτών πίεσης/όγκου με δυνατότητα

μέτρησης με ακρίβεια κυβικού χιλιοστού (mm^3). Ο συγκεκριμένος όγκος μετατρέπεται σε ποσοστό υγρασίας και χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της καμπύλης. Για την ακριβή μέτρηση του όγκου νερού που εξάχθηκε από το δείγμα χρειάστηκε να μην ληφθεί υπόψη η πρώτη μέτρηση σε κάθε στάδιο, διότι πρόκειται για όγκο νερού που μεταβάλλεται μέχρι την εξισορρόπηση της επιθυμητής πίεσης του νερού των πόρων.

Το δεύτερο βασικό μέρος της κατασκευής της καμπύλης είναι τα στάδια ελέγχου της τιμής μύζησης μέσα στο δείγμα με χρήση της τεχνικής ανάστροφης αναφοράς πιέσεων (axis translation technique). Στον πίνακα (25) δίνονται τα στάδια που ακολουθήθηκαν μετά τη στερεοποίηση του δείγματος.

Παρατηρήθηκε πως από στάδιο σε στάδιο και όσο η τιμή της μύζησης αυξανόταν, η απομάκρυνση του νερού από το δείγμα γινόταν όλο και με μικρότερο ρυθμό. Αναφορικά ο ρυθμός μεταβολής του όγκου του νερού κατά το πρώτο (1°) στάδιο (Πίνακας 25) για την δεύτερη ώρα της δοκιμής ήταν στα $2248 \text{ mm}^3/\text{h}$, ενώ κατά το τρίτο (3°) στάδιο για τη δεύτερη ώρα της δοκιμής ο ρυθμός μεταβολής ήταν στα $36 \text{ mm}^3/\text{h}$. Το γεγονός αυτό έκανε πιο δύσκολο τον εντοπισμό του σημείου ισορροπίας σε κάθε στάδιο και πιο χρονοβόρα τη διαδικασία.

Το δεύτερο γεγονός που παρατηρήθηκε είναι ότι από τα 150 kPa μύζησης στο δείγμα άρχισε να δημιουργείται "θόρυβος" στις μετρήσεις μέχρι και τη μέγιστη (500 kPa) μύζηση. Το εύρος του θορύβου στις μετρήσεις έφτασε έως και τα 50 mm^3 .

Πίνακας 25. Στάδια δημιουργίας της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης του στρώματος S1.

Στάδιο	Περιγραφή	Πίεση πόρων αέρα (kPa)	Πίεση πόρων νερού (kPa)	Τιμή Μύζησης
1°	Αρχική εξισορρόπηση πιέσεων	605	590	15
2°	Αύξηση της τιμής μύζησης	605	570	35
3°		605	550	55
4°		605	500	105
5°		605	450	155
6°		605	400	205
7°		605	350	255
8°		605	250	355
9°		605	150	455
10°	Μείωση της τιμής μύζησης	605	250	355
11°		605	350	255
12°		605	400	205
13°		605	450	155
14°		605	500	105
15°		605	550	55
16°		605	570	35
17°		605	590	15

Οι περιορισμοί της συγκεκριμένης διαδικασίας ήταν πως η ισορροπία του κάθε σταδίου είχε απόκλιση $30 \text{ mm}^3/\text{d}$ (προδιαγραφές ελεγκτή), και πως τη μέγιστη τιμή μύζησης που μπορεί να επιτευχθεί είναι στα 500 kPa, όσο και η τιμή πίεσης εισόδου αέρα του πωρόλιθου (HAEPD). Επίσης οι μετρήσεις των όγκων επηρεάζονται από μεταβολές της θερμοκρασίας και για το λόγο αυτό έγινε προσπάθεια διατήρησης ισοθερμικών συνθηκών κατά την εκτέλεση της δοκιμής ($24^\circ\text{C} \pm 0,5$).

Το κάθε στάδιο της καμπύλης έχει καταγραφεί και παρατίθεται σε ηλεκτρονική μορφή (cd-rom). Ο πίνακας (26) αποτελεί απόσπασμα από την καταγραφή δεδομένων κατά τη φάση της επιβολής των πιέσεων των πόρων και παρουσιάζονται οι τέσσερις (4) παράμετροι που μεταβάλλονται κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία.

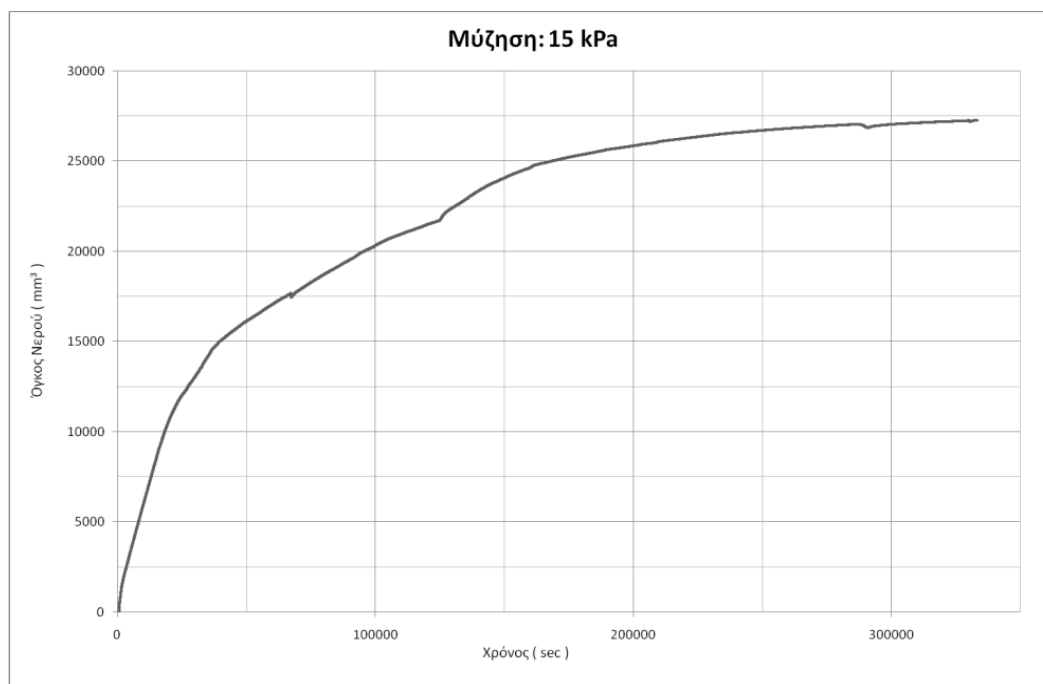
Πίνακας 26. Παράδειγμα καταχώρησης δεδομένων κατά τη διαδικασία της εξισορρόπησης του νερού και του αέρα των πόρων, κατά τη δημιουργία της ΧΚΜΕ. Το σύνολο των καταχωρήσεων συνοδεύει τη διατριβή σε ηλεκτρονική μορφή (βλ. cd-rom).

Stage Number	Time since start of stage (s)	Pore Water Pressure (kPa)	Back Pressure (kPa)	Back Volume (mm ³)	Pore Air Pressure (kPa)
1	0	513.67	500.00	-77.00	611.29
1	60	513.61	500.00	-76.00	611.32
1	120	564.29	550.00	-288.00	614.64
1	180	564.23	550.00	-288.00	614.64
1	240	563.98	550.00	-287.00	614.64
1	300	564.42	550.00	-289.00	614.64
1	360	564.23	550.00	-288.00	614.64
1	420	564.42	550.00	-289.00	614.64
1	480	564.23	550.00	-288.00	614.64
1	540	564.35	550.00	-289.00	614.67
1	600	564.35	550.00	-288.00	614.64
1	660	564.23	550.00	-288.00	614.64
1	720	564.35	550.00	-288.00	614.64
1	780	564.17	550.00	-287.00	614.64
1	840	564.23	550.00	-288.00	614.64
1	900	564.04	550.00	-287.00	614.64
1	960	564.11	550.00	-287.00	614.64
1	1020	564.23	550.00	-288.00	614.64
1	1080	564.04	550.00	-286.00	614.64
1	1140	564.23	550.00	-287.00	614.64
1	1200	564.11	550.00	-287.00	614.67
1	1260	564.17	550.00	-287.00	614.64
1	1320	564.23	550.00	-287.00	614.64
1	1380	564.23	550.00	-287.00	614.64
1	1440	564.29	550.00	-287.00	614.64
1	1500	564.35	550.00	-288.00	614.64
1	1560	564.29	550.00	-287.00	614.64
1	1620	564.23	550.00	-287.00	614.64
1	1680	564.29	550.00	-287.00	614.64

7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η δημιουργία της καμπύλης βασίστηκε στην εξισορρόπηση των πιέσεων (αέρα - νερού) σε κάθε στάδιο ξήρανσης και ύγρυνσης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί πώς ο θετικός (+) όγκος στα διαγράμματα που ακολουθούν αποτυπώνει την είσοδο του νερού στο δείγμα, ενώ ο αρνητικός (-) όγκος την αποβολή νερού από το δείγμα. Κατά την κατασκευή της παρατηρήθηκαν τρεις (3) διαφορετικοί τρόποι εξισορρόπησης οι οποίοι δίνονται παραδειγματικά στις εικόνες (37), (38) και (39).

Πιο συγκεκριμένα κατά την ξήρανση του δείγματος παρατηρήθηκε, σε όλα τα στάδια κατασκευής, η εξισορρόπηση της εικόνας (37) όπου το νερό εξέρχεται αρχικά με μεγάλο ρυθμό, ο οποίος μειώνεται σταδιακά ως ότου η πίεση του νερού των πόρων ισορροπήσει ως προς την πίεση του αέρα των πόρων.

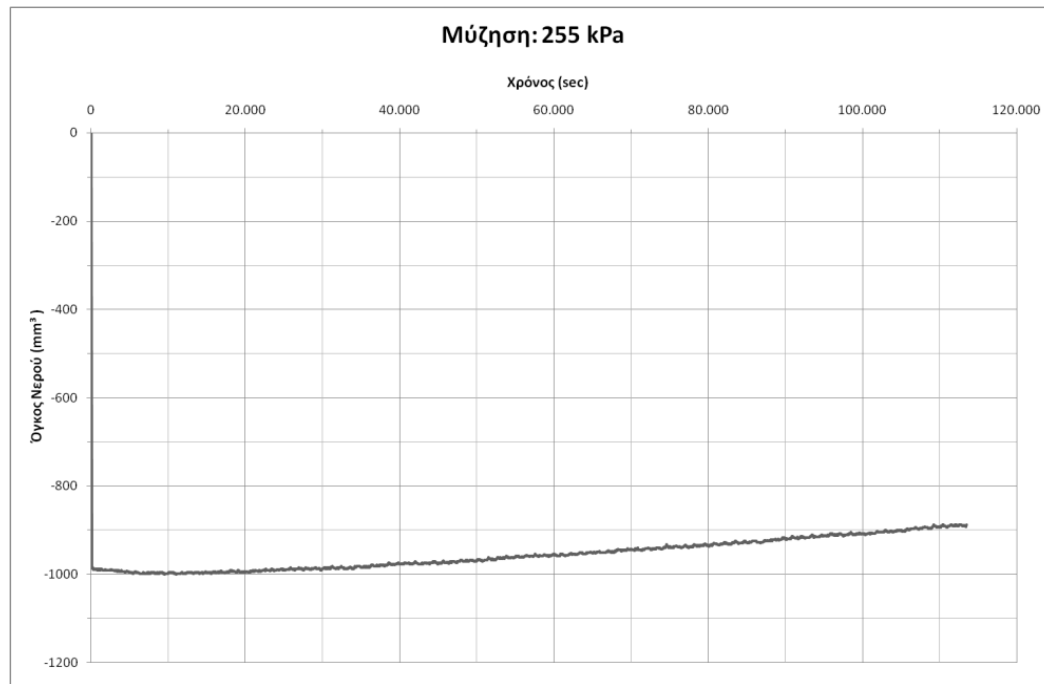


Εικόνα 37. Παράδειγμα εξισορρόπησης της πίεσης των πόρων (αέρα - νερού) κατά την κατασκευή της ΧΚΜΕ για τα στάδια της ξήρανσης.

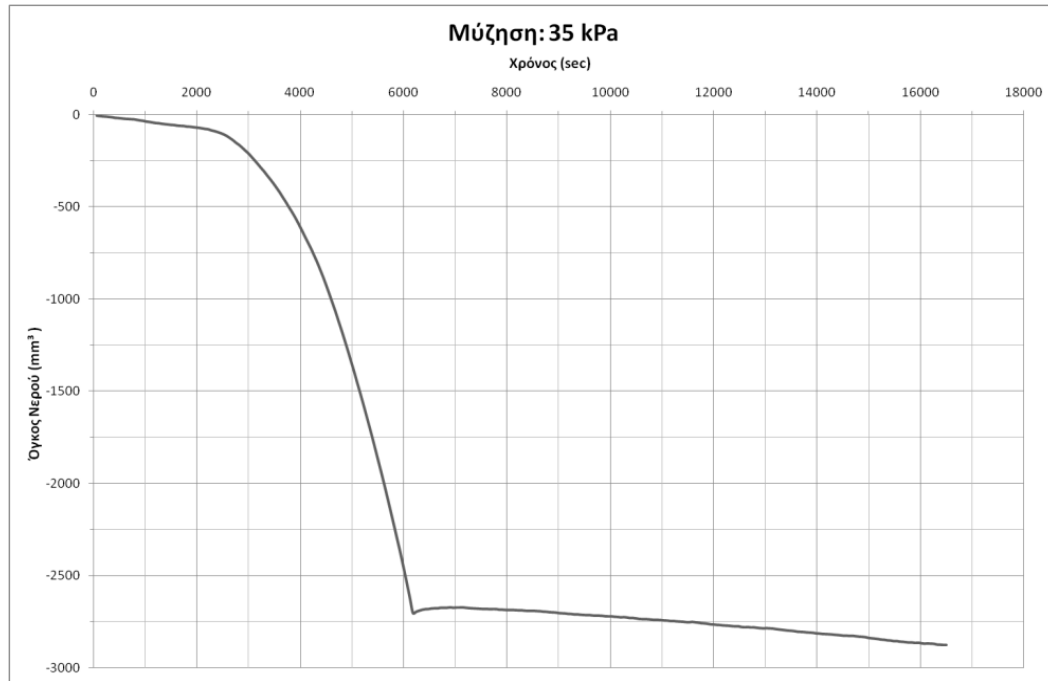
Κατά την ύγρυνση του δείγματος (καμπύλη επιστροφής) παρατηρήθηκαν δύο (2) μορφές εξισορρόπησης. Η πρώτη, η οποία παρατηρήθηκε για τιμές μύζησης 455 - 55 kPa, δίνεται στην εικόνα (38) και δείχνει μία απότομη είσοδο του νερού στο δείγμα και την εξισορρόπηση αυτής με την αποβολή του περίσσιου νερού από το δείγμα. Η

συγκεκριμένη συμπεριφορά συνδέεται με την υστέρηση της καμπύλης κατά την ύγρανση που θα αναλυθεί παρακάτω.

Η δεύτερη μορφή που δίνεται στην εικόνα (39), η οποία παρατηρήθηκε για τιμές μύζησης μικρότερες των 55 kPa, δείχνει την εξισορρόπηση των πιέσεων μέσω της απότομης εισόδου του νερού στο δείγμα αρχικά και στη συνέχεια τη μείωση του ρυθμού μέχρι την ισορροπία.



Εικόνα 38. Παράδειγμα εξισορρόπησης της πίεσης των πόρων (αέρα - νερού) κατά την κατασκευή της ΧΚΜΕ για τα στάδια της ύγρανσης (συμπεριφορά αποβολής νερού από το δείγμα).



Εικόνα 39. Παράδειγμα εξισορρόπησης της πίεσης των πόρων (αέρα - νερού) κατά την κατασκευή της ΧΚΜΕ για τα στάδια της ύγρανσης (συμπεριφορά εισόδου νερού στο δείγμα).

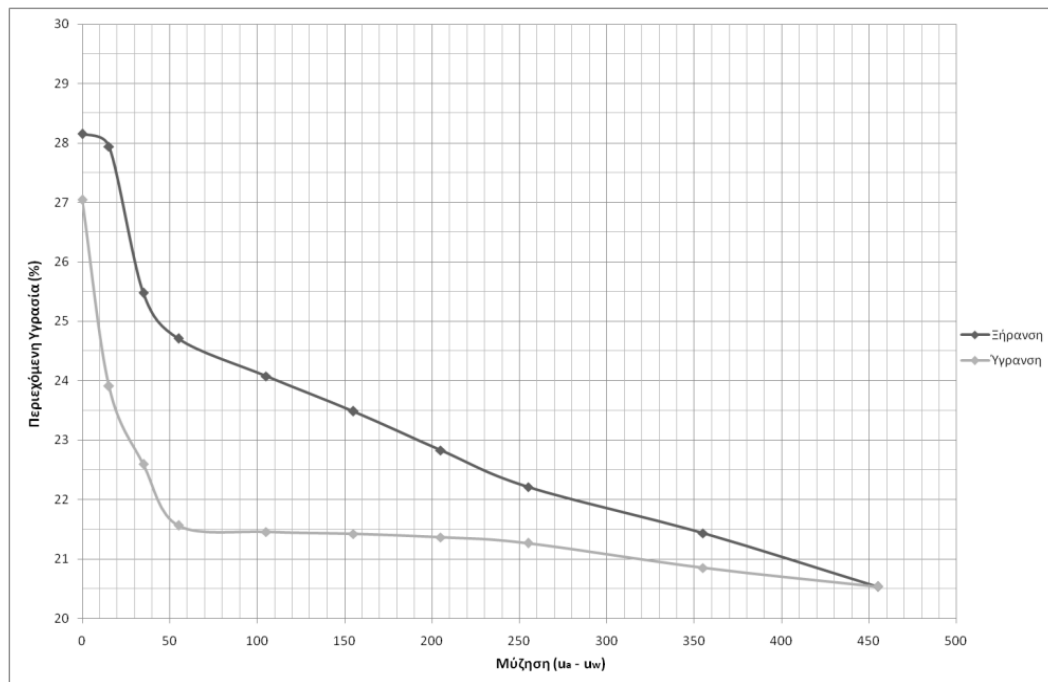
Τα παραπάνω στάδια ολοκληρώθηκαν με κατά μέσο όρο διάρκεια τις τέσσερεις (4) μέρες. Ο μέγιστος όγκος νερού που εξάχθηκε από το δείγμα κατά την ξήρανση ήταν στα 5240 mm^3 για 35 kPa μύζηση, ενώ αντίστοιχα κατά την ύγρανση ο μέγιστος όγκος νερού που εισήλθε στο δείγμα ήταν 2800 mm^3 στα 15 kPa μύζηση. Αναλυτικά τα συνολικά στοιχεία κάθε σταδίου δίνονται στον πίνακα (27).

Πίνακας 27. Συνολικά στοιχεία κάθε σταδίου για την κατασκευή της ΧΚΜΕ.

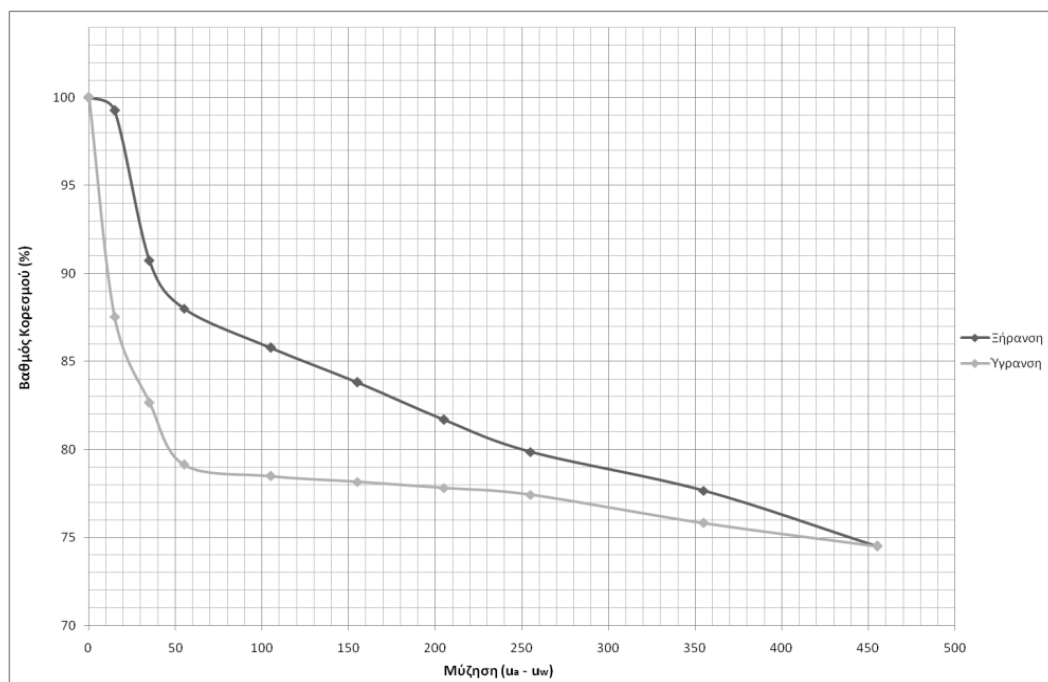
Στάδιο	Περιγραφή	Πίεση πόρων αέρα (kPa)	Πίεση πόρων νερού (kPa)	Τιμή μύζησης	Χρονική διάρκεια σταδίου (ημέρες)	Αρχικός όγκος νερού στο δείγμα (mm ³)	Τελικός όγκος νερού στο δείγμα (mm ³)	Απώλεια/Είσοδος νερού (mm ³)
1°	Αρχική εξισορρόπηση πιέσεων	605	590	15	5	-	-	-
2°		605	570	35	7	45	5285	5240
3°		605	550	55	4	28	1663	1635
4°		605	500	105	4	73	1418	1345
5°	Αύξηση τιμής μύζησης	605	450	155	6	83	1334	1251
6°		605	400	205	4	45	1443	1398
7°		605	350	255	4	178	1500	1322
8°		605	250	355	4	470	2125	1655
9°		605	150	455	4	990	2902	1912
10°		605	250	355	5	-1615	-677	-677
11°		605	350	255	4	-985	-888	-888
12°		605	400	205	4	-339	-206	-206
13°	Μείωση τιμής μύζησης	605	450	155	4	-283	-118	-118
14°		605	500	105	4	-360	-75	-75
15°		605	550	55	4	-288	-231	-231
16°		605	570	35	4	-309	-2186	-2186
17°		605	590	15	5	0	-2800	-2800

Με βάση τα στοιχεία του πίνακα (27) κατασκευάστηκε η Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης για το στρώμα S1 και πιο συγκεκριμένα η σχέση μύζησης-περιεχόμενης υγρασίας και η σχέση μύζησης-βαθμού κορεσμού του δείγματος. Οι δύο (2) καμπύλες δίνονται στις εικόνες (40) και (41). Από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν βρέθηκε ότι η μέγιστη υγρασία του υλικού για τιμή μύζησης 0 kPa είναι 28,14% και η ελάχιστη για τιμή μύζησης 455 kPa είναι 20,53%. Στην εικόνα (40) παρατηρείται υστέρηση στην αύξηση της υγρασίας κατά την ύγρανση με μέγιστη διαφορά για μύζηση 55 kPa περίπου στα 3%.

Ο βαθμός κορεσμού για τη μέγιστη τιμή μύζησης (455 kPa) μειώθηκε στο 74,5%. Στην εικόνα (41) παρατηρείται υστέρηση στην αύξηση του βαθμού κορεσμού κατά την ύγρανση του δείγματος με μέγιστη διαφορά για μύζηση 55 kPa περίπου στα 9%.



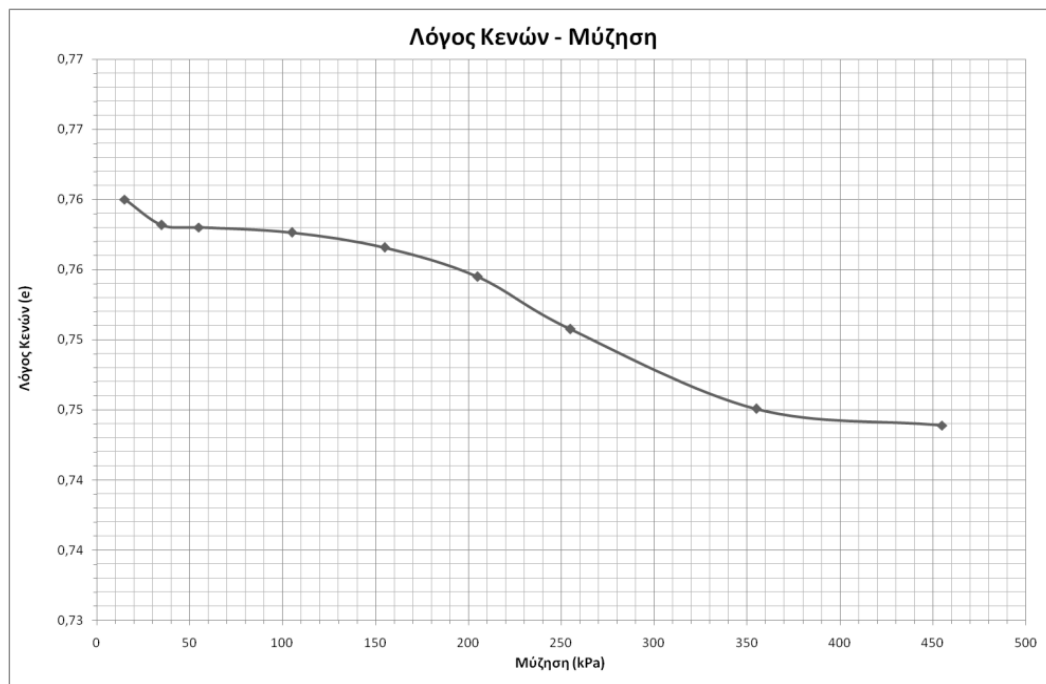
Εικόνα 40. Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης του στρώματος S1 σε σχέση με την περιεχόμενη υγρασία για πλήρη κύκλο ξήρανσης - ύγρυνσης.



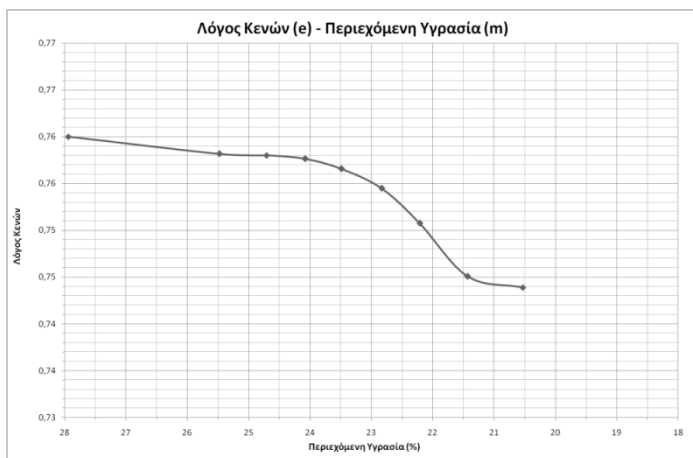
Εικόνα 41. Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης του στρώματος S1 σε σχέση με τον βαθμό κορεσμού για πλήρη κύκλο ξήρανσης - ύγρυνσης.

Παράλληλα με την υστέρηση παρατηρήθηκε μείωση του λόγου κενών με την αύξηση της μύζησης (από το 0,76 στα 0,73), δηλαδή συρρίκνωση, ενώ κατά τη μείωση της μύζησης παρέμεινε σχεδόν σταθερός. Η μείωση του λόγου κενών μπορεί να

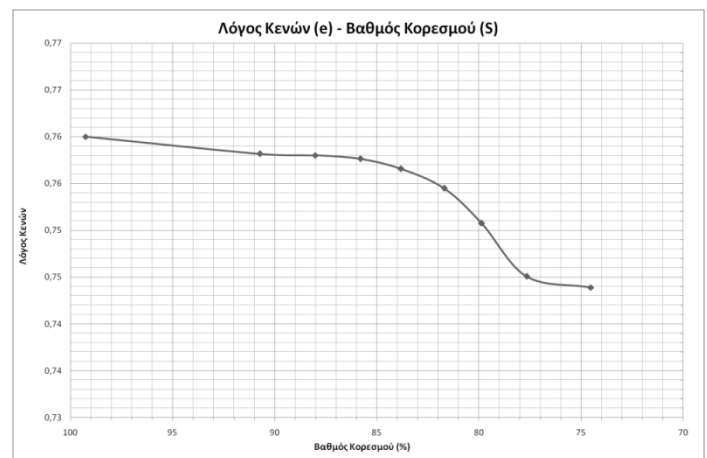
αποτυπωθεί τόσο σε σχέση με την υγρασία, όσο και με το βαθμό κορεσμού και δίνεται στις εικόνες (42), (43) και (44) αντίστοιχα.



Εικόνα 42. Διάγραμμα λόγου κενών και μύζησης.

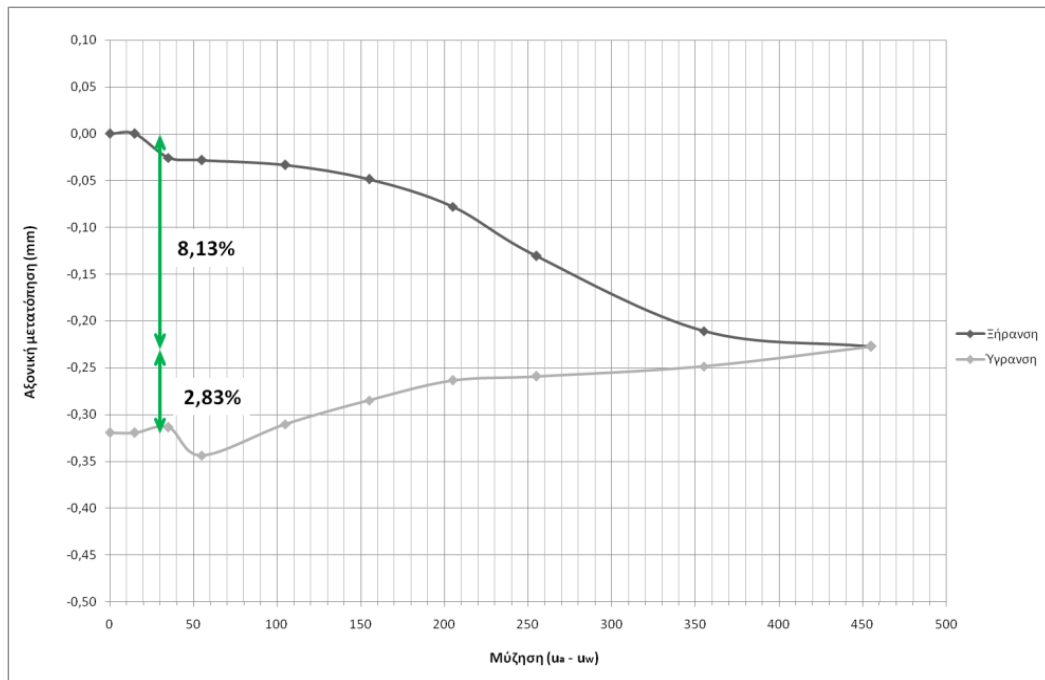


Εικόνα 43. Διάγραμμα λόγου κενών και περιεχόμενης υγρασίας.



Εικόνα 44. Διάγραμμα λόγου κενών και βαθμού κορεσμού.

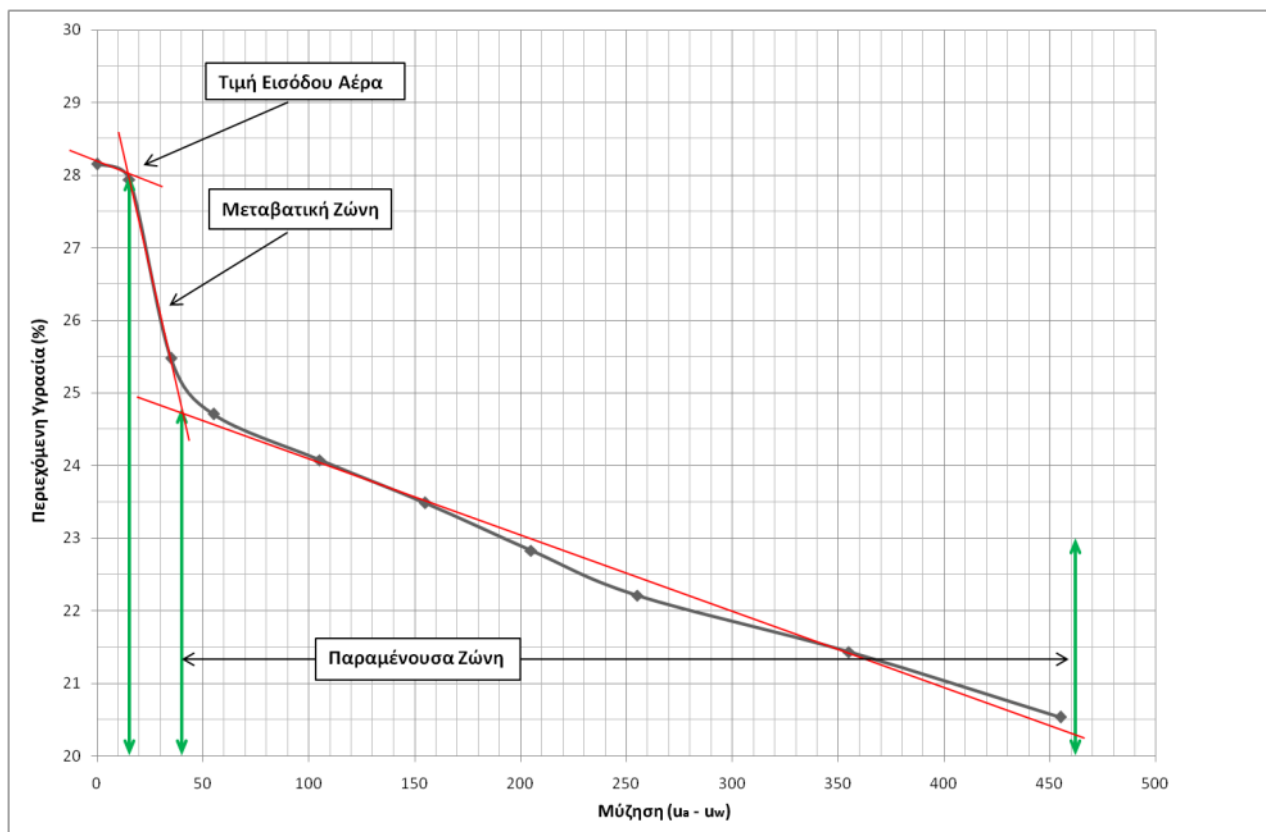
Η συγκεκριμένη μείωση σχετίζεται με συρρίκνωση του όγκου του δείγματος κατά την ξήρανσή της τάξης του 8,13%. Η συρρίκνωση αναμενόταν, κατά την μείωση της μύζησης (ύγραση), να σταματήσει και να αντιστραφεί (διόγκωση), όμως παρατηρήθηκε συνέχιση της συρρίκνωσης της τάξης του 2,83%. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά του υλικού αποτυπώνονται στην εικόνα (45) όπου δίνεται η συρρίκνωση του δείγματος στις δύο (2) φάσεις.



Εικόνα 45. Αξονική μετατόπιση κατά τη διαδικασία κατασκευής της ΧΚΜΕ.

Η Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης χωρίζεται σε τρία (3) τμήματα τα οποία ως προς τις τιμές μύζησης συμβαδίζουν (γι αυτό παρουσιάζονται μόνο στην ξήρανση) αλλά υπάρχει η υστέρηση που προαναφέρθηκε. Τα τμήματα δίνονται σχηματικά στην εικόνα (46) έχουν ως εξής:

- Αρχικά ορίζεται η τιμή εισόδου του αέρα (Air Entry Value), το σημείο όπου πλέον το δείγμα δεν θεωρείται κορεσμένο, στα 15 kPa μύζηση,
- στη συνέχεια ορίζεται η μεταβατική ζώνη (Transition Zone), όπου το δείγμα μεταβαίνει στην ακόρεστη κατάσταση, από τα 15 έως τα 40 kPa και τέλος
- η παραμένουσα ζώνη (Residual Zone), όπου το δείγμα θεωρείται ακόρεστο και η συμπεριφορά του παραμένει σταθερή, από τα 40 kPa έως τη μέγιστη τιμή μύζησης (455 kPa).



Εικόνα 46. Ανάλυση της ΧΚΜΕ ως προς την τιμή εισόδου του αέρα, τη μεταβατική ζώνη και την παραμένουσα ζώνη.

7.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύθηκε ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε η Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης για τον αμμώδη σχηματισμό του στρώματος S1. Πιο αναλυτικά υπολογίστηκαν τα στάδια στα οποία επρόκειτο να κατασκευαστεί η καμπύλη με βάση τα όρια της συσκευής, τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν και οι διαφορετικές συμπεριφορές του γεω-υλικού κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των σταδίων. Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που έδωσε η δημιουργία της καμπύλης και η ερμηνεία τους σε ότι θεωρήθηκε αξιοσημείωτο.

Η διαδικασία της κατασκευής της καμπύλης ολοκληρώθηκε ομαλά, χωρίς κάποιο πρόβλημα και παρατηρήθηκαν συνοπτικά τα εξής:

- Χαμηλή πίεση εισόδου αέρα (15kPa)
- Υστέρηση της καμπύλης κατά την ύγρανση εξαιτίας της δυσκολίας εισόδου νερού στο δείγμα από τη βάση της συσκευής. Φαίνεται πως η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμογής της μύζησης (axis translation

technique) εμφανίζει κατά την ύγρανση μία τιμή εισόδου νερού μικρότερη από την τιμή εισόδου αέρα, που αποτυπώνεται στην καμπύλη ως υστέρηση.

- Παρατηρήθηκε συρρίκνωση του δείγματος κατά την ξήρανσή του όπως αναμενόταν, η οποία όμως συνεχίστηκε σε μειωμένο βαθμό και στο στάδιο της ύγρανσης, όπου και αναμενόταν μικρή έως καθόλου διόγκωση εξαιτίας της αμμώδους σύστασης του δείγματος. Το φαινόμενο αυτό ερμηνεύεται ως μία συμπύκνωση που υπέστη το δείγμα κατά την ύγρανσή του λόγω του ίδιου βάρους του.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναλύονται οι δοκιμές διάτμησης σε ακόρεστες συνθήκες. Έχουν αναλυθεί (Κεφάλαιο 6) οι δοκιμές σε κορεσμό, όπου έγινε ένας χαρακτηρισμός των μηχανικών παραμέτρων του αμμόδους εδαφικού στρώματος που εξετάζεται καθώς και μία δοκιμή για τη σύγκριση κορεσμένων - ακόρεστων συνθηκών.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύθηκε (Κεφάλαιο 7) η Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης για το ίδιο στρώμα η οποία μας δίνει τη σχέση της τιμής της μύζησης του γεωυλικού με το ποσοστό υγρασίας αυτού. Αυτή η μέθοδος μας δίνει τη δυνατότητα να γνωρίζουμε ακριβώς της συνθήκες αρνητικών πιέσεων πόρων στο δείγμα ανάλογα με την τιμή της υγρασίας έτσι ώστε να είναι δυνατόν να προσομοιαστεί σε δοκιμή διάτμησης το υφιστάμενο εντατικό πεδίο.

Σε περιπτώσεις δοκιμών διάτμησης στη φυσική υγρασία των δειγμάτων ώστε να αποτυπωθεί η αντοχή σε ακόρεστες συνθήκες χωρίς τον έλεγχο της μύζησης, οι μεταβολή του όγκου του δείγματος συνεπάγεται και μεταβολή του βαθμού κορεσμού κατά τη διάρκεια αυτής, με αποτέλεσμα τα παραγόμενα χαρακτηριστικά αντοχής να μην μπορούν να αναφερθούν για συγκεκριμένη τιμή βαθμού κορεσμού.

Στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων από δοκιμές στη φυσική υγρασία του υλικού χωρίς έλεγχο του βαθμού κορεσμού κατά τη διάρκεια της δοκιμής και από δοκιμές με έλεγχο των πιέσεων αέρα - νερού στο δείγμα (έλεγχος μύζησης). Ακόμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μεμονωμένα και συνολικά, και σχολιάζονται τα διάφορα συμπεράσματα - προβληματισμοί που προκύπτουν.

Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο κεφάλαιο δίνονται στον πίνακα (28) με τα βασικά χαρακτηριστικά της κάθε δοκιμής. Πρόκειται για δείγματα της γεώτρησης Γ5 σε βάθος 10,50 έως 10,90 μέτρων. Η κοκκομετρία τους και τα φυσικά τους χαρακτηριστικά είναι ίδια με αυτά των δειγμάτων του 6^{ου} κεφαλαίου (Πίνακας 8 και Εικόνα 24 αντίστοιχα).

Πίνακας 28. Πλήθος και χαρακτηριστικά δειγμάτων 8^{ου} κεφαλαίου.

Πλήθος δειγμάτων	Είδος δοκιμής	Αξονικό φορτίο δοκιμής (kPa)	Κατάταξη δείγματος	Γεώτρηση	Βάθος
3	Διάτμηση σε φυσική υγρασία,	106	S1 (USCS: SM-SW)	Γ5	10.50 - 10.90
	στραγγιζόμενες	212			
	συνθήκες	300			

8.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

Στην παρούσα διατριβή δόθηκε η δυνατότητα πραγματοποίησης διατμήσεων των δειγμάτων σε κορεσμένες συνθήκες και στη φυσική υγρασία, χωρίς έλεγχο του βαθμού κορεσμού. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ως προς την προετοιμασία και τοποθέτηση, καθώς και στερεοποίηση του δείγματος παραλείποντας το στάδιο του κορεσμού είναι πανομοιότυπη με τη διαδικασία του έκτου (6^{ου}) κεφαλαίου (βλέπε Κεφάλαιο 6, σελ. 47-48).

Όσον αφορά το στάδιο της διάτμησης στα δείγματα με τη φυσική υγρασία η διαδικασία είναι ίδια με αυτή του έκτου (6^{ου}) κεφαλαίου επίσης (βλέπε Κεφάλαιο 6, σελ. 48).

8.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν παρήχθησαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Για τα δείγματα της γεώτρησης Γ5 (10,50-10,90) πραγματοποιήθηκε μία σειρά από δοκιμές στη φυσική τους υγρασία με σκοπό τον προσδιορισμό των μηχανικών παραμέτρων υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες:
1. Διάτμηση σε φυσική υγρασία για στερεοποίηση στα 106 kPa. Στους πίνακες (29) και (30) παρατηρούμε τα φυσικά χαρακτηριστικά του δείγματος πριν και μετά τη δοκιμή, ενώ στις εικόνες (47) και (48) τα διαγράμματα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης και μεταβολής αξονικής μετατόπισης -

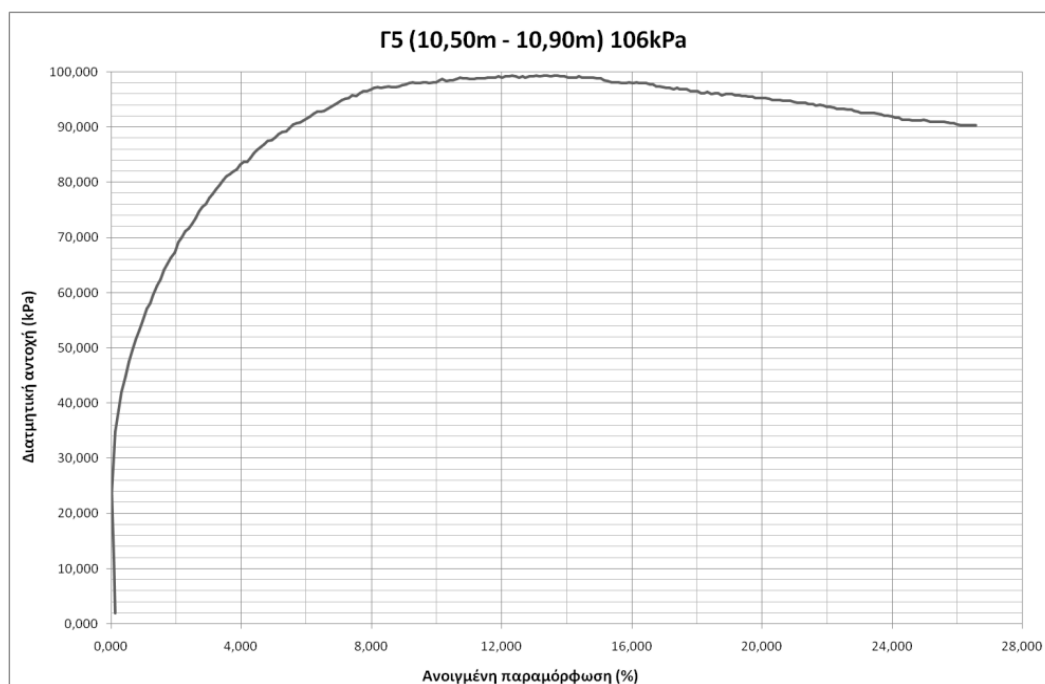
παραμόρφωσης αντίστοιχα. Από το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης παρατηρείται ότι η μέγιστη διατμητική αντοχή είναι 99 kPa και αντιστοιχεί σε 13% παραμόρφωση, ενώ η παραμένουσα διατμητική αντοχή είναι 90 kPa για τιμές παραμόρφωσης πάνω από 25%. Στο διάγραμμα μεταβολής αξονικής μετατόπισης - παραμόρφωσης παρατηρείται ίδια συμπεριφορά με τα δείγματα του έκτου (6^{ου}) κεφαλαίου (βλέπε σελ. 52) δηλαδή συρρίκνωση του δείγματος μέχρι την παραλαβή της μέγιστη διατμητικής αντοχής.

Πίνακας 29. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 106 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.

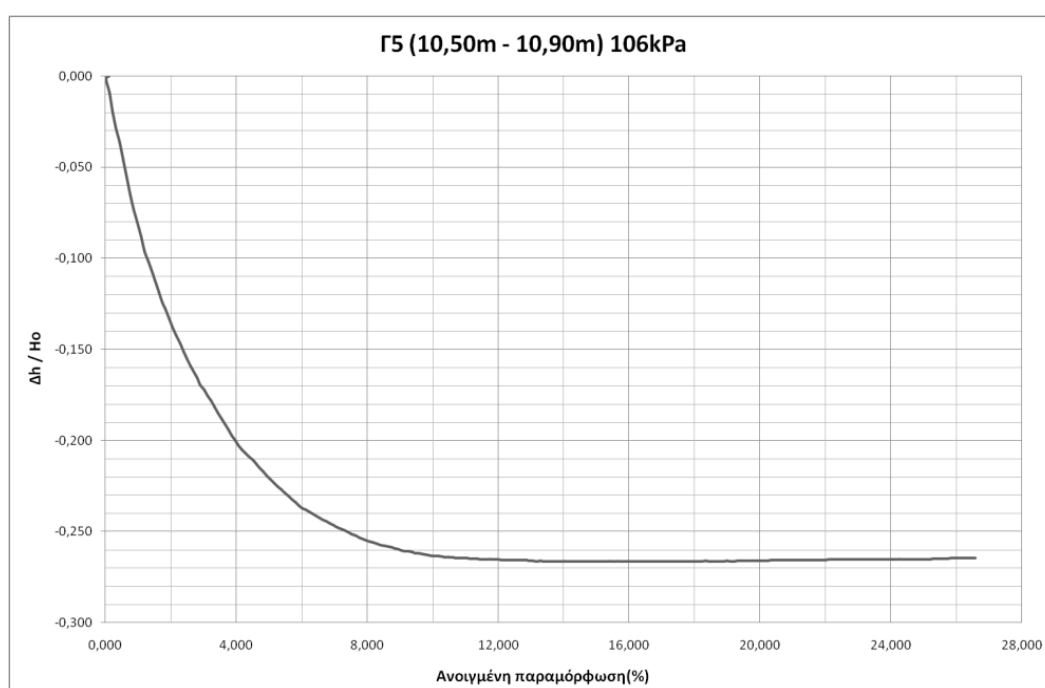
Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Αρχικό βάρος δείγματος	Αρχικός λόγος κενών
Ύψος (cm):	2.60	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm³):	146.25	Ws (gr): 248.69	e _{αρχ} : 0.59
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος			Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		
m (%):		18.44	γ (gr/cm³):		2.01	γ _d (gr/cm³): 1.70	

Πίνακας 30. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 106 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.

Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Βάρος δείγματος				Λόγος κενών	
Ύψος (cm):	2.26	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm³):	127.09	W:	274.93	Wd:	220.63	e:	0.56
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος					Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος			Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος			
m (%):					19.75	γ (gr/cm³):	2.08	γd (gr/cm³):		1.74	



Εικόνα 47. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 106 kPa.



Εικόνα 48. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 106 kPa.

2. Διάτμηση σε φυσική υγρασία για στερεοποίηση 212 kPa. Στους πίνακες (31) και (32) παρατηρούμε τα φυσικά χαρακτηριστικά του δείγματος πριν και μετά τη δοκιμή, ενώ στις εικόνες (49) και (50) τα διαγράμματα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης και μεταβολής αξονικής

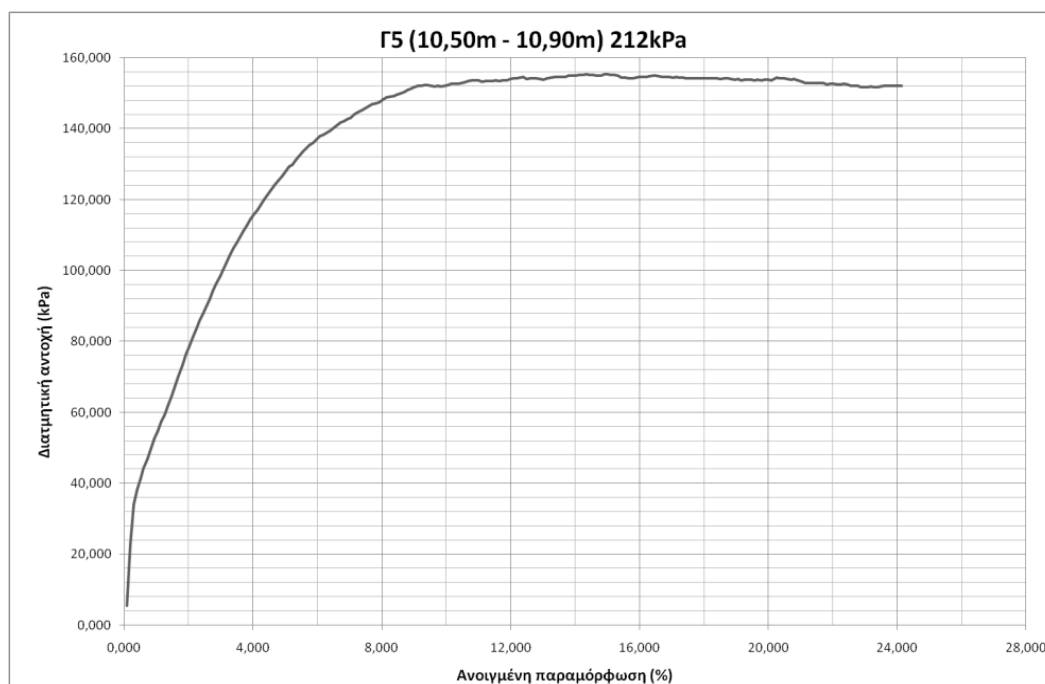
μετατόπισης - παραμόρφωσης αντίστοιχα. Από το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης παρατηρείται ότι η μέγιστη διατμητική αντοχή είναι 155 kPa και αντιστοιχεί σε 13% παραμόρφωση, ενώ η παραμένουσα διατμητική αντοχή είναι 150 kPa για τιμές παραμόρφωσης πάνω από 21%. Στο διάγραμμα μεταβολής όγκου - παραμόρφωσης παρατηρείται πανομοιότυπη συμπεριφορά με αυτή της δοκιμής στα 106 kPa.

Πίνακας 31. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 212 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.

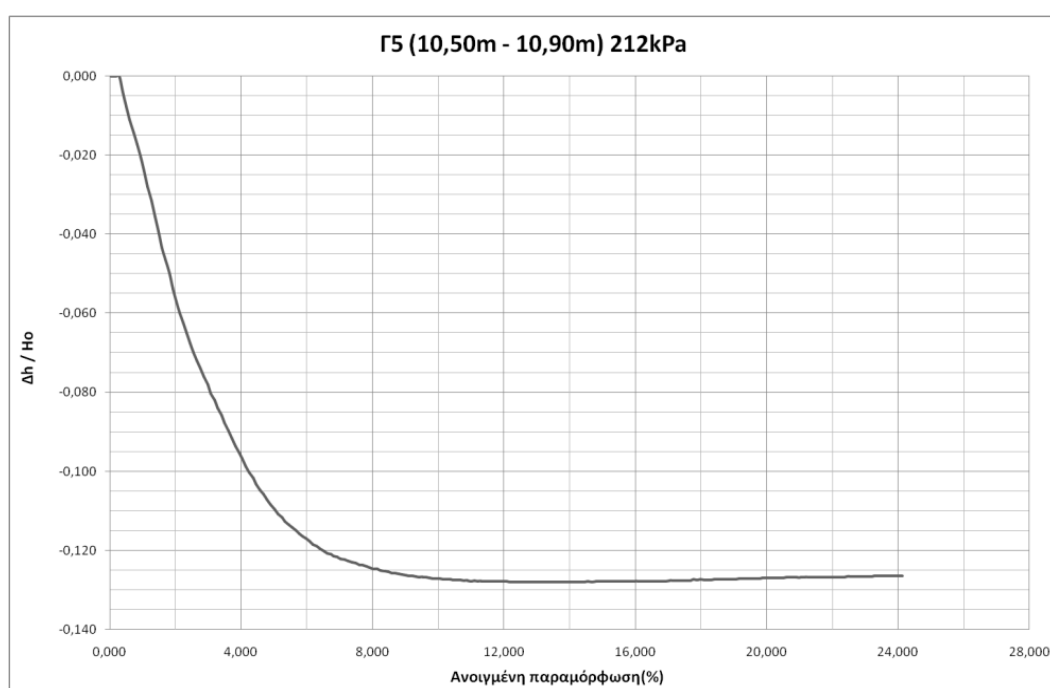
Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Αρχικό βάρος δείγματος	Αρχικός λόγος κενών
Ύψος (cm):	3.00	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm ³):	168.75	Ws (gr): 286.95	e _{αρχ} : 0.59
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος			Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος			Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος	
m (%):			γ (gr/cm ³):			γ _d (gr/cm ³):	
18.44			2.01			1.70	

Πίνακας 32. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 212 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.

Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Βάρος δείγματος		Λόγος κενών
Ύψος (cm):	2.49	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm ³):	139.84	W: 296.83	W _d : 236.84	e: 0.59
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος			Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος			Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		
m (%):			γ (gr/cm ³):			γ _d (gr/cm ³):		
20.21			2.04			1.69		



Εικόνα 49. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 212 kPa.



Εικόνα 50. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 212 kPa.

3. Διάτμηση σε φυσική υγρασία για στερεοποίηση 300 kPa. Στους πίνακες (33) και (34) παρατηρούμε τα φυσικά χαρακτηριστικά του δείγματος πριν και μετά τη δοκιμή, ενώ στις εικόνες (51) και (52) τα διαγράμματα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης και μεταβολής αξονικής

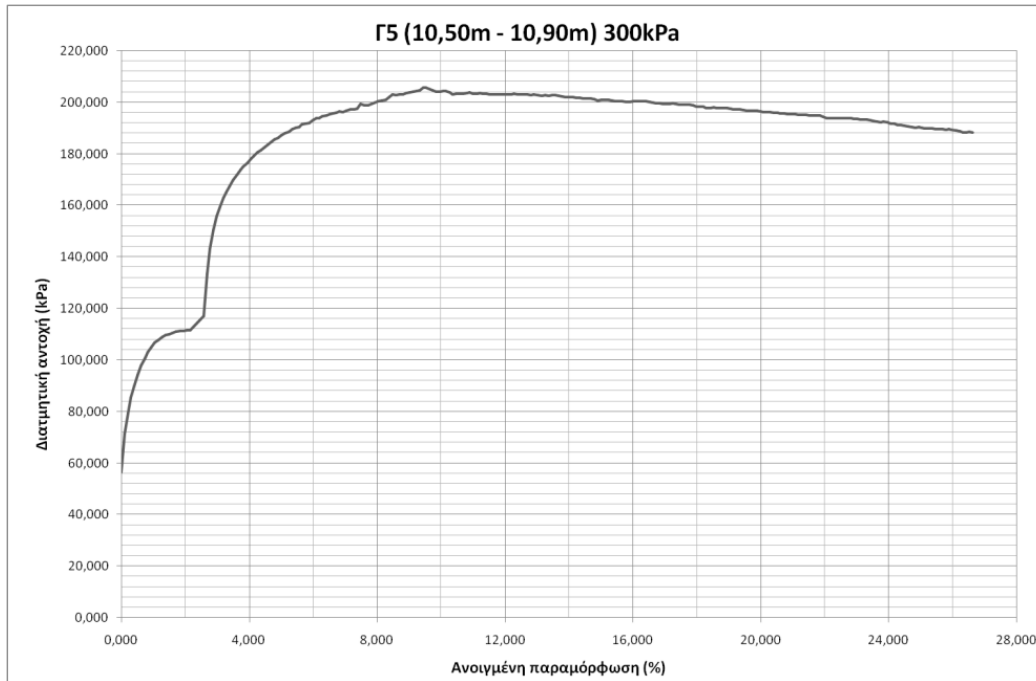
μετατόπισης - παραμόρφωσης αντίστοιχα. Από το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης παρατηρείται ότι η μέγιστη διατμητική αντοχή είναι 205 kPa και αντιστοιχεί σε 9% παραμόρφωση, ενώ η παραμένουσα διατμητική αντοχή είναι 90 kPa για τιμές παραμόρφωσης πάνω από 26%. Στο διάγραμμα μεταβολής όγκου - παραμόρφωσης παρατηρείται πανομοιότυπη συμπεριφορά με αυτή της δοκιμής στα 212 kPa.

Πίνακας 33. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 300 kPa πριν τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.

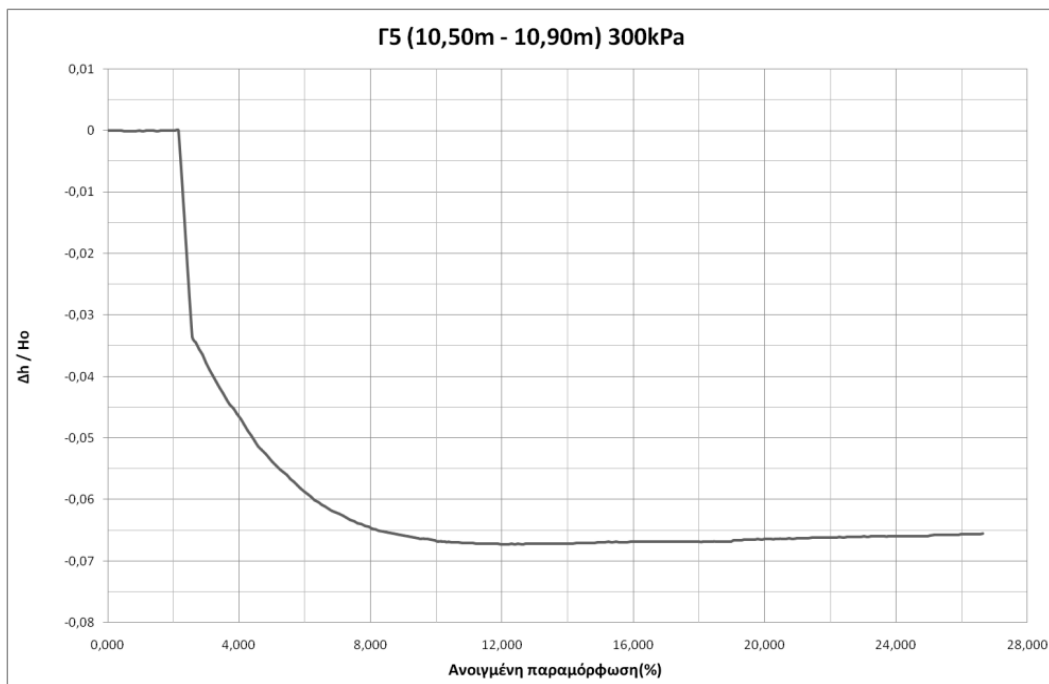
Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Αρχικό βάρος δείγματος	Αρχικός λόγος κενών
Ύψος (cm):	2.50	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm ³):	140.63	Ws (gr): 239.12	e _{αρχ} : 0.59
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος			Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος			Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος	
m (%):			γ (gr/cm ³):			γ _d (gr/cm ³):	
18.44			2.01			1.70	

Πίνακας 34. Φυσικές ιδιότητες δείγματος Γ5 (10,50-10,90) στα 300 kPa μετά τη δοκιμή, δεδομένα από Πίνακα 45, Παράρτημα.

Διαστάσεις τετραγωνικού δοκιμίου						Βάρος δείγματος		Λόγος κενών
Ύψος (cm):	1.64	Πλευρά (cm):	7.50	Όγκος (cm ³):	92.08	W: 216.83	W _d : 169.63	e: 0.47
Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος					Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		Ξηρό φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος	
m (%):					γ (gr/cm ³):		γ _d (gr/cm ³):	
21.77					2.24		1.84	



Εικόνα 51. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 300 kPa.

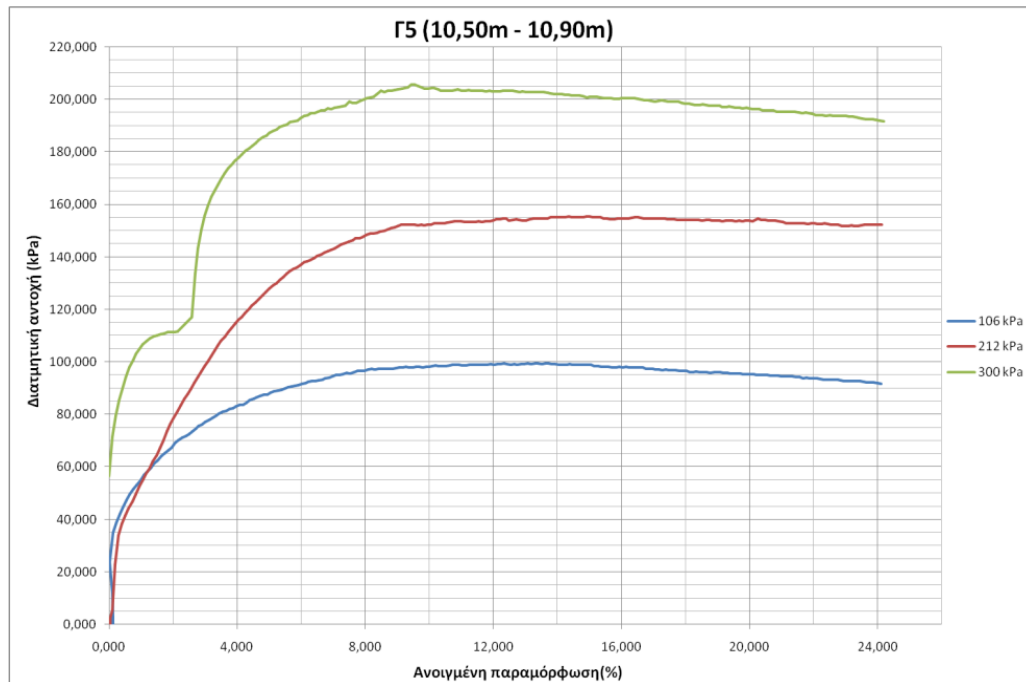


Εικόνα 52. Διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τη δοκιμή του Γ5 (10,50-10,90) στα 300 kPa.

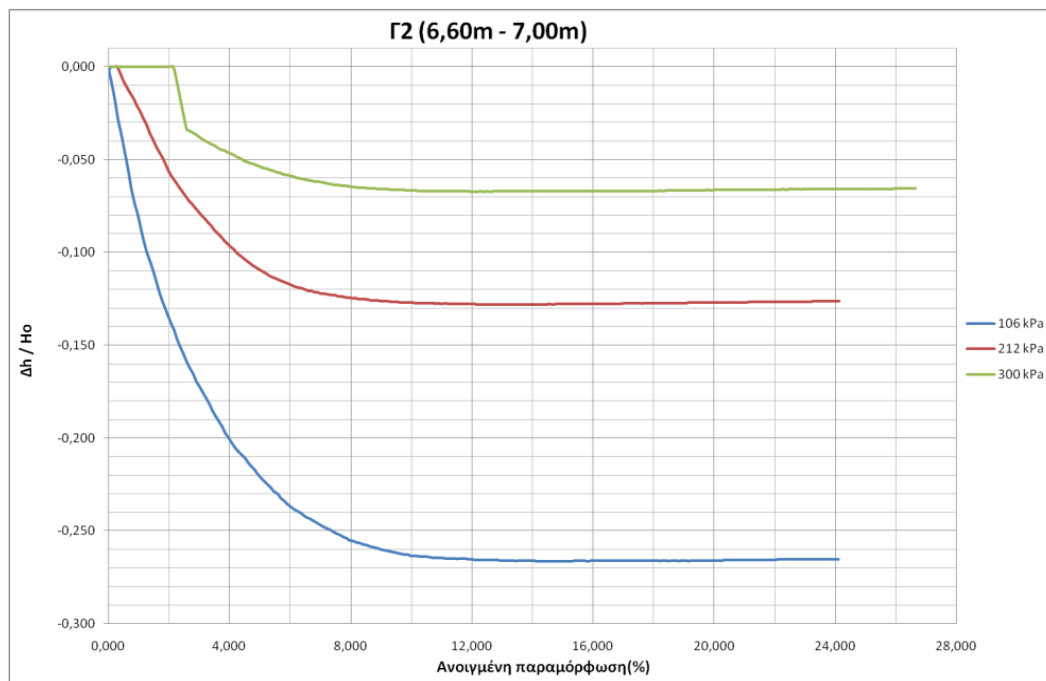
4. Από τις παραπάνω δοκιμές σε διαφορετική αξονική τάση προκύπτουν στις εικόνες (53) και (54) τα συγκεντρωτικά διαγράμματα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης και μεταβολής αξονικής μετατόπισης - παραμόρφωσης αντίστοιχα. Στο διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης παρατηρείται η αναμενόμενη αύξηση της διατμητικής αντοχής αναλογικά με την αύξηση του αξονικού φορτίου στο δείγμα.

Στο διάγραμμα μεταβολής αξονικής μετατόπισης - παραμόρφωσης παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τάση προστερεοποίησης που επιβάλλεται στο δείγμα τόσο μικρότερη είναι η συρρίκνωση του δείγματος κατά τη διάτμηση.

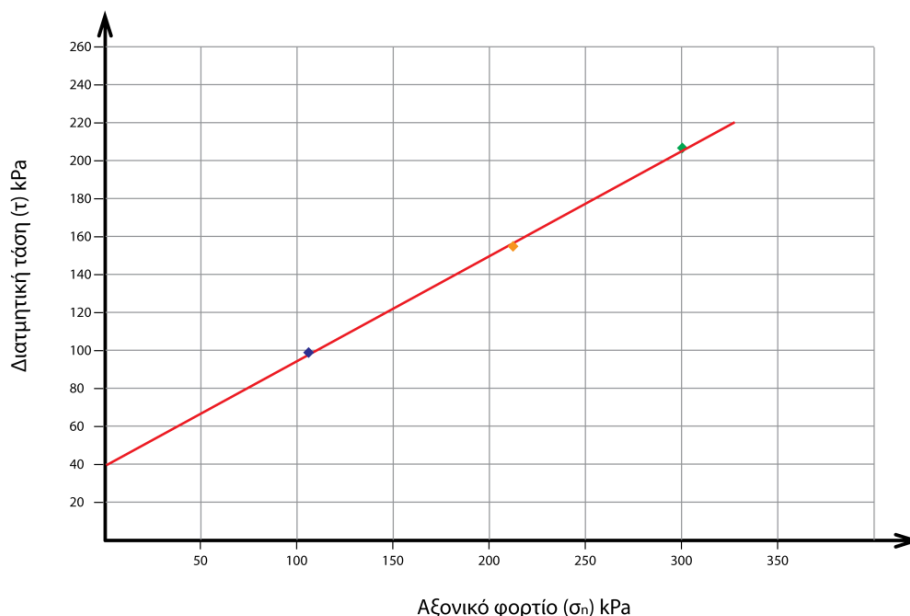
Οι μέγιστες τιμές της διατμητικής τάσης σε σχέση με την αξονική τάση μας δίνουν στην εικόνα (55) τα μέγιστα σημεία των κύκλων Mohr από τους οποίους υπολογίζονται οι μηχανικές παράμετροι του υλικού (Πίνακας 35). Στην εικόνα (55) παρατηρούμε ότι η ευθεία βρίσκεται σχεδόν πάνω και στα τρία σημεία οπότε το αποτέλεσμα της συνοχής και της γωνίας τριβής έχει μεγάλη ακρίβεια.



Εικόνα 53. Συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για τα δείγματα της γεώτρησης Γ5 (10,50 - 10,90).



Εικόνα 54. Συγκεντρωτικό διάγραμμα αξονικής μετατόπισης - διατμητικής παραμόρφωσης για τα δείγματα της γεώτρησης Γ5 (10,50 - 10,90).



Εικόνα 55. Αποτελέσματα των δοκιμών διάτμησης σε φυσική υγρασία στα δείγματα της γεώτρησης Γ5 (10,50 - 10,90)).

Πίνακας 35. Υπολογισμός μηχανικών παραμέτρων για τα δείγματα της γεώτρησης Γ5 (10,50 - 10,90) με βάση τις δοκιμές διάτμησης.

A/A	σ_n (kPa)	τ (kPa)	Μηχανικές Παράμετροι		
1	106	99	c:	40.00	(kPa)
2	212	155	ϕ :	27.85	($^\circ$)
3	300	206			

• Σύγκριση κορεσμένων - ακόρεστων συνθηκών

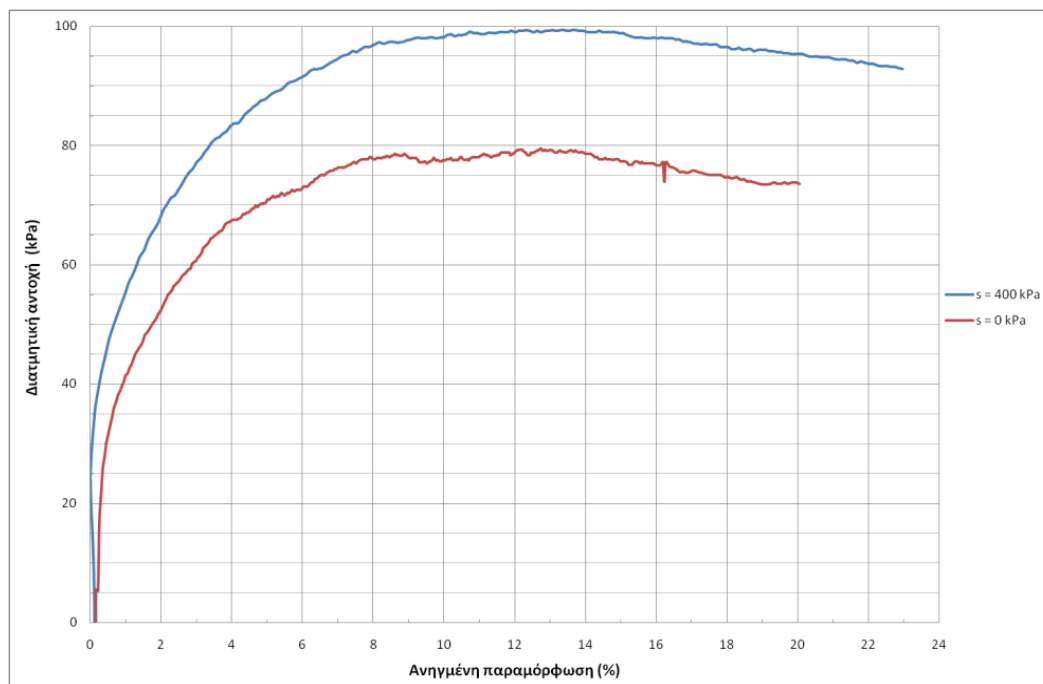
1. Απευθείας διάτμηση - κορεσμός:

Από την δοκιμή στη φυσική υγρασία στα 106 kPa και από την αντίστοιχη της σε κορεσμένες συνθήκες στα 120 kPa πραγματοποιήθηκε σύγκριση ως προς τη μέγιστη και την παραμένουσα διατμητική αντοχή. Στην εικόνα (56) προκύπτει το διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης για τις δύο (2) δοκιμές.

Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι οι δύο (2) καμπύλες έχουν παρόμοια μορφή με τη μέγιστη διατμητική αντοχή για τον κορεσμό να δίνεται στα 80 kPa και να αντιστοιχεί σε 13% παραμόρφωση, ενώ

η διάτμηση σε φυσική υγρασία έδωσε μέγιστη διατμητική αντοχή στα 99 kPa για το ίδιο ποσοστό παραμόρφωσης.

Η παραμένουσα διατμητική αντοχή σε κατάσταση κορεσμού παρατηρείται στα 74 kPa για τιμές παραμόρφωσης πάνω από 18%, ενώ η για τη φυσική υγρασία στα 90 kPa για τιμές παραμόρφωσης πάνω από 25%.



Εικόνα 56. Διάγραμμα διατμητικής τάσης - παραμόρφωσης για δείγματα με διαφορετική τιμή μύζησης.

Από το διάγραμμα μπορεί να υπολογισθεί και παρουσιάζεται στον πίνακα (36) η γωνία ϕ^b του σχηματισμού για το εύρος τάσεων που εκτελέστηκαν οι παραπάνω δοκιμές.

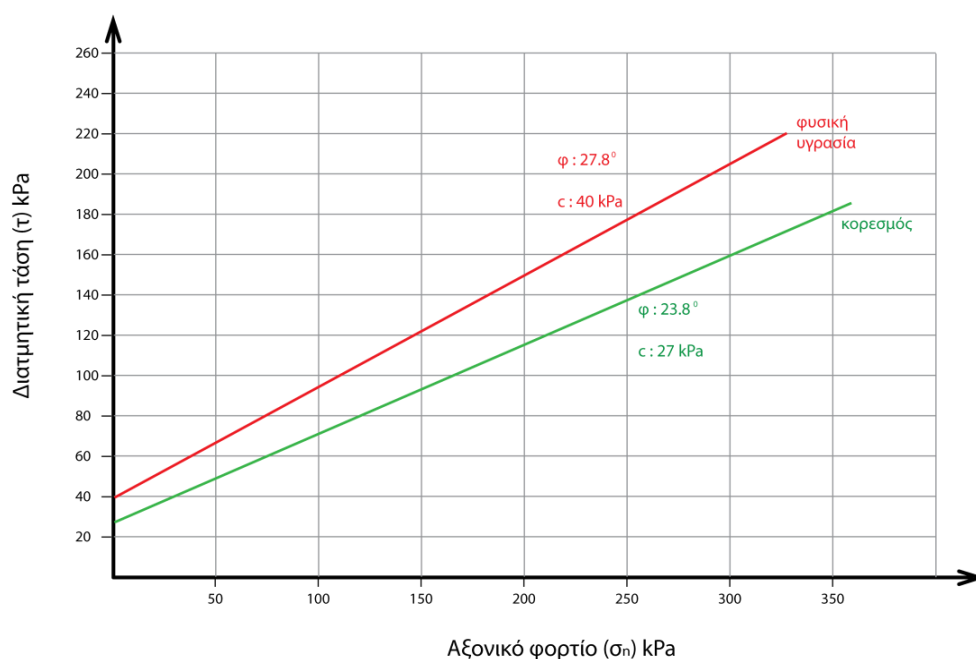
Πίνακας 36. Υπολογισμός γωνίας τριβής ϕ^b με βάση τις εργαστηριακές δοκιμές.

A/A	($u_a - u_w$) (kPa)	τ (kPa)
1	0	80
2	400	99

$$\phi^b : 3 \text{ } (^{\circ})$$

2. μηχανικές παράμετροι στις 2 περιπτώσεις - σύγκριση με επί τόπου δοκιμές:

Στην εικόνα (57) παρατηρούμε τις διαφορές, στις μηχανικές παραμέτρους, μεταξύ των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν με κορεσμό των δειγμάτων (πράσινο χρώμα) και με τη φυσική υγρασία των δειγμάτων (κόκκινο χρώμα). Όπως ήταν αναμενόμενο η συνοχή και η γωνία τριβής σε κορεσμό είναι μικρότερες σε σχέση με τη δεύτερη περίπτωση. Παρατηρείται ότι η γωνία τριβής δεν έχει μεγάλη διαφορά, μόλις 4° , ενώ η συνοχή σχεδόν διπλασιάζεται. Αυτό μας δίνει μία εικόνα για τη σημασία του νερού των πόρων σε ένα ιλυοαμμώδες υλικό.



Εικόνα 57. Συνδυαστικό διάγραμμα μηχανικών παραμέτρων για τις περιπτώσεις κορεσμού και φυσικής υγρασίας στα δείγματα.

Κατά τη γεωτεχνική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή μελέτης παρουσιάστηκαν αποτελέσματα μηχανικών παραμέτρων με βάση τα αποτελέσματα της επί τόπου δοκιμής SPT, οι οποίες υπολογίζονται από εμπειρικές σχέσεις για κάθε στρώμα. Οι εμπειρικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον πίνακα (37), ενώ στον πίνακα (38) δίνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά που υπολογίσθηκαν για το στρώμα S1.

Πίνακας 37. Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού χαρακτηριστικών του εδάφους από τη δοκιμή SPT.

Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού χαρακτηριστικών εδάφους από δοκιμή N _{spt}		
$C_u = 0,6N$	t/m^2	(Terzaghi & Peck)
$\phi' = 0,3N + 27^\circ$ ή SPT (30-50) $\rightarrow \phi = 40^\circ - 45^\circ$		(Peck)
$E_s = 5(N + 15)$	kp/cm^2	(Webb)

Πίνακας 38. Συνοπτικά αποτελέσματα γεωτεχνικής έρευνας στην περιοχή θεμελίωσης του Τεμένους Βαγιαζήτ με βάση τη δοκιμή SPT (Χατζηγώγος, 2015).

Στρώμα	Βάθος (m)	Μέσο Πάχος(m)	N ₃₀ SPT	C _u (kPa)	C _{uspt} (kPa)	E _{soed} (MPa)	E _{sspt} (MPa)	c' (kPa)	φ' (°)	φ' _{spt} (°)
S1	6,3-9,1	4,35	≥50	-	-	-	31,8	0	-	42

Με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών και των επί τόπου δοκιμών στον πίνακα (39) γίνεται σύγκριση όλων των παραμέτρων που έχουν υπολογισθεί στην παρούσα διατριβή. Από τη σύγκριση παρατηρούμε ότι θεωρητικά μία πυκνή άμμος δεν έχει συνοχή και η γωνία τριβής της, η οποία υπολογίζεται αυξημένη σε σχέση με τα εργαστηριακά αποτελέσματα, εξαρτάται από το πόσο πυκνή είναι. Στο εργαστήριο όπου μπορεί να προσομοιωθεί ο βαθμός διαγένεσης του σχηματισμού, αν έχει, υπολογίζεται και η συνοχή που μπορεί να έχει αναπτυχθεί στον σχηματισμό. Τέλος με βάση τη θεωρία της καταστροφής των δεσμών λόγω υψηλών τάσεων (Vargas, 1974) παρατηρούνται παράμετροι πιο κοντά σε αυτές των επί τόπου δοκιμών. Ωστόσο η διαφορά στον υπολογισμό των μηχανικών παραμέτρων μεταξύ των δύο (2) περιπτώσεων μπορεί να μην επηρεάζει τη μηχανική αντοχή ή τη φέρουσα ικανότητα του σχηματισμού στην πραγματικότητα.

Πίνακας 39. Συγκριτικά αποτελέσματα μηχανικών παραμέτρων για το στρώμα S1.

Μηχανικές Παράμετροι			
Κορεσμένες συνθήκες (m=28.14%)	c :	27.0	(kPa)
	φ :	23.8	(°)
Ακόρεστες συνθήκες (m=21.03%)	c :	40.0	(kPa)
	φ :	27.8	(°)
N _{spt}	c :	0.0	(kPa)
	φ :	42.0	(°)
Υψηλές εργαστηριακές τάσεις (Vargas, 1974)	c :	0.0	(kPa)
	φ ^{cr} :	35.0	(°)

Ο όγκος των δεδομένων που επεξεργάστηκε η παρούσα διατριβή για το συγκεκριμένο κεφάλαιο δίνεται στους πίνακες (40) και (41) και όλα τα δεδομένα παρατίθενται σε ηλεκτρονική μορφή (cd-rom).

Πίνακας 40. Συνολικός όγκος δεδομένων για το στάδιο της στερεοποίησης στο 8^ο κεφάλαιο.

Στερεοποίηση											
Δεδομένα που καταγράφονται	Axial Displacement (mm)	Axial Load (kN)	Horizontal Displacement (mm)	Horizontal Load (kN)	Axial Strain (%)	Normal Stress (kPa)	Horizontal Strain (%)	Horizontal Stress (kPa)	Horizontal Eff Stress (kPa)	Effective Area (mm ²)	Normal Effective Stress (kPa)
<i>Γ5 (10,50-10,90) 106kPa</i>											
Πλήθος δεδομένων	203										
Μέγιστο	3.409	0.596	-0.002	0.001	13.113	106.078	-0.006	0.178	1.856	5624.880	107.756
Μέση τιμή	3.387	0.595	-0.087	0.000	13.026	105.900	-0.383	0.000	1.678	5618.498	107.578
Ελάχιστο	0.000	-0.013	-0.087	-0.041	0.000	-2.311	-0.384	-7.289	-5.611	5618.498	-0.634
<i>Γ5 (10,50-10,90) 300kPa</i>											
Πλήθος δεδομένων	164										
Μέγιστο	8.636	1.802	0.000	0.041	34.542	321.013	0.000	7.304	8.982	5625.000	322.690
Μέση τιμή	8.528	1.800	-0.152	0.000	34.112	320.650	-0.924	0.000	1.678	5613.600	322.327
Ελάχιστο	1.344	-0.005	-0.157	-0.031	5.376	-0.889	-0.936	-5.522	-3.844	5613.255	0.789

Πίνακας 41. Συνολικός όγκος δεδομένων για το στάδιο της διάτμησης στο 8^ο κεφάλαιο.

Διάτμηση											
Δεδομένα που καταγράφονται	Axial Displacement (mm)	Axial Load (kN)	Horizontal Displacement (mm)	Horizontal Load (kN)	Axial Strain (%)	Normal Stress (kPa)	Horizontal Strain (%)	Horizontal Stress (kPa)	Horizontal Eff Stress (kPa)	Effective Area (mm ²)	Normal Effective Stress (kPa)
<i>Γ5 (10,50-10,90)106kPa</i>											
Πλήθος δεδομένων	252										
Μέγιστο	4	1	20	0	17	106	92	0	2	5624	108
Μέση τιμή	4	1	10	-1	17	106	45	-114	-113	4887	108
Ελάχιστο	3	0	0	-1	13	106	0	-123	-121	4130	107
<i>Γ5 (10,50-10,90) 212kPa</i>											
Πλήθος δεδομένων	227										
Μέγιστο	5.795	1.200	18.106	0.000	19.316	213.643	74.776	15.118	16.795	5622.607	215.320
Μέση τιμή	5.788	1.057	8.984	-0.858	19.293	213.435	37.114	-174.907	-173.229	4951.215	215.112
Ελάχιστο	5.124	0.911	0.032	-0.874	17.078	213.059	0.128	-200.606	-198.929	4267.065	214.737
<i>Γ5 (10,50-10,90) 300kPa</i>											
Πλήθος δεδομένων	227										
Μέγιστο	9.216	1.807	17.972	-0.204	36.865	328.047	113.782	-37.163	-35.485	5625.000	329.725
Μέση τιμή	9.207	1.451	8.912	-1.109	36.828	300.005	56.462	-230.603	-228.925	4956.578	301.683
Ελάχιστο	8.514	0.072	0.000	-1.157	34.056	13.102	0.000	-252.832	-251.154	4277.100	14.779

8.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι δοκιμές που εκτελέστηκαν στη φυσική υγρασία των δειγμάτων. Πιο συγκεκριμένα αναλύθηκαν: τα φυσικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, η διαδικασία της κάθε δοκιμής και τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών. Από τα παραπάνω υπολογίσθηκαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της Ιλυώδους ΑΜΜΟΥ που εξετάζουμε για ακόρεστες συνθήκες (μετατροπή της φυσικής υγρασίας σε βαθμό κορεσμού).

Όλες οι δοκιμές εκτελέστηκαν με πανομοιότυπη διαδικασία και έδωσαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Οι μηχανικές παράμετροι του 8^{ου} κεφαλαίου συγκρίθηκαν με αυτές του 6^{ου} ως προς τις διαφορές τους και παρατηρήθηκε αυξημένη διατμητική αντοχή σε ακόρεστες συνθήκες. Όσον αφορά τις μηχανικές παραμέτρους βρέθηκε ότι η γωνία τριβής παρουσιάζει αύξηση κατά 4°, ενώ η συνοχή παρουσιάζει αύξηση κατά 48% σε ακόρεστες συνθήκες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε με στόχο τη διερεύνηση των ακόρεστων εδαφικών συνθηκών σε δείγματα αμμώδους εδαφικού σχηματισμού από την περιοχή θεμελίωσης του Τεμένους Βαγιαζήτ (Διδυμότειχο, Έβρος, ΒΑ Ελλάδα). Για την εκπόνηση της πραγματοποιήθηκαν:

- Βιβλιογραφική έρευνα πάνω στη θεωρία των ακόρεστων εδαφών όπου ανατυπώθηκαν, τροποποιήθηκαν ως προς τη μορφοποίηση τους ή και αναδιατυπώθηκαν βασικές έννοιες, ιστορικές αναφορές και σχήματα. Η παραπάνω έρευνα οδήγησε στην κατανόηση των μεθόδων εργαστηριακής προσομοίωσης των καταστατικών φάσεων ενός ακόρεστου εδάφους, καθώς και της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης των Εδαφών.
- Εργαστηριακή προσομοίωση των ακόρεστων εδαφικών συνθηκών σε δείγματα από γεωτεχνική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια σχεδιασμού και υλοποίησης της δομικής και μορφολογικής αποκατάστασης του Τεμένους Βαγιαζήτ. Χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία της έρευνας με τελικό σκοπό τη δημιουργία εδαφικών τομών και την παρουσίαση του γεωτεχνικού μοντέλου της ευρύτερης και στενής περιοχής. Η συνεισφορά της παρούσας διατριβής στην παραπάνω μελέτη ήταν μία σειρά από εργαστηριακές δοκιμές τόσο στον προσδιορισμό των φυσικών παραμέτρων του αμμώδους σχηματισμού, όσο και στον προσδιορισμό των μηχανικών παραμέτρων του.
- Πραγματοποιήθηκε μία σειρά από εργαστηριακές δοκιμές για τον προσδιορισμό των ακόρεστων μηχανικών παραμέτρων. Για τον συγκεκριμένο στόχο ήταν απαραίτητη η δημιουργία της Χαρακτηριστικής Καμπύλης Μύζησης. Οι εργαστηριακές προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στη συσκευή άμεσης διάτμησης με έλεγχο της πίεσης των πόρων (GDS Back Pressured Shearbox) που διαθέτει το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του τμήματος της Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης. Η συγκεκριμένη συσκευή χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην παρούσα διπλωματική εργασία και πριν την έναρξη των

δοκιμών πραγματοποιήθηκε η αρχική εγκατάσταση και βαθμονόμηση της συσκευής.

Με την εκτέλεση των δοκιμών που διεξήχθησαν στα πλαίσια της διατριβής τόσο σε κορεσμένες όσο και σε ακόρεστες συνθήκες προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- Προσδιορισμός των φυσικών χαρακτηριστικών (κοκκομετρική ανάλυση, όρια Atterberg, φυσικής υγρασίας, λόγου κενών, φαινόμενου και ξηρού φαινόμενου βάρους) του εξεταζόμενου ιλυοαμμώδους στρώματος τόσο στην κατάσταση του πριν την έναρξη των δοκιμών, όσο και μετά το τέλος των δοκιμών.
- Προσδιορισμός των μηχανικών παραμέτρων (συνοχή και γωνία τριβής) του αμμώδους στρώματος σε κατάσταση κορεσμού.
- Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης του αμμώδους στρώματος σε δύο (2) φάσεις, σταδιακή ξήρανση και σταδιακή ύγρανση του δείγματος, η οποία συνοδεύεται από πλήρη περιγραφή και παρατήρηση όλων των σταδίων επιβολής ελεγχόμενου βαθμού κορεσμού μέσω ελέγχου της τιμής της μύζησης. Οποιοδήποτε στοιχείο κρίθηκε σημαντικό κατά την παραπάνω διαδικασία περιγράφεται όπου είναι εφικτό.
- Προσδιορισμός των μηχανικών παραμέτρων του αμμώδους στρώματος σε ακόρεστη κατάσταση και η σύγκριση αυτών σε σχέση με την κατάσταση κορεσμού.

Τα παραπάνω αποτελέσματα τόσο κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των δοκιμών, όσο και κατά την επεξεργασία τους οδήγησαν σε συμπεράσματα που αφορούν τη συμπεριφορά του σχηματισμού μεταξύ των διαφορετικών καταστάσεων και τη Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης. Όσον αφορά τη συμπεριφορά παρατηρείται ότι:

- Η μέγιστη υγρασία που μπορεί να παραλάβει ο σχηματισμός είναι κατά μέσο όρο 28,9%, ο λόγος κενών κυμαίνεται μεταξύ του 0,76 και 0,50, ενώ δεν παρουσιάζεται καθόλου πλαστικότητα, ιδιότητα που συμβαδίζει με το ποσοστό αργίλου στον σχηματισμό (μικρότερο από 5%).
- Η γωνία τριβής του υλικού μεταξύ κορεσμού και φυσικής υγρασίας παρουσιάζει διαφορά της τάξης των 4° με χαμηλότερη τιμή αυτή σε κορεσμό (23,8°).

- Η συνοχή του υλικού σε ακόρεστες συνθήκες παρουσιάζει αύξηση σε ποσοστό 48% σε σχέση με τον κορεσμό (40 και 27 kPa αντίστοιχα).
- Υπολογίστηκε η γωνία ϕ^b για την ιλυώδη άμμο με βάση τις εργαστηριακές δοκιμές που έγιναν στις 3^ο.
- Γενικά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του αμμόδους σχηματισμού που αναλύθηκε παρουσιάζουν δύο (2) κατηγοριοποιήσεις. 1^η αυτή των εργαστηριακών αποτελεσμάτων που προσδίδουν στο υλικό μία συνοχή (λόγω της διαγένεσής του) και μικρότερη γωνία τριβής, και 2^η αυτή του θεωρητικού υποβάθρου που ορίζεται από εμπειρικές σχέσεις με μηδενική συνοχή (αμμόδες σχηματισμός) και αυξημένη γωνία τριβής.

Από την κατασκευή της Χαρακτηριστική Καμπύλη Μύζησης προκύπτουν ότι:

- Το σημείο εισόδου του αέρα στο σχηματισμό (air entry value) εντοπίζεται σε μύζηση 15 kPa (πολύ κοντά στην κατάσταση κορεσμού).
- Η μεταβατική ζώνη (transition zone) ορίζεται από 15 - 40 kPa και μετά το τέλος της ορίζεται η παραμένουσα ζώνη (residual zone) έως τη μέγιστη τιμή μύζησης (455 kPa).
- Κατά την αύξηση του βαθμού κορεσμού η καμπύλη παρουσιάζει υστέρηση σε σχέση με τη ξήρανση, δηλαδή εντοπίζεται μία δυσκολία στην πλήρωση των κενών με νερό μέχρι την τιμή μύζησης 55 kPa.
- Όσο η τιμή της μύζησης αυξάνεται, τόσο η απομάκρυνση του νερού από το πλέγμα γίνεται με μικρότερο ρυθμό. Σε αυτό το φαινόμενο αξίζει να σημειωθεί πως στην παραμένουσα ζώνη παρατηρήθηκε "θόρυβος" στις καταγραφές του όγκου του νερού σε σχέση με το χρόνο. Το συγκεκριμένο φαινόμενο δεν παρατηρήθηκε στις υπόλοιπες δύο (2) ζώνες της καμπύλης.
- Παρατηρήθηκε συρρίκνωση του όγκου του δείγματος της τάξης του 8% κατά την αύξηση της μύζησης και 2,8% κατά τη μείωση της.
- Τέλος η κατασκευή της καμπύλης, σε συνδυασμό με τις μηχανικές παραμέτρους που υπολογίστηκαν, δίνει τη δυνατότητα πλήρους περιγραφής της μηχανικής συμπεριφοράς του εξεταζόμενου σχηματισμού σε ακόρεστες συνθήκες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Aitchison, G. D. (1965). Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas.

Bishop, A. W., Alpan, I., Blight, G. E., & Donald, I. B. (1960). Factors Controlling the Shear Strength of Partly Saturated Cohesive Soils. ASCE Res. Conf Shear Strength of Cohesive Soils, Univ. of Colorado, Boulder, CO, (σσ. 503-532).

Escario, V., & Saez, J. (1986). The Shear Strength of Partly Saturated Soils. Geotechnique , 36 (3), (σσ. 453-456).

Escario, V., Juca, J. F., & Coppe, M. S. (1989). Strength and Deformation of Partly Saturated Soils. Proc. 12th Int. Conf. Soil Mech & Found. Eng., (σσ. 43-46). Rio de Janeiro, Brazil.

Fredlund, D. G., & Morgenstern N. R., (1977). Stress State Variables for Unsaturated Soils. ASCE J. Geotech. Eng. Div. GT5 , 103, (σσ. 447-466).

Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). The Shear Strength of Unsaturated Soils. Can. Geotech. J. , 15 (3), (σσ. 313-321).

Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Gan, J. (1987). Nonlinearity of Strength Envelope for Unsaturated Soils. Proc. 6th Int. Conf. Expansive Soils, 1, (σσ. 49-54). New Delhi, India.

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). An overview of unsaturated soil behavior. *Geotechnical special publication*, 1-1.

Richards, B. G. (1965). *Measurement of free energy of soil moisture by the psychrometric technique, using thermistors* (No. pp 39-46).

Vargas, M. (1974). Engineering properties of residual soils from south-central region of Brazil. In *Proceedings of the Second International Conference of the International Association of Engineering Geology, Sao Paulo, Brazil* (Vol. 1, σσ 5,1-5,26).

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος, κλίμακα 1:500.000 (ΜΠΟΡΝΟΒΑ-PONTOΓΙΑΝΝΗ, 1983) Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών

Χατζηγώγος Ν. Π., (2015). Συμβολή στη διερεύνηση των μηχανισμών αστοχίας υπολειμματικών εδαφών, (σσ. 107-122).

Χατζηγώγος, Ν. Π. (2015). Γεωτεχνική Έρευνα - Μελέτη, Διδυμότειχο, νομός Έβρου, Διεξαγωγή Γεωτεχνικής Έρευνας στην περιοχή θεμελίωσης του Τεμένους Βαγιαζήτ Διδυμοτείχου.

Λοιπή Βιβλιογραφία

ASTM D3080-90: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions

GDS Specification Datasheet: (a)Saturated/Unsaturated Back Pressured Shearbox (GDSBPS), (b)Pneumatic Pressure Controller (GDSPPC), (c)Standard Pressure/Volume Controller (STDDPC) v2

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 42. Προσδιορισμός αρχικής υγρασίας και φαινόμενου βάρους Γ2 (6,60m - 7,00m).

Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος		
Βάρος Κάψας:	31.213	gr
Βάρος Κάψας+Δείγματος:	56.200	gr
Βάρος Δείγματος με υγρασία:	24.987	gr
Βάρος Κάψας+Δείγματος μετά την ξήρανση:	50.537	gr
Βάρος Δείγματος μετά την ξήρανση:	19.324	gr
Υπολογισμός Φυσικής Υγρασίας:	29.31	%
Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		
Βάρος Δακτυλίου:	35.861	gr
Βάρος Δακτυλίου+Δείγμα:	109.940	gr
Βάρος Δείγματος:	74.079	gr
Εσωτερική Διάμετρος Δακτυλίου:	5.040	cm
Ύψος Δακτυλίου:	2.000	cm
Όγκος Δακτυλίου:	39.901	cm ³
Υπολογισμός Φαινόμενου Βάρους:	1.857	gr/cm ³

Πίνακας 43. Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα Γ2 (6,60m - 7,00m).

Κοκκομετρική Ανάλυση Εδαφικού Δείγματος						
Αριθμός κόσκινου	Άνοιγμα κόσκινου	Συγκρατούμενο Βάρος		Διερχόμενο Βάρος		
No	mm	gr	%	gr	%	
				74.64		
10	2.000	0.00	0.00	74.64	100.00	
40	0.425	0.02	0.03	74.62	99.97	
100	0.150	1.82	2.44	72.80	97.53	
200	0.075	35.56	47.64	37.24	49.89	
Ανάλυση με πυκνόμετρο	0.047	-	-	-	32.12	
	0.034	-	-	-	21.92	
	0.023	-	-	-	15.79	
	0.013	-	-	-	13.07	
	0.009	-	-	-	10.35	
	0.007	-	-	-	9.26	
	0.003	-	-	-	4.22	d60= 0.02
	0.001	-	-	-	2.86	d30= 0.003
	Παιπάλη	37.24	49.89	0.00	0.00	d10= 0.0015
	Σύνολο	74.64				
Βάρος Δείγματος:		74.64		Cu=	13.33	Cc= 0.30

Πίνακας 44. Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο Γ2 (6,60m - 7,00m).

Κοκκομετρική ανάλυση με πυκνόμετρο									
A/A	ΧΡΟΝΟΣ	ΛΕΠΤΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΑΝΑΓΝΩΣΗ	R	ΠΟΣΟΣΤΟ	d (mm)	ΠΟΣΟΣΤΟ	
			Α	ΠΥΚΝΟΜΕΤΡΟΥ		ΚΟΚΚΩΝ ΣΕ		ΚΟΚΚΩΝ	
						ΑΙΩΡΗΣΗ Ρ		ΕΠΙ	
						(%)		ΑΡΧΙΚΟΥ	
								W (%)	
1	11:35	0	-	-	-	-	-	-	-
2	11:36	1	27.6	26	-2.4	23.6	32.1243	0.0466	32.1243
3	11:37	2	27.6	18.5	-2.4	16.1	21.9153	0.0341	21.9153
4	11:40	5	27.5	14	-2.4	11.6	15.7899	0.0228	15.7899
5	11:50	15	27.6	12	-2.4	9.6	13.0675	0.0133	13.0675
6	10:19	30	27.9	10	-2.4	7.6	10.3451	0.0090	10.3451
7	12:05	60	28.5	9	-2.2	6.8	9.2562	0.0067	9.2562
8	12:35	250	29.3	5	-1.9	3.1	4.2197	0.0033	4.2197
9	11:35	1440	29.4	4	-1.9	2.1	2.8585	0.0014	2.8585
Ws= 74.64									
Διερχόμενο από Νο 10= 100.00									

A/A	ΛΕΠΤΑ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ	Kn	KL	KG	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΚΟΚΚΩΝ ΣΕ ΑΙΩΡΗΣΗ d (mm)
1	0	-	-	-	-	-
2	1	0.0580	0.920	0.860	1.016	0.0466
3	2	0.0400	0.920	0.911	1.016	0.0341
4	5	0.0260	0.920	0.938	1.016	0.0228
5	15	0.0150	0.920	0.950	1.016	0.0133
6	30	0.0100	0.920	0.962	1.016	0.0090
7	60	0.0074	0.920	0.967	1.016	0.0067
8	250	0.0036	0.920	0.990	1.016	0.0033
9	1440	0.0015	0.920	0.996	1.016	0.0014

Πίνακας 45. Προσδιορισμός αρχικής υγρασίας και φαινόμενου βάρους Γ5 (10,50m - 10,90m).

Φυσική Υγρασία Εδαφικού Δείγματος		
Βάρος Κάψας:	55.520	gr
Βάρος Κάψας+Δείγματος:	85.520	gr
Βάρος Δείγματος με υγρασία:	30.000	gr
Βάρος Κάψας+Δείγματος μετά την ξήρανση:	80.300	gr
Βάρος Δείγματος μετά την ξήρανση:	24.780	gr
Υπολογισμός Φυσικής Υγρασίας:	21.07	%

Φαινόμενο Βάρος Εδαφικού Δείγματος		
Βάρος Δακτυλίου:	35.861	gr
Βάρος Δακτυλίου+Δείγμα:	116.230	gr
Βάρος Δείγματος:	80.369	gr
Εσωτερική Διάμετρος Δακτυλίου:	5.040	cm
Ύψος Δακτυλίου:	2.000	cm
Όγκος Δακτυλίου:	39.901	cm ³
Υπολογισμός Φαινόμενου Βάρους:	2.014	gr/cm ³

Πίνακας 46. Κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα Γ5 (10,50m - 10,90m).

Κοκκομετρική Ανάλυση Εδαφικού Δείγματος						
Αριθμός κόσκινου	Άνοιγμα κόσκινου	Συγκρατούμενο Βάρος		Διερχόμενο Βάρος		
No	mm	gr	%	gr	%	
				197.39		
10	2.000	0.08	0.04	197.31	99.96	
40	0.425	11.19	5.67	186.12	94.29	
100	0.150	42.78	21.67	143.34	72.62	
200	0.075	61.23	31.02	82.11	41.60	
Ανάλυση με πυκνόμετρο	0.031	-	-	-	18.93	
	0.022	-	-	-	18.42	
	0.016	-	-	-	16.36	
	0.010	-	-	-	13.53	
	0.007	-	-	-	12.25	
	0.005	-	-	-	10.96	
	0.003	-	-	-	9.47	d60= 0.102
	0.001	-	-	-	5.87	d30= 0.055
	Παιπάλη	82.11	41.60	0.00	0.00	d10= 0.004
	Σύνολο	197.39				
Βάρος Δείγματος:		197.48		Cu=	25.50	Cc= 7.41

Πίνακας 47. Κοκκομετρική ανάλυση με αραιόμετρο Γ5 (10,50m - 10,90m).

Κοκκομετρική ανάλυση με πυκνόμετρο

A/A	ΧΡΟΝΟΣ	ΛΕΠΤΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	ΑΝΑΓΝΩΣΗ ΠΥΚΝΟΜΕΤΡΟΥ	ΔΙΟΡΘΩΣΗ R	R	ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΟΚΚΩΝ ΣΕ ΔΙΩΡΗΣΗ P (%)	d (mm)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΚΟΚΚΩΝ ΕΠΙ ΑΡΧΙΚΟΥ W (%)
1	11:35	0	0	0	0	0	0	0	0
2	11:36	1	28.7	39	-2.2	36.8	18.9416	0.0309	18.9339
3	11:37	2	28.5	38	-2.2	35.8	18.4269	0.0224	18.4194
4	11:40	5	28.5	34	-2.2	31.8	16.3680	0.0156	16.3614
5	11:50	15	28.5	28.5	-2.2	26.3	13.5371	0.0097	13.5316
6	10:19	30	28.4	26	-2.2	23.8	12.2503	0.0067	12.2453
7	12:05	60	28.7	23.5	-2.2	21.3	10.9635	0.0052	10.9590
8	12:35	250	29.4	20.5	-2.1	18.4	9.4708	0.0026	9.4670
9	11:35	1440	29.1	13.5	-2.1	11.4	5.8678	0.0012	5.8654

Ws= 197.39

Διερχόμενο από No 10= 99.96

A/A	ΛΕΠΤΑ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ	Kn	KL	KG	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΚΟΚΚΩΝ ΣΕ ΔΙΩΡΗΣΗ d (mm)
1	0	-	-	-	-	-
2	1	0.0580	0.783	0.669	1.016	0.0309
3	2	0.0400	0.789	0.699	1.016	0.0224
4	5	0.0260	0.814	0.725	1.016	0.0156
5	15	0.0150	0.849	0.752	1.016	0.0097
6	30	0.0100	0.860	0.764	1.016	0.0067
7	60	0.0074	0.878	0.783	1.016	0.0052
8	250	0.0036	0.897	0.805	1.016	0.0026
9	1440	0.0015	0.944	0.830	1.016	0.0012