

Η Επίδραση των Λεπτοκόκκων στη Διατμητική Αντοχή Άμμου

Διπλωματική Εργασία

Κουλαουζίδου Κυριακή

Επιβλ.: Π. Καλλιόγλου, Λέκτορας

2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κ. Καλλιόγλου Πολυξένη, λέκτορα, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ πολύ τα υπόλοιπα μέλη της κριτικής επιτροπής, τον καθηγητή κ. Παναγιώτη Ντακούλα και τον επίκουρο καθηγητή κ. Γιώργο Εφραιμίδη, για την προσεκτική ανάγνωση της δουλειάς μου, καθώς και τη συνάδελφό μου Δανάη Τύρη για τα στοιχεία που μου παρείχε και που συνέβαλαν στα συμπεράσματα του κεφαλαίου 6. Τέλος, θέλω να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Σωτήρη και Ρένα, για τη βοήθεια και τη στήριξή τους σε όλες τις αποφάσεις και τις ενέργειές μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αντοχή του εδάφους αποτελεί μια από τις βασικότερες παραμέτρους σχεδιασμού των έργων του Πολιτικού Μηχανικού. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της συμπεριφοράς αργιλωδών ιλυωδών άμμων σε άμεση διάτμηση, καθώς επίσης και ο συσχετισμός των παραμέτρων αντοχής των εδαφών αυτών με τις φυσικές τους ιδιότητες, για τον προσδιορισμό της επίδρασης του είδους και του ποσοστού των λεπτοκόκκων. Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης εκτελέστηκαν δοκιμές άμεσης διάτμησης σε δοκίμια διαφόρων πυκνοτήτων στη συσκευή άμεσης διάτμησης του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κατάταξης για τον προσδιορισμό των φυσικών χαρακτηριστικών των μελετηθέντων εδαφών. Πριν την εκτέλεση όλων των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν βαθμονομήσεις του σχετικού εξοπλισμού και δημιουργήθηκαν υπολογιστικά φύλλα για την επεξεργασία των δεδομένων – καταγραφών και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Υπολογίστηκε η γωνία τριβής και η συνοχή των μελετηθέντων εδαφών και έγινε σύγκριση με προηγούμενες μελέτες του Εργαστηρίου για την επίδραση του ποσοστού και της πλαστικότητας των λεπτοκόκκων στα αμμώδη εδάφη. Από τη σύγκριση προέκυψαν εξισώσεις προσδιορισμού των παραμέτρων αντοχής με επεξεργασία των αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα στατιστικής ανάλυσης SPSS.

THE EFFECT OF FINES ON SHEAR STRENGTH OF SAND

ABSTRACT

The soil strength is one of the main design parameters in Civil Engineering. The aim of this thesis is the study of clayey-silty sand in direct shear, as well as the correlation of soil strength parameters with their physical properties for the determination of finer influence. Shear tests were performed on sandy specimens of varying densities by means of direct shear apparatus in the Laboratory of Geotechnical Engineering of University of Thessaly. Moreover, classification tests were conducted on the tested soils in order to determine their physical properties. All the devices used, were first calibrated by the author. The analyses of data-records resulted in the determination of internal friction and cohesion of the soils, which were compared with the corresponding results of previous studies in order to study the effect of plasticity and ammount of fines on these parameters. These results were processed in SPSS for the determination of proposed equations expressing this effect.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	17
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	19
1.1. Γενικά	19
1.2. Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο	19
Κεφάλαιο 2 – Δοκιμή άμεσης διάτμησης	21
2.1. Εισαγωγή	21
2.2. Διατμητική αντοχή και κριτήρια αστοχίας	21
2.3. Μέτρηση της διατμητικής αντοχής των εδαφών	22
2.4. Αρχές της δοκιμής άμεσης διάτμησης	23
Κεφάλαιο 3 – Περιγραφή εξοπλισμού και διαδικασία δοκιμής	27
3.1. Δοκιμή άμεσης διάτμησης	27
3.1.1. Περιγραφή συσκευής άμεσης διάτμησης	27
3.1.2. Προετοιμασία δοκιμίων	28
3.1.3. Διαδικασία δοκιμής	28
3.1.4. Υπολογισμός και ανάλυση των αποτελεσμάτων της δοκιμής	30
3.2. Δοκιμές Ταξινόμησης	32
3.2.1. Κοκκομετρική ανάλυση με τον κανονισμό BS 1377	32
3.2.2. Βαθμονόμηση εξοπλισμού με τον κανονισμό BS 1377	33
3.2.3. Υπολογισμός κοκκομετρικής καμπύλης κατά BS 1377	35
3.2.4. Κοκκομετρική ανάλυση με τον κανονισμό ASTM D422-63	38
3.2.5. Δοκιμή συμπύκνωσης	39
3.2.6. Δοκιμή ελάχιστης πυκνότητας	41
Κεφάλαιο 4 – Μελετηθέντα εδάφη – Πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών	77
4.1. Γενικά	77
4.2. Μελετηθέντα εδάφη	77

4.3.	Φυσικά χαρακτηριστικά εδαφών	77
4.4.	Πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών διατμητικής αντοχής	85
Κεφάλαιο 5 – Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης		99
5.1.	Μείγμα καθαρής άμμου και 4% καολίνη, M31-1SILT-4KAOL	99
5.1.1.	Πολύ πυκνή κατάσταση	99
5.1.2.	Πυκνή κατάσταση	99
5.1.3.	Κατάσταση μέσης πυκνότητας	100
5.1.4.	Επίδραση της σχετικής πυκνότητας στη διατμητική αντοχή	100
5.2.	Μείγμα καθαρής άμμου και 12% καολίνη, M31-3SILT-12KAOL.....	100
5.2.1.	Πολύ πυκνή κατάσταση	100
5.2.2.	Κατάσταση μέσης πυκνότητας	100
5.2.3.	Χαλαρή κατάσταση	101
5.2.4.	Επίδραση της σχετικής πυκνότητας στη διατμητική αντοχή	101
Κεφάλαιο 6 – Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα		111
6.1.	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	111
6.2.	Συμπεράσματα	114
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α		139
	Βαθμονόμηση αναλυτικών ζυγών	139
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		149

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<u>Σχήμα 2.1:</u> Γραφική παράσταση του νόμου αστοχίας του Coulomb.....	25
<u>Σχήμα 2.2:</u> Τρόπος λειτουργίας συσκευής.....	25
<u>Σχήμα 2.3:</u> Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης.....	25
<u>Σχήμα 2.4:</u> Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τρεις διαφορετικές ορθές τάσεις.....	26
<u>Σχήμα 3.1:</u> Συσκευή άμεσης διάτμησης	43
<u>Σχήμα 3.2:</u> Κιβώτιο άμεσης διάτμησης: (1) κάτω και (2) άνω μέρος κιβωτίου, (3) οδοντωτές πλάκες, (4) βίδες ανύψωσης, (5) βίδες ένωσης, (6) βάση, (7) καπάκι	43
<u>Σχήμα 3.3:</u> Σύστημα επιβολής κατακόρυφων φορτίων	44
<u>Σχήμα 3.4:</u> Βρασμός πορόλιθων.....	44
<u>Σχήμα 3.5:</u> Μόρφωση δοκιμίου στο κιβώτιο συμπίκνωσης.....	45
<u>Σχήμα 3.6:</u> Οριζοντίωση δοκιμίου	45
<u>Σχήμα 3.7:</u> Βαθύμετρο	46
<u>Σχήμα 3.8:</u> Τα πέντε σημεία επαφής	46
<u>Σχήμα 3.9:</u> Φορτία για δοκιμές σε τάσεις (α) 50,1 (β) 97,4 (γ) 197,4 (δ) 398,92.....	47
<u>Σχήμα 3.10:</u> Ξηρό δοκίμιο	47
<u>Σχήμα 3.11:</u> Κατακόρυφη μετακίνηση – χρόνος στερεοποίησης	48
<u>Σχήμα 3.12:</u> Κατακόρυφη μετακίνηση – τετραγωνική ρίζα χρόνου στερεοποίησης.....	48
<u>Σχήμα 3.13:</u> Διατμητική τάση – οριζόντια μετακίνηση	48
<u>Σχήμα 3.14:</u> Κατακόρυφη παραμόρφωση – οριζόντια μετακίνηση	49
<u>Σχήμα 3.15:</u> Δείκτης πόρων – οριζόντια μετακίνηση	49
<u>Σχήμα 3.16:</u> Σύγκριση αποτελεσμάτων για δοκιμές σε ίδια πυκνότητα και διαφορετική ορθή τάση με τα διαγράμματα (α) διατμητικής τάσης, (β) κατακόρυφης παραμόρφωσης και (γ) δείκτη πόρων ως προς την οριζόντια μετακίνηση.....	51
<u>Σχήμα 3.17:</u> Περιβάλλουσες αστοχίας για μέγιστη και οριακή αντοχή.....	51
<u>Σχήμα 3.18:</u> Ανάμειξη αντιθρομβωτικού διαλύματος	52
<u>Σχήμα 3.19:</u> Σειρά κοσκίνων.....	52
<u>Σχήμα 3.20:</u> Αραιόμετρο	53
<u>Σχήμα 3.21:</u> Διαδικασία αραιομέτρου κατά την καθίζηση.....	53
<u>Σχήμα 3.22:</u> Αραιόμετρο και θερμόμετρο	54
<u>Σχήμα 3.23:</u> Λήψη θερμοκρασίας	54
<u>Σχήμα 3.24:</u> Αραιόμετρο τύπου 151H	54
<u>Σχήμα 3.25:</u> Σημείο επιφάνειας (A) και σημείο κορυφής του μηνίσκου (B)	55
<u>Σχήμα 3.26:</u> Τιμές για διόρθωση θερμοκρασίας.....	55
<u>Σχήμα 3.27:</u> Θάλαμος σταθερής θερμοκρασίας	56
<u>Σχήμα 3.28:</u> Έντυπο για δοκιμή υγρής κοκκομετρίας	57
<u>Σχήμα 3.29:</u> Έντυπο για δοκιμή αραιομέτρου	58
<u>Σχήμα 3.30:</u> Υπολογιστικά φύλλα στο excel για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής καμπύλης, (α) υγρή κοκκομετρία, (β) αραιόμετρο και (γ) κοκκομετρική καμπύλη.....	60
<u>Σχήμα 3.31:</u> Συσκευή Proctor, (α) μεταλλική μήτρα και (β) σφύρα συμπίκνωσης	61

<u>Σχήμα 3.32:</u> Συμπύκνωση πρώτης στρώσης	61
<u>Σχήμα 3.33:</u> Χαλαρό έδαφος στην επιφάνεια μετά τη συμπύκνωση	61
<u>Σχήμα 3.34:</u> Μετά τη συμπύκνωση και της 3 ^{ης} στρώσης	61
<u>Σχήμα 3.35:</u> Οριζοντίωση της συμπυκνωμένης ποσότητας	62
<u>Σχήμα 3.37:</u> Ξήρανση σε κλίβανο 105°C	62
<u>Σχήμα 3.38:</u> Έντυπο της δοκιμής συμπύκνωσης	64
<u>Σχήμα 3.39:</u> Υπολογιστικά φύλλα excel για τον προσδιορισμό της καμπύλης συμπύκνωσης	65
<u>Σχήμα 3.40:</u> Καμπύλη συμπύκνωσης για διάφορα εδάφη (J.N. Mandal, D.G. Dirshikar)	66
<u>Σχήμα 3.41:</u> Προσδιορισμός όγκου στη δοκιμή ελάχιστης πυκνότητας	66
<u>Σχήμα 4.1:</u> Κοκκομετρική καμπύλη άμμου M31 (Τύρη, 2016)	86
<u>Σχήμα 4.2:</u> Κοκκομετρικές καμπύλες αμμοϊλύος D6	86
<u>Σχήμα 4.3:</u> Κοκκομετρική καμπύλη ιλυώδους άμμου, M31-5SILT	87
<u>Σχήμα 4.4:</u> Κοκκομετρική καμπύλη ιλυώδους άμμου, M31-15SILT	87
<u>Σχήμα 4.5:</u> Κοκκομετρική καμπύλη καολίνη	88
<u>Σχήμα 4.6:</u> Κοκκομετρική καμπύλη αργιλώδους άμμου, M31-1SILT-4KAOL	88
<u>Σχήμα 4.7:</u> Κοκκομετρική καμπύλη αργιλώδους άμμου, M31-3SILT-12KAOL	89
<u>Σχήμα 4.8:</u> Κοκκομετρικές καμπύλες M31-5SILT και M31-1SILT-4KAOL	89
<u>Σχήμα 4.9:</u> Κοκκομετρικές καμπύλες M31-15SILT και M31-3SILT-12KAOL	90
<u>Σχήμα 4.10:</u> Καμπύλη συμπύκνωσης M31	90
<u>Σχήμα 4.11:</u> Καμπύλη συμπύκνωσης M31-5SILT	91
<u>Σχήμα 4.12:</u> Καμπύλη συμπύκνωσης M31-15SILT	91
<u>Σχήμα 4.13:</u> Καμπύλη συμπύκνωσης M31-1SILT-4KAOL	92
<u>Σχήμα 4.14:</u> Καμπύλη συμπύκνωσης M31-3SILT-12KAOL	92
<u>Σχήμα 5.1:</u> Μεταβολή (α) της διατμητικής τάσης τ , (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης τ/σ_v , (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης ΔH και (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης $\Delta H/H_{\sigma_{τερ}}$ του δοκιμίου με την οριζόντια μετατόπιση δ , για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης σε πολύ πυκνά δοκίμια αργιλώδους άμμου M31-1SILT-4KAOL.	102
<u>Σχήμα 5.2:</u> Μεταβολή (α) της διατμητικής τάσης τ , (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης τ/σ_v , (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης ΔH και (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης $\Delta H/H_{\sigma_{τερ}}$ του δοκιμίου με την οριζόντια μετατόπιση δ , για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης σε πυκνά δοκίμια αργιλώδους άμμου M31-1SILT-4KAOL.	103
<u>Σχήμα 5.3:</u> Μεταβολή (α) της διατμητικής τάσης τ , (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης τ/σ_v , (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης ΔH και (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης $\Delta H/H_{\sigma_{τερ}}$ του δοκιμίου με την οριζόντια μετατόπιση δ , για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης της αργιλώδους άμμου M31-1SILT-4KAOL στην κατάσταση μέσης πυκνότητας.	104
<u>Σχήμα 5.4:</u> Μεταβολή (α) της μέγιστης διατμητικής τάσης, τ_{max} και (β) της κρίσιμης διατμητικής τάσης, τ_{crit} με τη σχετική πυκνότητα D_r κατά το σύνολο των δοκιμών άμεσης διάτμησης της αργιλώδους άμμου, M31-1SILT-4KAOL, σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης	105
<u>Σχήμα 5.5:</u> Μεταβολή (α) της διατμητικής τάσης τ , (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης τ/σ_v , (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης ΔH και (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης $\Delta H/H_{\sigma_{τερ}}$ του δοκιμίου με την οριζόντια μετατόπιση δ , για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης σε πολύ πυκνά δοκίμια αργιλώδους άμμου M31-3SILT-12KAOL.	106

<u>Σχήμα 5.6:</u> Μεταβολή (α) της διατμητικής τάσης τ , (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης τ/σ_v , (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης ΔH και (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης $\Delta H/H_{\sigma_{τερ}}$ του δοκιμίου με την οριζόντια μετατόπιση δ , για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης της αργιλώδους άμμου M31-3SILT-12KAOL στην κατάσταση μέσης πυκνότητας.	107
<u>Σχήμα 5.7:</u> Μεταβολή (α) της διατμητικής τάσης τ , (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης τ/σ_v , (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης ΔH και (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης $\Delta H/H_{\sigma_{τερ}}$ του δοκιμίου με την οριζόντια μετατόπιση δ , για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης της αργιλώδους άμμου M31-3SILT-12KAOL στην χαλαρή κατάσταση.	108
<u>Σχήμα 5.8:</u> Μεταβολή (α) της μέγιστης διατμητικής τάσης, τ_{max} , και (β) της κρίσιμης διατμητικής τάσης, τ_{crit} , με τη σχετική πυκνότητα D_r κατά το σύνολο των δοκιμών άμεσης διάτμησης της αργιλώδους άμμου, M31-3SILT-12KAOL, σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης.....	109
<u>Σχήμα 6.1:</u> Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για το έδαφος M31-1SILT-4KAOL.....	116
<u>Σχήμα 6.2:</u> Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για το έδαφος M31-3SILT-12KAOL.....	116
<u>Σχήμα 6.3:</u> Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} και (β) της μέγιστης συνοχής, c' με τη σχετική πυκνότητα D_r για την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL.....	117
<u>Σχήμα 6.4:</u> Μεταβολή (α) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (β) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα D_r για την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL.....	117
<u>Σχήμα 6.5:</u> Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} και (β) της μέγιστης συνοχής, c' με τη σχετική πυκνότητα D_r για την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL.....	118
<u>Σχήμα 6.6:</u> Μεταβολή (α) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (β) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα D_r για την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL.....	118
<u>Σχήμα 6.7:</u> Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL σε πολύ πυκνά δοκίμια, $D_r=80-100\%$	119
<u>Σχήμα 6.8:</u> Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL σε μεσαία πυκνότητα, $D_r=30-72\%$	119
<u>Σχήμα 6.9:</u> Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την άμμο M31 και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε χαλαρά δοκίμια, $D_r=6-28\%$	120
<u>Σχήμα 6.10:</u> Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL σε πολύ πυκνά δοκίμια, $D_r=86-98\%$	120
<u>Σχήμα 6.11:</u> Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL σε πυκνά δοκίμια, $D_r=63-74\%$	121
<u>Σχήμα 6.12:</u> Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL σε μεσαία πυκνότητα, $D_r=35-50\%$	121

<u>Σχήμα 6.13:</u> Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την ιλυώδη άμμο M31-15SILT και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε πολύ πυκνά δοκίμια, $D_r=69-100\%$	122
<u>Σχήμα 6.14:</u> Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την ιλυώδη άμμο M31-15SILT και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε χαλαρά δοκίμια, $D_r=0-25\%$	122
<u>Σχήμα 6.15:</u> Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} , (β) της μέγιστης συνοχής, c' , (γ) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (δ) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v=50,1kPa$	123
<u>Σχήμα 6.16:</u> Μεταβολή (α) της γωνίας τριβής, $\phi'_{max}-\phi_{crit}$ και (β) της συνοχής, $c'-c_{crit}$ με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v=50,1kPa$	124
<u>Σχήμα 6.17:</u> Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} , (β) της μέγιστης συνοχής, c' , (γ) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (δ) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v=97,4kPa$	125
<u>Σχήμα 6.18:</u> Μεταβολή (α) της γωνίας τριβής, $\phi'_{max}-\phi_{crit}$ και (β) της συνοχής, $c'-c_{crit}$ με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v=97,4kPa$	126
<u>Σχήμα 6.19:</u> Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} , (β) της μέγιστης συνοχής, c' , (γ) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (δ) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v=197,4kPa$	127
<u>Σχήμα 6.20:</u> Μεταβολή (α) της γωνίας τριβής, $\phi'_{max}-\phi_{crit}$ και (β) της συνοχής, $c'-c_{crit}$ με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31, και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v=197,4kPa$	128
<u>Σχήμα 6.21:</u> Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} , (β) της μέγιστης συνοχής, c' , (γ) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (δ) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31, και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v=398,9kPa$	129
<u>Σχήμα 6.22:</u> Μεταβολή (α) της γωνίας τριβής, $\phi'_{max}-\phi_{crit}$ και (β) της συνοχής, $c'-c_{crit}$ με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31, και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v=398,9kPa$	130
<u>Σχήμα 6.23:</u> Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} , (β) της μέγιστης συνοχής, c' , (γ) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (δ) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} , σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης για τα μελετηθέντα εδάφη	131
<u>Σχήμα 6.24:</u> Μεταβολή (α) της γωνίας τριβής, $\phi'_{max}-\phi_{crit}$ και (β) της συνοχής, $c'-c_{crit}$ με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης.....	132
<u>Σχήμα 6.25:</u> Μεταβολή της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} , με τη σχετική πυκνότητα D_r για (α) την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL και (β) την ιλυώδη άμμο M31-15SILT και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης	132

<u>Σχήμα 6.26:</u> Μεταβολή της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ_{crit} με τη σχετική πυκνότητα D_r για (α) την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL και (β) την ιλυώδη άμμο M31-15SILT και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης	133
<u>Σχήμα 6.27:</u> Μεταβολή της γωνίας τριβής, $\phi'_{max}-\phi_{crit}$ με τη σχετική πυκνότητα D_r για (α) την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL και (β) την ιλυώδη άμμο M31-15SILT και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης	133
<u>Σχήμα 6.28:</u> Μεταβολή της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ_{max} , με τη σχετική πυκνότητα, D_r , για (α) την άμμο M31, την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL και (β) την άμμο M31, την ιλυώδη άμμο M31-15SILT και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης	134
<u>Σχήμα 6.29:</u> Μεταβολή της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα, D_r , για την άμμο M31, τις ιλυώδεις άμμους M31-5SILT και M31-15SILT και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης	135
<u>Σχήμα 6.30:</u> Μεταβολή της γωνίας τριβής, $\phi_{max}-\phi_{crit}$, με την πυκνότητα, D_r για την άμμο M31, τις ιλυώδεις άμμους M31-5SILT και M31-15SILT και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης	136
<u>Σχήμα A.1:</u> Εικόνα του ζυγού AND EK-G	139
<u>Σχήμα A.2:</u> Βαθμονόμηση ζυγού AND EK – G	140
<u>Σχήμα A.3:</u> Εικόνα του ζυγού KERN ABJ 220 – 4NM.....	141
<u>Σχήμα A.4:</u> Βαθμονόμηση του ζυγού KERN ABJ 220 - 4NM.....	142
<u>Σχήμα A.5:</u> Εικόνα του ζυγού KERN PBJ 4200 – 2M	143
<u>Σχήμα A.6:</u> Βαθμονόμηση ζυγού KERN PBJ 4200 - 2M.....	144
<u>Σχήμα A.7:</u> Εικόνα του ζυγού Precisa BJ 610C.....	145
<u>Σχήμα A.8:</u> Βαθμονόμηση ζυγού Precisa BJ 610C	146
<u>Σχήμα A.9:</u> Πρότυπα βάρη	147

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<u>Πίνακας 2.1:</u> Είδη δοκιμών άμεσης διάτμησης.....	26
<u>Πίνακας 3.1:</u> Διαστάσεις κιβωτίου διάτμησης.....	67
<u>Πίνακας 3.2:</u> Διαστάσεις πορόλιθων.....	67
<u>Πίνακας 3.3:</u> Διαστάσεις για φίλτρα και καπάκι.....	67
<u>Πίνακας 3.4:</u> Διαστάσεις για κάτω βάση κιβωτίου και σχάρες.....	68
<u>Πίνακας 3.5:</u> Στοιχεία διαμόρφωσης δοκιμίων.....	68
<u>Πίνακας 3.6:</u> Φορτία στερεοποίησης.....	68
<u>Πίνακας 3.7:</u> Βασικά στοιχεία δοκιμής.....	69
<u>Πίνακας 3.8:</u> Στοιχεία αρχικού δοκιμίου.....	69
<u>Πίνακας 3.9:</u> Στοιχεία τελικού δοκιμίου.....	70
<u>Πίνακας 3.10:</u> Στοιχεία στερεοποίησης.....	70
<u>Πίνακας 3.11:</u> Ενδεικτικές καταγραφές από την έναρξη (αριστερά) και τη λήξη (δεξιά) της διαδικασίας στερεοποίησης.....	71
<u>Πίνακας 3.12:</u> Προσδιορισμός ρυθμού παραμόρφωσης.....	71
<u>Πίνακας 3.13:</u> Στοιχεία διάτμησης.....	71
<u>Πίνακας 3.14:</u> Ενδεικτικές καταγραφές κατά την έναρξη (πάνω) και τη λήξη (κάτω) της διαδικασίας διάτμησης.....	72
<u>Πίνακας 3.15:</u> Ανάλυση των καταγραφών διάτμησης για χρονικές στιγμές αντίστοιχες αυτών του Πίνακα 3.14.....	73
<u>Πίνακας 3.16:</u> Σύγκριση αποτελεσμάτων για δοκιμές με ίδια πυκνότητα και διαφορετική ορθή τάση.....	74
<u>Πίνακας 3.17:</u> Συνοχή και γωνία τριβής για (α) μέγιστη και (β) οριακή αντοχή.....	74
<u>Πίνακας 3.18:</u> Εξωτερική διάμετρος κυλίνδρου 1000ml.....	74
<u>Πίνακας 3.19:</u> Στοιχεία αναδευτήρα.....	74
<u>Πίνακας 3.20:</u> Ενεργά βάρη αραιομέτρου.....	75
<u>Πίνακας 3.21:</u> Ένδειξη αραιομέτρου στην επιφάνεια του νερού και στην κορυφή του μηνίσκου..	75
<u>Πίνακας 3.22:</u> Ιξώδες και πυκνότητα του νερού βάσει θερμοκρασίας.....	75
<u>Πίνακας 3.23:</u> Τιμές διόρθωσης ανάλογα με τη θερμοκρασία του διαλύματος.....	76
<u>Πίνακας 3.24:</u> Τιμές για την ποσότητα K από ASTM.....	76
<u>Πίνακας 3.25:</u> Τιμή διόρθωσης ανάλογα με τη θερμοκρασία του διαλύματος.....	76
<u>Πίνακας 3.26:</u> Διαστάσεις σταθερού τμήματος μήτρας.....	76
<u>Πίνακας 4.1:</u> Παρασκευή δοκιμίων.....	93
<u>Πίνακας 4.2:</u> Αποτελέσματα δοκιμής συμπύκνωσης άμμου M31.....	93
<u>Πίνακας 4.3:</u> Αποτελέσματα δοκιμής συμπύκνωσης ιλυώδους άμμου M31-5SILT.....	93
<u>Πίνακας 4.4:</u> Αποτελέσματα δοκιμής συμπύκνωσης ιλυώδους άμμου M31-15SILT.....	93
<u>Πίνακας 4.5:</u> Αποτελέσματα δοκιμής συμπύκνωσης αργιλώδους άμμου M31-1SILT-4KAOL.....	94
<u>Πίνακας 4.6:</u> Αποτελέσματα δοκιμής συμπύκνωσης αργιλώδους άμμου M31-15SILT-12KAOL.....	94
<u>Πίνακας 4.7:</u> Ελάχιστη πυκνότητα άμμου M31 (σε κύλινδρο με νερό).....	94
<u>Πίνακας 4.8:</u> Ελάχιστη πυκνότητα και μέγιστος δείκτης πόρων της M31 (Τύρη, 2016).....	95

<u>Πίνακας 4.9:</u> Ελάχιστη πυκνότητα ιλυώδους άμμου M31-5SILT (σε κύλινδρο με νερό).....	95
<u>Πίνακας 4.10:</u> Ελάχιστη πυκνότητα και μέγιστος δείκτης πόρων της M31-5SILT (Τύρη,2016)	95
<u>Πίνακας 4.11:</u> Ελάχιστη πυκνότητα ιλυώδους άμμου M31-15SILT (σε κύλινδρο με νερό).....	96
<u>Πίνακας 4.12:</u> Ελάχιστη πυκνότητα και μέγιστος δείκτης πόρων της M31-15SILT (Τύρη, 2016)	96
<u>Πίνακας 4.13:</u> Ελάχιστη πυκνότητα αργιλώδους άμμου M31-1SILT-4KAOL (σε κύλινδρο χωρίς νερό).....	96
<u>Πίνακας 4.14:</u> Φυσικά χαρακτηριστικά μελετηθέντων εδαφών	97
<u>Πίνακας 4.15:</u> Στοιχεία δοκιμών διάτμησης	97
<u>Πίνακας 6.1:</u> Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης για το έδαφος M31-1SILT-4KAOL	137
<u>Πίνακας 6.2:</u> Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης για το έδαφος M31-3SILT-12KAOL	137
<u>Πίνακας 6.3:</u> Τιμές της παραμέτρου αντοχής για τα μελετηθέντα εδάφη	138
<u>Πίνακας A.1:</u> Στοιχεία Ζυγού AND EK-G.....	139
<u>Πίνακας A.2:</u> Βαθμονόμηση του ζυγού AND EK-G	140
<u>Πίνακας A.3:</u> Στοιχεία του ζυγού KERN ABJ 220 – 4NM	141
<u>Πίνακας A.4:</u> Βαθμονόμηση του ζυγού KERN ABJ 220 – 4NM.....	142
<u>Πίνακας A.5:</u> Στοιχεία του ζυγού KERN PBJ 4200 – 2M	143
<u>Πίνακας A.6:</u> Βαθμονόμηση του ζυγού KERN PBJ 4200 - 2M	144
<u>Πίνακας A.7:</u> Στοιχεία του ζυγού Precisa BJ 610C	145
<u>Πίνακας A.8:</u> Βαθμονόμηση ζυγού Precisa BJ 610C	146
<u>Πίνακας A.9:</u> Πρότυπα βάρη	147

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

1.1. Γενικά

Βασική παράμετρος σχεδιασμού των τεχνικών έργων είναι η αντοχή του εδάφους που τα στηρίζει ή τα περιβάλλει ή για τα οποία έχει χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό, καθώς ενδεχόμενη αστοχία του μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση των κατασκευών με σημαντικές οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες.

Για τον προσδιορισμό της εδαφικής αντοχής, αλλά και των φυσικών εδαφικών παραμέτρων πραγματοποιούνται εργαστηριακές και επιτόπου μετρήσεις. Οι εργαστηριακές μέθοδοι είναι γενικά οικονομικότερες των επιτόπου δοκιμών και επιπλέον δίνουν τη δυνατότητα παραμετρικών μελετών (π.χ. δοκιμές σε διάφορα επίπεδα τάσεων και παραμορφώσεων.)

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει πειραματικό χαρακτήρα και σκοπό τη μέτρηση εδαφικών παραμέτρων με εργαστηριακές μεθόδους, οι οποίες εφαρμόστηκαν στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, σε αμμώδη εδάφη με παρουσία πλαστικών λεπτοκόκκων. Η εργασία λειτουργεί συμπληρωματικά σε προηγούμενη μελέτη που αφορούσε σε αμμώδη εδάφη με παρουσία μη-πλαστικών λεπτοκόκκων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών επιτρέπουν τη συσχέτιση των παραμέτρων αντοχής με τις φυσικές ιδιότητες των μελετηθέντων εδαφών καθώς και την μελέτη της επίδρασης των λεπτοκόκκων στην εδαφική αντοχή. Καθώς η πλειονότητα των φυσικών αμμωδών εδαφών περιλαμβάνει την παρουσία λεπτοκόκκων σε διάφορα ποσοστά, η μελέτη αυτή προσβλέπει στην κατανόηση της συμπεριφοράς των φυσικών άμμων που συναντώνται κατά το σχεδιασμό των τεχνικών έργων.

1.2. Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι στόχοι της διπλωματικής εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 δίνεται ο ορισμός της διατμητικής αντοχής του εδάφους και παρουσιάζονται οι αρχές της δοκιμής άμεσης διάτμησης.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που απαιτείται και η διαδικασία που εφαρμόζεται κατά την πραγματοποίηση (α) των δοκιμών άμεσης διάτμησης και (β) των δοκιμών ταξινόμησης των εδαφικών υλικών.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η παρουσίαση των φυσικών ιδιοτήτων των μελετηθέντων εδαφών και δίνεται το πρόγραμμα των δοκιμών άμεσης διάτμησης που πραγματοποιήθηκε.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών άμεσης διάτμησης που πραγματοποιήθηκαν, σε δείγματα άμμου με παρουσία πλαστικών λεπτοκόκκων. Μελετάται η μεταβολή της διατμητικής τάσης και της κατακόρυφης παραμόρφωσης με την οριζόντια μετατόπιση των δοκιμών και εξετάζεται η επίδραση της πυκνότητας στην αντοχή του εδάφους.

Στο Κεφάλαιο 6 πραγματοποιείται ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών και προσδιορίζεται η συνοχή και η γωνία τριβής των μελετηθέντων εδαφών, και αξιολογείται η επίδραση του ποσοστού των λεπτοκόκκων στην αντοχή του εδάφους. Επίσης, γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα δοκιμών σε αμμώδη εδάφη με μη-πλαστικά λεπτόκοκκα για τη μελέτη της επίδρασης του είδους των λεπτοκόκκων.

Στο παράρτημα Α παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης των αναλυτικών ζυγών του εργαστηρίου.

Κεφάλαιο 2 – Δοκιμή άμεσης διάτμησης

2.1. Εισαγωγή

Οι παραμορφώσεις που εκδηλώνονται στο έδαφος λόγω των κατασκευών που εδράζονται ή θεμελιώνονται σε αυτό είναι:

- i. ελαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες στην πράξη είναι πολύ μικρές για τα συνήθη επίπεδα τάσεων
- ii. μεταβολή του εδαφικού όγκου λόγω στερεοποίησης
- iii. ολίσθηση και κύλιση μεταξύ των εδαφικών κόκκων, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ολίσθηση τμήματος του εδάφους ως προς την περιβάλλουσα μάζα.

Η τελευταία κατάσταση οδηγεί στην κατάσταση αστοχίας όταν οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις υπερβαίνουν τη διατμητική αντοχή του εδάφους. Η κατάσταση αστοχίας έχει καταστροφικές συνέπειες στα έργα Πολιτικού Μηχανικού, επειδή συνοδεύεται από σημαντικές παραμορφώσεις που υπερβαίνουν τις αντοχές των συνήθων κατασκευών. (Καββαδάς, 2009)

2.2. Διατμητική αντοχή και κριτήρια αστοχίας

Η διατμητική αντοχή δεν αποτελεί μονοσήμαντη παράμετρο του εδάφους, αλλά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. (Τίκα, 2006)

Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι:

- τα χαρακτηριστικά των εδαφικών κόκκων
- ο δείκτης πόρων και η υγρασία
- η ιστορία φόρτισης και το καθεστώς των τάσεων στο πεδίο
- ο βαθμός διατάραξης του δοκιμίου κατά τη δειγματοληψία και τη διαχώρισή του
- το είδος της δοκιμής, ο ρυθμός φόρτισης και οι συνθήκες στράγγισης κατά τη δοκιμή
- η αναπτυσσόμενη πίεση του νερού των πόρων και
- το κριτήριο προσδιορισμού της διατμητικής αστοχίας.

Σύμφωνα με τον Coulomb (1776) η διατμητική αντοχή του εδάφους αποτελείται από δύο συνιστώσες. Η πρώτη είναι ανεξάρτητη της ορθής τάσης και ονομάζεται συνοχή και η δεύτερη εξαρτάται από την ορθή τάση, οφείλεται στην αλληλεπίδραση των εδαφικών κόκκων και είναι όμοια με την τριβή. (εξίσωση 2.1)

$$\tau_f = c + \sigma \times \tan\phi \quad (2.1)$$

όπου τ_f : διατμητική αντοχή του εδάφους

c: συνοχή

ϕ : γωνία εσωτερικής τριβής

σ : ολική ορθή τάση στο επίπεδο της διάτμησης

Η εξίσωση (2.1) αποτελεί το νόμο αστοχίας του Coulomb η γραφική παράσταση του οποίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 και είναι μια ευθεία με κλίση τη γωνία εσωτερικής τριβής ϕ .

Στην εξίσωση Coulomb οι παράμετροι αντοχής δεν είναι εγγενείς ιδιότητες του εδάφους, αλλά εξαρτώνται από τις συνθήκες κάτω από τις οποίες το έδαφος οδηγείται στην αστοχία. Η κοινή εφαπτομένη των κύκλων του Mohr κατά την αστοχία δοκιμίων του ίδιου εδάφους σε διαφορετικές τάσεις είναι η περιβάλλουσα αστοχίας και εκφράζει τη σχέση μεταξύ διατμητικών και ορθών τάσεων κατά την αστοχία του εδάφους.

Η διατμητική αντοχή του εδάφους συναρτήσει των ενεργών τάσεων εκφράζεται από τη σχέση Hvorslev – Coulomb (1937).

$$\tau_f = c + (\sigma - u) \times \tan\phi = c + \sigma' \times \tan\phi \quad (2.2)$$

όπου σ' : η ενεργή ορθή τάση στο επίπεδο αστοχίας

Οι παράμετροι c και ϕ εξαρτώνται από το δείκτη πόρων του εδάφους κατά την αστοχία.

Ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής από τη σχέση (2.2) προϋποθέτει τη μέτρηση της πίεσης του νερού των πόρων u.

2.3. Μέτρηση της διατμητικής αντοχής των εδαφών

Η περιβάλλουσα αστοχίας δεν είναι μονοσήμαντη για ένα έδαφος, αλλά εξαρτάται από τις συνθήκες φόρτισης (αργή ή ταχεία), τις συνθήκες στράγγισης (διαπερατά και αδιαπέρατα εδάφη), την ιστορία φόρτισης (υπερστερεοποίηση) και την πυκνότητα του εδάφους. Έτσι, πολλές φορές κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός της διατμητικής αντοχής του εδάφους με διάφορα είδη δοκιμών.

Οι εργαστηριακές δοκιμές που χρησιμοποιούνται στην πράξη για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής του εδάφους είναι η δοκιμή τριαξονικής φόρτισης, η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, η δοκιμή άμεσης διάτμησης και η δοκιμή πτερυγίου.

Οι δοκιμές αυτές ταξινομούνται ως εξής:

1. χωρίς στράγγιση κατά τη διάρκεια της διάτμησης
 - i. αστράγγιστη (ταχεία) δοκιμή UU (unconsolidated undrained), στην οποία το δοκίμιο φορτίζεται χωρίς να λάβει χώρα στράγγιση, δηλαδή στερεοποίηση, και στη συνέχεια υποβάλλεται σε διάτμηση χωρίς στράγγιση
 - ii. με στερεοποίηση και αστράγγιστη διάτμηση, δοκιμή CU (consolidated undrained), στην οποία το δοκίμιο φορτίζεται υπό πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες και, αφού ολοκληρωθεί η στερεοποίησή του, υποβάλλεται σε διάτμηση χωρίς στράγγιση.
2. με στερεοποίηση και διάτμηση υπό πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες, δοκιμή CD (consolidated drained), στην οποία το δοκίμιο φορτίζεται υπό πλήρως στραγγιζόμενες συνθήκες και, αφού ολοκληρωθεί η στερεοποίησή του, υποβάλλεται σε διάτμηση με βραδύ ρυθμό ώστε να λαμβάνει χώρα αποστράγγιση του δοκιμίου.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής του εδάφους εξαρτάται από τις συνθήκες στράγγισης που επικρατούν στο πεδίο.

2.4. Αρχές της δοκιμής άμεσης διάτμησης

Η δοκιμή της άμεσης διάτμησης αποτελεί μια από τις απλούστερες και παλαιότερες μεθόδους για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Είναι μια δοκιμή προσδιορισμού της τριβής στην οποία ένα τμήμα εδάφους ολισθαίνει ως προς ένα άλλο τμήμα κατά την εφαρμογή μιας σταθερά αυξανόμενης οριζόντιας διατμητικής δύναμης υπό την ταυτόχρονη δράση ενός σταθερού φορτίου, κάθετου στο επίπεδο της ολίσθησης.

Οι παραπάνω συνθήκες φόρτισης επιτυγχάνονται εγκιβωτίζοντας το δοκίμιο εντός άκαμπτου μεταλλικού κιβωτίου. Το κιβώτιο αποτελείται από δύο τμήματα (άνω και κάτω). Το κάτω τμήμα έχει τη δυνατότητα ολίσθησης ως προς το άνω, το οποίο παραμένει ακίνητο, με τη βοήθεια ενός μηχανισμού. Παράλληλα, ένα μεταλλικό πλαίσιο συνδεδεμένο με ένα μοχλοβραχίονα χρησιμοποιείται για την επιβολή της κατακόρυφης τάσης, η οποία παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της διάτμησης. Το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει τον τρόπο λειτουργίας της συσκευής.

Η δοκιμή εκτελείται σε δύο στάδια. Στο στάδιο I επιβάλλεται στο δοκίμιο το κατακόρυφο φορτίο και στο στάδιο II επιβάλλεται η διατμητική δύναμη. Ανάλογα με τις συνθήκες στράγγισης του δοκιμίου στα δύο στάδια προκύπτουν τα είδη δοκιμών του Πίνακα 2.1.

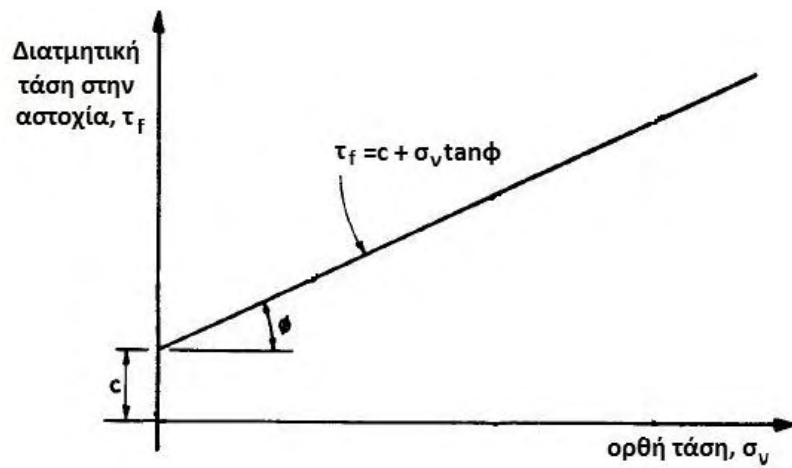
Η επιβαλλόμενη ορθή τάση στο δοκίμιο υπολογίζεται ως $\sigma_v = N/A$, όπου N είναι το κατακόρυφο φορτίο στην επιφάνεια ολίσθησης και A είναι η διατομή του κιβωτίου διάτμησης. Κατά τη διάρκεια της διάτμησης μετράται η σχετική μετακίνηση των δύο τμημάτων του κιβωτίου, που προκαλεί προοδευτική εφαρμογή της δύναμης F, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, που παρουσιάζει την καμπύλη τάσης- παραμόρφωσης.

Η επιβαλλόμενη διατμητική τάση στο δοκίμιο υπολογίζεται ως $\tau=F/A$, όπου F είναι η διατμητική δύναμη στο προκαθορισμένο επίπεδο διάτμησης. Στο σημείο Β του Σχήματος 2.3 ενεργοποιείται η μέγιστη διατμητική τάση στην επιφάνεια ολίσθησης. Η διατμητική αυτή τάση καλείται αντοχή του εδάφους στη συγκεκριμένη ορθή τάση, σ_v . Μετά τη μέγιστη τάση, η διατμητική αντοχή ελαττώνεται καθώς επέρχεται θραύση.

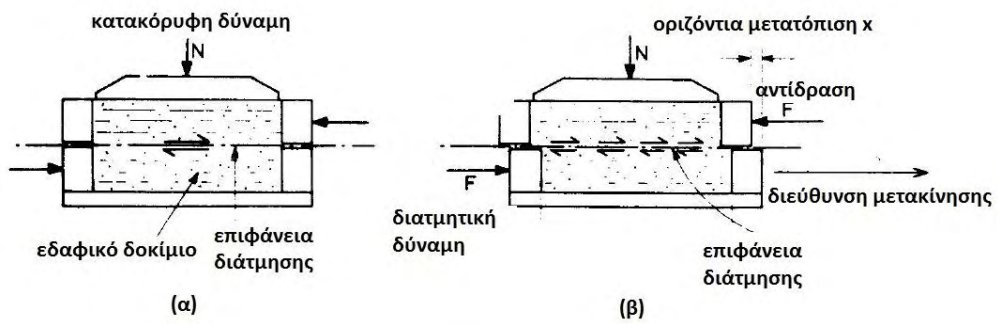
Κατά τη διάρκεια της διάτμησης μετράται η οριζόντια μετατόπιση, καθώς και η κατακόρυφη μετατόπιση του δοκιμίου, η οποία υποδεικνύει τη μεταβολή του όγκου του δοκιμίου κατά τη διάτμηση. Ο ρυθμός επιβολής της οριζόντιας μετατόπισης του κιβωτίου προεπιλέγεται στην έναρξη της διάτμησης και παραμένει σταθερός καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής. Έτσι, η διάτμηση λαμβάνει χώρα υπό σταθερό ρυθμό παραμόρφωσης.

Συνήθως πραγματοποιούνται τρεις δοκιμές σε διαφορετικά δοκίμια (1, 2 και 3) του ίδιου εδάφους, στα οποία επιβάλλονται διαφορετικές ορθές τάσεις ($\sigma_{v1}<\sigma_{v2}<\sigma_{v3}$), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4. Από κάθε καμπύλη διατμητικής τάσης-μετατόπισης προσδιορίζεται η μέγιστη διατμητική τάση ($\tau_{f1}<\tau_{f2}<\tau_{f3}$), η οποία σχεδιάζεται ως προς την αντίστοιχη ορθή τάση για τον προσδιορισμό της περιβάλλουσας Mohr-Coulomb.

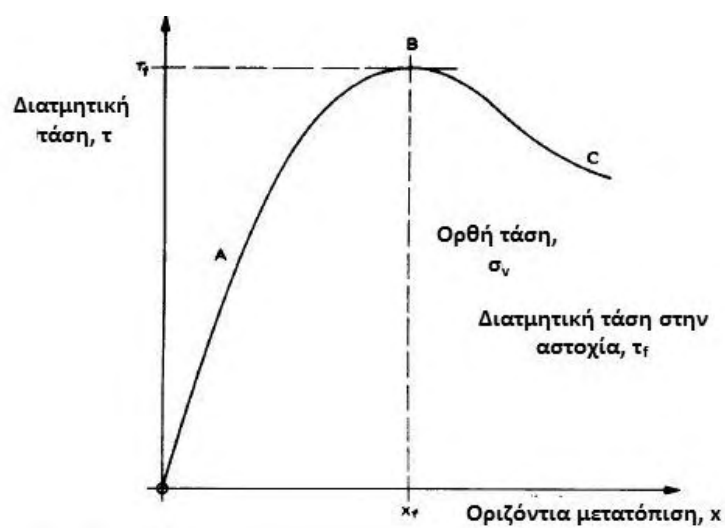
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα της δοκιμής άμεσης διάτμησης είναι η απλότητα και η ταχύτητα στην εκτέλεση ενός προγράμματος δοκιμών. Βέβαια, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της δοκιμής είναι υποδεέστερη των αντίστοιχων αποτελεσμάτων της δοκιμής τριαξονικής φόρτισης. Επίσης, η αστοχία στη δοκιμή άμεσης διάτμησης λαμβάνει χώρα σε προκαθορισμένο επίπεδο που είναι το οριζόντιο και το οποίο δεν είναι πάντα το ασθενέστερο. Οι τάσεις σε οποιοδήποτε άλλο επίπεδο, εκτός από την επιφάνεια θραύσης, δεν είναι γνωστές. Τέλος, η συσκευή άμεσης διάτμησης δεν παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης της πίεσης του νερού των πόρων και κατά συνέπεια δε δίνει τη δυνατότητα πλήρους ελέγχου των συνθηκών στράγγισης του δοκιμίου. Για το λόγο αυτό η δοκιμή εφαρμόζεται κυρίως υπό στραγγιζόμενες συνθήκες.



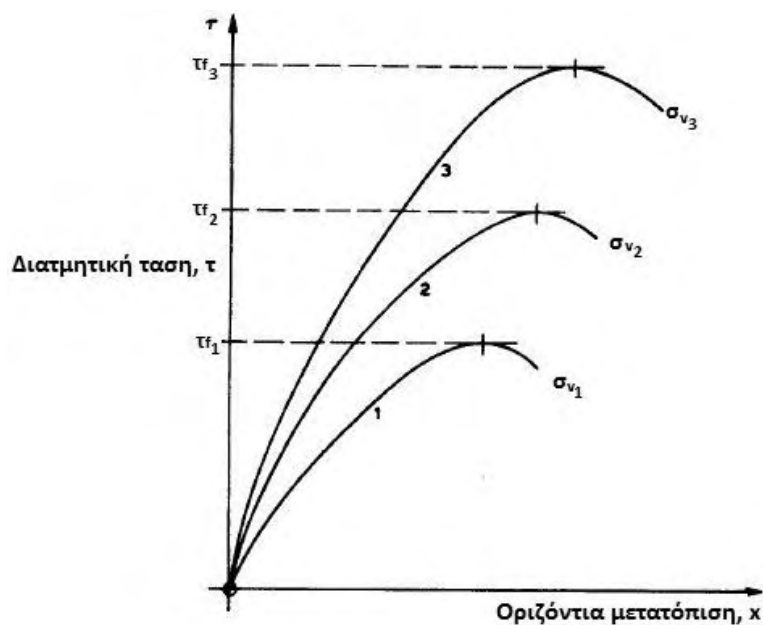
Σχήμα 2.1: Γραφική παράσταση του νόμου αστοχίας του Coulomb.



Σχήμα 2.2: Τρόπος λειτουργίας συσκευής.



Σχήμα 2.3: Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης.



Σχήμα 2.4: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τρεις διαφορετικές ορθές τάσεις.

Πίνακας 2.1: Είδη δοκιμών άμεσης διάτμησης.

Είδος Δοκιμής	Στάδιο I	Στάδιο II
Ταχεία χωρίς στερεοποίηση (UU)	Αστράγγιστες συνθήκες	Αστράγγιστες συνθήκες
Ταχεία με στερεοποίηση (CU)	Συνθήκες πλήρους στράγγισης	Αστράγγιστες συνθήκες
Βραδεία με στερεοποίηση (CD)	Συνθήκες πλήρους στράγγισης	Συνθήκες πλήρους στράγγισης (μικρή ταχύτητα διάτμησης)

3.1. Δοκιμή άμεσης διάτμησης

3.1.1. Περιγραφή συσκευής άμεσης διάτμησης

Οι δοκιμές άμεσης διάτμησης που παρουσιάζονται σε αυτή τη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν στη συσκευή του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, τύπου VJT9500, Σχήμα 3.1. Αναλυτική περιγραφή της συσκευής δίνεται από τη φοιτήτρια Τύρη Δανάη (2016).

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το μεταλλικό κιβώτιο διάτμησης μέσα στο οποίο τοποθετείται ή μορφώνεται το κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο. Είναι διαιρετό και αποτελείται από δύο τμήματα (άνω και κάτω) τα οποία ενώνονται με δύο βίδες. Στο κιβώτιο υπάρχουν επίσης οι βίδες ανύψωσης που ρυθμίζουν την κατακόρυφη απόσταση των δύο τμημάτων. Στις βάσεις του δοκιμίου τοποθετούνται διάτρητες, οδοντωτές πλάκες για τη διασφάλιση επαφής του δοκιμίου στο κιβώτιο. Στη συνέχεια, τοποθετούνται πορώδεις δίσκοι για τη δυνατότητα στράγγισης του δοκιμίου. Έγινε έλεγχος των διαστάσεων του κιβωτίου και των εξαρτημάτων για την τήρηση των προδιαγραφών του Κανονισμού. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν είτε με βερνιέρο είτε με ηλεκτρονικό παχύμετρο και παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 3.1 έως 3.4.

Χρησιμοποιήθηκαν τρία ζεύγη πορόλιθων. Οι μετρήσεις στον Πίνακα 3.2 αφορούν στο πρώτο ζεύγος, για το οποίο το αφαιρούμενο ύψος υπολογίστηκε ίσο με 29,27mm. Λόγω μεγάλης χρήσης, οι πορόλιθοι υπέστησαν φθορά με αποτέλεσμα να σπάσει ο ένας από τους δύο και να αντικατασταθεί με έναν πορόλιθο που παραχώρησε προσωρινά το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Το αφαιρούμενο ύψος τότε υπολογίστηκε ίσο με 29,91mm. Το τρίτο ζεύγος αποτελείται από καινούριους πορόλιθους και το αφαιρούμενο ύψος μετρήθηκε ίσο με 29,14mm. Ως αφαιρούμενο ύψος ορίζεται το συνολικό πάχος της κάτω βάσης, των οδοντωτών πλακών, των φίλτρων, των πορόλιθων και του καπακιού. Η συσκευή διαθέτει σύστημα επιβολής κατακόρυφων φορτίων Σχήμα 3.3. Ο μοχλοβραχίονας για την τοποθέτηση των νεκρών φορτίων έχει λόγο 1:10.

Ο κινητήρας για την οριζόντια μετακίνηση του κιβωτίου διάτμησης έχει τη δυνατότητα επιβολής ταχύτητας από 0,0001 έως 10mm/min.

Η συσκευή επίσης διαθέτει δύο μηχανοσκόπετρα ακριβείας 0,001mm για την παρακολούθηση και καταγραφή των οριζόντιων και κατακόρυφων μετακινήσεων στο δοκίμιο. Η μέτρηση της οριζόντιας δύναμης γίνεται μέσω δυναμοκυψέλης με μέγιστη ικανότητα 5KN.

Τη συσκευή υποστηρίζει το καταγραφικό όργανο MPX3000 της VJTech το οποίο είναι συνδεδεμένο με τα μηχανοσκόπετρα και τη δυναμοκυψέλη. Επίσης, είναι συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή και μέσω του προγράμματος Clisp Studio της VJTech ελέγχεται η

λειτουργία της συσκευής κατά τη διάτμηση και γίνεται η καταγραφή των μετρήσεων των αισθητήρων μήκους και της δυναμοκυψέλης.

3.1.2. Προετοιμασία δοκιμίων

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε δοκίμια άμμου με πλαστικά λεπτόκοκκα. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της υγρής υποσυμπύκνωσης (undercompaction method, Ladd 1978). Η μέθοδος αυτή θεωρείται κατάλληλη για τη διαμόρφωση ομοιόμορφων δοκιμίων άμμου με λεπτόκοκκα και επιτρέπει την παρασκευή δοκιμίων σε μεγάλο εύρος πυκνοτήτων.

Η συμπύκνωση επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας τάση σε στρώσεις υλικού, ξεκινώντας από τη βάση και καταλήγοντας στην κορυφή του δοκιμίου. Οι στρώσεις αποτελούνται από ισοβαρείς ποσότητες υλικού αναμεμιγμένες με ποσότητα απεσταγμένου νερού ώστε να αποκτήσει την κατάλληλη υγρασία. Πριν τη συμπύκνωση των στρώσεων το υλικό παραμένει εντός θαλάμου για τουλάχιστον 12 ώρες. Η συμπύκνωση κάθε στρώσης γίνεται στη συγκεκριμένη συσκευή με τη χρήση ξύλινης σφύρας βάρους 93,94gr από ύψος 1-2cm. Η συμπύκνωση καθορίζεται τόσο από την υγρασία του δείγματος όσο και από τον αριθμό των χτύπων συμπύκνωσης. Ο αριθμός των χτύπων αυξάνεται προς τις ανώτερες στρώσεις ώστε όλες οι στρώσεις να έχουν την ίδια συμπύκνωση.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, χρησιμοποιήθηκαν οι συνδιασμοί χτύπων και υγρασίας, για τη διαμόρφωση δοκιμίων σε διάφορες πυκνότητες, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5. Αναλυτικά τα ποσοστά των εδαφικών υλικών για την παρασκευή του μείγματος που χρησιμοποιείται στη δημιουργία του κάθε δοκιμίου δίνονται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.1.3. Διαδικασία δοκιμής

Οι δοκιμές άμεσης διάτμησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές των Κανονισμών ASTM D3080-98 και BS 1377: part7: 1990 καθώς επίσης και την προτεινόμενη από τον Head διαδικασία.

Η δοκιμή αποτελείται από τρεις φάσεις. Στην πρώτη φάση γίνεται η προετοιμασία του δοκιμίου, στη δεύτερη η στερεοποίηση και στην τρίτη η διάτμησή του. Τα βήματα της διαδικασίας είναι, συνοπτικά, τα εξής:

1. Προετοιμασία ξηρής ποσότητας περίπου 200gr του εδαφικού μείγματος.
2. Προσθήκη απεσταγμένου νερού και παραμονή σε κλειστό θάλαμο ή κάλυψη με πλαστική μεμβράνη για τουλάχιστον 12 ώρες.
3. Βρασμός των πορόλιθων σε νερό για την απομάκρυνση του αέρα από τους πόρους, Σχήμα 3.4.
4. Επάλειψη της επιφάνειας επαφής των δύο τμημάτων του κιβωτίου καθώς και του εσωτερικού του.
5. Τοποθετούνται οι κοχλίες ανύψωσης χωρίς να προεξέχουν στο τελικό άκρο τους και στη συνέχεια ενώνονται τα δύο τμήματα του κιβωτίου με τους κοχλίες ένωσης και τοποθετείται η μεταλλική βάση του κιβωτίου.
6. Ζυγίζεται το κιβώτιο μαζί με τις οδοντωτές σχάρες, το καπάκι, τους πορόλιθους και τα φίλτρα που προηγουμένως έχουν βυθιστεί σε νερό.
7. Ζυγίζεται το καπάκι, ο άνω πορόλιθος, το φίλτρο και η οδοντωτή σχάρα για τον συνυπολογισμό τους στο φορτίο στερεοποίησης.
8. Το εδαφικό δείγμα χωρίζεται σε ποσότητες των 20gr περίπου που είναι τοποθετημένες μέσα σε υποδοχείς.
9. Γίνεται η μόρφωση του δοκιμίου στο κιβώτιο συμπύκνωσης με τη μέθοδο της υγρής υποσυμπύκνωσης, Σχήμα 3.5.
10. Οι οδοντωτές πλάκες έχουν τοποθετηθεί με τις ράγες κάθετες στη διεύθυνση διάτμησης.
11. Γίνεται έλεγχος της οριζοντίωσης του δοκιμίου με την τοποθέτηση αλφαδιού (σωληνωτή αεροστάθμη) στην κορυφή του καπακιού, Σχήμα 3.6. Σε περίπτωση που δεν είναι οριζόντιο συμπληρώνεται εδαφικό υλικό στο δοκίμιο.
12. Με τη χρήση βαθυμέτρου (Σχήμα 3.7) μετράται το ύψος του δοκιμίου μαζί με το καπάκι, τη βάση, τους πορόλιθους, τα φίλτρα και τις οδοντωτές πλάκες. Η μέτρηση αυτή επαναλαμβάνεται σε τρία σημεία και ο μέσος όρος τους αποτελεί το μετρηθέν ύψος (Μ.Υ.)
13. Πραγματοποιείται μέτρηση της μάζας του κιβωτίου με το υγρό δοκίμιο.
14. Τοποθετείται μια ποσότητα των 20gr του εδαφικού δείγματος στον κλίβανο (105°C) για τον προσδιορισμό της αρχικής υγρασίας του δοκιμίου.
15. Μεταφέρεται προσεκτικά το κιβώτιο στη συσκευή και ρυθμίζεται η θέση του σφίγγοντας τις βίδες στα πέντε σημεία επαφής, Σχήμα 3.8.
16. Υπολογίζονται τα φορτία στερεοποίησης, Πίνακας 3.6.
17. Γίνεται οριζοντίωση του βραχίονα, η επαφή του με τον κατακόρυφο άξονα και η τοποθέτηση των νεκρών φορτίων, Σχήμα 3.9.
18. Το μεταλλικό στέλεχος επιβολής του κατακόρυφου φορτίου κεντράρεται ρυθμίζοντας τον κοχλία. Αφού το μηκυσιόμετρο έχει προσαρμοστεί στην κορυφή του κοχλία, ο τελευταίος έρχεται προσεκτικά σε επαφή με το καπάκι του κιβωτίου.
19. Τοποθετείται νερό στη συσκευή γύρω από το κιβώτιο και αφαιρούνται οι βίδες ένωσης του κιβωτίου. Δεν έχει σημασία η σειρά των ενεργειών αυτών.
20. Στο πρόγραμμα Clisp Studio ενεργοποιείται η εντολή για την καταγραφή της στερεοποίησης. Σημειώνεται στο έντυπο η ώρα έναρξης της καταγραφής και η ένδειξη του κατακόρυφου μηκυσιόμετρου. Ορίζεται καθυστέρηση πέντε δευτερολέπτων από την ενεργοποίηση της εντολής (Run) μέχρι την έναρξη της καταγραφής. Η καθυστέρηση αυτή

είναι επιβεβλημένη για την επιβολή του κατακόρυφου φορτίου στο δοκίμιο. Το φορτίο επιβάλλεται ξεβιδώνοντας τον κοχλία που συγκρατεί το σύστημα φόρτισης και ξεκινά η στερεοποίηση.

21. Μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης και της καταγραφής της, από την καμπύλη καθίζησης και χρόνου στερεοποίησης υπολογίζεται ο ρυθμός παραμόρφωσης που θα επιβληθεί στο δοκίμιο κατά το επόμενο στάδιο, δηλαδή αυτό της διάτμησης. Ο ρυθμός αυτός εισάγεται στο πρόγραμμα Clisp Studio.
22. Πριν την έναρξη της διάτμησης ελέγχεται αν οι κοχλίες συγκράτησης (κόκκινες βίδες) των δύο τμημάτων του κιβωτίου έχουν αφαιρεθεί, διαφορετικά γίνεται τότε η αφαίρεση. Στη συνέχεια οι κοχλίες ανύψωσης στρέφονται κατά 180° ώστε να γίνει ανύψωση του άνω μέρους του κιβωτίου για να μην υπάρχει τριβή στο κιβώτιο κατά τη διάτμηση.
23. Δίνεται η εντολή της καταγραφής και της εκκίνησης της διάτμησης από το Clisp Studio.
24. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας διάτμησης, γίνεται αναστροφή της φοράς λειτουργίας της οριζόντιας μετακίνησης για να επανέλθει το κιβώτιο στην αρχική του θέση (εντολή Reverse).
25. Αφαιρούνται τα φορτία από τη συσκευή.
26. Αφαιρείται το κιβώτιο διάτμησης.
27. Το δοκίμιο μετά το πέρας της δοκιμής τοποθετείται στον κλίβανο (105°C) εντός ζυγισμένου υποδοχέα για τη μέτρηση της ξηρής του μάζας, Σχήμα 3.10.

3.1.4. Υπολογισμός και ανάλυση των αποτελεσμάτων της δοκιμής

Οι υπολογισμοί και η ανάλυση των αποτελεσμάτων γίνεται σύμφωνα με τους κανονισμούς ASTM D3080-98 και BS 1377: part7: 1990 και την προτεινόμενη από τον Head διαδικασία.

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα excel, όπως αυτό περιγράφεται παρακάτω.

Σε κάθε τάση στερεοποίησης αναλογούν 4 καρτέλες:

1. Η πρώτη περιλαμβάνει τα βασικά στοιχεία της δοκιμής όπως ημερομηνία δοκιμής, στοιχεία εδαφικού δείγματος και προετοιμασία δοκιμίου, Πίνακας 3.7.
2. Η δεύτερη, περιλαμβάνει τα δεδομένα του δοκιμίου πριν και μετά το τέλος της δοκιμής, Πίνακας 3.8 και Πίνακας 3.9 αντίστοιχα. Τα δεδομένα αυτά είναι η υγρασία, η μάζα, το ύψος, η πυκνότητα και ο δείκτης πόρων του δοκιμίου. Στους υπολογισμούς του ύψους του δοκιμίου θεωρείται πως και οι δύο οδοντωτές πλάκες έχουν εισχωρήσει στο δοκίμιο.
3. Η τρίτη καρτέλα παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη στερεοποίηση του δοκιμίου, Πίνακας 3.10. Τυπικό δείγμα ανάλυσης των καταγραφών στερεοποίησης παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.11.

Η συνολική κατακόρυφη τάση στο δοκίμιο υπολογίζεται από το συνολικό φορτίο που τοποθετείται στο βραχίονα πολλαπλασιασμένο επί 10 και του φορτίου που εφαρμόζεται απευθείας στο δοκίμιο εντός του κιβωτίου (καπάκι, πορόλιθος, φίλτρο, οδοντωτή πλάκα). Η καθίζηση του δοκιμίου υπολογίζεται αφού αφαιρεθεί η συμπίεση του συστήματος. Δεν υπάρχει μεταβολή ύψους που πρέπει να ληφθεί υπόψη λόγω των οδοντωτών πλακών, καθώς η εισχώρησή τους έχει ληφθεί υπόψη στο ύψος του δοκιμίου κατά το προηγούμενο στάδιο.

Αναλυτικά οι υπολογισμοί παρουσιάζονται από τη φοιτήτρια Τύρη Δανάη (2016).

Τυπικά αποτελέσματα του σταδίου στερεοποίησης από το πρόγραμμα δίνονται στα Σχήματα 3.11 και 3.12.

Από τα διαγράμματα μεταβολής της κατακόρυφης μετατόπισης με το χρόνο προσδιορίζεται ο χρόνος στερεοποίησης και από εκεί υπολογίζεται ο προβλεπόμενος χρόνος αστοχίας και η μετακίνηση αστοχίας.

Τα μεγέθη αυτά δίνουν τελικά το ρυθμό παραμόρφωσης, Πίνακας 3.12, ο οποίος εισάγεται στο Clisp Studio για την εκτέλεση του σταδίου διάτμησης.

4. Στην τέταρτη καρτέλα παρουσιάζονται τα δεδομένα της διάτμησης, Πίνακας 3.13, και οι υπολογισμοί που προκύπτουν από τις καταγραφές της δυναμοκυψέλης και των δύο αισθητήρων μήκους. Ενδεικτικοί υπολογισμοί παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.14 και 3.15.

Ο υπολογισμός της διατμητικής δύναμης γίνεται βάσει της εξίσωσης βαθμονόμησης της δυναμοκυψέλης.

Αναλυτικά οι υπολογισμοί αυτού του σταδίου παρουσιάζονται από την Τύρη (2016).

Τυπικά αποτελέσματα της διάτμησης παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.13 έως 3.15.

Από τα σχήματα αυτά μπορεί να υπολογιστεί η μέγιστη διατμητική αντοχή και η διατμητική αντοχή στην κρίσιμη κατάσταση.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για δοκίμια του ίδιου εδάφους που μελετήθηκαν σε διαφορετικές τάσεις στερεοποίησης αλλά στην ίδια πυκνότητα παρουσιάζονται στο τελευταίο φύλλο του προγράμματος.

Ενδεικτικά αποτελέσματα, υπολογισμοί και διαγράμματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.16 και 3.17 και στα Σχήματα 3.16 και 3.17.

Από το συγκεντρωτικό διάγραμμα διατμητικής προς ορθή τάση εκτιμώνται οι παράμετροι αντοχής, c και ϕ .

3.2. Δοκιμές Ταξινόμησης

3.2.1. Κοκκομετρική ανάλυση με τον κανονισμό BS 1377

Εφαρμόστηκε η υγρή μέθοδος με τη χρήση κοσκίνων και ακολούθησε η μέθοδος του αραιομέτρου. Ο συνδυασμός των μεθόδων αυτών γίνεται σε εδάφη που περιέχουν λεπτόκοκκα. Το πρώτο στάδιο των μεθόδων είναι η προετοιμασία του δοκιμίου. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για αυτό το στάδιο είναι, σύμφωνα με τον κανονισμό BS 1377: part2: 1990 και την προτεινόμενη διαδικασία από τον Head, ο ακόλουθος:

- Μηχανικός αναδευτήρας
- Γυάλινος υποδοχέας
- Ογκομετρικός κύλινδρος
- Αναλυτικός ζυγός
- Αντιθρομβωτικό μέσο (εξαμεταφωσφορικό νάτριο) (NaPO_3)₆
- Απεσταγμένο νερό
- Γυάλινη ράβδος
- Κλίβανος
- Μεμβράνη

Επιλέγεται μια ποσότητα ξηρού εδαφικού δείγματος (έχει προηγουμένως ξηρανθεί σε κλίβανο στους 105°C) και τοποθετείται σε γυάλινο υποδοχέα. Στη συνέχεια προετοιμάζεται ένα λίτρο αντιθρομβωτικού διαλύματος (Σχήμα 3.18) κανονικότητας 1N. Η αναλογία είναι 40gr εξαμεταφωσφορικού νατρίου στο ένα λίτρο διαλύματος. Στο διάλυμα περιέχεται απεσταγμένο νερό.

Προστίθενται 125ml αντιθρομβωτικού διαλύματος στα 50gr ξηρού εδαφικού δείγματος που έχουν διαχωριστεί. Το μείγμα σκεπάζεται με μεμβράνη και παραμένει κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για τη μέθοδο της υγρής κοκκομετρίας και του αραιομέτρου είναι:

- Αναδευτήρας
- Κόσκινα και συλλέκτης
- Ογκομετρικός κύλινδρος 1000ml με πώμα
- Αραιόμετρο
- Θερμόμετρο
- Απιονισμένο νερό

Την επομένη το μείγμα μεταφέρεται στον κάδο του αναδευτήρα, καθαρίζοντας καλά τον υποδοχέα με απιονισμένο νερό και γίνεται ανάδευση ενός λεπτού.

Στην υγρή κοκκομετρία χρησιμοποιείται στήλη από κόσκινα, Σχήμα 3.19, με το κόσκινο της μεγαλύτερης διαμέτρου στην κορυφή, το κόσκινο με τη μικρότερη διάμετρο (63 μ m) στη βάση και κάτω από αυτό το συλλέκτη. Το εδαφικό μείγμα διέρχεται από τα κόσκινα με τη χρήση νερού και τη βοήθεια των δακτύλων, όπου απαιτείται. Η συγκρατούμενη σε κάθε κόσκινο εδαφική μάζα συγκεντρώνεται σε προζυγισμένο υποδοχέα και ακολούθως σε κλίβανο στους 105°C. Μετά την ξήρανό της ζυγίζεται για να προσδιοριστεί το συγκρατούμενο ποσοστό σε κάθε κόσκινο.

Το εδαφικό δείγμα που διήλθε από τη στήλη κοσκίνων και συγκεντρώθηκε στο συλλέκτη, μεταφέρεται σε γυάλινο ογκομετρικό κύλινδρο περιεκτικότητας ενός λίτρου. Στο διάλυμα προστίθεται απιονισμένο νερό ώστε ο τελικός όγκος του εδαφικού διαλύματος να είναι ακριβώς ένα λίτρο.

Στη συνέχεια ο κύλινδρος σφραγίζεται με πλαστικό πώμα και ανακινείται (πάνω- κάτω) για ένα λεπτό. Ο κύλινδρος τοποθετείται προσεκτικά σε επίπεδη και σταθερή επιφάνεια και αφαιρείται προσεκτικά το καπάκι, ξεκινώντας το χρονόμετρο για τη διαδικασία της καθίζησης. Γίνεται προσεκτική εισχώρηση του αραιομέτρου (Σχήμα 3.20) στο διάλυμα για την καταγραφή της ένδειξης του στο ύψος του μηνίσκου, Σχήμα 3.21, και στη συνέχεια αφαιρείται και τοποθετείται εντός γυάλινου σωλήνα με απιονισμένο νερό, Σχήμα 3.22. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την καταγραφή των ενδείξεων του αραιομέτρου στους παρακάτω χρόνους, από την έναρξη της καθίζησης, με ταυτόχρονη μέτρηση της θερμοκρασίας του διαλύματος, Σχήμα 3.23. Χρόνοι λήψης ενδείξεων: 15 δευτ., 30 δευτ., 1 λεπτό, 2 λεπτά, 4 λεπτά, 8 λεπτά, 15 λεπτά, 30 λεπτά, 1 ώρα, 2 ώρες, 4 ώρες, 8 ώρες και 24 ώρες.

3.2.2. Βαθμονόμηση εξοπλισμού με τον κανονισμό BS 1377

Χρησιμοποιήθηκε ογκομετρικός κύλινδρος 1000ml με πλαστικό πώμα για τη διευκόλυνση της ανακίνησης του περιεχομένου. Το ύψος του κυλίνδρου από τη βάση μέχρι το στόμιο μετρήθηκε με μεταλλικό κανόνα ίσο με 45,6cm, η απόσταση από την ένδειξη των 100ml ως αυτή των 1000ml μετρήθηκε ίση 30,75cm και εξωτερική διάμετρος του κυλίνδρου με ηλεκτρονικό βερνιέρο ίση με 65,44cm, Πίνακας 3.18.

Τα στοιχεία του αναδευτήρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.19.

Το αραιόμετρο είναι τύπου 151H με σειριακό αριθμό SN 5360404, Σχήμα 3.24. Για τη μέτρηση των διαστάσεων του χρησιμοποιήθηκε μεταλλικός κανόνας. Ο όγκος του αραιομέτρου είναι $V_h=50\text{cm}^3$ και το ύψος του βολβού είναι $h=173\text{mm}$.

Η απόσταση από το πάνω μέρος του βολβού (λαιμός) μέχρι την πρώτη διαβάθμιση του αραιομέτρου συμβολίζεται με N . Η απόσταση κάθε επόμενης διαβάθμισης από την πρώτη συμβολίζεται με d_i , ενώ με H_i συμβολίζεται η απόσταση κάθε διαβάθμισης από το πάνω μέρος

βολβού, δηλαδή το άθροισμα $H_i = N + d_i$. Το ενεργό βάθος για κάθε μία από τις κύριες διαβαθμίσεις του αραιομέτρου υπολογίζεται από τον τύπο:

$$H_{Ri} = H_i + \frac{1}{2} \times \left(h - \frac{Vh \cdot L}{900} \right) \quad (3.1)$$

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.20. Από τον πίνακα προσδιορίστηκε η εξίσωση (3.2) για τη βαθμονόμηση του αραιομέτρου.

$$H_R = -0,2105 \times (R_h' + C_m) + 17,565 \quad (3.2)$$

όπου R_h' : τιμή αραιομέτρου, όπως προκύπτει από την ένδειξη αφαιρώντας τη μονάδα και πολλαπλασιάζοντας με το 1000 και
 C_m : διόρθωση λόγω μηνίσκου.

Η βαθμονόμηση του αραιομέτρου έγινε σε θερμοκρασία 20°C και οι διαγραμμώσεις του έχουν βαθμονομηθεί από τον κατασκευαστή σε απιονισμένο νερό. Καθώς όμως η δοκιμή του αραιομέτρου πραγματοποιείται σε διάλυμα που, εκτός από απιονισμένο νερό, περιέχει και αντιθρομβωτικό μέσο, αλλά επίσης και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος που πιθανά διαφέρει από τους 20°C, απαιτούνται κάποιες αλλαγές στις αναγνώσεις των ενδείξεων του αραιομέτρου.

- i. Η πρώτη διόρθωση είναι αυτή του μηνίσκου. Το εδαφικό διάλυμα κατά τη διάρκεια της δοκιμής είναι αδιαφανές και για το λόγο αυτό η ανάγνωση της ένδειξης του αραιομέτρου γίνεται στην κορυφή του μηνίσκου και όχι στο επίπεδο της οριζόντιας επιφάνειας του διαλύματος. Η διαδικασία που εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό της απαιτούμενης διόρθωσης είναι:

Γεμίζει ο ογκομετρικός κύλινδρος που χρησιμοποιείται στη δοκιμή με 800ml απιονισμένο νερό.

Εισάγεται το αραιόμετρο της δοκιμής στον κύλινδρο.

Καταγράφεται η ένδειξη του αραιομέτρου στην επιφάνεια του νερού (A) και στο μηνίσκο (B), Σχήμα 3.25.

Οι ενδείξεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.21.

Η διόρθωση λόγω μηνίσκου είναι:

$$C_m = (A - B) \times 1000 = (0,9995 - 0,9990) \times 1000 = 0,5$$

Η τιμή αυτή προστίθεται στην ένδειξη του αραιομέτρου.

- ii. Η δεύτερη διόρθωση είναι αυτή που αφορά στη μεταβολή της πυκνότητας του νερού λόγω θερμοκρασίας και η οποία προκύπτει από την κατασκευή του αραιομέτρου. Η μέγιστη πυκνότητα του απιονισμένου νερού παρατηρείται στους 4°C με την ένδειξη στο αραιόμετρο να είναι 1,000. Σύμφωνα όμως με τους Βρετανικούς Κανονισμούς (1975) τα αραιόμετρα κατασκευάζονται ώστε να έχουν ένδειξη 1,000 στους 20°C, αντί για 0,9982 που είναι η πραγματική πυκνότητα του απιονισμένου νερού, Πίνακας 3.22.

Επομένως, στις ενδείξεις του αραιομέτρου προστίθεται η ποσότητα

$$(1,000 - 0,9982) \times 1000 = 1,8$$

- iii. Η τρίτη διόρθωση αφορά στη χρήση του αντιθρομβωτικού μέσου που μεταβάλλει την πυκνότητα του απιονισμένου νερού. Ως αντιθρομβωτικό μέσο χρησιμοποιείται εξαμεταφωσφορικό νάτριο. Σε απιονισμένο νερό διαλύεται ποσότητα 2gr αντιθρομβωτικού, ώστε να προκύψει διάλυμα 50gr (αναλογία 40gr αντιθρομβωτικού μέσου σε 1 λίτρο διαλύματος). Η ποσότητα αυτή τοποθετείται σε προζυγισμένο υποδοχέα με μάζα m_1 και ζυγίζεται ως μάζα m_2 ο υποδοχέας μαζί με το διάλυμα. Για τις ζυγίσεις χρησιμοποιείται αναλυτικός ζυγός με ακρίβεια δύο δεκαδικών. Στη συνέχεια ο υποδοχέας τοποθετείται σε κλίβανο στους 105°C . Μετά την ξήρανση γίνεται επαναζύγιση του υποδοχέα, m_3 . Η ποσότητα $m_d=m_3-m_1$ είναι η ξηρή μάζα του αντιθρομβωτικού μέσου. Η διόρθωση που εισάγεται είναι $x=2 \times m_d=4,28$. Η τιμή αυτή αφαιρείται από τις ενδείξεις του αραιομέτρου.
- iv. Η τέταρτη διόρθωση εισάγεται λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας του διαλύματος και συνεπώς της πυκνότητάς του κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η διόρθωση γίνεται βάσει των τιμών που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.26 από τον Head. Από τις τιμές του Σχήματος 3.25 προέκυψε ο Πίνακας 3.23. Η διόρθωση για κάθε επίπεδο θερμοκρασίας είναι η M_t και προστίθεται στις ενδείξεις του αραιομέτρου. Η εξίσωση που προκύπτει από τον Πίνακα 3.23 είναι η ακόλουθη:
- $$M_t=0,0056 \times T^2-0,0444 \times T-1,3639 \quad (3.3)$$
- όπου T είναι η θερμοκρασία του διαλύματος σε $^{\circ}\text{C}$.

Λαμβάνοντας υπόψην όλες τις παραπάνω διορθώσεις, η τελική ένδειξη του αραιομέτρου υπολογίζεται ως

$$R=R_h' + C_m+M_t-x+1,8 \quad (3.4)$$

3.2.3. Υπολογισμός κοκκομετρικής καμπύλης κατά BS 1377

Η κοκκομετρική καμπύλη είναι ένα διάγραμμα με οριζόντιο άξονα τη διάμετρο των κόκκων σε χιλιοστά και σε λογαριθμική κλίμακα και κατακόρυφο άξονα το διερχόμενο ή συγκρατούμενο ποσοστό σε κάθε διάμετρο.

Για τον υπολογισμό της κοκκομετρικής καμπύλης των εδαφών έγινε ένα πρόγραμμα στο excel που αποτελείται από τρία φύλλα: αυτό για τη μέθοδο των κοσκίνων, αυτό για τη μέθοδο του αραιομέτρου και αυτό της κοκκομετρικής καμπύλης. Για το σχεδιασμό τη κοκκομετρικής καμπύλης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Grapher. Οι απαιτούμενες ποσότητες για το σχεδιασμό της κοκκομετρίας είναι δύο: η διάμετρος των κόκκων και το συγκρατούμενο ή διερχόμενο ποσοστό που αντιστοιχεί σε κάθε διάμετρο.

Με τη μέθοδο των κοσκίνων η διάμετρος των κοσκίνων είναι γνωστή και ίδια με την ονομαστική διάμετρο των κοσκίνων. Το συγκρατούμενο ποσοστό των κοσκίνων υπολογίζεται από τον τύπο για το πρώτο κόσκινο (με τη μεγαλύτερη διάμετρο)

$$R_1 = m_{dry1} \times 100/m \quad (\%)$$

όπου m_{dry1} : το ξηρό εδαφικό υλικό που συγκρατείται στο πρώτο κόσκινο και m : η συνολική ξηρή μάζα του εδαφικού δείγματος.

Το διερχόμενο ποσοστό για το πρώτο κόσκινο είναι

$$P_1 = 100 - R_1 \quad (\%)$$

Το συγκρατούμενο ποσοστό για το δεύτερο κόσκινο είναι

$$R_2 = m_{dry2} \times 100/m \quad (\%)$$

όπου m_{dry2} : το ξηρό εδαφικό υλικό που συγκρατείται στο δεύτερο κόσκινο.

Το διερχόμενο ποσοστό για το δεύτερο κόσκινο είναι

$$P_2 = P_1 - R_2 \quad (\%)$$

Ομοίως για το τρίτο κόσκινο

$$P_3 = P_2 - R_3 \quad (\%) \quad \text{κ.ο.κ.}$$

Οι υπολογισμοί για τη μέθοδο του αραιομέτρου βασίζονται στο νόμο του Stokoe (1891) σύμφωνα με τον οποίο η ταχύτητα της καθίζησης των κόκκων είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου τους. Η θεωρία βασίζεται στο γεγονός πως οι κόκκοι μεγαλύτερης διαμέτρου καθιζάνουν γρηγορότερα συγκριτικά με αυτούς μικρότερης διαμέτρου. Οι παραδοχές της θεωρίας είναι πως οι εδαφικοί κόκκοι έχουν ίδια πυκνότητα και σφαιρικό σχήμα.

Η ταχύτητα καθίζησης των κόκκων εντός διαλύματος υπολογίζεται από τη σχέση

$$u = D^2 \times g \times \frac{(\rho_s - \rho_w)}{18 \cdot \eta} \quad (3.5)$$

όπου D : η διάμετρος των κόκκων

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

ρ_s : πυκνότητα στερεών κόκκων

ρ_w : πυκνότητα νερού

η : κινηματικό ιξώδες του νερού

Επιλύοντας ως προς τη διάμετρο D ισχύει:

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta}{g} \times \frac{v}{\rho_s - \rho_w}} \quad (3.6)$$

Όμως, κατά τη διάχυση απόστασης H σε χρόνο t, για τους κόκκους, η ταχύτητα είναι $v = H/t$. Αντικαθιστώντας στην παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta}{g} \times \frac{1}{\rho_s - \rho_w} \times \frac{H}{t}}$$

Θέτοντας $g = 9,807 \text{ m/sec}^2$

$$\rho_w = 1,000 \text{ Mg/m}^3$$

$$G_s = \rho_s / \rho_w$$

Προκύπτει

$$\frac{D}{1000} = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta}{1000 \cdot 9,807} \times \frac{1}{1000 \cdot (G_s \cdot 1 - 1)} \times \frac{H}{1000 \cdot t \cdot 60}} \Rightarrow$$

$$D = 0,005531 \times \sqrt{\frac{\eta \cdot H}{(G_s - 1) \cdot t}} \quad \text{ή} \quad D = K \times \sqrt{H/t}$$

όπου D: η διάμετρος των κόκκων σε mm

H: το ενεργό βάθος για τη συγκεκριμένη ένδειξη του αραιομέτρου σε mm

t: ο διελεύων χρόνος από την έναρξη της καθίζησης σε min

$$K = 0,005531 \times \sqrt{\frac{\eta}{(G_s - 1)}}$$

όπου G_s : το ειδικό βάρος των στερεών κόκκων του εδάφους

η : το ιξώδες του νερού, Πίνακας 3.22.

Ο υπολογισμός του ιξώδους συναρτήσει της θερμοκρασίας του διαλύματος γίνεται από την εξίσωση (3.7).

$$\eta = 0,0005 \times T^2 - 0,0463 \times T + 1,7586 \quad (3.7)$$

Το διερχόμενο ποσοστό που αντιστοιχεί σε κάθε διάμετρο κόκκων υπολογίζεται από την εξίσωση (3.8)

$$P = \frac{G_s \cdot R}{m \cdot (G_s - 1)} \times 100 \quad (\%) \quad (3.8)$$

όπου R: η διορθωμένη ένδειξη του αραιομέτρου και

m: η αρχική ξηρή μάζα του εδαφικού δείγματος.

3.2.4. Κοκκομετρική ανάλυση με τον κανονισμό ASTM D422-63

Ως προς τη διαδικασία της δοκιμής η προετοιμασία του εδαφικού δείγματος με το αντιθρομβωτικό είναι ίδια. Η κύρια διαφορά με τους βρετανικούς κανονισμούς είναι πως αφού το μείγμα μεταφερθεί στον αναδευτήρα, προστίθεται απιονισμένο νερό ώστε η στάθμη να φθάσει στα 2/3 του κυπέλου, γίνεται ανάδευση για ένα λεπτό και στη συνέχεια τοποθετείται στον ογκομετρικό κύλινδρο για τη δοκιμή του αραιομέτρου. Η δοκιμή του αραιομέτρου προηγείται της υγρής μεθόδου με τα κόσκινα.

Η διαδικασία έχει ως εξής:

Μετά τη μεταφορά του εδαφικού δείγματος από τον αναδευτήρα στον κύλινδρο, προστίθεται ποσότητα απιονισμένου νερού ώστε η τελική στάθμη του διαλύματος να φθάσει στην ένδειξη των 1000ml. Στη συνέχεια σφραγίζεται ο κύλινδρος με το πλαστικό πώμα και ανακινείται για περίπου ένα λεπτό με αναστροφές και επιστροφή στην όρθια θέση 60 φορές. Έπειτα τοποθετείται σε επίπεδη επιφάνεια, αφαιρείται το πώμα και ξεκινά η χρονομέτρηση της καθίζησης. Γίνεται μέτρηση της πυκνότητας του διαλύματος με το αραιόμετρο και της θερμοκρασίας του με θερμομέτρο στους χρόνους καθίζησης που αναφέρθηκαν για το βρετανικό κανονισμό και με τον ίδιο τρόπο.

Μετά την ολοκλήρωση της μεθόδου του αραιομέτρου, το διάλυμα μεταφέρεται στη στήλη των κοσκίων. Με τη χρήση νερού γίνεται διέλευση των κόκκων από τα κόσκινα. Η ποσότητα του εδάφους που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο τοποθετείται σε προζυγισμένους υποδοχείς και έπειτα στον κλίβανο στους 105°C προς ξήρανση. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η ξηρή ποσότητα της εδαφικής μάζας που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο.

Σε ό,τι αφορά τους υπολογισμούς για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής καμπύλης, χρησιμοποιούνται οι ίδιοι τύποι με αυτούς των βρετανικών κανονισμών, με μόνες διαφορές τα εξής δύο σημεία:

- i. Η διόρθωση των ενδείξεων του αραιομέτρου είναι συνολική, συμβολίζεται με C_{or} και η διαδικασία προσδιορισμού της παρουσιάζεται παρακάτω.
- ii. Η ποσότητα K που περιλαμβάνεται στον τύπο για τον υπολογισμό της διαμέτρου των κόκκων προκύπτει από τον Πίνακα 3.24.

Η διαδικασία για τον προσδιορισμό της συνολικής διόρθωσης του αραιομέτρου είναι η εξής:

Σε θάλαμο (λουτρό) σταθερής και ελεγχόμενης θερμοκρασίας γεμάτο με νερό τοποθετούνται δύο ογκομετρικοί κύλινδροι, ο ένας εκ των οποίων έχει όγκο 1000ml και είναι γεμάτος με απιονισμένο νερό. Ο άλλος κύλινδρος περιέχει νερό και χρησιμοποιείται απλώς για τη διατήρηση του αραιομέτρου και του θερμομέτρου εντός του, στις φάσεις που δεν χρησιμοποιούνται, Σχήμα 3.27.

Ρυθμίζεται η θερμοκρασία του λουτρού μέσω θερμοστάτη στην επιθυμητή θερμοκρασία και δίνεται ο απαραίτητος χρόνος ώστε όλα τα μόρια του περιεχόμενου νερού να αποκτήσουν την

ίδια θερμοκρασία. Μετρώνται η θερμοκρασία και η ένδειξη του αραιομέτρου στον ογκομετρικό κύλινδρο με το απιονισμένο νερό και καταγράφονται.

Μετά τη μέτρηση, το θερμόμετρο και το αραιόμετρο τοποθετούνται στο δεύτερο κύλινδρο. Στη συνέχεια ρυθμίζεται η θερμοκρασία του λουτρού στο επόμενο επίπεδο επιθυμητής θερμοκρασίας και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Το εύρος της θερμοκρασίας για το οποίο γίνεται η βαθμονόμηση καθορίζεται από τις θερμοκρασίες διεξαγωγής του πειράματος.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της βαθμονόμησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.25. Η διόρθωση, Cor , που απαιτείται για κάθε επίπεδο θερμοκρασίας υπολογίζεται ως $Cor=R_n-1$, όπου 1 είναι η ένδειξη του αραιομέτρου για απιονισμένο νερό στους 20°C, βάσει της κατασκευής του, και το οποίο επαληθεύεται και από τις μετρήσεις.

Η τελική διόρθωση του αραιομέτρου συναρτήσει της θερμοκρασίας δίνεται από τη σχέση

$$Cor=0,0228-0,0002 \times T$$

Τα έντυπα των δοκιμών υγρής κοκκομετρίας και αραιομέτρου συντάχθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, και παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.28 και 3.29. Επίσης, δημιουργήθηκαν τα υπολογιστικά φύλλα στο excel για τον υπολογισμό της κοκκομετρικής καμπύλης, Σχήμα 3.30.

3.2.5. Δοκιμή συμπύκνωσης

Ο προσδιορισμός της μέγιστης πυκνότητας, του ελάχιστου δείκτη πόρων και της καμπύλης συμπύκνωσης γίνεται στο εργαστήριο με τη δοκιμή συμπύκνωσης ή διαφορετικά τη δοκιμή Proctor. Στη δοκιμή αυτή, η συμπύκνωση του δοκιμίου γίνεται σε μεταλλικό δοχείο (μήτρα) ορισμένου όγκου με πτώση σφύρας συγκεκριμένου βάρους από ορισμένο ύψος και η ενέργεια συμπύκνωσης μετράται με τη συνολική ενέργεια πτώσης ανά μονάδα όγκου του δοκιμίου. Εφαρμόστηκε το πρότυπο ASTM D698 – 07 και ειδικότερα η μέθοδος A καθώς τα εδάφη που μελετήθηκαν είχαν μέγιστη διάμετρο κόκκων μικρότερη των 4,75mm (κόσκινο No4).

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για τη δοκιμή είναι:

- Συσσκευή Proctor που αποτελείται από τη μεταλλική μήτρα και τη σφύρα συμπύκνωσης (Σχήμα 3.31)
- Κόσκινο No4
- Κλίβανος
- Υποδοχείς
- Ταψιά

Πριν την διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε έλεγχος των διαστάσεων της μήτρας και της σφύρας της συσκευής. Συγκεκριμένα, μετρήθηκαν οι διαστάσεις του ύψους με βαθύμετρο και της

εσωτερικής διαμέτρου (άνω και κάτω) με ηλεκτρονικό βερνιέρο. Για το τμήμα της μήτρας που περιέχει το δοκίμιο οι μετρήσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.26. Το ύψος προσδιορίστηκε ίσο με 116,51mm και η μέση διάμετρος ίση με 101,58mm και είναι σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 698 – 07.

Η σφύρα έχει βάρος 2,5kg και μέση διάμετρο 50,75mm, όπως προέκυψε από τρεις μετρήσεις με ηλεκτρονικό βερνιέρο. Επίσης, μετρήθηκε το ύψος πτώσης της σφύρας ίσο με 300mm. Ακόμη, η σφύρα περιβάλλεται από προστατευτικό μεταλλικό σωλήνα με τέσσερις οπές σε απόσταση 2cm από κάθε άκρο, με διάμετρο 9,5mm και σε απόσταση 90° μεταξύ τους.

Η διαδικασία που εφαρμόζεται στα πλαίσια της δοκιμής είναι η ακόλουθη:

Το δείγμα ξηραίνεται στον αέρα ή σε κλίβανο μέχρι 60°C και στη συνέχεια κοσκινίζεται με το κόσκινο No4 για τον έλεγχο της μέγιστης διαμέτρου των κόκκων. Από το δείγμα λαμβάνεται ποσότητα η οποία χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αρχικής υγρασίας του δείγματος που πρακτικά πρέπει να είναι μηδενική.

Χρησιμοποιείται ποσότητα ίση με 2,3-2,5kg ξηρού αρχικού δείγματος στην οποία προστίθεται κατάλληλη ποσότητα νερού ώστε το δείγμα να αποκτήσει υγρασία 5%.

Αφού γίνει πολύ καλή ανάμειξη του δείγματος, στη συνέχεια χωρίζεται σε τρία ίσα μέρη, τα οποία προστατεύονται για την αποφυγή απώλειας της υγρασίας τους.

Ζυγίζεται το σταθερό τμήμα της μήτρας μαζί με τη βάση και τις πεταλούδες σύνδεσης. Στη συνέχεια προστίθεται και το σταθερό τμήμα της μήτρας και σταθεροποιείται.

Τοποθετείται η πρώτη στρώση εδάφους και γίνεται συμπύκνωση με 25 χτύπους της σφύρας, Σχήμα 3.32. Η σφύρα ακολουθεί με την μετακίνησή της ένα μοτίβο σταυρού, με πρώτο χτύπο αριστερά, δεύτερο δεξιά, τρίτο κάτω, τέταρτο πάνω και επαναλαμβάνοντας μέχρι τους 25 χτύπους. Το εδαφικό δείγμα που δεν έχει συμπυκνωθεί, αλλά βρίσκεται στην επιφάνεια της στρώσης, αφαιρείται, Σχήμα 3.33. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τις άλλες δύο εδαφικές στρώσεις, Σχήμα 3.34. Στο τέλος της συμπύκνωσης, το αποδεκτό ύψος του δοκιμίου εντός του πρόσθετου τμήματος της μεταλλικής μήτρας είναι 6mm.

Μετά την ολοκλήρωση του τρίτου κύκλου συμπύκνωσης, αφαιρείται το πρόσθετο τμήμα της μήτρας και οριζοντιώνεται η επιφάνεια του δείγματος, Σχήμα 3.35.

Αφού γίνει προσεκτικός καθαρισμός της μήτρας εξωτερικά, ζυγίζεται μαζί με το εδαφικό δείγμα για τον προσδιορισμό της υγρής μάζας του δοκιμίου και της φαινόμενης πυκνότητάς του.

Λαμβάνονται δείγματα από το εσωτερικό του δοκιμίου, ένα από το κέντρο κάθε στρώσης συμπύκνωσης, για τον προσδιορισμό της υγρασίας του δοκιμίου σε διαφορετικά σημεία. Η υγρασία του δοκιμίου προκύπτει ως μέσος όρος. Αντί αυτού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η συνολική ποσότητα του δοκιμίου μετά το τέλος της συμπύκνωσης, Σχήμα 3.36, και να τοποθετηθεί σε κλίβανο στους 105°C προς ξήρανση, Σχήμα 3.37.

Ακολουθεί προσεκτικός καθαρισμός της μήτρας και της σφύρας και προετοιμασία νέας ποσότητας δείγματος σε διαφορετική υγρασία και επανάληψη της διαδικασίας. Συνήθως, η αύξηση της υγρασίας είναι 2,5-3%. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται ώστε στο τέλος να προκύψουν τουλάχιστον πέντε σημεία στην καμπύλη συμπίκνωσης.

Η καμπύλη συμπίκνωσης δίνει τη μεταβολή της ξηρής πυκνότητας με την υγρασία του εδάφους.

Το έντυπο της δοκιμής συμπίκνωσης συντάχθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, Σχήμα 3.38. Επίσης, δημιουργήθηκε το υπολογιστικό φύλλο του excel για τον υπολογισμό της καμπύλης συμπίκνωσης, Σχήμα 3.39.

Οι υπολογισμοί που γίνονται στα πλαίσια της δοκιμής είναι:

$$w = \frac{M_w}{M_s}$$
$$\rho = \frac{M}{V}$$
$$\rho_D = \frac{\rho}{1+w}$$
$$e = \frac{G_s \times (1+w)}{\rho} - 1$$

Η καμπύλη συμπίκνωσης έχει τη μορφή του Σχήματος 3.40.

Στο μέγιστο σημείο της καμπύλης ορίζεται η μέγιστη ξηρή πυκνότητα του δοκιμίου, ρ_{Dmax} . Η υγρασία στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη συμπίκνωση είναι η βέλτιστη υγρασία, w_{opt} . Σε αυτό το σημείο προσδιορίζεται και ο ελάχιστος δείκτης πόρων, e_{min} .

3.2.6. Δοκιμή ελάχιστης πυκνότητας

Χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη δοκιμών για τον προσδιορισμό της ελάχιστης πυκνότητας των εδαφών: (α) η απόθεση ξηρής άμμου σε ογκομετρικό κύλινδρο (BS 1377: part4: 44 και ASTM D4254 Method C) και (β) η απόθεση ξηρής άμμου σε ογκομετρικό κύλινδρο με νερό (Head).

Η πρώτη μέθοδος ακολουθεί τα αμερικανικά και βρετανικά πρότυπα, ενώ η δεύτερη βασίστηκε σε προτεινόμενη μεθοδολογία από τη βιβλιογραφία (Head). Και οι δύο μέθοδοι έχουν καλή εφαρμογή σε αμμώδη εδάφη με ποσοστό λεπτοκόκκων έως 10%. Συνοπτικά γίνεται η παρουσίαση των μεθόδων, ενώ αναλυτικά παρουσιάζονται από την Τύρη (2016). Στην πρώτη μέθοδο ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε είναι ογκομετρικός κύλινδρος 2000ml, ζυγός με ακρίβεια 0,01gr και ένα λάστιχο μικρού πάχους που εφάπτεται στην περίμετρο του κυλίνδρου. Ποσότητα 1000gr ξηρού εδάφους τοποθετείται εντός του κυλίνδρου. Γίνεται αναστροφή του κυλίνδρου (πάνω-κάτω), αφού σφραγιστεί η άνω βάση, με αργό ρυθμό 5 φορές και στη συνέχεια

επαναφορά του σε οριζόντια σταθερή επιφάνεια. Με τη βοήθεια του λάστιχου γίνεται μέτρηση του όγκου του δοκιμίου, Σχήμα 3.41, και στη συνέχεια ζύγισή του για τον προσδιορισμό της πυκνότητας και του δείκτη πόρων. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται 10 φορές.

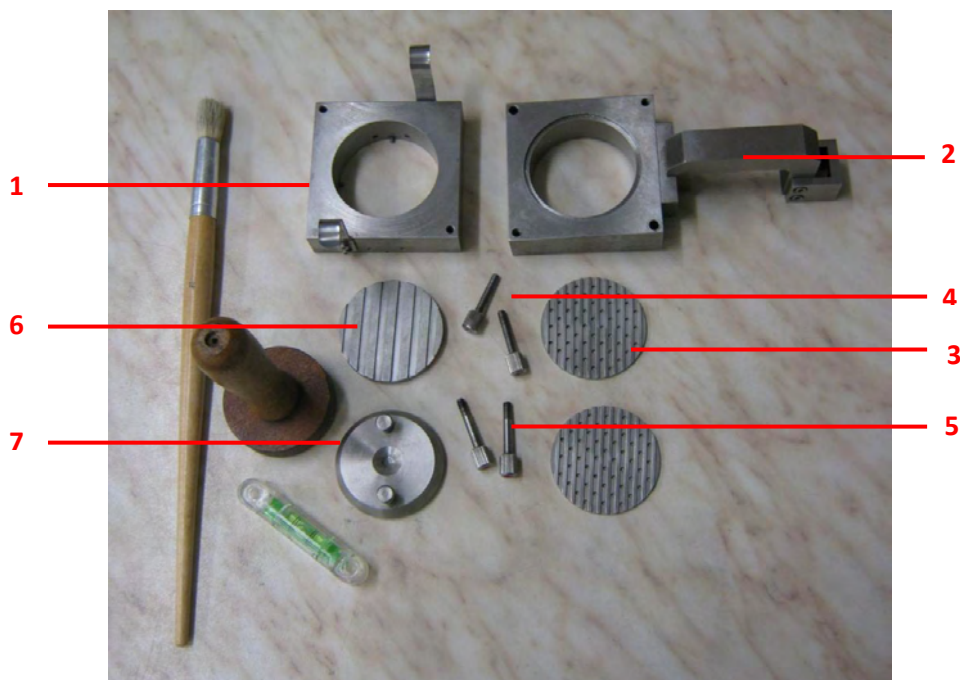
Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στη δεύτερη μέθοδο είναι ογκομετρικός κύλινδρος 100ml, χωνί μικρής διατομής, ζυγός ακρίβειας 0,01gr και απιονισμένο νερό. Ο ογκομετρικός κύλινδρος γεμίζει με νερό κατά τα 2/3 του ύψους με προσοχή ώστε τα τοιχώματά του να παραμένουν στεγνά και ζυγίζεται. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του χωνιού προστίθενται 40gr ξηρού εδάφους με αργό ρυθμό. Γίνεται ξανά ζύγιση του κυλίνδρου για την ακριβή μέτρηση της ξηρής μάζας του δοκιμίου.

Επίσης, καταγράφεται η στάθμη του εδάφους εντός του κυλίνδρου (το έδαφος σε αυτή την κατάσταση θεωρείται κορεσμένο) για τον υπολογισμό του όγκου του εδάφους.

Η δοκιμή επαναλαμβάνεται άλλες δύο φορές.



Σχήμα 3.1: Συσκευή άμεσης διάτμησης



Σχήμα 3.2: Κιβώτιο άμεσης διάτμησης: (1) κάτω και (2) άνω μέρος κιβωτίου, (3) οδοντωτές πλάκες, (4) βίδες ανύψωσης, (5) βίδες ένωσης, (6) βάση, (7) καπάκι



Σχήμα 3.3: Σύστημα επιβολής κατακόρυφων φορτίων



Σχήμα 3.4: Βρασμός πορόλιθων



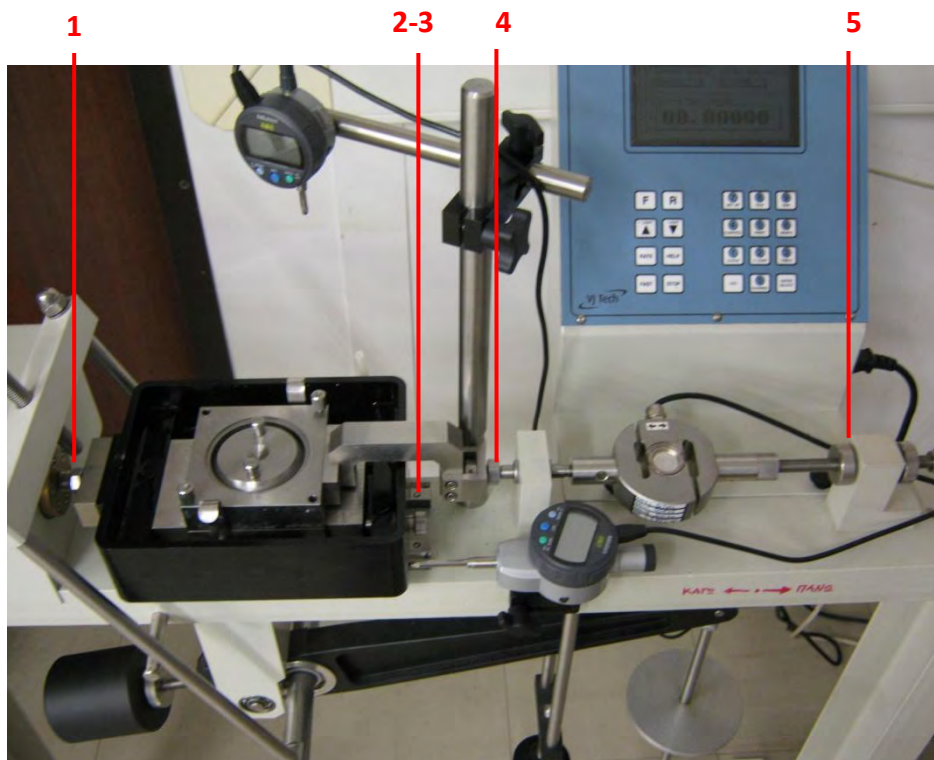
Σχήμα 3.5: Μόρφωση δοκιμίου στο κιβώτιο συμπίκνωσης



Σχήμα 3.6: Οριζοντίωση δοκιμίου



Σχήμα 3.7: Βαθύμετρο



Σχήμα 3.8: Τα πέντε σημεία επαφής



(α)



(β)



(γ)

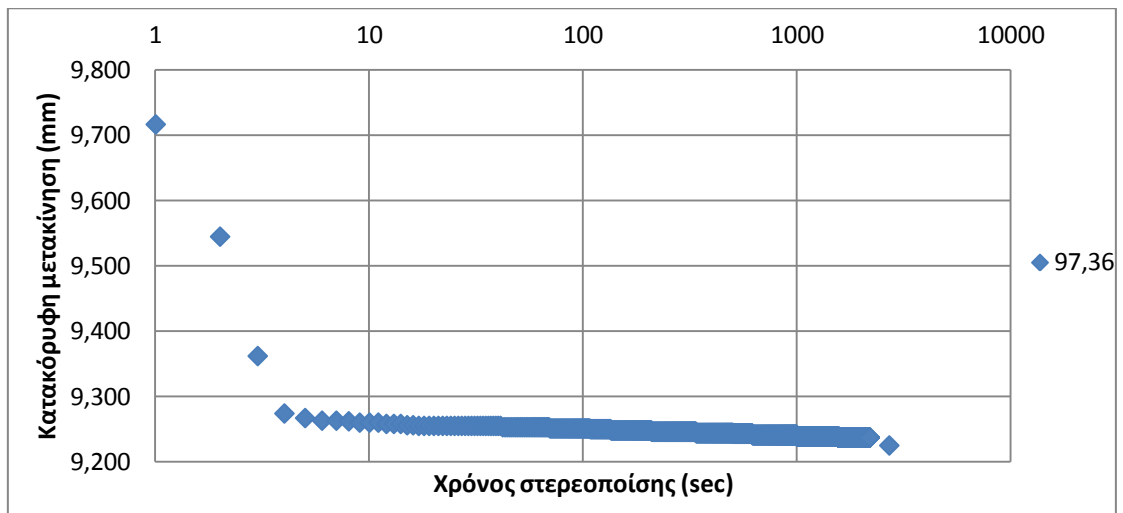


(δ)

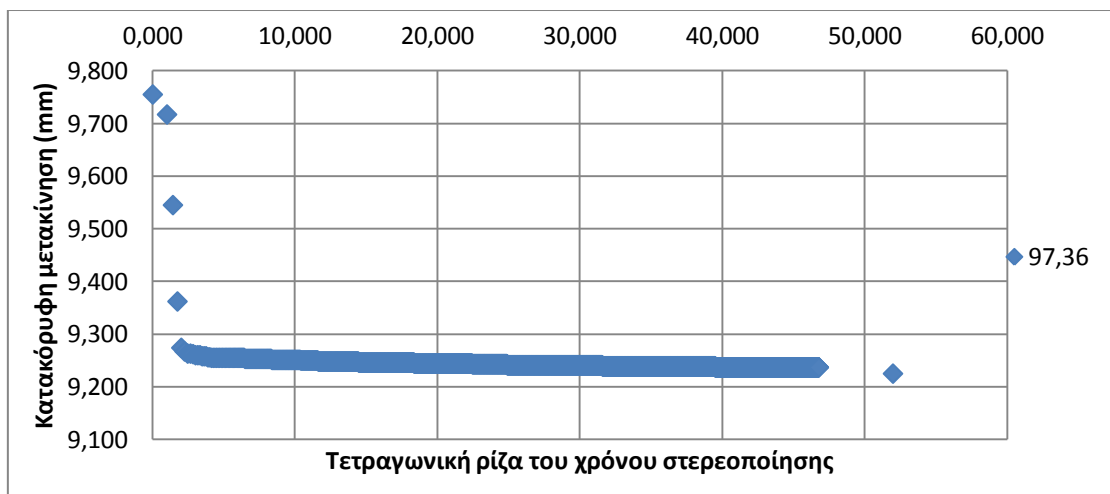
Σχήμα 3.9: Φορτία για δοκιμές σε τάσεις (α) 50,1 (β) 97,4 (γ) 197,4 (δ) 398,92



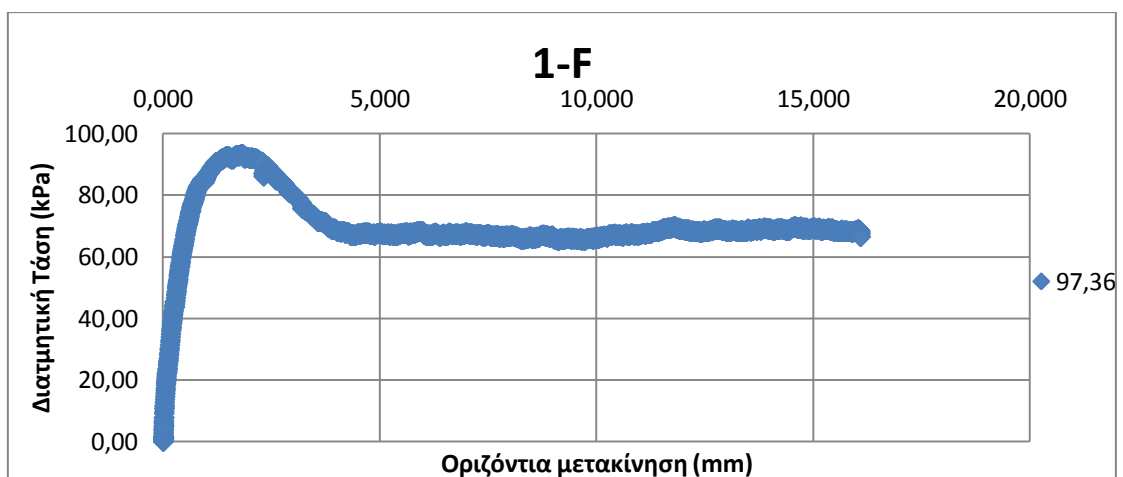
Σχήμα 3.10: Ξηρό δοκίμιο



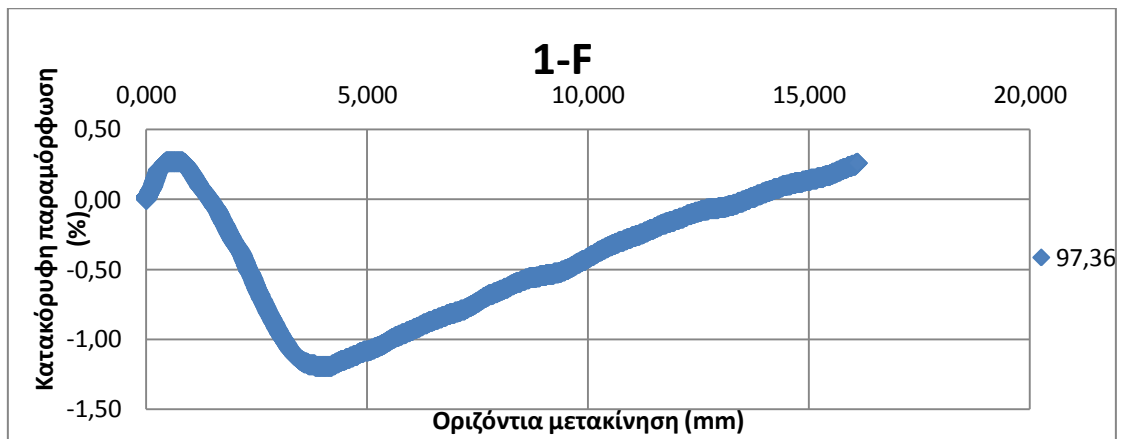
Σχήμα 3.11: Κατακόρυφη μετακίνηση – χρόνος στερεοποίησης



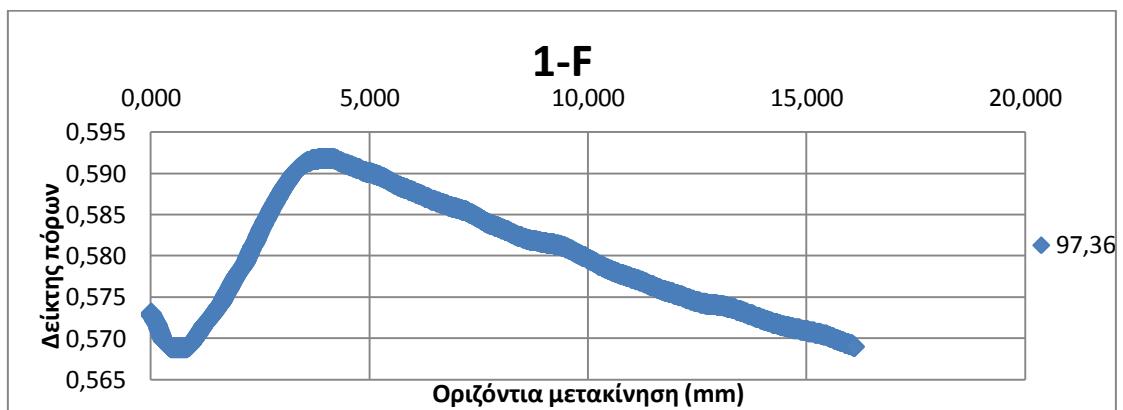
Σχήμα 3.12: Κατακόρυφη μετακίνηση – τετραγωνική ρίζα χρόνου στερεοποίησης



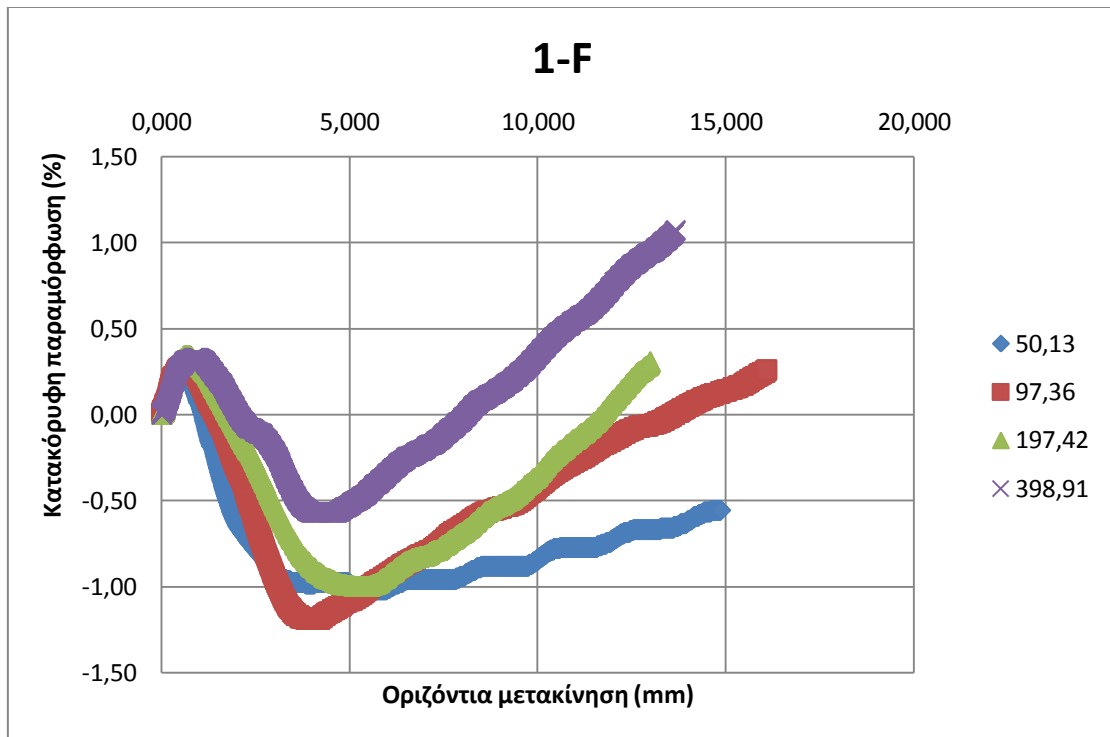
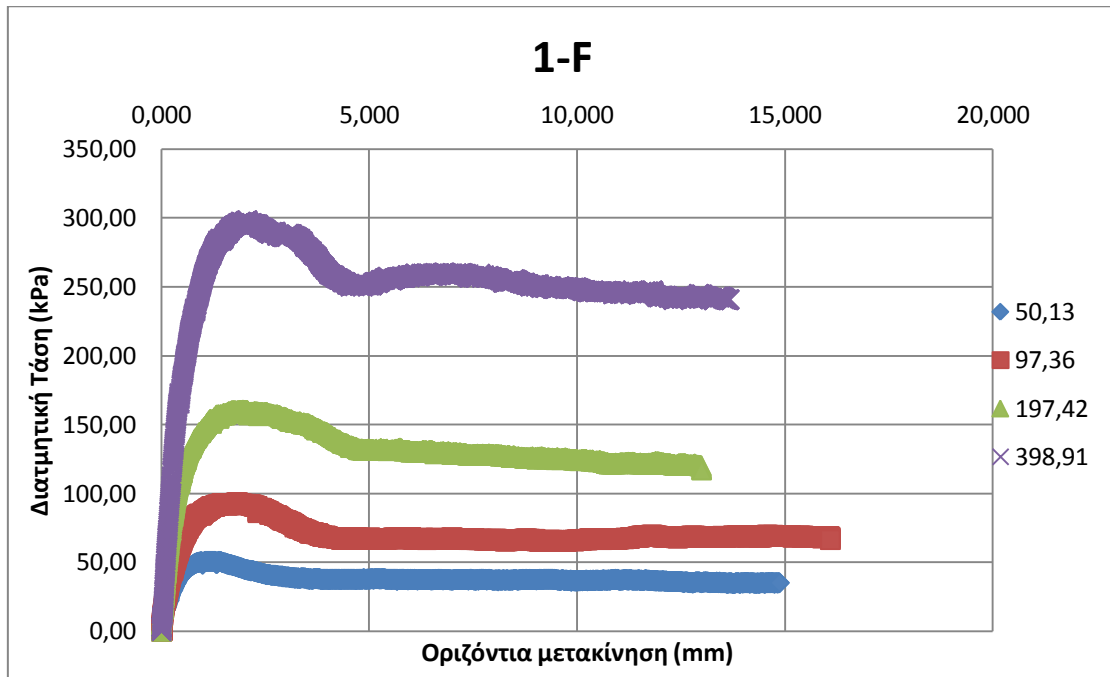
Σχήμα 3.13: Διατμητική τάση – οριζόντια μετακίνηση

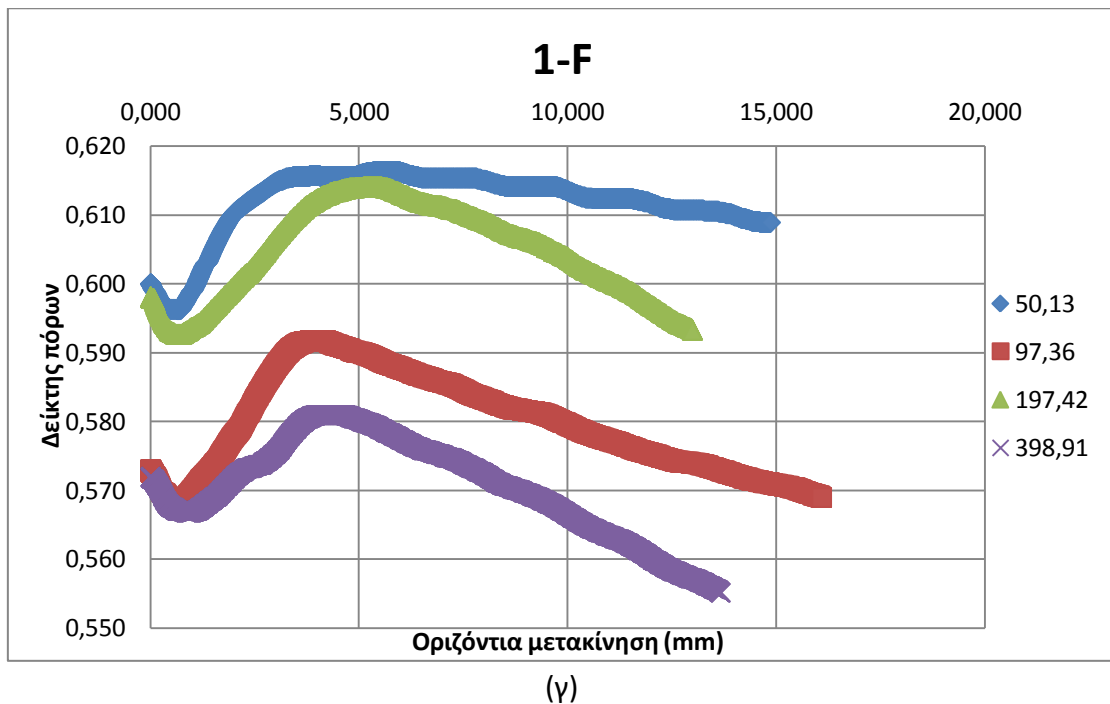


Σχήμα 3.14: Κατακόρυφη παραμόρφωση – οριζόντια μετακίνηση

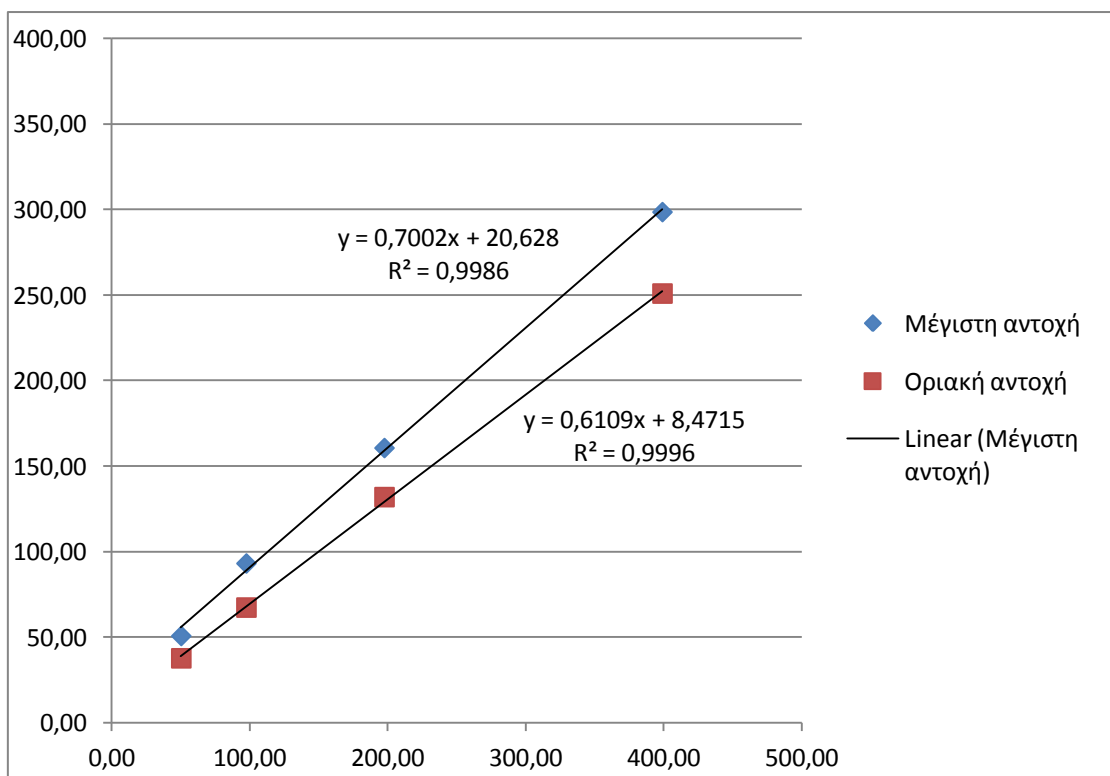


Σχήμα 3.15: Δείκτης πόρων – οριζόντια μετακίνηση





Σχήμα 3.16: Σύγκριση αποτελεσμάτων για δοκιμές σε ίδια πυκνότητα και διαφορετική ορθή τάση με τα διαγράμματα (α) διατμητικής τάσης, (β) κατακόρυφης παραμόρφωσης και (γ) δείκτη πόρων ως προς την οριζόντια μετακίνηση



Σχήμα 3.17: Περιβάλλουσες αστοχίας για μέγιστη και οριακή αντοχή



Σχήμα 3.18: Ανάμειξη αντιθρομβωτικού διαλύματος



Σχήμα 3.19: Σειρά κοσκίνων



Σχήμα 3.20: Αραιόμετρο



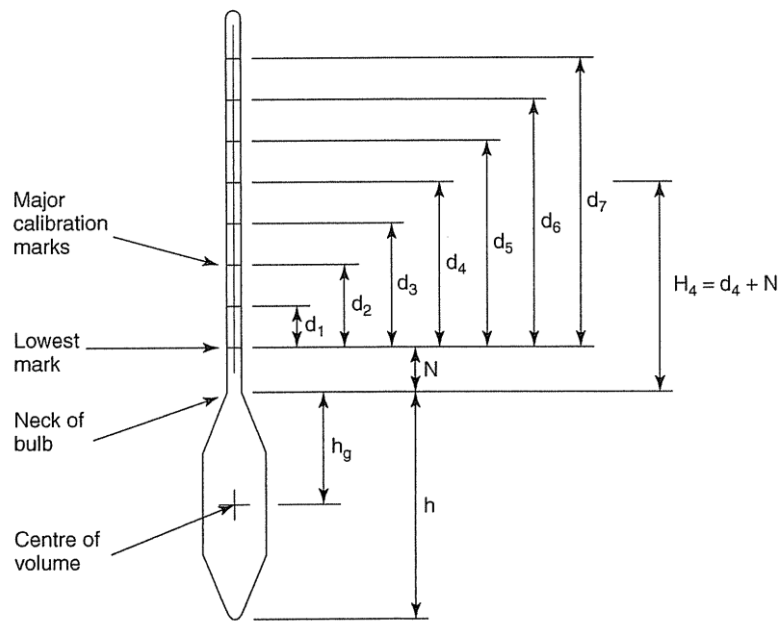
Σχήμα 3.21: Διαδικασία αραιομέτρου κατά την καθίζηση



Σχήμα 3.22: Αραιόμετρο και θερμομότρο

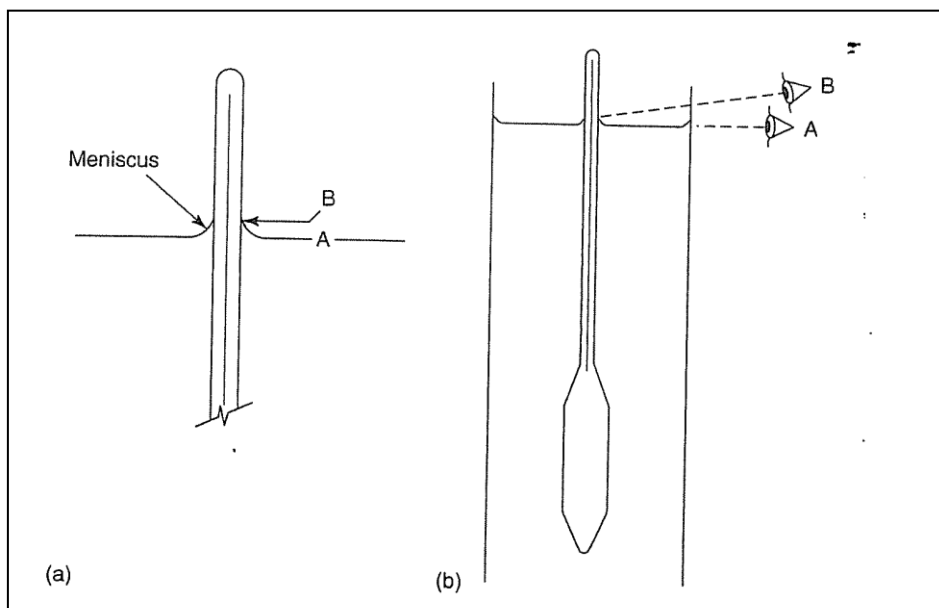


Σχήμα 3.23: Λήψη θερμοκρασίας

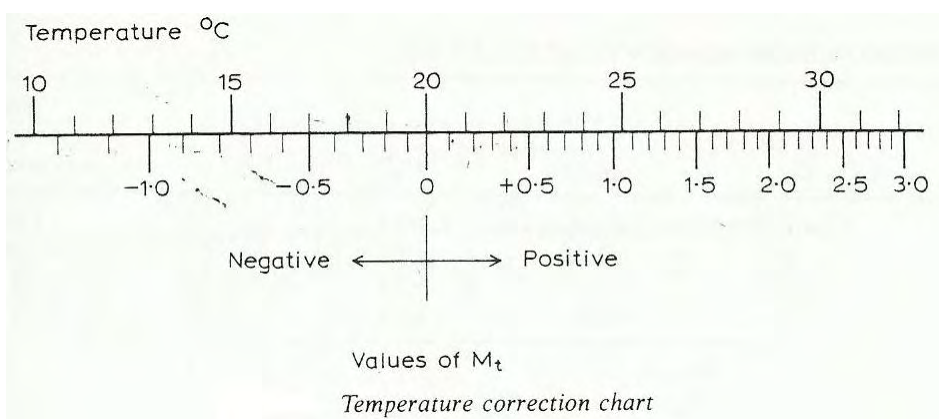


For a symmetrical bulb, $h_g = h/2$

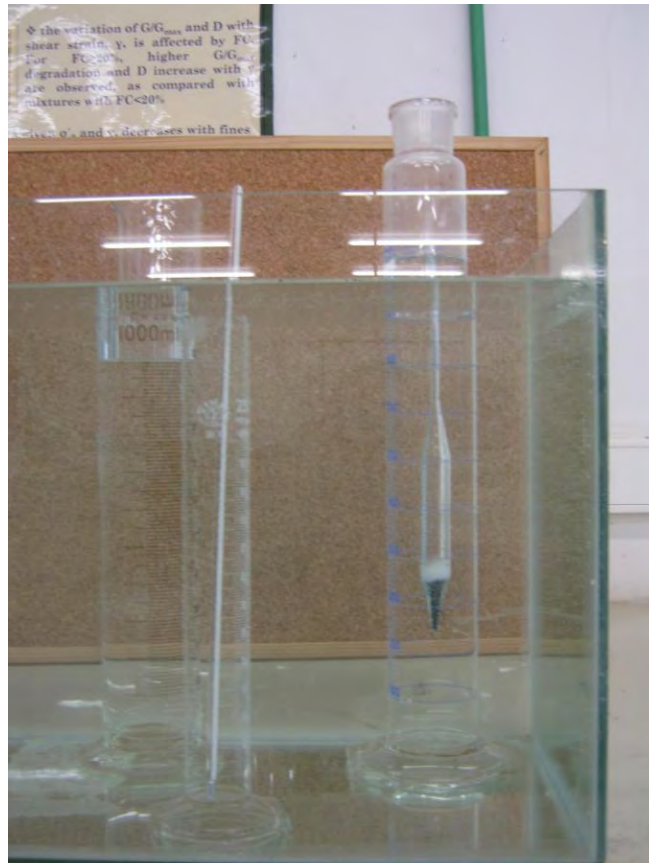
Σχήμα 3.24: Αραιόμετρο τύπου 151H



Σχήμα 3.25: Σημείο επιφάνειας (A) και σημείο κορυφής του μηνίσκου (B)



Σχήμα 3.26: Τιμές για διόρθωση θερμοκρασίας



Σχήμα 3.27: Θάλαμος σταθερής θερμοκρασίας



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τίτλος: Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής	Δοκιμή Προσδιορισμού Κοκκομετρίας Εδάφους (Μέθοδος Κοσκίνων)
--	---

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΡΓΟΥ:		Γεώτρηση:	
Αριθμός Δείγματος:		Βάθος (m):	
Περιγραφή Εδάφους:		Ημερομηνία:	
Προετοιμασία Εδάφους:		Πρότυπα αναφοράς:	BS1377: 1990 – 2 ASTM D422
Μέθοδος Δοκιμής:	<input type="checkbox"/> Υγρή <input type="checkbox"/> Ξηρή		
Όνομαστική Διάμετρος Μεγαλύτερου Κόκκου D_{max} (mm) =	2.00 (κόσκινο No. 10) 4.75 (κόσκινο No. 4) 19.00 (κόσκινο No. 3/4in)	Ελάχιστη μάζα εδαφικού δείγματος (g)	200 500 1500

Δεδομένα Δοκιμίου	Μάζα υποδοχέα (g)	
	Μάζα ξηρού δείγματος και υποδοχέα (g)	
	Μάζα ξηρού δείγματος (g)	

Αριθμός κοσκίνου	Διάμετρος (mm)	Αριθμός υποδοχέα	Μάζα υποδοχέα (gr)	Μάζα υποδοχέα και ξηρού δείγματος (gr)	Μάζα συγκρατούμενου ξηρού δείγματος (gr)	Συγκρατούμενο ποσοστό (%)	Μάζα διερχόμενου ξηρού δείγματος (gr)	Διερχόμενο ποσοστό (%)
3in	75.000							
1.5in	37.500							
3/4in	19.000							
3/8in	9.500							
No. 4	4.750							
No. 8	2.360							
No. 10	2.000							
No. 16	1.180							
No. 20	0.850							
No. 30	0.600							
No. 40	0.425							
No. 50	0.300							
No. 60	0.250							
No. 100	0.150							
No. 140	0.106							
No. 200	0.075							
	0.063							

Υπεύθυνος Δοκιμής: _____

Ημερομηνία Έναρξης Δοκιμής: _____

Σχήμα 3.28: Έντυπο για δοκιμή υγρής κοκκομετρίας



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Δοκιμή Προσδιορισμού Κοκκομετρίας Εδάφους (Μέθοδος Αραιομέτρου)		
Τύπος Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής		
ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΡΓΟΥ:	Γεώτρηση:	
Αριθμός Δειγματος:	Βάθος (m):	
Περιγραφή Εδάφους:	Ημερομηνία:	
Προετοιμασία Εδάφους:	Πρότυπα αναφοράς: BS1377: 1990 – 2 ASTM D422	
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΡΑΙΟΜΕΤΡΟΥ		
Τύπος Αραιομέτρου	Μέσο διασποράς (NaPO ₂) ₆	
Διόρφωση μηδενικής ένδειξης	125ml διαλύματος (40g/l)	
Διόρφωση μηνίσκου, C _m	4.28	
Εξίσωση βαθμονόμησης	Ειδικό βάρος στερεών κόκκων, G _s	
151H Μέσο διασποράς		
Χρησιμοποιηθείσα ποσότητα		
1.8 Διόρφωση μέσου διασποράς, π		
0.5 Μάζα ξηρού δείγματος (g)		
H=0.2105*R'+17.565		

Ημερομηνία	Ωρα	Διελθόν χρόνος (min)	Θερμοκρασία °C	Ενδειξη Αραιομέτρου R _s '	Διόρφωση θερμοκρασίας M _t	Συνολική διόρφωση R ₀	R' = R _s ' + C _m	L cm	p =	η	K	D mm	R	P %

Υπεύθυνος Δοκιμής: _____

Σχήμα 3.29: Έντυπο για δοκιμή αραιομέτρου

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ (Μέθοδος κοσκίνων)

Έργο: Περιγραφή εδάφους:	ΑΜΜΟΣ & ΑΜΜΩΔΗΣ ΙΛΥΣ	Αρ. Έργου: Γεώτρηση
Πρότυπο:	Head & BS	
Αρ. Δοκιμής:	M31-5SILT-1	
Εκτελέσας:	Κουλαουζίδου Κυρακή	Ημερ.: 29/3/2016
Μέθοδος δοκιμής :	Υγρή / Ξηρή (BS1377: Part2: 1990, ASTM D422-63)	

Μέγεθος εδαφικού δείγματος

Περιγραφή Εδάφους:	Ελάχιστη μάζα δείγματος: (gr)
Ιλυώδη εδάφη	50
Συνεκτικά εδάφη με άμμο	100
Συνεκτικά εδάφη με χαλίκια	2000

Μάζα ξηρού δείγματος και υποδοχέα:	100
Μάζα υποδοχέα:	0
Μάζα ξηρού δείγματος:	100,00

Αρ. κοσκίνου	Διάμετρος οπής (mm)	Αρ. Υποδοχέα	Βάρος υποδοχέα (g)	Υποδοχέας και ξηρό δείγμα (g)	Βάρος ξηρού δείγματος (g)	Βάρος διερχομ. ξηρού δείγματος (g)	Διερχόμενο ποσοστό (%)	Βάρος συγκρατ. ξηρού δείγματος (g)	Συγκρατ. ποσοστό (%)
No 20	0,850	3A	26,71	26,92	0,21	99,79	99,79	0,21	0,21
	0,600	10M	54,58	58,75	4,17	95,62	95,62	4,38	4,38
No 40	0,425	9M	54,53	72,79	18,26	77,36	77,36	22,64	22,64
	0,300	2T	408,46	447,56	39,10	38,26	38,26	61,74	61,74
	0,150	1T	407,6	436,95	29,35	8,91	8,91	91,09	91,09
No 200	0,075	3	69,59	70,66	1,07	7,84	7,84	92,16	92,16
	0,063	2	69,95	70,71	0,76	7,08	7,08	92,92	92,92

(α)

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ (Μέθοδος αραιομέτρου)

Έργο: Περιγραφή εδάφους:	ΑΜΜΟΣ & ΑΜΜΩΔΗΣ ΙΛΥΣ	Αρ. Έργου: Γεώτρηση
Πρότυπο:	Head & BS	Αρ. δείγματος:
Αρ. Δοκιμής:	M31-5SILT-1	Βάθος:
Εκτελέσας:	Κουλαουζίδου Κυρακή	Ημερ.: 29/3/2016

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Τύπος Αραιομέτρου:	151H	Μέσο διασποράς:	(NaPO₃)₆
Διόρθωση μηδενικής ένδειξης:	1,8	Χρησιμοποιηθείσα ποσότητα:	125ml solution (40g/lit)
Διόρθωση μηδίσκου:	C _m = 0,5	Διόρθωση μέσου διασποράς:	
Εξίσωση Βαθμονόμησης :		Αρ. υποδοχέα:	10
H= νέα βαθμονόμηση 2016 17.565-0.2105		Βάρος υποδοχέα (g):	210,84
		Υποδοχέας και μέσο διασποράς (50ml) (g):	260,77
		Υποδοχέας και ξηρό μέσο διασποράς (g):	212,98
Μάζα ξηρού δείγματος:	100,00 (g)		
Ειδικό βάρος στερεών κόκκων:	G_s = 2,657	Διόρθωση μέσου διασποράς:	4,28

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ							ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ						ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	
Ημερ.	Ωρα	Διελθών χρόνος (min)	Θερμ. T (°C)	Ένδειξη αραίομ. R _h	Διόρθωση Θερμοκρασίας, M _t	Συνολική Διόρθωση αραίομ. R ₀	Διορθ. ένδειξη αραίομ. R' = R _h ' + C _m	L (cm)	ρ _w (Mg/m ³)	n (poise)	K = f (T°C, G _s)	D (μm)	R	P (%)
29/03/16	13:53:00	0,00												
29/03/16	13:53:30	0,50	19,6	4,50	-0,08	-2,06	5,00	16,5125	0,99838	1,04320	0,004389	25,220	2,52	4,04
29/03/16	13:54:00	1,00	19,6	4,00	-0,08	-2,06	4,50	16,6178	0,99838	1,04320	0,004389	17,890	2,02	3,24
29/03/16	13:55:00	2,00	19,6	4,00	-0,08	-2,06	4,50	16,61775	0,99838	1,04320	0,004389	12,650	2,02	3,24
29/03/16	13:57:00	4,00	19,6	3,50	-0,08	-2,06	4,00	16,7230	0,99838	1,04320	0,004389	8,973	1,52	2,44
29/03/16	14:01:00	8,00	19,6	3,50	-0,08	-2,06	4,00	16,723	0,99838	1,04320	0,004389	6,345	1,52	2,44
29/03/16	14:08:00	15,00	19,6	3,50	-0,08	-2,06	4,00	16,7230	0,99838	1,04320	0,004389	4,634	1,52	2,44
29/03/16	14:23:00	30,00	19,6	3,50	-0,08	-2,06	4,00	16,7230	0,99838	1,04320	0,004389	3,277	1,52	2,44
29/03/16	14:53:00	60,00	19,9	3,00	-0,03	-2,01	3,50	16,8283	0,99832	1,03524	0,004372	2,315	1,02	1,64
29/03/16	15:53:00	120,00	20,6	2,50	0,10	-1,88	3,00	16,9335	0,99818	1,01700	0,004333	1,628	0,52	0,83
29/03/16	20:01:00	368,00	21,6	2,50	0,29	-1,69	3,00	16,9335	0,99796	0,99180	0,004279	0,918	0,52	0,83

(β)

Μέθοδος	D (mm)	P (%)
Κόσκινα	0,850	99,79
	0,600	95,62
	0,425	77,36
	0,300	38,26
	0,150	8,91
	0,075	7,84
	0,063	7,08
Αραιόμετρο	0,0252	4,04
	0,0179	3,24
	0,0127	3,24
	0,0090	2,44
	0,0063	2,44
	0,0046	2,44
	0,0033	2,44
	0,0023	1,64
	0,0016	0,83
	0,0009	0,83

(γ)

Σχήμα 3.30: Υπολογιστικά φύλλα στο excel για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής καμπύλης, (α) υγρή κοκκομετρία, (β) αραιόμετρο και (γ) κοκκομετρική καμπύλη



(α)



(β)

Σχήμα 3.31: Συσκευή Proctor, (α) μεταλλική μήτρα και (β) σφύρα συμπίκνωσης



Σχήμα 3.32: Συμπύκνωση πρώτης στρώσης



Σχήμα 3.33: Χαλαρό έδαφος στην επιφάνεια μετά τη συμπύκνωση



Σχήμα 3.34: Μετά τη συμπύκνωση και της 3^{ης} στρώσης



Σχήμα 3.35: Οριζοντίωση της συμπυκνωμένης ποσότητας



Σχήμα 3.36: Συλλογή του συμπυκνωμένου εδάφους για ξήρανση



Σχήμα 3.37: Ξήρανση σε κλίβανο 105°C



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τίτλος: Έντυπο Καταγραφής Δεδομένων

Δοκιμή Στατικής Συμπύκνωσης

ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ PROCTOR

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΡΓΟΥ:		Γεώτρηση:	
Αριθμός δείγματος:		Βάθος:	
Περιγραφή εδάφους:		Ημερομηνία:	
Μέθοδος Δοκιμής:	<input type="checkbox"/> standard <input type="checkbox"/> modified	Πρότυπα αναφοράς:	

Χαρακτηριστικά Εδάφους:

Ειδική Βαρύτητα, G_s	
Πυκνότητα Νερού, ρ_w (Mg/m^3)	
Πυκνότητα Κόκκων, ρ_s (Mg/m^3)	

Χαρακτηριστικά Μήτρας:

Διάμετρος D (cm)		Έπιφάνεια Βάσης, A (cm^2)	
Ύψος H (cm)		Όγκος V (cm^3)	
Μάζα M(gr)			

Δοκιμή 1

Εισαγωγή υγρασίας (%)			
Μάζα εδάφους+μήτρας (gr)			
Μάζα εδάφους (gr)			
Φαινόμενη πυκνότητα, ρ (gr/cm^3)			
Προσδιορισμός υγρασίας			
Έπιφάνεια	άνω	μέση	κάτω
Αρ. υποδοχέα			
Μάζα υποδοχέα (g)			
Μάζα υποδοχέα+υγρού δείγματος (g)			
Μάζα υποδοχέα+ξηρού δείγματος (g)			
Μάζα περιεχόμενου ύδατος			
Μάζα ξηρού δείγματος			
Υγρασία w(%)			
Μέσος Όρος Υγρασίας, w(%)			
Ξηρή φαινόμενη πυκνότητα, ρ_d (gr/cm^3)			
Δείκτης Πόρων, e			

Δοκιμή 2

Εισαγωγή υγρασίας (%)	
Μάζα εδάφους+μήτρας (gr)	
Μάζα εδάφους (gr)	
Φαινόμενη πυκνότητα, ρ (gr/cm^3)	

Προσδιορισμός υγρασίας			
Επιφάνεια	άνω	μέση	κάτω
Αρ. υποδοχέα			
Μάζα υποδοχέα (g)			
Μάζα υποδοχέα+υγρού δείγματος (g)			
Μάζα υποδοχέα+ξηρού δείγματος (g)			
Μάζα περιεχόμενου ύδατος			
Μάζα ξηρού δείγματος			
Υγρασία w(%)			
Μέσος Όρος Υγρασίας, w(%)			
Ξηρή φαινόμενη πυκνότητα, ρ_d (gr/cm ³)			
Δείκτης Πόρων, e			

Δοκιμή 3

Εισαγωγή υγρασίας (%)			
Μάζα εδάφους+μήτρας (gr)			
Μάζα εδάφους (gr)			
Φαινόμενη πυκνότητα, ρ (gr/cm ³)			
Προσδιορισμός υγρασίας			
Επιφάνεια	άνω	μέση	κάτω
Αρ. υποδοχέα			
Μάζα υποδοχέα (g)			
Μάζα υποδοχέα+υγρού δείγματος (g)			
Μάζα υποδοχέα+ξηρού δείγματος (g)			
Μάζα περιεχόμενου ύδατος			
Μάζα ξηρού δείγματος			
Υγρασία w(%)			
Μέσος Όρος Υγρασίας, w(%)			
Ξηρή φαινόμενη πυκνότητα, ρ_d (gr/cm ³)			
Δείκτης Πόρων, e			

Δοκιμή 4

Εισαγωγή υγρασίας (%)			
Μάζα εδάφους+μήτρας (gr)			
Μάζα εδάφους (gr)			
Φαινόμενη πυκνότητα, ρ (gr/cm ³)			
Προσδιορισμός υγρασίας			
Επιφάνεια	άνω	μέση	κάτω
Αρ. υποδοχέα			
Μάζα υποδοχέα (g)			
Μάζα υποδοχέα+υγρού δείγματος (g)			
Μάζα υποδοχέα+ξηρού δείγματος (g)			
Μάζα περιεχόμενου ύδατος			
Μάζα ξηρού δείγματος			
Υγρασία w(%)			
Μέσος Όρος Υγρασίας, w(%)			
Ξηρή φαινόμενη πυκνότητα, ρ_d (gr/cm ³)			
Δείκτης Πόρων, e			

Σχήμα 3.38: Έντυπο της δοκιμής συμπύκνωσης

ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΕΔΑΦΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ PROCTOR

Εργο: Περιγραφή εδάφους: Πρότυπο: Αρ. Δοκιμής: Εκτελέσας:	M31, D6(κοσκ Νο200) & ΚΑΟΛΙΝΗΣ ASTM M31-3SILT-12ΚΑΟΛ-1P Κουλαουζίδου Κυριακή	Αρ. Εργου: Γεώτρηση Αρ. δείγματος: Βάθος: Ημερ.:	18/7/2016
---	---	--	------------------

Διαστάσεις Μήτρας

Διάμετρος (m)	10,158
Υψος (m)	11,651
Μάζα (gr)	3409,13
Επιφάνεια Βάσης (cm ²)	81,04
Όγκος (cm ³)	944,2

	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 3	Δοκιμή 4
Εισαγωγή Υγρασίας	8%	10%	12%	15%
Μάζα εδάφους + μήτρας (gr)	5299	5342	5308	5274
Μάζα εδάφους (gr)	1889,87	1932,87	1898,87	1864,87
Φαινόμενη Πυκνότητα, ρ (gr/cm ³)	2,002	2,047	2,011	1,975

Προσδιορισμός Υγρασίας

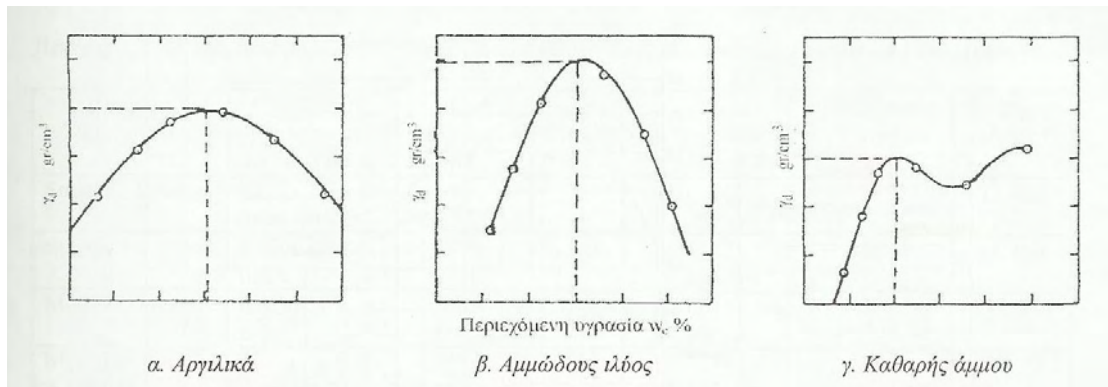
Αρ Υποδοχέα	5T		5T		1T		1T
Μάζα Υποδοχέα (gr)	786		786		1108		1108
Μάζα Υποδοχέα + υγρού δείγματος (gr)	2683		2726		3011		2975
Μάζα Υποδοχέα + ξηρού δείγματος (gr)	2545		2553		2812		2739
Μάζα Νερού (gr)	138		173		199		236
Μάζα Ξηρού Δείγματος (gr)	1759		1767		1704		1631
Υγρασία, w (%)	7,85		9,79		11,68		14,47
Ξηρή Φαινόμενη Πυκνότητα, ρ (gr/cm³)	1,856		1,865		1,801		1,725

Ειδική Βαρύτητα, G _s	2,652
Πυκνότητα Νερού, ρ _w (Mg/m ³)	1
Πυκνότητα Κόκκων, ρ _s (Mg/m ³)	2,652

Δείκτης Πόρων, e	0,429	0,422	0,473	0,537
------------------	-------	-------	-------	-------

e_{min}=0,422 για υγρασία 9,79%

Σχήμα 3.39: Υπολογιστικά φύλλα excel για τον προσδιορισμό της καμπύλης συμπύκνωσης



Σχήμα 3.40: Καμπύλη συμπίκνωσης για διάφορα εδάφη(J.N. Mandal, D.G. Dirshikar)



Σχήμα 3.41: Προσδιορισμός όγκου στη δοκιμή ελάχιστης πυκνότητας

Πίνακας 3.1: Διαστάσεις κιβωτίου διάτμησης.

ΥΨΟΣ ΚΙΒΩΤΙΟΥ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΣΧΑΡΩΝ ΚΑΙ ΠΟΡΟΛΙΘΩΝ	
Αρ. Επανάληψης	Μέτρηση (mm)
1 ^η	50,02
2 ^η	50,10
3 ^η	50,05
Μ.Ο.	50,06

ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ	
Αρ. Επανάληψης	Μέτρηση (mm)
1 ^η	63,52
2 ^η	63,40
3 ^η	63,40
4 ^η	63,47
5 ^η	63,49
6 ^η	63,51
7 ^η	63,38
8 ^η	63,58
Μ.Ο.	63,47

Πίνακας 3.2: Διαστάσεις πορόλιθων.

ΠΑΧΟΣ – ΠΟΡΟΛΙΘΟΣ 1	
Αρ. Επανάληψης	Μέτρηση (mm)
1 ^η	5,3
2 ^η	5,4
3 ^η	5,64
4 ^η	5,67
5 ^η	5,24
6 ^η	5,28
7 ^η	5,57
Μ.Ο.	5,44

ΠΑΧΟΣ – ΠΟΡΟΛΙΘΟΣ 2	
Αρ. Επανάληψης	Μέτρηση (mm)
1 ^η	5,55
2 ^η	5,53
3 ^η	5,44
4 ^η	5,42
5 ^η	5,45
6 ^η	5,34
7 ^η	5,2
8 ^η	5,35
9 ^η	5,35
10 ^η	5,5
Μ.Ο.	5,413

Πίνακας 3.3: Διαστάσεις για φίλτρα και καπάκι.

ΠΑΧΟΣ – ΦΙΛΤΡΑ	
Αρ. Επανάληψης	Μέτρηση (mm)
1 ^η	0,41
2 ^η	0,39
3 ^η	0,41
4 ^η	0,38
Μ.Ο.	0,397

ΠΑΧΟΣ – ΚΑΠΑΚΙ	
Αρ. Επανάληψης	Μέτρηση (mm)
1 ^η	11,97
2 ^η	11,96
3 ^η	11,96
4 ^η	11,97
5 ^η	11,97
Μ.Ο.	11,97

Πίνακας 3.4: Διαστάσεις για κάτω βάση κιβωτίου και σχάρες.

ΠΑΧΟΣ – ΚΑΤΩ ΒΑΣΗΣ ΚΙΒΩΤΙΟΥ	
Αρ. Επανάληψης	Μέτρηση (mm)
1 ^η	6,08
2 ^η	5,97
3 ^η	5,99
4 ^η	5,96
5 ^η	5,95
6 ^η	5,95
7 ^η	6,02
8 ^η	5,93
9 ^η	5,95
10 ^η	5,95
11 ^η	6,01
12 ^η	5,95
M.O.	5,97

ΠΑΧΟΣ – ΣΧΑΡΑ	
Αρ. Επανάληψης	Μέτρηση (mm)
1 ^η	3,04
2 ^η	3,04
3 ^η	3,10
4 ^η	3,10
M.O.	3,07

Πίνακας 3.5: Στοιχεία διαμόρφωσης δοκιμών.

Έδαφος	Χαλαρό	Μετρίως πυκνό	Πυκνό	Πολύ πυκνό
	w (%) χτύποι ανά στρώση	w (%) χτύποι ανά στρώση	w (%) χτύποι ανά στρώση	w (%) χτύποι ανά στρώση
Άμμος M31 + 1% άμμος D6 + 4% καολίνης	10 5-10	–	10 5-10	14 15-20
Άμμος M31 + 3% άμμος D6 + 12% καολίνης	7 7-11	10 15-22	–	14 15-21

Πίνακας 3.6: Φορτία στερεοποίησης.

Δοκιμή	Φορτία στερεοποίησης (kg)	Ορθή τάση
A	1,58042	50,1
B	2,07366+1,02998	97,4
C	3,16423+1,58042+1,58636	197,4
D	10,213+1,02998+1,58636	398,92

Πίνακας 3.7: Βασικά στοιχεία δοκιμής.

Δεδομένα Εδαφικού Δειγματος					
Κωδικός Έργου:	ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΚΙΚΗ			Γεώτρηση:	
Αριθμός Δειγματος:	M31-4ΚΑΟΛ-1B			Βάθος (m):	
Περιγραφή Εδάφους:	Άμμος M31, D6 (κοσκ Νο200), Καολίνης			Ημερομηνία:	10/4/2016
Προετοιμασία Δοκιμίου:	Μέθοδος της υγρής συμπίκνωσης με $w_0=14\%$ σε στρώσεις των 20g. Ξύλινη σφύρα μάζας 93.94g με ύψος πτώσης 1-2cm. 1η στρώση 15 κτύποι μέχρι την 6,5η στρώση 20 κτύποι.			Πρότυπα Αναφοράς:	BS1377: 1990 – 7 ASTM D3080-04
Ονομαστική Διάμετρος Μεγαλύτερου Εδαφικού Κόκκου, D_{max} (mm) =	0,850	$e_{min} =$ 0,568	$e_{max} =$ 0,820	$G_s =$	2,657

Πίνακας 3.8: Στοιχεία αρχικού δοκιμίου.

Αρχικό Δοκίμιο						
Χρήση σαχάρων:	1	*	Εισχώρηση σαχάρων στο δοκίμιο κατά την εγκατάστασή του:		1	**
Υγρασία			Μάζα Δοκιμίου			21,48
Αρ. Υποδοχεία	2		Μάζα Κιβωτίου (g)	3.067,00		2 20,24
Μάζα Υποδοχεία (g)	69,95		Κιβώτιο + Υγρό Δοκίμιο (g)	3.195,00		1 21,48
Μάζα Υποδοχεία + Υγρού Δειγματος (g)	90,61		Υγρό Δοκίμιο, M (g)	128,00		3 20,86
Μάζα Υποδοχεία + Ξηρού Δειγματος (g)	88,19		Ξηρό Δοκίμιο (από w_0) (g)	113,01	Μάζα Ξηρού Δοκιμίου M_s (g)	113,08
Μάζα νερού (g)	2,42		Διάμετρος Δοκιμίου, D_0 (mm)	63,47	Μέσο ύψος σαχάρας t_2 (mm)	2,42
Μάζα Ξηρού Δειγματος (g)	18,24		Αφαιρούμενο Ύψος*** (mm)	29,27	Ολικό πάχος σαχάρας (p + r) (mm)	3,04
Αρχική Υγρασία, w_0 (%)	13,27		Μετρηθέν Ύψος (mm)	55,59	Πυκνότητα Νερού, ρ_w (kg/m ³)	1000
			Ύψος Δοκιμίου, H_0 (mm)	21,48	Όγκος Στερεού Σκελετού Δοκιμίου, V_s (m ³)	4,25593E-05
			Εμβαδόν Διατομής Δοκιμίου, A_0 (m ²)	0,003164	Δείκτης Πόρων, e_0	0,597
			Όγκος Δοκιμίου, V_0 (m ³)	6,8E-05	Σχετική Πυκνότητα, Dr_0 (%)	88,55
			Φαινόμενη Πυκνότητα, ρ (kg/m ³)	1883,43	Ξηρή Πυκνότητα, ρ_d (kg/m ³)	1663,89

* 1 = ναι
2 = όχι

** 1 = ναι (και οι 2)
2 = όχι (καμία)
3 = εισχώρηση μιας εκ των δύο σαχάρων

*** χωρίς τις σαχάρες

Πίνακας 3.9: Στοιχεία τελικού δοκιμίου.

Εισχώρηση σχαρών στο δοκίμιο κατά τη στερεοποίησή του:		2	*
Μάζα Δοκιμίου			0,00
Αρ. Υποδοχέα	B	1	1,24
Μάζα Υποδοχέα (g)	743,61	2	0,00
Μάζα Υποδοχέα + Ξηρού Δοκιμίου (g)	856,69	3	0,62
Ξηρό Δοκίμιο (g)	113,08		
		Διόρθωση ύψους (mm)	
Βάθος Εισχώρησης Κάθε Σχάρας στο Δοκίμιο (mm) (p+r)-t ₂	0,620	0,00	
* 1 = ναι (και οι δύο) 2 = όχι (καμία) 3 = εισχώρηση μιας εκ των δύο σχαρών			

Πίνακας 3.10: Στοιχεία στερεοποίησης.

Αρχικό Φορτίο: καπάκι + πορώδης δίσκος + φίλτρο + σχάρα (kg)	Συνολικό Φορτίο στο μοχλό (kg)	Λόγος Μοχλού	Συνολικό Φορτίο στο Δοκίμιο (kg)	Ορθή Τάση, σ _n (kPa)	Ημερομηνία	Ώρα	Κατακόρυφη Μετακίνηση	
							Αρχική Ένδειξη (mm)	Τελική Ένδειξη (mm)
0,36513	3,104	1/10	31,402	97,36	10/4/2016	12:20	9,755	9,237

Τελική Κατακόρυφη Μετακίνηση, ΔΗ(mm)	Τελική Συμπίεση Συστήματος, ΔΗ _{συστ} (mm)	Βάθος εισχώρησης σχαρών στο δοκίμιο κατά τη στερεοποίηση, ΔΗ _{σχ} (mm)	Ολική Καθαρή Κατακόρυφη Μετακίνηση, ΔΗ _{καθ} (mm)	Ολικό Ύψος Δοκιμίου, Η _{στερ} (mm)	Ολική Κατακόρυφη Παραμόρφωση Δοκιμίου, ε _a (%)	Δείκτης πόρων, e	Σχετική Πυκνότητα, D _r (%)	Αρχείο καταγραφής
0,518	0,198	0,000	0,320	21,160	1,489	0,573	97,99	Consolidation.xls

Πίνακας 3.11: Ενδεικτικές καταγραφές από την έναρξη (αριστερά) και τη λήξη (δεξιά) της διαδικασίας στερεοποίησης.

Ορθή Τάση, σ_n (kPa)	Χρόνος (sec)	Τετραγωνική ρίζα του χρόνου	Κατακόρυφη μετακίνηση, ΔH_k (mm)
97,36	0	0,000	9,755
	1	1,000	9,717
	2	1,414	9,545
	3	1,732	9,362
	4	2,000	9,274
	5	2,236	9,267
	6	2,449	9,263
	7	2,646	9,263
	8	2,828	9,262
	9	3,000	9,260
	10	3,162	9,260
	11	3,317	9,260
	12	3,464	9,258
	13	3,606	9,258
	14	3,742	9,258

2170	46,583	9,237
2171	46,594	9,237
2172	46,605	9,237
2173	46,615	9,237
2174	46,626	9,237
2175	46,637	9,237
2176	46,648	9,237
2177	46,658	9,237
2178	46,669	9,237
2179	46,680	9,237
2180	46,690	9,237
2181	46,701	9,237
2182	46,712	9,237
2183	46,723	9,237
2184	46,733	9,237
2185	46,744	9,237
2186	46,755	9,237
2700	51,962	9,225

Πίνακας 3.12: Προσδιορισμός ρυθμού παραμόρφωσης.

Ορθή τάση	
σ (kPa)	97,36
Χρόνος στερεοποίησης	
t_{100} (sec)	5
t_{100} (min)	0,0833
Χρόνος αστοχίας	
$t_f=12.7 \times t_{100}$ (min)	1,0625
Μετακίνηση αστοχίας	
df (mm)	1
Ρυθμός διάτμησης	
$rate=df/t_f$ (mm/min)	0,9412

Πίνακας 3.13: Στοιχεία διάτμησης.

α.α.	F / R	Ημερομηνία	Ώρα	Ρυθμός (mm/min)	Δυναμοκυπέλη		Οριζόντια Μετακίνηση		Κατακόρυφη Μετακίνηση		Αρχείο καταγραφής
					Αρχική Ένδειξη (mm)	Τελική Ένδειξη (mm)	Αρχική Ένδειξη (mm)	Τελική Ένδειξη (mm)	Αρχική Ένδειξη (mm)	Τελική Ένδειξη (mm)	
1	F	10/4/2016	13:05	0,4	-42	157	-1,954	14,133	9,225	9,17	Shearing-1.xls

Πίνακας 3.14: Ενδεικτικές καταγραφές κατά την έναρξη (πάνω) και τη λήξη (κάτω) της διαδικασίας διάτμησης.

Χρόνος (sec)	Ένδειξη δυναμοκυπέλης	Ένδειξη Μηκνιομέτρου Κατακόρυφης Μετακίνησης, ΔΗκ	Ένδειξη Μηκνιομέτρου Οριζόντιας Μετακίνησης, ΔΗορ
0	-42	9,225	-1,954
1	-42	9,225	-1,954
2	-40	9,223	-1,953
3	-39	9,223	-1,953
4	-37	9,223	-1,951
5	-34	9,223	-1,951
6	-31	9,223	-1,949
7	-29	9,223	-1,947
8	-27	9,223	-1,946
9	-24	9,223	-1,943
10	-22	9,222	-1,941
11	-19	9,222	-1,939
12	-18	9,222	-1,936
13	-26	9,222	-1,934
14	-40	9,222	-1,944
15	-41	9,222	-1,944
16	-41	9,222	-1,944
17	-41	9,222	-1,944
18	-41	9,222	-1,944
19	-41	9,222	-1,944

2452	168	9,173	14,026
2453	168	9,173	14,029
2454	168	9,173	14,036
2455	168	9,173	14,041
2456	168	9,173	14,050
2457	168	9,173	14,057
2458	168	9,173	14,062
2459	169	9,173	14,069
2460	169	9,173	14,076
2461	169	9,173	14,083
2462	169	9,173	14,086
2463	169	9,171	14,093
2464	168	9,171	14,100
2465	168	9,171	14,107
2466	168	9,171	14,114
2467	168	9,171	14,119
2468	167	9,170	14,128
2469	165	9,170	14,131
2470	162	9,170	14,131
2471	162	9,170	14,131

Πίνακας 3.15: Ανάλυση των καταγραφών διάτμησης για χρονικές στιγμές αντίστοιχες αυτών του Πίνακα 3.14.

Οριζόντια Δύναμη, F (N)	Διατμητική Τάση, $\tau=F/A_0$ (kPa)	Μεταβολή ύψους δοκιμίου, ΔH (mm)	Ύψος δοκιμίου, H (mm)	Κατακόρυφη παραμόρφωση, $\varepsilon_k=\Delta H/H_{\sigma\tau\epsilon\rho}$ (%)	Οριζόντια Μετακίνηση, $\Delta H_{\text{ορ}}$ (mm)	Δείκτης πόρων, e	$(\tau/\Delta H_{\text{ορ}})/(\tau/\Delta H_{\text{ορ}})_{\text{peak}}$
0,000	0,00	0,000	21,160	0,00	0,000	0,573	
0,000	0,00	0,000	21,160	0,00	0,000	0,573	
2,063	0,65	0,002	21,158	0,01	0,001	0,573	1247
3,094	0,98	0,002	21,158	0,01	0,001	0,573	1871
5,157	1,63	0,002	21,158	0,01	0,003	0,573	1040
8,250	2,61	0,002	21,158	0,01	0,003	0,573	1663
11,344	3,59	0,002	21,158	0,01	0,005	0,573	1372
13,407	4,24	0,002	21,158	0,01	0,007	0,573	1158
15,470	4,89	0,002	21,158	0,01	0,008	0,573	1170
18,563	5,87	0,002	21,158	0,01	0,011	0,573	1021
20,626	6,52	0,003	21,157	0,01	0,013	0,573	960
23,720	7,50	0,003	21,157	0,01	0,015	0,573	956
24,751	7,82	0,003	21,157	0,01	0,018	0,573	832
16,501	5,22	0,003	21,157	0,01	0,020	0,573	499
2,063	0,65	0,003	21,157	0,01	0,010	0,573	125
1,031	0,33	0,003	21,157	0,01	0,010	0,573	62
1,031	0,33	0,003	21,157	0,01	0,010	0,573	62
1,031	0,33	0,003	21,157	0,01	0,010	0,573	62
1,031	0,33	0,003	21,157	0,01	0,010	0,573	62
1,031	0,33	0,003	21,157	0,01	0,010	0,573	62

216,573	68,45	0,052	21,108	0,25	15,980	0,569	8
216,573	68,45	0,052	21,108	0,25	15,983	0,569	8
216,573	68,45	0,052	21,108	0,25	15,990	0,569	8
216,573	68,45	0,052	21,108	0,25	15,995	0,569	8
216,573	68,45	0,052	21,108	0,25	16,004	0,569	8
216,573	68,45	0,052	21,108	0,25	16,011	0,569	8
216,573	68,45	0,052	21,108	0,25	16,016	0,569	8
217,604	68,78	0,052	21,108	0,25	16,023	0,569	8
217,604	68,78	0,052	21,108	0,25	16,030	0,569	8
217,604	68,78	0,052	21,108	0,25	16,037	0,569	8
217,604	68,78	0,052	21,108	0,25	16,040	0,569	8
217,604	68,78	0,054	21,106	0,26	16,047	0,569	8
216,573	68,45	0,054	21,106	0,26	16,054	0,569	8
216,573	68,45	0,054	21,106	0,26	16,061	0,569	8
216,573	68,45	0,054	21,106	0,26	16,068	0,569	8
216,573	68,45	0,054	21,106	0,26	16,073	0,569	8
215,542	68,12	0,055	21,105	0,26	16,082	0,569	8
213,479	67,47	0,055	21,105	0,26	16,085	0,569	8
210,385	66,49	0,055	21,105	0,26	16,085	0,569	8
210,385	66,49	0,055	21,105	0,26	16,085	0,569	8

Πίνακας 3.16: Σύγκριση αποτελεσμάτων για δοκιμές με ίδια πυκνότητα και διαφορετική ορθή τάση.

Στερεοποίηση			Μέγιστη αντοχή			Οριακή αντοχή		
Ορθή Τάση, σ_n (kPa)	Δείκτης πόρων, e	Σχετική Πυκνότητα, D_r (%)	Μέγιστη Διατμητική Τάση, $\tau_{max}=F_{max}/A_0$ (kPa)	Οριζόντια Μετακίνηση ΔH_{op} (mm)	Δείκτης πόρων, e	Οριακή Διατμητική Τάση, $\tau_{cr}=F_{cr}/A_0$ (kPa)	Οριζόντια Μετακίνηση ΔH_{op} (mm)	Δείκτης πόρων, e
50,13	0,600	87,28	50,85	1,086	0,600	37,81	3,883	0,616
97,36	0,573	97,99	93,22	1,784	0,576	67,47	4,844	0,590
197,42	0,598	88,03	160,70	1,957	0,599	132,01	4,797	0,614
398,91	0,572	98,41	298,58	2,063	0,572	250,99	4,613	0,581

Πίνακας 3.17: Συνοχή και γωνία τριβής για (α) μέγιστη και (β) οριακή αντοχή.

Συνοχή, c' (kPa)	20,63
Γωνία τριβής, φ' ($^\circ$)	35

(α)

Συνοχή, c_{cv}' (kPa)	8,47
Γωνία τριβής, φ'_{cv} ($^\circ$)	31,42

(β)

Πίνακας 3.18: Εξωτερική διάμετρος κυλίνδρου 1000ml

Εξωτερική Διάμετρος Κυλίνδρου	
1 ^η μέτρηση	65,55mm
2 ^η μέτρηση	65,31mm
3 ^η μέτρηση	65,45mm
Μ.Ο.	65,44mm

Πίνακας 3.19: Στοιχεία αναδευτήρα

Μοντέλο	S156-10N
Ηλεκτρική Παροχή	220V
Ισχύς	120W
Συχνότητα	50/60 Hz
Διαστάσεις (mm)	155x180x485

Πίνακας 3.20: Ενεργά βάθη αραιομέτρου

N=29,5 (mm)				
d_i (mm)	H_i (mm)	Ενεργό Βάθος	Ένδειξη	R_h'
d_0	$H_0=29,5$	$H_{R0}=10,33$	1,035	35
$d_1=9,5$	$H_1=39$	$H_{R1}=11,28$	1,03	30
$d_2=19$	$H_2=48,5$	$H_{R2}=12,23$	1,025	25
$d_3=29,5$	$H_3=59$	$H_{R3}=13,28$	1,02	20
$d_4=40$	$H_4=69,5$	$H_{R4}=14,33$	1,015	15
$d_5=51$	$H_5=80,5$	$H_{R5}=15,43$	1,01	10
$d_6=61,5$	$H_6=91$	$H_{R6}=16,48$	1,005	5
$d_7=72,5$	$H_7=102$	$H_{R7}=17,58$	1	0
$d_8=84$	$H_8=113,5$	$H_{R8}=18,73$	0,995	-5

Πίνακας 3.21: Ένδειξη αραιομέτρου στην επιφάνεια του νερού και στην κορυφή του μηνίσκου.

Σημείο	Ένδειξη Αραιομέτρου
A	0,9995
B	0,9990

Πίνακας 3.22: Ιξώδες και πυκνότητα του νερού βάσει θερμοκρασίας

Θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$)	Ιξώδες, η (mPa s)	Πυκνότητα, ρ_w (Mg/m^3)
0	1,7865	0,99984
5	1,5138	0,99995
10	1,3037	0,99970
15	1,1369	0,99909
20	1,0019	0,99820
25	0,8909	0,99704
30	0,7982	0,99565
40	0,6540	0,99222

Από Kaye και Laby (1973)

Πίνακας 3.23: Τιμές διόρθωσης ανάλογα με τη θερμοκρασία του διαλύματος

M_t	T (°C)	M_t	T (°C)
-1,25	10	0,38	22
-1,17	11	0,57	23
-1,09	12	0,81	24
-0,99	13	1,04	25
-0,88	14	1,27	26
-0,77	15	1,51	27
-0,64	16	1,78	28
-0,5	17	2,08	29
-0,37	18	2,35	30
-0,19	19	2,63	31
0	20	2,96	32
0,18	21		

Πίνακας 3.24: Τιμές για την ποσότητα K από ASTM

Temperature,* C	Specific Gravity of Soil Particles								
	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
16	0.01510	0.01505	0.01481	0.01457	0.01435	0.01414	0.01394	0.01374	0.01356
17	0.01511	0.01486	0.01462	0.01439	0.01417	0.01396	0.01376	0.01356	0.01338
18	0.01492	0.01467	0.01443	0.01421	0.01399	0.01378	0.01359	0.01339	0.01321
19	0.01474	0.01449	0.01425	0.01403	0.01382	0.01361	0.01342	0.1323	0.01305
20	0.01456	0.01431	0.01408	0.01386	0.01365	0.01344	0.01325	0.01307	0.01289
21	0.01438	0.01414	0.01391	0.01369	0.01348	0.01328	0.01309	0.01291	0.01273
22	0.01421	0.01397	0.01374	0.01353	0.01332	0.01312	0.01294	0.01276	0.01258
23	0.01404	0.01381	0.01358	0.01337	0.01317	0.01297	0.01279	0.01261	0.01243
24	0.01388	0.01365	0.01342	0.01321	0.01301	0.01282	0.01264	0.01246	0.01229
25	0.01372	0.01349	0.01327	0.01306	0.01286	0.01267	0.01249	0.01232	0.01215
26	0.01357	0.01334	0.01312	0.01291	0.01272	0.01253	0.01235	0.01218	0.01201
27	0.01342	0.01319	0.01297	0.01277	0.01258	0.01239	0.01221	0.01204	0.01188
28	0.01327	0.01304	0.01283	0.01264	0.01244	0.01225	0.01208	0.01191	0.01175
29	0.01312	0.01290	0.01269	0.01249	0.01230	0.01212	0.01195	0.01178	0.01162
30	0.01298	0.01276	0.01256	0.01236	0.01217	0.01199	0.01182	0.01165	0.01149

Πίνακας 3.25: Τιμή διόρθωσης ανάλογα με τη θερμοκρασία του διαλύματος

Σε Απιονισμένο Νερό					
Θερμοκρασία, T (°C)	15,7	20	25,2	30,9	35,7
ένδειξη μηνίσκου, R_h	1,0002	1	0,9995	0,998	0,997
διόρθωση, Cor	0,0002	0	-0,0005	-0,002	-0,003

Πίνακας 3.26: Διαστάσεις σταθερού τμήματος μήτρας.

Μέτρηση	Ύψος(mm)	Άνω Διάμετρος(mm)	Κάτω Διάμετρος(mm)
1 ^η	116,52	101,51	101,65
2 ^η	116,54	101,55	101,56
3 ^η	116,58	101,59	101,58
4 ^η	116,4	101,58	101,59
Μέση τιμή	116,51	101,56	101,6

Κεφάλαιο 4 – Μελετηθέντα εδάφη – Πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών

4.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά παρουσιάζονται τα εδάφη που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία και στη συνέχεια το πρόγραμμα των δοκιμών άμεσης διάτμησης.

4.2. Μελετηθέντα εδάφη

Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν η καθαρή άμμος M31, η αμμώδης ιλύς D6 και ο καολίνης. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιήθηκαν σε διάφορες αναλογίες για την παρασκευή μειγμάτων. Συγκεκριμένα η άμμος M31 και τα μείγματα άμμος M31+ 5% αμμοϊλός D6 και η άμμος M31+ 15% αμμοϊλός D6 χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή δοκιμών που μελετήθηκαν στη συσκευή άμεσης διάτμησης από την Τύρη Δανάη (2016).

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα εξής μείγματα: (α) άμμος M31+ 1% άμμος από την D6+ 4% καολίνης και (β) άμμος M31+ 3% άμμος από την D6+ 12% καολίνης για την παρασκευή δοκιμών στη συσκευή άμεσης διάτμησης. Τα μείγματα αυτά παρασκευάστηκαν έτσι ώστε να έχουν το ίδιο ποσοστό άμμου με τα μείγματα που μελετήθηκαν από την Τύρη και το ίδιο ποσοστό λεπτοκόκκων, με τη διαφορά πως το ποσοστό της μη πλαστικής ιλύος από την D6 έχει αντικατασταθεί από τον πλαστικό καολίνη, Πίνακας 4.1. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που παρουσιάζονται από την Τύρη (2016) επιτρέπει τη μελέτη της επίδρασης του είδους των λεπτοκόκκων στην αντοχή του εδάφους.

4.3. Φυσικά χαρακτηριστικά εδαφών

Η άμμος M31 είναι φυσική χαλαζιακή άμμος από το Βέλγιο. Πρόκειται για καθαρή άμμο με σχετικά ομοιόμορφους στιλβωμένους κόκκους με ομοιόμορφη στρογγυλότητα και σφαιρικότητα. Η στίλβωση αποτελεί ένδειξη προέλευσης από υδάτινο περιβάλλον. Οι κόκκοι στην πλειονότητά τους είναι διαυγείς, ενώ ένα ποσοστό 5-10% είναι γαλακτόχρωμοι (ημιδιαφανείς) και άλλης

γενετικής προέλευσης. Υπάρχει ελάχιστη ποσότητα (4%) μαύρων κόκκων σιδηροειδών άγνωστης προέλευσης (Βράννα, 2016).

Η αμμώδης ιλύς D6 αποτελεί προϊόν θραύσης χαλαζιακής άμμου με απειροελάχιστη ποσότητα (<1%) μαύρων κόκκων, που οφείλονται πιθανά σε ανθρώπινη επιμόλυνση. Οι κόκκοι της D6 είναι διαυγείς και σε αντίθεση με την M31, εξαιρετικά γωνιώδεις με έντονη στιλπνότητα, που οφείλεται στην κογχώδη θραύση τους (Βράννα, 2016). Η ιλύς που προέρχεται από την D6 είναι μη πλαστική.

Ο καολίνης είναι αργιλικό έδαφος, έχει λευκό χρώμα και πλαστικότητα που εκφράζεται με όριο υδαρότητας $WL=47,2\%$ και δείκτη πλαστικότητας $PI=18,2\%$.

Εργαστηριακές δοκιμές ταξινόμησης πραγματοποιήθηκαν σε δύο ιλυώδεις άμμους που αποτελούνται από μείγματα των M31 και D6 με ποσοστό της D6 ίσο με 5% και 15%, και που στο εξής θα αναφέρονται ως M31-5SILT και M31-15SILT αντίστοιχα. Το ποσοστό ιλύος σε αυτά τα εδάφη ήταν 4% και 12% αντίστοιχα. Εργαστηριακές δοκιμές ταξινόμησης και άμεσης διάτμησης πραγματοποιήθηκαν σε δύο αργιλώδεις άμμους που αποτελούνται από μείγματα της M31, της περιεχόμενης άμμου από την D6 και του καολίνης σε ποσοστά του τελευταίου ίσα με 4% και 12% και που στο εξής θα αναφέρονται ως M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL αντίστοιχα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών ταξινόμησης των παραπάνω εδαφών.

Ειδικό βάρος στερεών κόκκων

- Άμμος M31

Για την καθαρή άμμο M31 χρησιμοποιείται η τιμή που προσδιορίστηκε από την Τύρη (2016) και είναι $G_s=2,659$.

- Αμμοϊλύς D6

Για την αμμοϊλύ D6 χρησιμοποιείται η τιμή που προσδιορίστηκε από την Τύρη (2016) και είναι $G_s=2,672$.

- Ιλυώδης άμμος M31-5SILT

Για την ιλυώδη άμμο M31-5SILT χρησιμοποιείται η τιμή που προσδιορίστηκε από τη Βράννα (2016) και είναι $G_s=2,657$.

- Ιλυώδης άμμος M31-15SILT

Για την ιλυώδη άμμο M31-15SILT χρησιμοποιείται η τιμή που προσδιορίστηκε από τη Βράννα (2016) και είναι $G_s=2,653$.

- Καολίνης

Για τον καολίνη χρησιμοποιείται η τιμή που προτείνεται στη διεθνή βιβλιογραφία και είναι $G_s=2,7$.

- Αργιλώδης άμμος M31-1SILT-4KAOL

Για την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL χρησιμοποιείται η τιμή που προσδιορίζεται από τις τιμές του G_s για την καθαρή άμμο M31 και τον καολίνη, βάσει των ποσοστών τους στο μείγμα και είναι $G_s=2,657$.

- Αργιλώδης άμμος M31-3SILT-12KAOL

Για την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL χρησιμοποιείται η τιμή που προσδιορίζεται από τις τιμές του G_s για την καθαρή άμμο M31 και τον καολίνη, βάσει των ποσοστών τους στο μείγμα και είναι $G_s=2,652$.

Κοκκομετρική ανάλυση

- Άμμος M31

Η κοκκομετρική καμπύλη της καθαρής άμμου M31 προσδιορίστηκε από την Τύρη (2016) με τη μέθοδο της ξηρής κοκκομετρίας και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Ο συντελεστής ομοιομορφίας της άμμου είναι $C_u=1,82$ και ο συντελεστής καμπυλότητας $C_c=1,09$.

Το έδαφος χαρακτηρίζεται ως ομοιόμορφη άμμος SP (κατά USCS) χωρίς λεπτόκοκκα.

- Αμμοϊλός D6

Η κοκκομετρική καμπύλη της αμμοϊλός D6 προσδιορίστηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας με τη μέθοδο της υγρής κοκκομετρίας και του αραιομέτρου κατά BS 1377 και κατά ASTM. Οι καμπύλες και των δύο μεθόδων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2. Το ποσοστό της μη πλαστικής ιλός στο έδαφος είναι 80% (διάμετρος μικρότερη των 75μm). Το έδαφος χαρακτηρίζεται ως μη πλαστική αμμοϊλός.

- Ιλυώδης άμμος M31-5SILT

Η κοκκομετρική καμπύλη της ιλυώδους άμμου M31-5SILT προσδιορίστηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας με τη μέθοδο της υγρής κοκκομετρίας και του αραιομέτρου κατά BS 1377 και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.

Το έδαφος περιέχει 3% μη πλαστικά λεπτόκοκκα (<75μm) και χαρακτηρίζεται ως ιλυώδης άμμος SM-SP (κατά USCS).

- Ιλυώδης άμμος M31-15SILT

Η κοκκομετρική καμπύλη της ιλυώδους άμμου M31-15SILT προσδιορίστηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας με τη μέθοδο της υγρής κοκκομετρίας και του αραιομέτρου κατά BS 1377 και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.

Το έδαφος περιέχει 12% μη πλαστικά λεπτόκοκκα (<75μm) και χαρακτηρίζεται ως ιλυώδης άμμος SM (κατά USCS).

- Καολίνης

Η κοκκομετρική καμπύλη του καολίνη προσδιορίστηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας με τη μέθοδο του αραιομέτρου κατά BS 1377 και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.

Το έδαφος αποτελείται από 100% λεπτόκοκκα (<75μm) και περιέχει CF=70% ποσοστό αργιλικών κόκκων (διάμετρος μικρότερη των 2μm). Βάσει της τιμής του ορίου υδαρότητας WL=47,2% και του δείκτη πλαστικότητας PI=18,2% που προσδιορίστηκαν από το Α.Π.Θ. το έδαφος χαρακτηρίζεται ως CH (κατά USCS).

- Αργιλώδης άμμος M31-1SILT-4KAOL

Η κοκκομετρική καμπύλη της αργιλώδους άμμου M31-1SILT-4KAOL προσδιορίστηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας με τη μέθοδο της υγρής κοκκομετρίας και του αραιομέτρου κατά BS 1377 και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6.

Το έδαφος περιέχει 3% πλαστικά λεπτόκοκκα (<75 μ m) και χαρακτηρίζεται ως αργιλώδης άμμος SC-SP (κατά USCS).

- Αργιλώδης άμμος M31-3SILT-12KAOL

Η κοκκομετρική καμπύλη της αργιλώδους άμμου M31-3SILT-12KAOL προσδιορίστηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας με τη μέθοδο της υγρής κοκκομετρίας και του αραιομέτρου κατά BS 1377 και παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7.

Το έδαφος περιέχει 12% πλαστικά λεπτόκοκκα (<75 μ m) και χαρακτηρίζεται ως αργιλώδης άμμος SC (κατά USCS).

Οι κοκκομετρικές καμπύλες των εδαφών M31-5SILT και M31-1SILT-4KAOL παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.8 για λόγους σύγκρισης. Παρομοίως, οι κοκκομετρικές καμπύλες των εδαφών M31-15SILT και M31-3SILT-12KAOL παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.9.

Μέγιστη πυκνότητα

- Άμμος M31

Για τον προσδιορισμό της μέγιστης πυκνότητας της άμμου M31 πραγματοποιήθηκαν, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, δοκιμές Proctor. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. και επιτρέπουν το σχεδιασμό της καμπύλης συμπύκνωσης, Σχήμα 4.10. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει πως η βέλτιστη υγρασία είναι $w_{opt}=11,73\%$ και η μέγιστη ξηρή φαινόμενη πυκνότητα είναι $\rho_d=1,612\text{gr/cm}^3$. Ο ελάχιστος δείκτης πόρων υπολογίζεται $e_{min}=0,649$.

Ο ελάχιστος δείκτης πόρων που προέκυψε από τα εδαφικά δοκίμια της δοκιμής άμεσης διάτμησης που παρουσιάζονται από την Τύρη (2016) είναι $e_{min}=0,645$. Από δοκιμή δονητικής τράπεζας που πραγματοποιήθηκε σε ξηρό εδαφικό δοκίμιο της M31 και που παρουσιάζεται από την Βράννα (2016) προέκυψε $e_{min}=0,558$.

- Ιλυώδης άμμος M31-5SILT

Για τον προσδιορισμό της μέγιστης πυκνότητας της ιλυώδους άμμου M31-5SILT πραγματοποιήθηκαν, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, δοκιμές συμπύκνωσης Proctor.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3 και επιτρέπουν το σχεδιασμό της καμπύλης συμπύκνωσης, Σχήμα 4.11. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει πως η βέλτιστη υγρασία είναι $w_{opt}=14,61\%$ και η μέγιστη ξηρή πυκνότητα είναι $\rho_d=1,654\text{gr}/\text{cm}^3$. Ο ελάχιστος δείκτης πόρων υπολογίζεται $e_{min}=0,606$.

- Ιλυώδης άμμος M31-15SILT

Για τον προσδιορισμό της μέγιστης πυκνότητας της ιλυώδους άμμου M31-15SILT πραγματοποιήθηκαν, στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, δοκιμές συμπύκνωσης Proctor. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4 και επιτρέπουν το σχεδιασμό της καμπύλης συμπύκνωσης, Σχήμα 4.12. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει πως η βέλτιστη υγρασία είναι $w_{opt}=12,69\%$ και η ξηρή μέγιστη φαινόμενη πυκνότητα είναι $\rho_d=1,695\text{gr}/\text{cm}^3$. Ο ελάχιστος δείκτης πόρων υπολογίζεται $e_{max}=0,569$. Παρατηρείται όμως πως στην καμπύλη συμπύκνωσης δεν έχει καταγραφεί καθοδικός κλάδος, οπότε αναμένονται και μικρότερες τιμές του δείκτη πόρων.

Ο ελάχιστος δείκτης πόρων που προέκυψε από τα εδαφικά δοκίμια της δοκιμής άμεσης διάτμησης και που παρουσιάζονται από την Τύρη (2016) είναι $e_{min}=0,422$. Από δοκιμή δονητικής τράπεζας που πραγματοποιήθηκε σε ξηρό εδαφικό δοκίμιο της M31-15SILT και που παρουσιάζεται από τη Βράννα (2016) προέκυψε $e_{min}=0,414$.

- Αργιλώδης άμμος M31-1SILT-4KAOL

Για την παρασκευή του εδαφικού μείγματος M31-1SILT-4KAOL που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές συμπύκνωσης, ελάχιστης πυκνότητας και άμεσης διάτμησης εφαρμόστηκε η ακόλουθη διαδικασία. Για το μείγμα απαιτείται ποσοστό 95% της M31, 4% του καολίνη και 1% από την άμμο της αμμοιλύος D6. Για το διαχώρισμό της άμμου από την αμμοιλύ D6, αρχικά έγινε ανάμειξη 100gr της D6 με 100ml αντιθρομβωτικού διαλύματος εξαμεταφωσφορικού νατρίου $(\text{NaPO}_3)_6$ κανονικότητας IN.

Το διάλυμα παρέμεινε καλυμένο με μεμβράνη κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στη συνέχεια έγινε διαχωρισμός του μείγματος με κοσκίνισμα στο κόσκινο No200 (75 μm) και τη χρήση νερού. Η συκρατούμενη από το κόσκινο ποσότητα είναι η άμμος της D6, η οποία και τοποθετήθηκε στον κλίβανο 105°C προς ξήρανση και εν συνεχεία προς παρασκευή του μείγματος και των δοκιμών.

Πέρα από την προετοιμασία του δείγματος, η διαδικασία συμπύκνωσης ήταν ίδια με τα υπόλοιπα δείγματα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5 και επιτρέπουν το σχεδιασμό της καμπύλης συμπύκνωσης, Σχήμα 4.13. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει πως η βέλτιστη υγρασία είναι $w_{opt}=11,89\%$ και η μέγιστη ξηρή πυκνότητα $\rho_d=1,694\text{gr}/\text{cm}^3$. Ο ελάχιστος δείκτης πόρων υπολογίζεται $e_{min}=0,568$.

- Αργιλώδης άμμος M31-3SILT-12KAOL

Για την παρασκευή του εδαφικού μείγματος M31-3SILT-12KAOL που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές συμπύκνωσης, ελάχιστης πυκνότητας και άμεσης διάτμησης εφαρμόστηκε η διαδικασία που περιγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο και που εστιάζει στο διαχωρισμό της άμμου από την αμμοϊλύ D6. Για το μείγμα απαιτείτο ποσοστό 85% της M31, 12% του καολίνη και 3% από την άμμο της αμμοϊλύος D6. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συμπύκνωσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.6 και επιτρέπουν το σχεδιασμό της καμπύλης συμπύκνωσης, Σχήμα 4.14. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει πως η βέλτιστη υγρασία είναι $w_{opt}=9,79\%$ και η μέγιστη ξηρή πυκνότητα είναι $\rho_d=1,865\text{gr}/\text{cm}^3$. Ο ελάχιστος δείκτης πόρων υπολογίζεται $e_{min}=0,422$.

Ωστόσο, ο ελάχιστος δείκτης πόρων που υπολογίστηκε από δοκιμές άμεσης διάτμησης που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι $e_{min}=0,412$.

Ελάχιστη πυκνότητα

- Άμμος M31

Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης πυκνότητας και του μέγιστου δείκτη πόρων, πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας δοκιμές απόθεσης της ξηρής άμμου M31 σε κύλινδρο με νερό. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.7 και ο μέγιστος δείκτης πόρων προκύπτει ως μέσος όρος $e_{min}=0,882$.

Ο προσδιορισμός του μέγιστου δείκτη πόρων της άμμου M31 έγινε επίσης από την Τύρη (2016) με διάφορες μεθόδους και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8.

Επίσης, τα αποτελέσματα για το μέγιστο δείκτη πόρων της M31 από δοκιμές απόθεσης ξηρής άμμου σε ογκομετρικό κύλινδρο 2000ml χωρίς νερό δίνονται από τη Βράννα (2016) και είναι $e_{max}=0,805$.

- Ιλυώδης άμμος M31-5SILT

Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης πυκνότητας και του μέγιστου δείκτη πόρων, πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας δοκιμές απόθεσης της ξηρής άμμου M31-5SILT σε κύλινδρο με νερό. Εξαιτίας της παρουσίας λεπτοκόκκων στο δείγμα, η διάρκεια της δοκιμής ήταν μεγάλη (περίπου 24 ώρες) και εξαρτιόταν από την ταχύτητα καθίζησης των κόκκων. Επίσης, για τον ίδιο λόγο πραγματοποιήθηκαν τρεις ταυτόχρονες δοκιμές στο ίδιο έδαφος σε κυλίνδρους των 1000ml. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.9 και ο μέγιστος δείκτης πόρων προκύπτει $e_{max}=0,867$.

Ο προσδιορισμός του μέγιστου δείκτη πόρων της άμμου M31-5SILT έγινε επίσης από την Τύρη (2016), με διάφορες μεθόδους και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.10.

- Ιλυώδης άμμος M31-15SILT

Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης πυκνότητας και του μέγιστου δείκτη πόρων πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας δοκιμές απόθεσης της ξηρής άμμου M31-15SILT σε κύλινδρο με νερό. Εξαιτίας της παρουσίας λεπτοκόκκων στο δείγμα, η διάρκεια της δοκιμής ήταν μεγάλη (περίπου 24 ώρες) και εξαρτιόταν από την ταχύτητα της καθίζησης των κόκκων. Επίσης, για τον ίδιο λόγο πραγματοποιήθηκαν δύο ταυτόχρονες δοκιμές για το ίδιο έδαφος σε κυλίνδρους των 250ml. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11 και ο μέγιστος δείκτης πόρων προκύπτει $e_{max}=0,765$.

Ο προσδιορισμός του μέγιστου δείκτη πόρων της άμμου M31-15SILT έγινε επίσης από την Τύρη (2016) με διάφορες μεθόδους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12.

Ο μέγιστος δείκτης πόρων της άμμου M31-15SILT υπολογίστηκε επίσης από τη Βράννα (2016) με δοκιμές απόθεσης ξηρής άμμου σε ογκομετρικό κύλινδρο 2000ml και είναι $e_{max}=0,682$.

- Αργιλώδης άμμος M31-1SILT-4KAOL

Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης πυκνότητας και του μέγιστου δείκτη πόρων πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας δοκιμές απόθεσης της ξηρής άμμου M31-1SILT-4KAOL σε κύλινδρο 2000ml χωρίς νερό. Εξαιτίας της παρουσίας πλαστικών λεπτοκόκκων στο δείγμα ήταν αδύνατη η εφαρμογή της μεθόδου σε κύλινδρο με νερό. Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.13 και ο μέγιστος δείκτης πόρων προκύπτει $e_{max}=0,820$.

- Αργιλώδης άμμος M31-3SILT-12KAOL

Για τον προσδιορισμό της ελάχιστης πυκνότητας και του μέγιστου δείκτη πόρων πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας δοκιμές απόθεσης της ξηρής άμμου M31-3SILT-12KAOL σε κύλινδρο με και χωρίς την παρουσία νερού. Ωστόσο καμία μέθοδος δεν ολοκληρώθηκε με επιτυχία, ούτε κατάληξε σε αποτέλεσμα εξαιτίας της παρουσίας πλαστικών λεπτοκόκκων στο δείγμα. Έτσι, ο μέγιστος δείκτης πόρων υπολογίστηκε προσεγγιστικά ίσος με $e_{max}=0,664$.

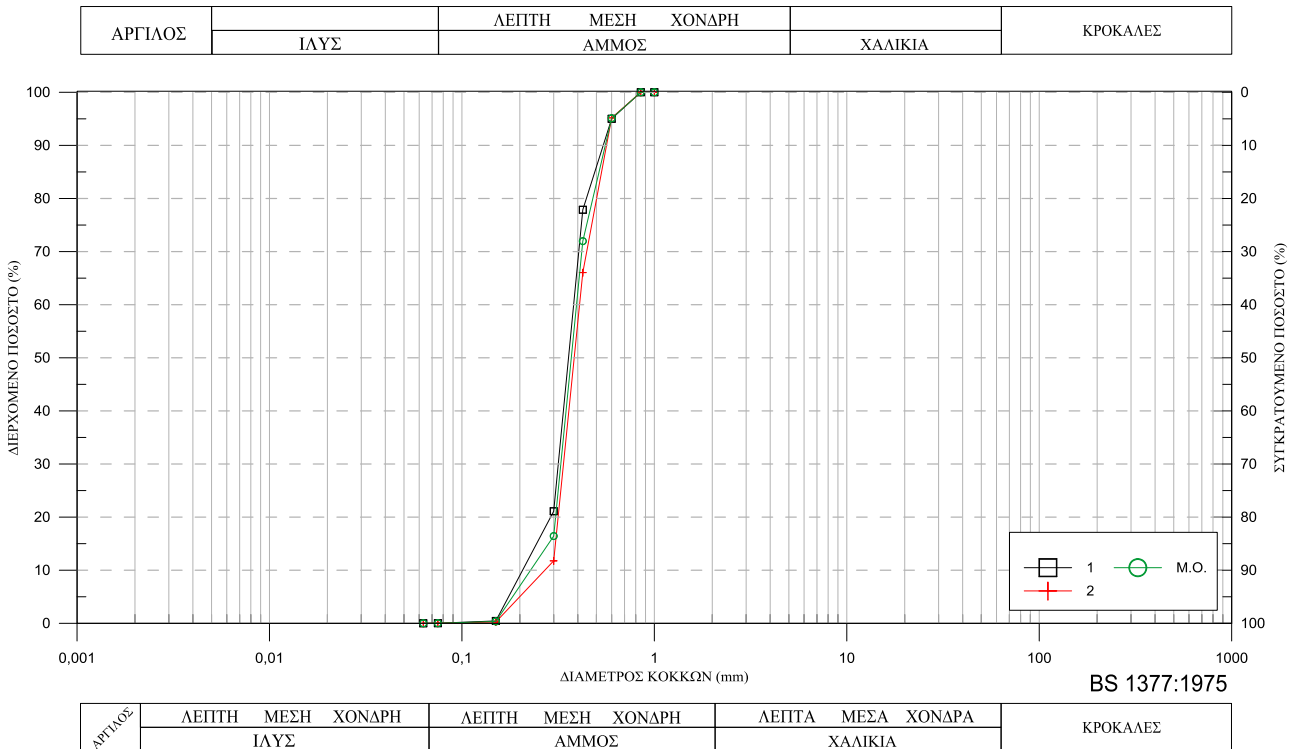
Ο υπολογισμός έγινε με βάση τη διαφορά του μέγιστου και του ελάχιστου δείκτη πόρων για τα μείγματα με καολίνη. Με βάση τις τιμές e_{min} και e_{max} για τα αργιλώδη εδάφη M31-1SILT-4KAOL η διαφορά τους προκύπτει ίση με $\Delta e=0,252$. Η τιμή του ελάχιστου δείκτη πόρων για το έδαφος M31-3SILT-12KAOL έχει προσδιοριστεί από δοκιμή άμεσης διάτμησης και είναι $e_{min}=0,412$ και επομένως $e_{max}= e_{min}+ \Delta e= 0,664$.

Συγκεντρωτικά, τα φυσικά χαρακτηριστικά των μελετηθέντων εδαφών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.14.

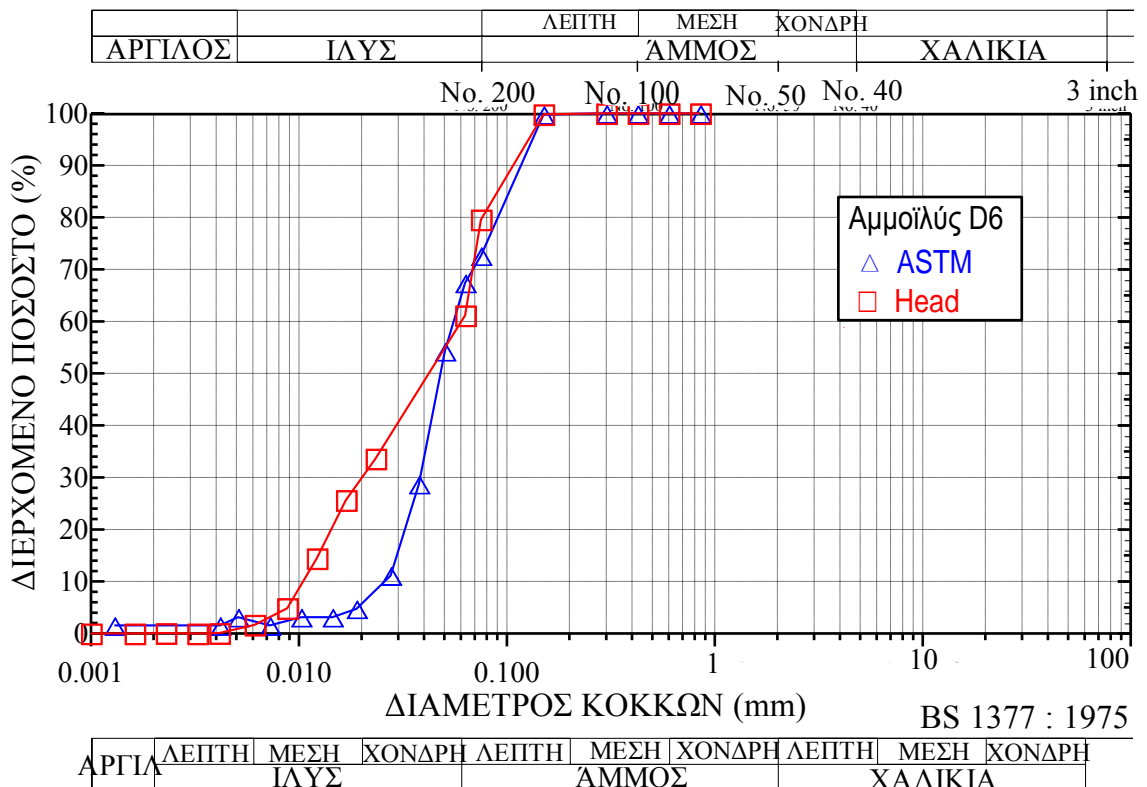
4.4. Πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών διατμητικής αντοχής

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει δοκιμές άμεσης διάτμησης υπό στραγγιζόμενες συνθήκες (CD) σε δοκίμια (α) αργιλώδους άμμου M31-1SILT-4KAOL και (β) αργιλώδους άμμου M31-3SILT-12KAOL σε διάφορες πυκνότητες και τάσεις στερεοποίησης.

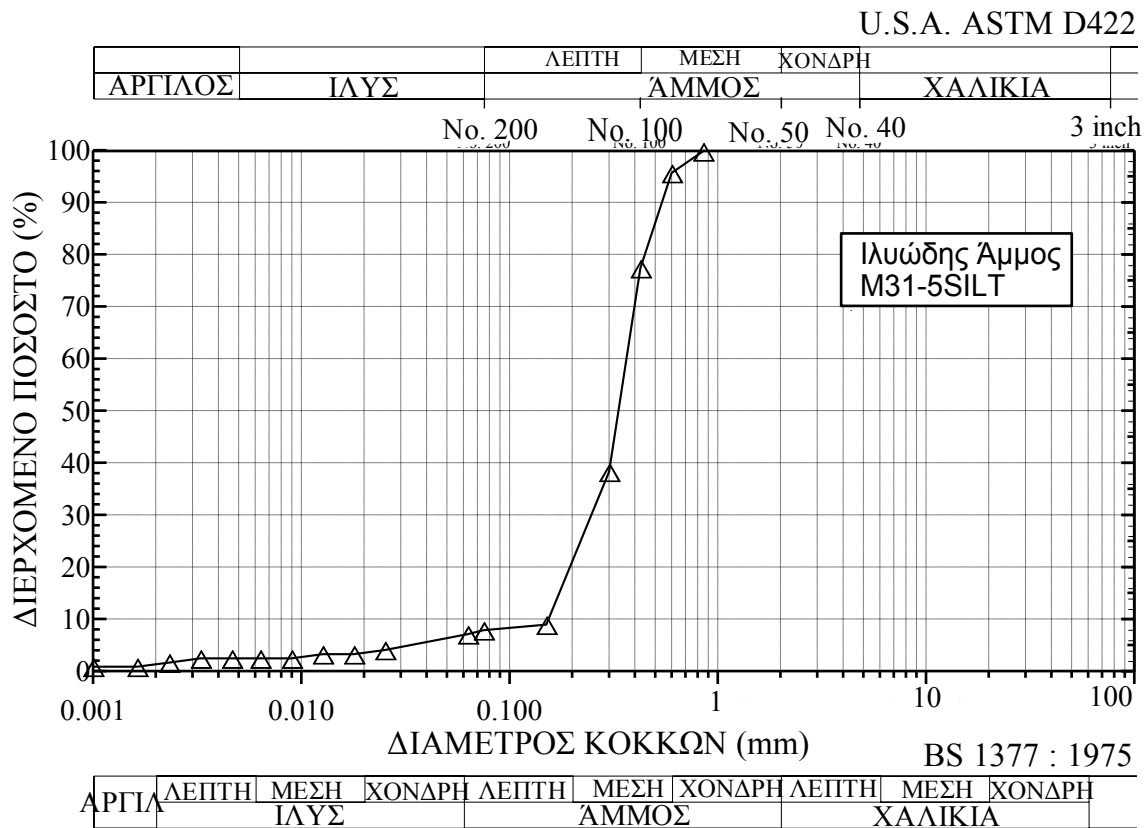
Στον Πίνακα 4.15 παρουσιάζονται τα στοιχεία των δοκιμών άμεσης διάτμησης που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας για τον προσδιορισμό των παραμέτρων μηχανικής αντοχής των εδαφών.



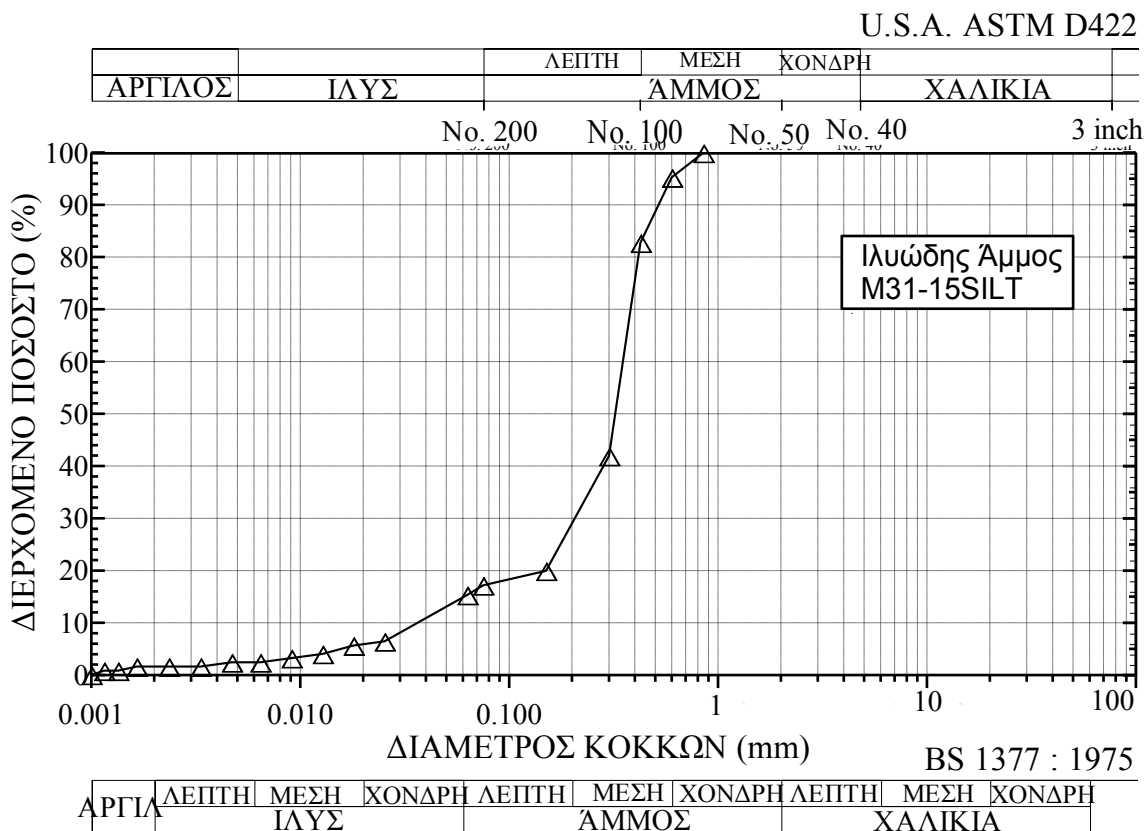
Σχήμα 4.1: Κοκκομετρική καμπύλη άμμου M31 (Τύρη, 2016)



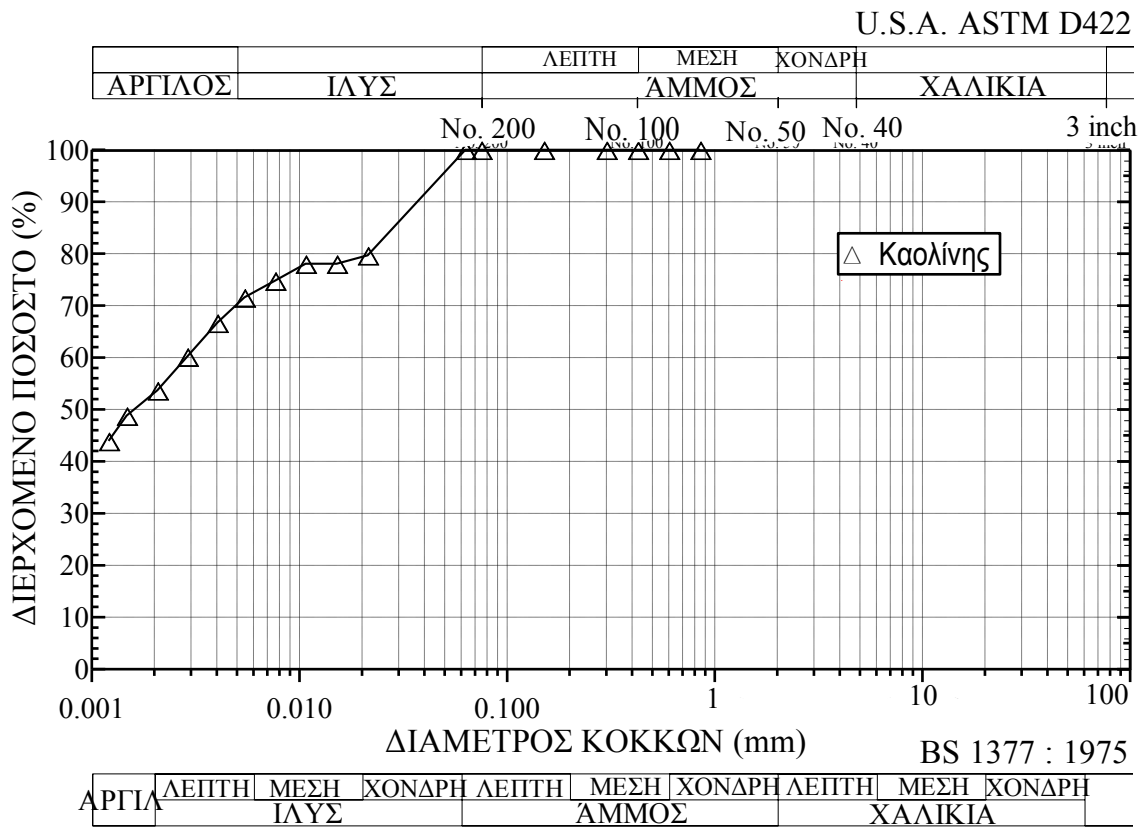
Σχήμα 4.2: Κοκκομετρικές καμπύλες αμμοίλου D6



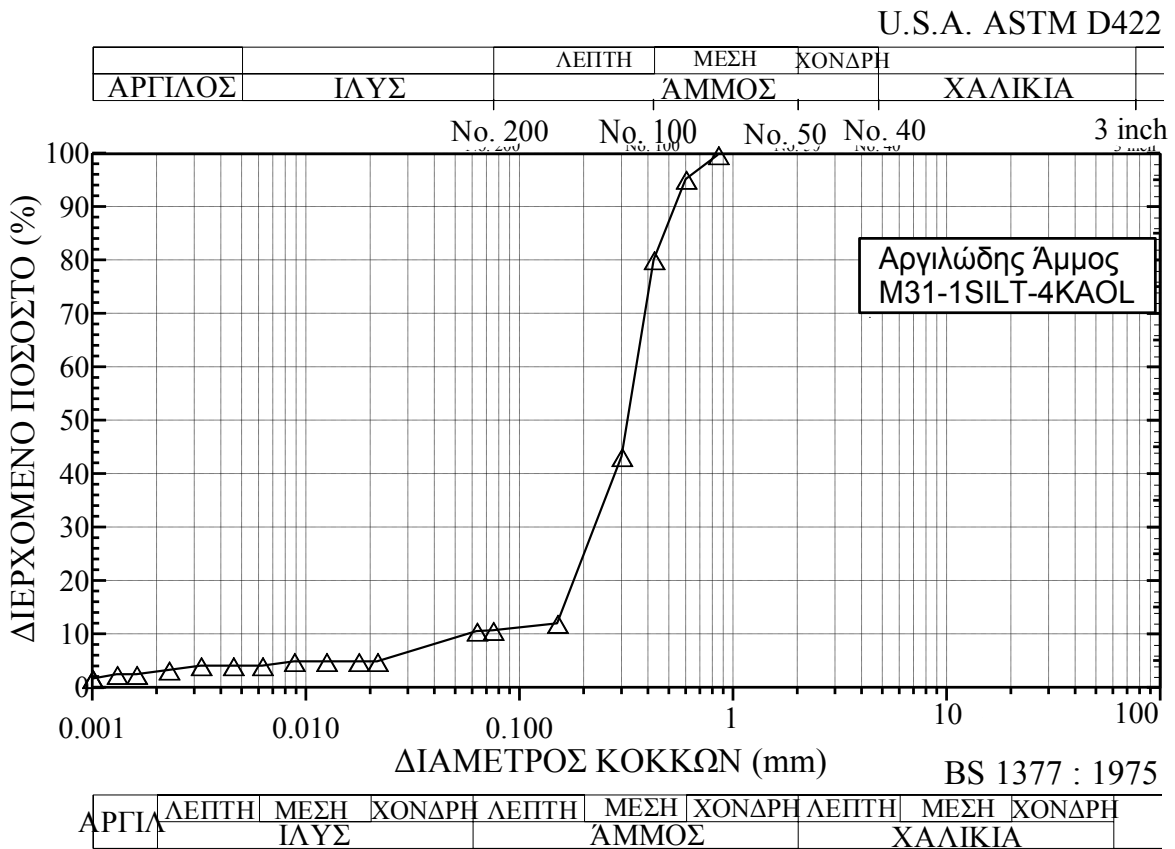
Σχήμα 4.3: Κοκκομετρική καμπύλη ιλυώδους άμμου, M31-5SILT



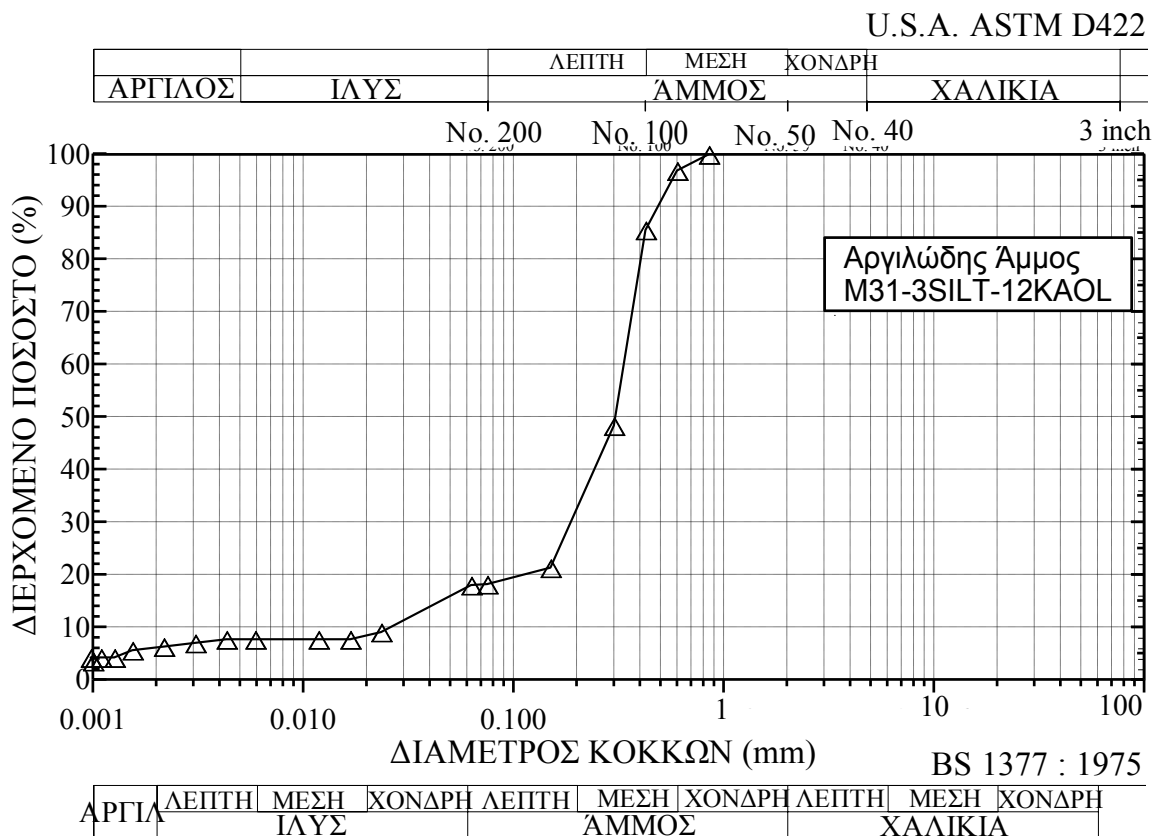
Σχήμα 4.4: Κοκκομετρική καμπύλη ιλυώδους άμμου, M31-15SILT



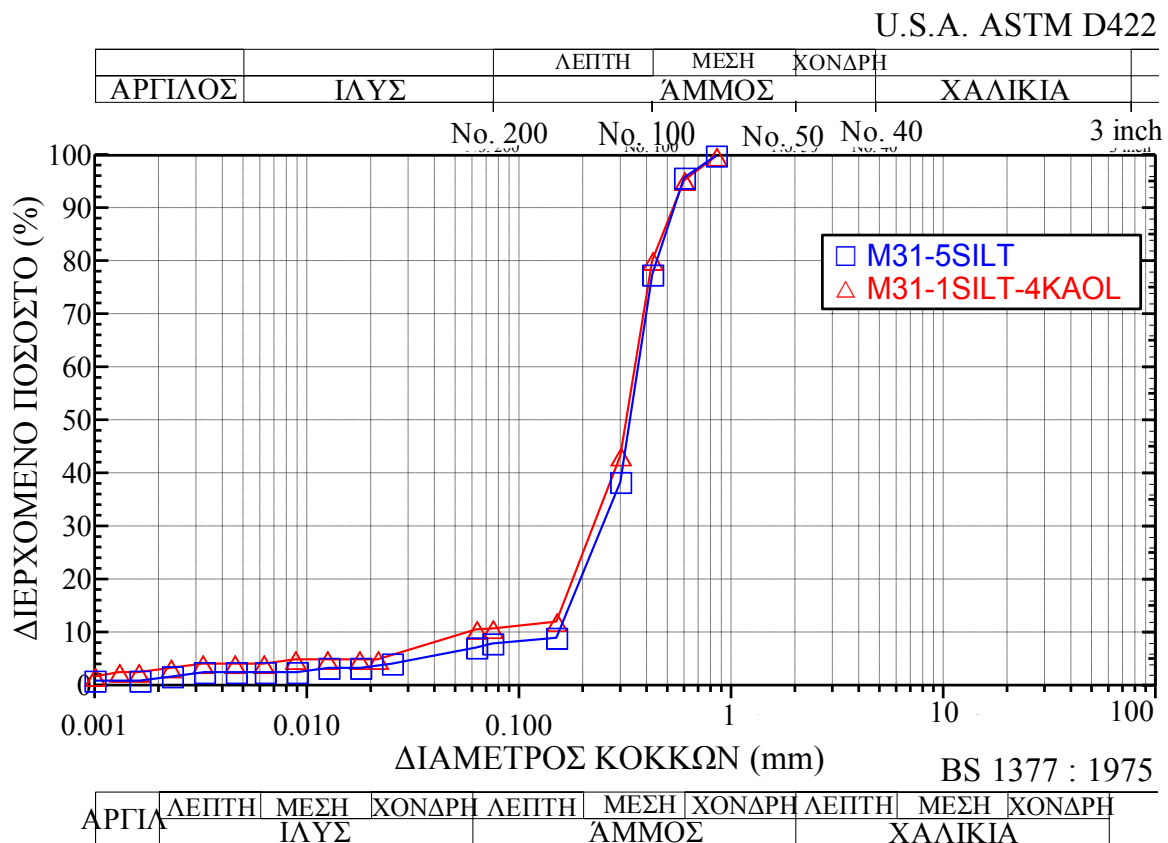
Σχήμα 4.5: Κοκκομετρική καμπύλη καολίνη



Σχήμα 4.6: Κοκκομετρική καμπύλη αργιλώδους άμμου, M31-1SILT-4KAOL

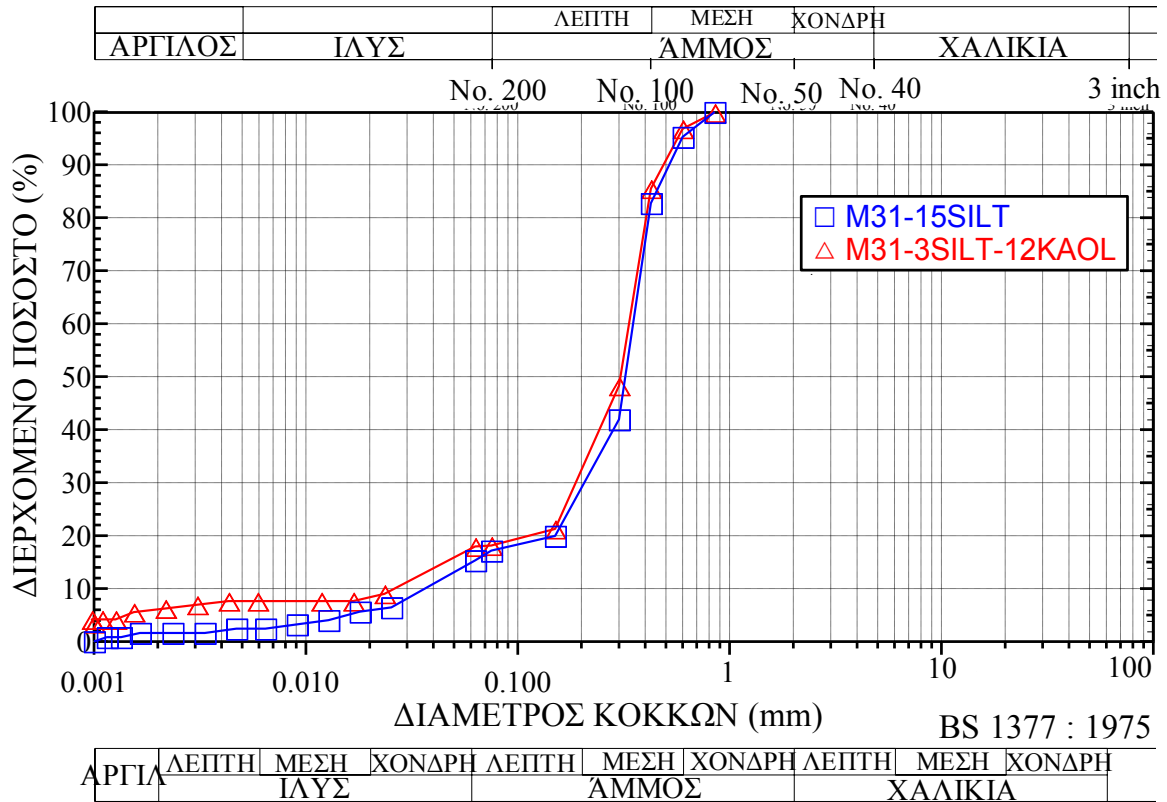


Σχήμα 4.7: Κοκκομετρική καμπύλη αργιλώδους άμμου, M31-3SILT-12KAOL

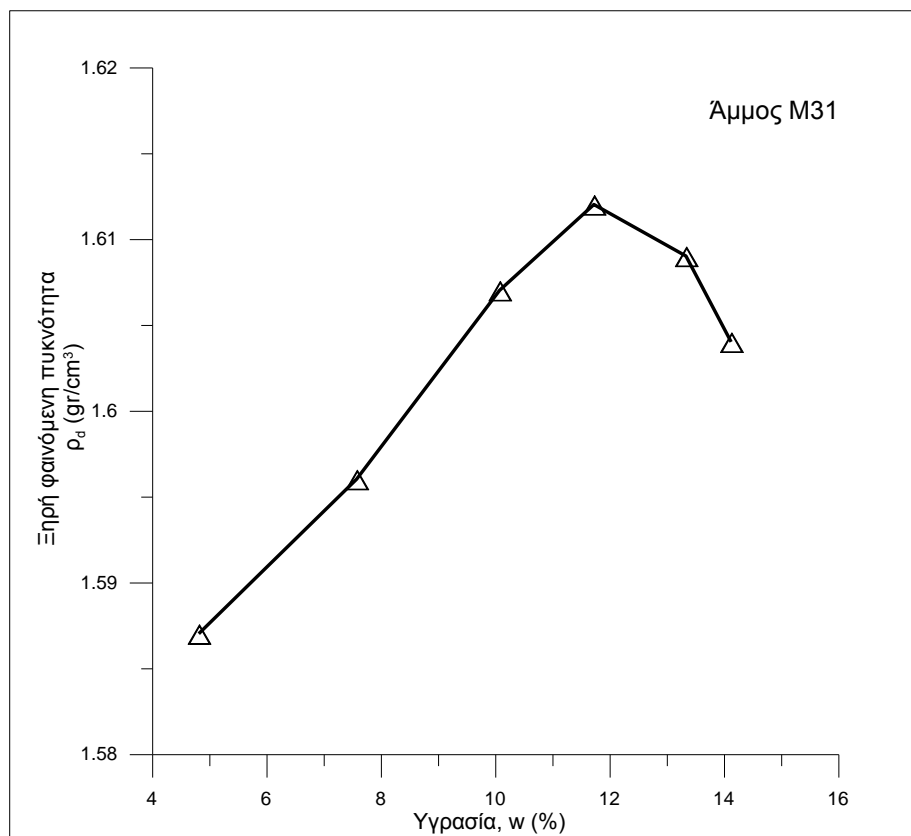


Σχήμα 4.8: Κοκκομετρικές καμπύλες M31-5SILT και M31-1SILT-4KAOL

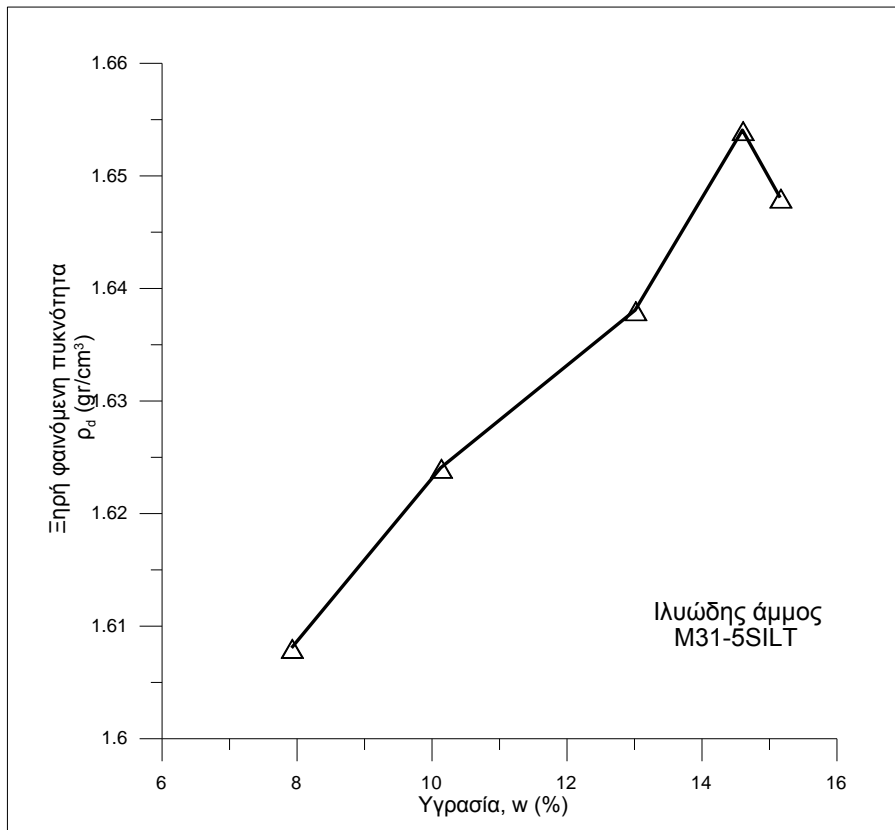
U.S.A. ASTM D422



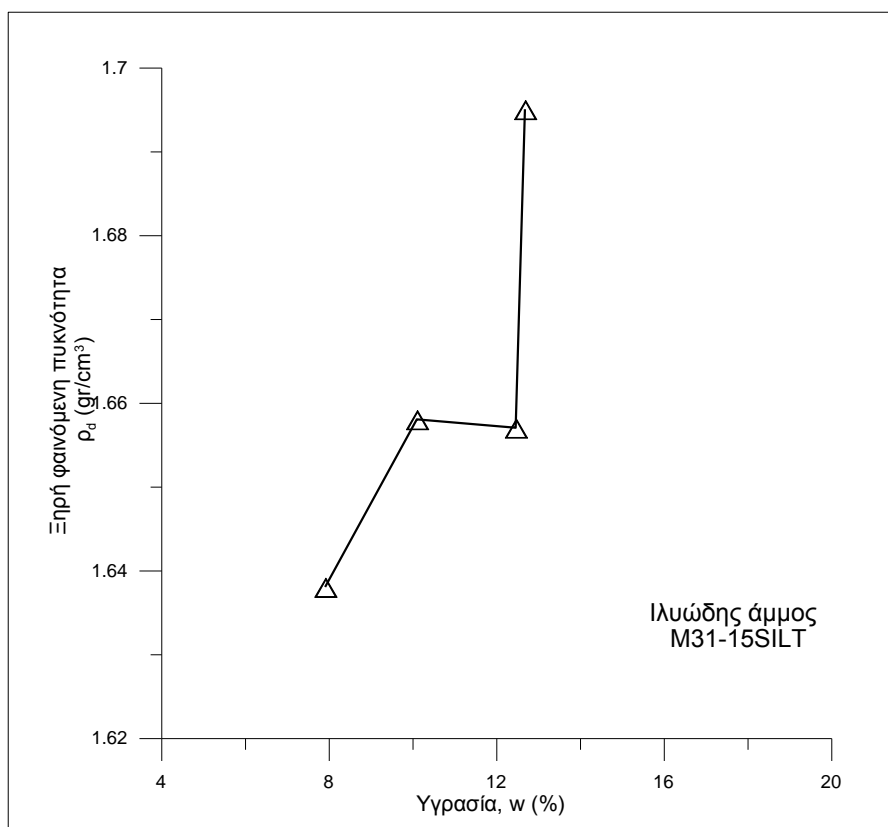
Σχήμα 4.9: Κοκκομετρικές καμπύλες M31-15SILT και M31-3SILT-12KAOL



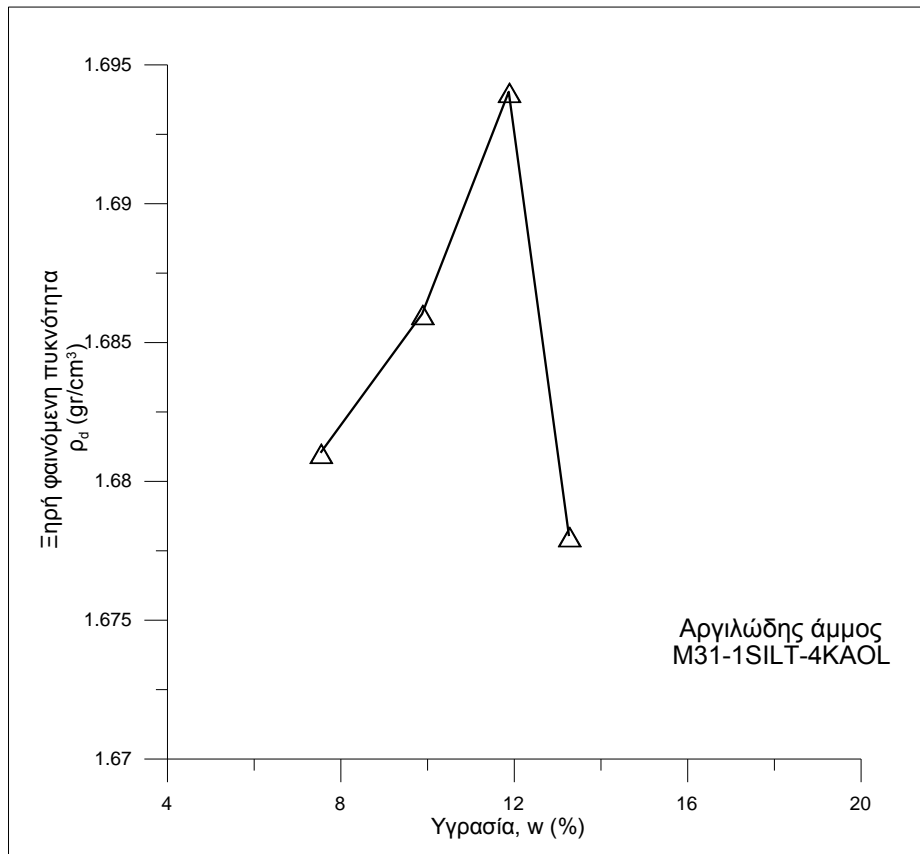
Σχήμα 4.10: Καμπύλη συμπίκνωσης M31



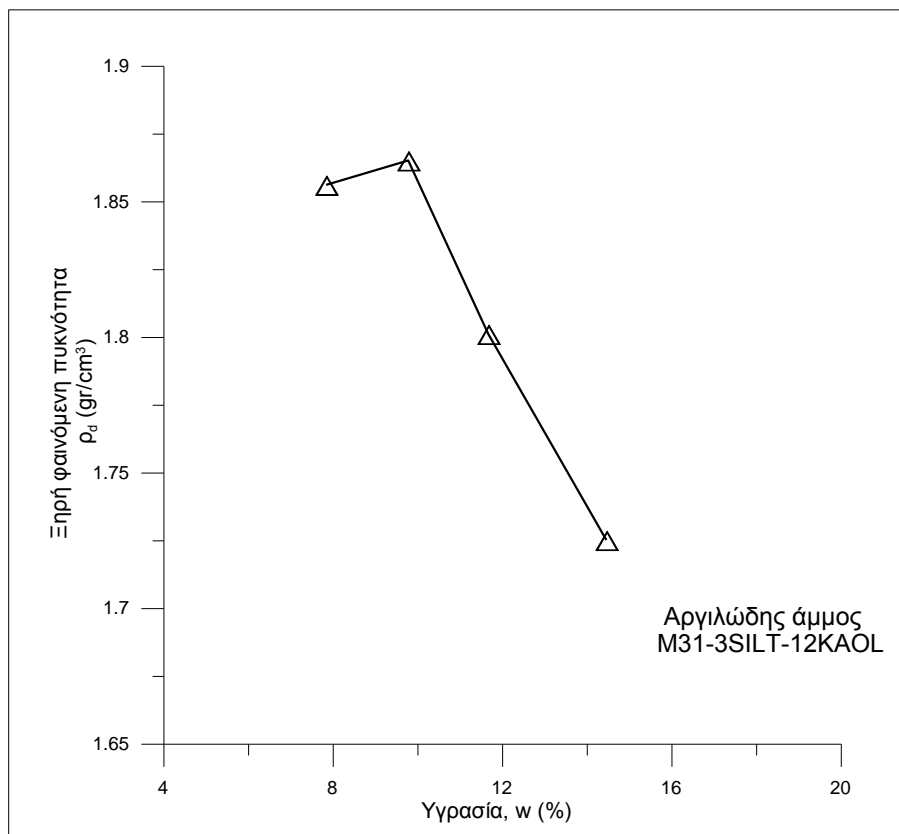
Σχήμα 4.11: Καμπύλη συμπίκνωσης M31-5SILT



Σχήμα 4.12: Καμπύλη συμπίκνωσης M31-15SILT



Σχήμα 4.13: Καμπύλη συμπίκνωσης M31-1SILT-4KAOL



Σχήμα 4.14: Καμπύλη συμπίκνωσης M31-3SILT-12KAOL

Πίνακας 4.1: Παρασκευή δοκιμών

Έδαφος	Ποσοστό άμμου (%)		Ποσοστό ιλύος, NP (%)	Ποσοστό καολίνη (%)
M31	100		0	0
M31-5SILT	95 από M31	1 από D6	4	0
M31-15SILT	85 από M31	3 από D6	12	0
M31-1SILT-4KAOL	95 από M31	1 από D6	0	4
M31-3SILT-12KAOL	85 από M31	3 από D6	0	12

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα δοκιμής συμπίκνωσης άμμου M31

Αριθμός Επανάληψης	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η	6 ^η
Μέσος όρος υγρασίας, w (%)	4,82	7,58	10,08	14,13	13,34	11,73
Ξηρή φαινόμενη πυκνότητα, ρ (gr/cm ³)	1,587	1,596	1,607	1,604	1,609	1,612
Δείκτης πόρων, e	0,675	0,666	0,655	0,657	0,653	0,649

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα δοκιμής συμπίκνωσης ιλυώδους άμμου M31-5SILT

Αριθμός Δοκιμής	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
Υγρασία, w (%)	7,93	10,14	13,02	14,61	15,17
Ξηρή Φαινόμενη Πυκνότητα, ρ (gr/cm ³)	1,608	1,624	1,638	1,654	1,648
Δείκτης Πόρων, e	0,652	0,636	0,622	0,606	0,612

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα δοκιμής συμπίκνωσης ιλυώδους άμμου M31-15SILT

Αριθμός δοκιμής	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η
Υγρασία, w(%)	7,92	10,11	12,47	12,69
Ξηρή φαινόμενη πυκνότητα, ρ _d (gr/cm ³)	1,638	1,658	1,657	1,695
Δείκτης Πόρων, e	0,620	0,600	0,601	0,565

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα δοκιμής συμπίκνωσης αργιλώδους άμμου M31-1SILT-4KAOL

Αριθμός δοκιμής	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η
Υγρασία, w(%)	7,55	9,89	11,89	13,28
Ξηρή φαινόμενη πυκνότητα, ρ_d (gr/cm ³)	1,681	1,686	1,694	1,678
Δείκτης Πόρων, e	0,581	0,576	0,568	0,583

Πίνακας 4.6: Αποτελέσματα δοκιμής συμπίκνωσης αργιλώδους άμμου M31-15SILT-12KAOL

Αριθμός δοκιμής	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η
Υγρασία, w(%)	7,85	9,79	11,68	14,47
Ξηρή φαινόμενη πυκνότητα, ρ_d (gr/cm ³)	1,856	1,865	1,801	1,725
Δείκτης Πόρων, e	0,429	0,422	0,473	0,537

Πίνακας 4.7: Ελάχιστη πυκνότητα άμμου M31 (σε κύλινδρο με νερό)

Αριθμός Δοκιμής	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η
m_1 (gr)	154,78	206,28	206,28	206,69
m_2 (gr)	186,98	237,66	236,83	239
m_3 (gr)	32,2	31,38	30,55	32,31
V (cm ³)	23	22,5	21,5	22,5
ρ_d (gr/cm ³)	1,4	1,395	1,421	1,436
e	0,899	0,907	0,871	0,852
M.O. Δείκτη Πόρων, e_{max}	0,882			

Πίνακας 4.8: Ελάχιστη πυκνότητα και μέγιστος δείκτης πόρων της M31 (Τύρη, 2016)

Μέθοδος	ρ_{D-min} (gr/cm ³)	e_{max}
Απόθεση ξηρής άμμου σε κύλινδρο με νερό	1,395	0,907
Απόθεση ξηρής άμμου σε κύλινδρο 1000ml χωρίς νερό (γρήγορη εναπόθεση)	1,449	0,835
Απόθεση ξηρής άμμου σε κύλινδρο 1000ml χωρίς νερό (αργή εναπόθεση)	1,449	0,835
Απόθεση ξηρής άμμου σε κύλινδρο 2000ml χωρίς νερό (γρήγορη εναπόθεση)	1,449	0,835
Απόθεση ξηρής άμμου σε κύλινδρο 2000ml χωρίς νερό (αργή εναπόθεση)	1,424	0,867

Πίνακας 4.9: Ελάχιστη πυκνότητα ιλυώδους άμμου M31-5SILT (σε κύλινδρο με νερό)

Αριθμός Δοκιμής	1 ^η	2 ^η	3 ^η
m_1 (gr)	206,7	164,79	202,98
m_2 (gr)	235,71	198,77	234,64
m_3 (gr)	29,01	33,98	31,66
V (cm ³)	20,5	24	22
ρ_d (gr/cm ³)	1,415	1,416	1,439
e	0,878	0,877	0,846
M.O. Δείκτη Πόρων, e_{max}	0,867		

Πίνακας 4.10: Ελάχιστη πυκνότητα και μέγιστος δείκτης πόρων της M31-5SILT (Τύρη,2016)

Μέθοδος	ρ_{D-min} (gr/cm ³)	e_{max}
Απόθεση ξηρής άμμου σε κύλινδρο με νερό	1,415	0,879
Απόθεση ξηρής άμμου σε κύλινδρο 2000ml χωρίς νερό (αργή εναπόθεση)	1,462	0,819

Πίνακας 4.11: Ελάχιστη πυκνότητα ιλυώδους άμμου M31-15SILT (σε κύλινδρο με νερό)

Αριθμός Δοκιμής	1 ^η	2 ^η
m ₁ (gr)	411,5	416,56
m ₂ (gr)	453,87	467,98
m ₃ (gr)	42,37	51,42
V (cm ³)	30	32
ρ _d (gr/cm ³)	1,412	1,607
e	0,878	0,651
M.O. Δείκτη Πόρων, e _{max}	0,765	

Πίνακας 4.12: Ελάχιστη πυκνότητα και μέγιστος δείκτης πόρων της M31-15SILT (Τύρη, 2016)

Μέθοδος	ρ _{D-min} (gr/cm ³)	e _{max}
Απόθεση ξηρής άμμου σε κύλινδρο με νερό	Αδύνατη εφαρμογή της μεθόδου	
Απόθεση ξηρής άμμου σε κύλινδρο 2000ml χωρίς νερό (αργή εναπόθεση)	1,612	0,646
Δοκιμές άμεσης διάτμησης	1,573	0,687

Πίνακας 4.13: Ελάχιστη πυκνότητα αργιλώδους άμμου M31-1SILT-4KAOL (σε κύλινδρο χωρίς νερό)

Αριθμός Επανάληψης	V (cm ³)	m (gr)	ρ _d (gr/cm ³)	e
1	680	1000,14	1,471	0,807
2	690	1000,13	1,449	0,833
3	670	1000,1	1,493	0,780
4	690	1000,02	1,449	0,833
5	680	999,97	1,471	0,807
6	680	999,95	1,471	0,807
7	690	999,95	1,449	0,833
8	680	997,49	1,467	0,811
9	690	995,75	1,443	0,841
10	690	993,7	1,440	0,845
e _{max}	0,820			

Πίνακας 4.14: Φυσικά χαρακτηριστικά μελετηθέντων εδαφών

Έδαφος	Άμμος >75μm <475μm (%)	Λεπτόκοκκα (%) <75μm	Αργιλικό κλάσμα (%) <2μm	PI (%)	USCS	G _s	e _{min}	e _{max}
M31	100	∅	∅	NP	SP	2,659	0,645	0,907
D6	20	80	∅	NP		2,672		
Καολίνης	∅	100	72	18,2	CL	2,700		
M31-5SILT	92	8	2	NP	SP-SM	2,657	0,606	0,879
M31-15SILT	83	17	2	NP	SM	2,653	0,414	0,687
M31-1SILT-4KAOL	89	11	4	NP	SP-SC SP-SM	2,657	0,568	0,820
M31-3SILT-12KAOL	82	18	8	NP	SC-SM	2,652	0,412	0,664

Πίνακας 4.15: Στοιχεία δοκιμών διάτμησης

Δοκιμή		e _{στερ}	Dr ^{στερ} (%)	σ _v ' (kPa)	Ονομαστικός ρυθμός διάτμησης (mm/min)
Αργιλώδης άμμος M31 – 1SILT – 4KAOL					
M31-1SILT-4KAOL-1A	Πόλυ πυκνό	0,600	87,28	50,13	0,4
M31-1SILT-4KAOL-1B		0,573	97,99	97,36	0,4
M31-1SILT-4KAOL-1C		0,598	88,03	197,42	0,3
M31-1SILT-4KAOL-1D		0,572	98,41	398,91	0,25
M31-1SILT-4KAOL-2A	Πυκνό	0,654	65,74	50,13	0,55
M31-1SILT-4KAOL-2B		0,648	68,08	97,36	0,4
M31-1SILT-4KAOL-2C		0,638	72,34	197,42	0,2
M31-1SILT-4KAOL-2D		0,661	63,13	398,91	0,2
M31-1SILT-4KAOL-3A	Μεσαίας πυκνότητας	0,707	44,93	50,13	0,45
M31-1SILT-4KAOL-3B		0,694	49,99	97,36	0,3
M31-1SILT-4KAOL-3C		0,722	38,70	197,42	0,25
M31-1SILT-4KAOL-3D		0,732	34,77	398,91	0,15
Αργιλώδης Άμμος M31 – 4SILT – 12KAOL					
M31-3SILT-12KAOL-2A	Πολύ πυκνό	0,461	80,62	50,13	0,4
M31-3SILT-12KAOL-2B		0,462	80,15	97,36	0,5
M31-3SILT-12KAOL-2C		0,412	100	197,43	0,35
M31-3SILT-12KAOL-2D		0,424	95,29	398,91	0,25
M31-3SILT-12KAOL-3A	Μεσαίας πυκνότητας	0,589	29,62	50,13	0,3
M31-3SILT-12KAOL-3B		0,524	55,44	97,36	0,3
M31-3SILT-12KAOL-3C		0,485	71,20	197,43	0,3
M31-3SILT-12KAOL-5A		Χαλαρό	0,641	9,18	50,13
M31-3SILT-12KAOL-5B	0,641		9,20	97,36	0,1
M31-3SILT-12KAOL-5C	0,649		6,00	197,43	0,05
M31-3SILT-12KAOL-5D	0,602		24,76	398,91	0,05

Κεφάλαιο 5 – Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης

Τα αποτελέσματα και οι υπολογισμοί από τις αναλύσεις των δοκιμών άμεσης διάτμησης δίνονται σε διαγράμματα που παρουσιάζουν τη μεταβολή:

- (α) της διατμητικής τάσης, τ
 - (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης με την τάση στερεοποίησης, τ/σ'
 - (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης του δοκιμίου, ΔH , και
 - (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης του δοκιμίου, $\Delta H/H_{\sigma\tau\epsilon\rho}$
- με την οριζόντια παραμόρφωση, δ .

5.1. Μείγμα καθαρής άμμου και 4% καολίνη, M31-1SILT-4KAOL

5.1.1. Πολύ πυκνή κατάσταση

Τα αποτελέσματα για την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL που αποτελεί μείγμα της καθαρής άμμου M31 και του αμμώδους κλάσματος της D6 με 4% καολίνη σε δοκίμια πολύ πυκνής κατάστασης στις διάφορες τάσεις στερεοποίησης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.1.

5.1.2. Πυκνή κατάσταση

Τα αποτελέσματα για την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL σε δοκίμια πυκνής κατάστασης στις διάφορες τάσεις στερεοποίησης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2.

5.1.3. Κατάσταση μέσης πυκνότητας

Τα αποτελέσματα για την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL σε δοκίμια μέσης πυκνότητας στις διάφορες τάσεις στερεοποίησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3.

5.1.4. Επίδραση της σχετικής πυκνότητας στη διατμητική αντοχή

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η επίδραση της σχετικής πυκνότητας μετά τη στερεοποίηση, $D_{r\text{στερ}}$ (η οποία στο εξής θα συμβολίζεται με D_r), στις τιμές της μέγιστης και της κρίσιμης διατμητικής αντοχής, τ_{max} και τ_{crit} αντίστοιχα, σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης για το έδαφος M31-1SILT-4KAOL.

5.2. Μείγμα καθαρής άμμου και 12% καολίνη, M31-3SILT-12KAOL

5.2.1. Πολύ πυκνή κατάσταση

Τα αποτελέσματα για την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL που αποτελεί μείγμα της καθαρής άμμου M31 και του αμμώδους κλάσματος της D6 με 12% καολίνη σε δοκίμια πολύ πυκνής κατάστασης στις διάφορες τάσεις στερεοποίησης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5.

5.2.2. Κατάσταση μέσης πυκνότητας

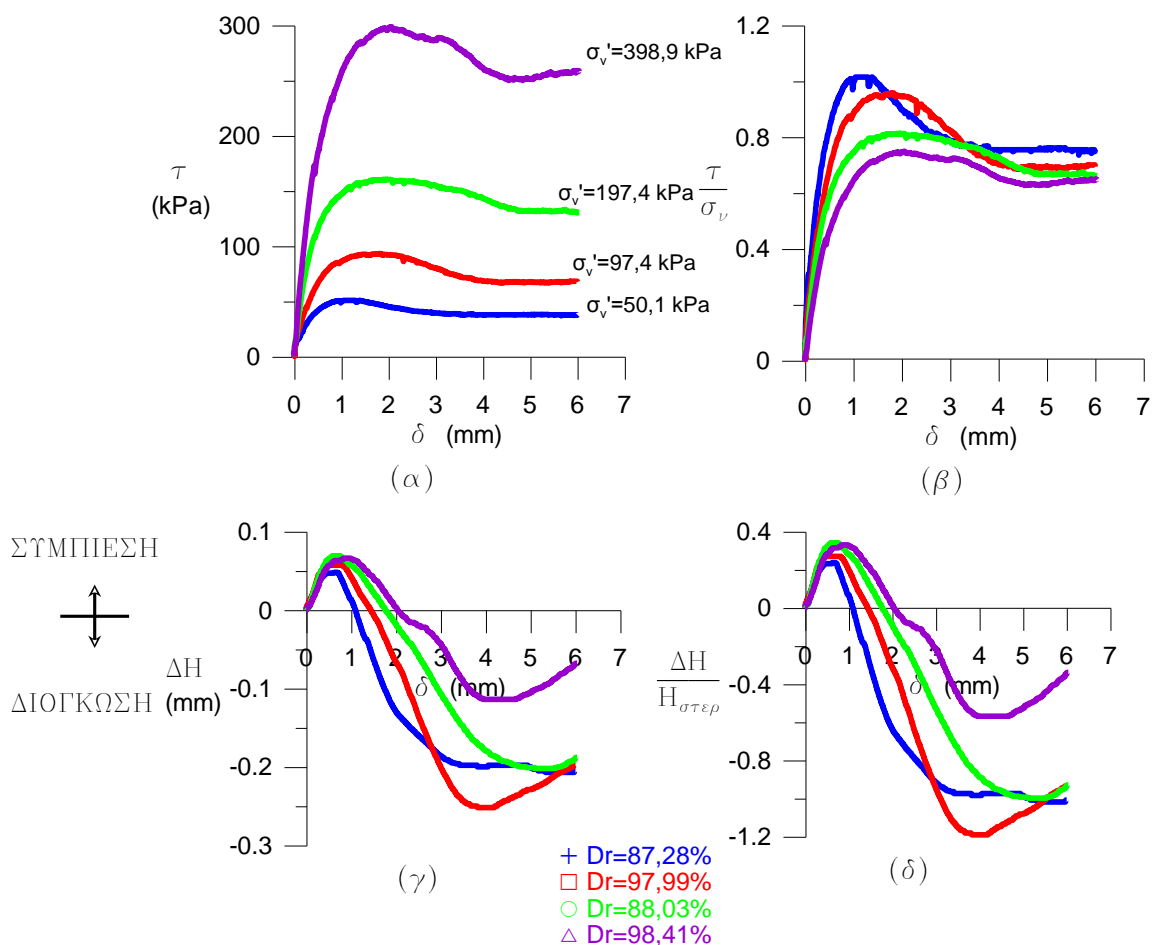
Τα αποτελέσματα για την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε μέσης πυκνότητας δοκίμια στις διάφορες τάσεις στερεοποίησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.6.

5.2.3. Χαλαρή κατάσταση

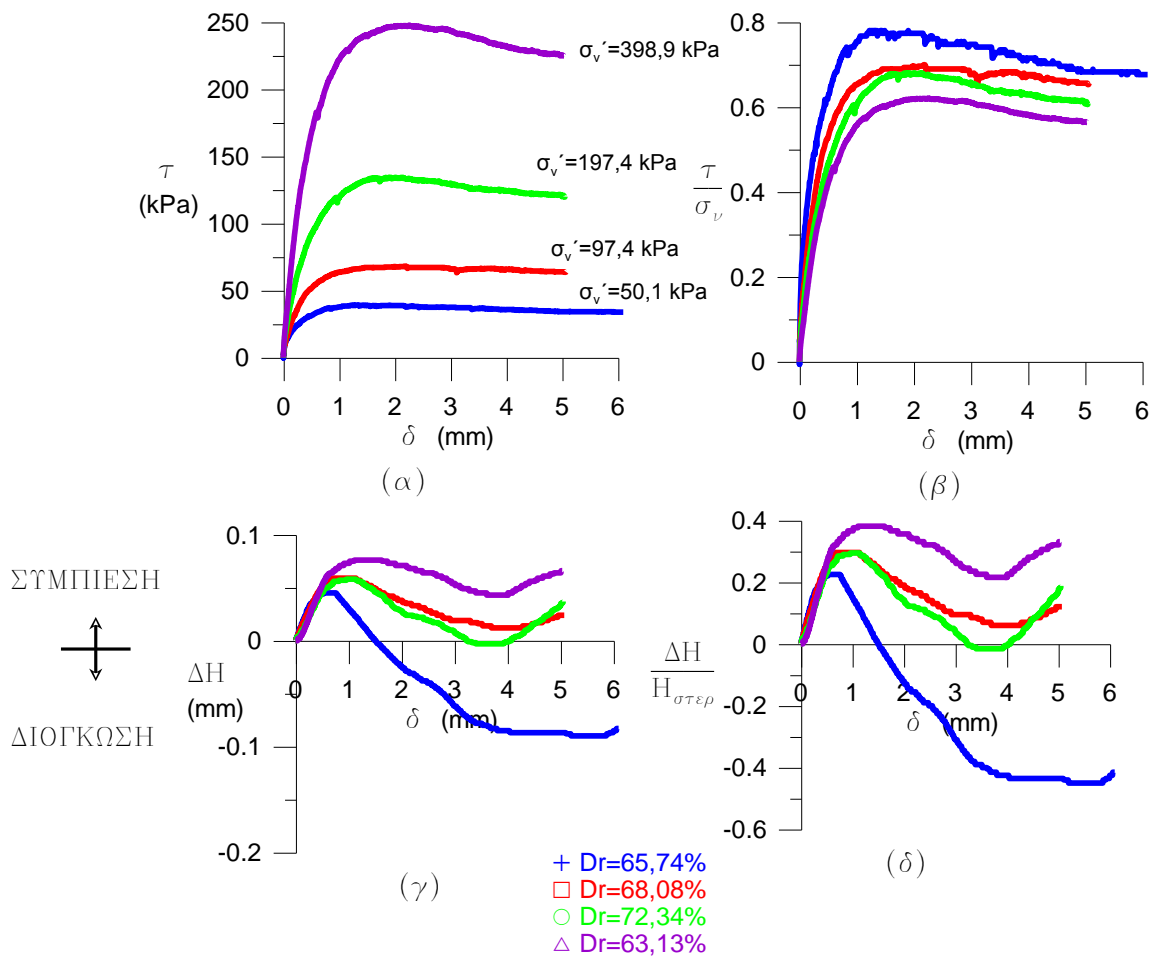
Τα αποτελέσματα για την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε δοκίμια χαλαρής κατάστασης στις διάφορες τάσεις στερεοποίησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.7.

5.2.4. Επίδραση της σχετικής πυκνότητας στη διατμητική αντοχή

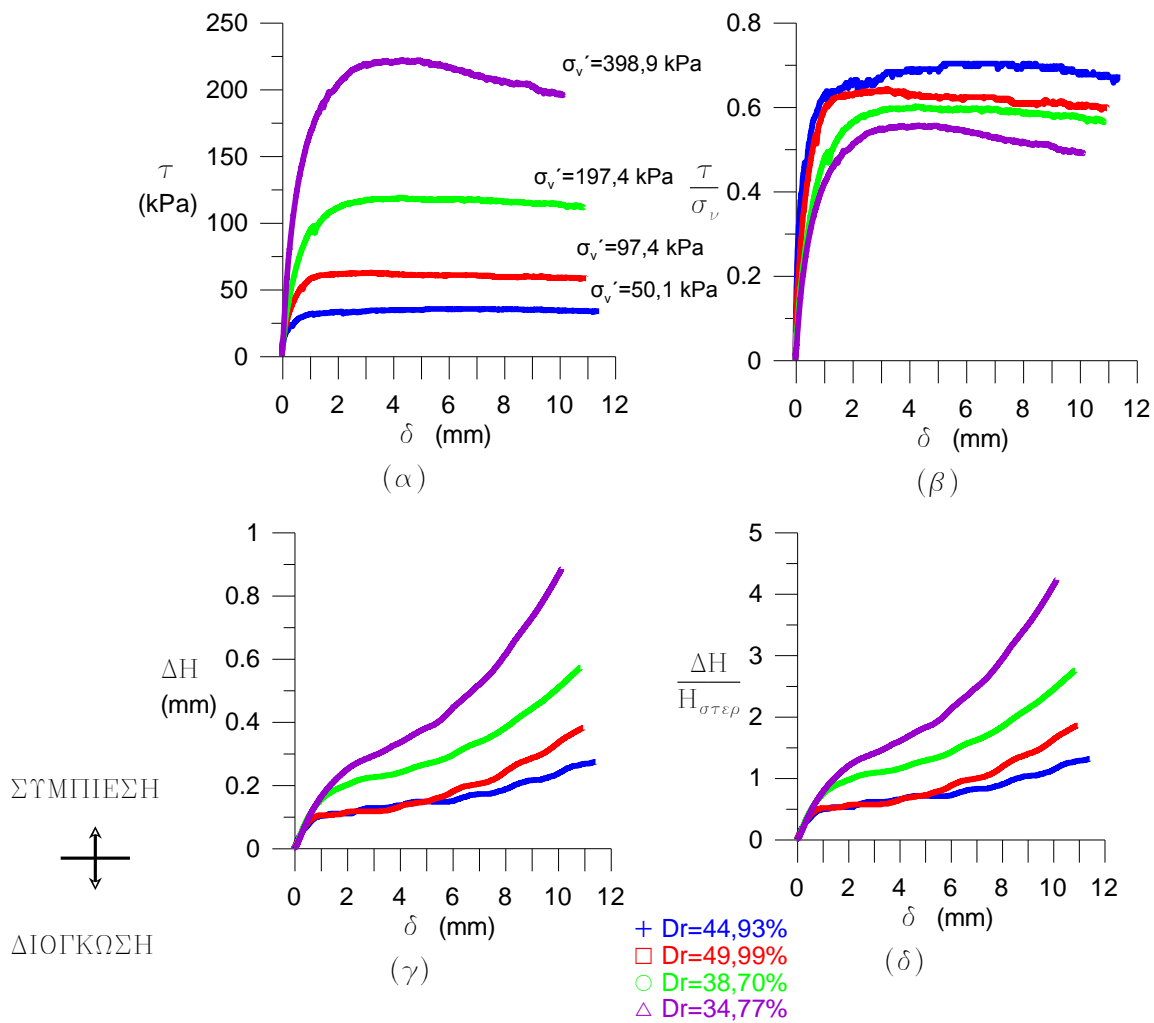
Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η επίδραση της σχετικής πυκνότητας, D_r , στις τιμές της μέγιστης και της κρίσιμης διατμητικής αντοχής, τ_{max} και τ_{crit} αντίστοιχα, σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης για το έδαφος M31-3SILT-12KAOL.



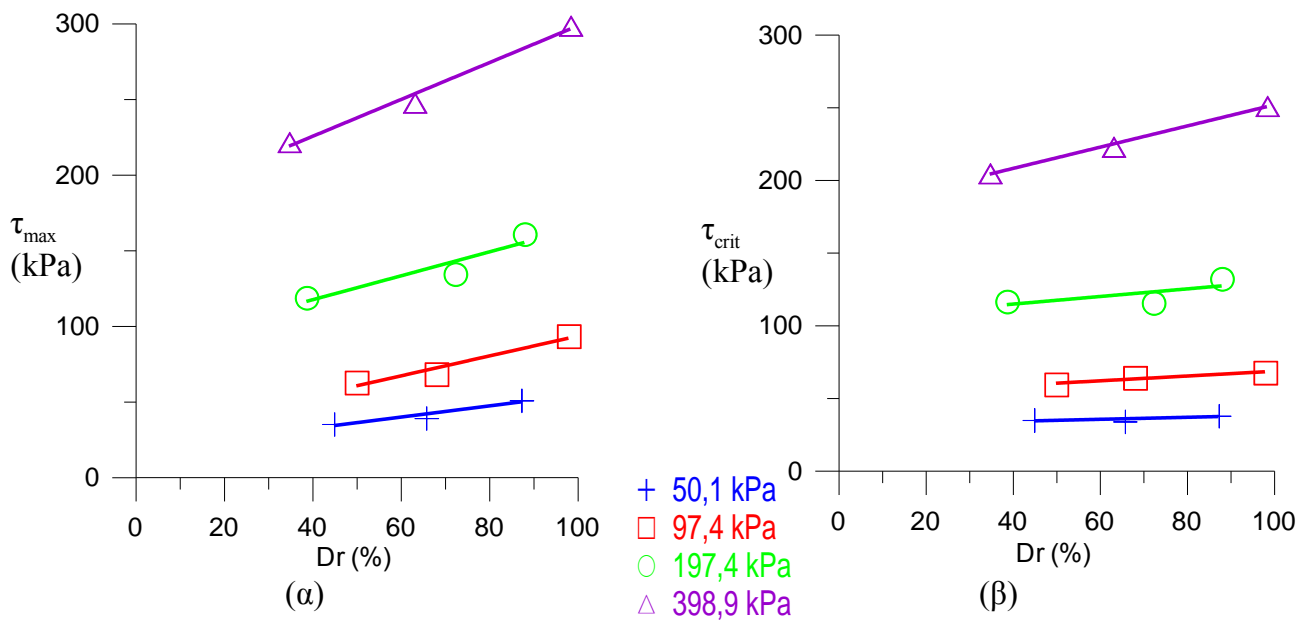
Σχήμα 5.1: Μεταβολή (α) της διατμητικής τάσης τ , (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης τ/σ_v , (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης ΔH και (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης $\Delta H/H_{\sigma_{τερ}}$ του δοκιμίου με την οριζόντια μετατόπιση δ , για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης σε πολύ πυκνά δοκίμια αργιλώδους άμμου M31-1SILT-4KAOL.



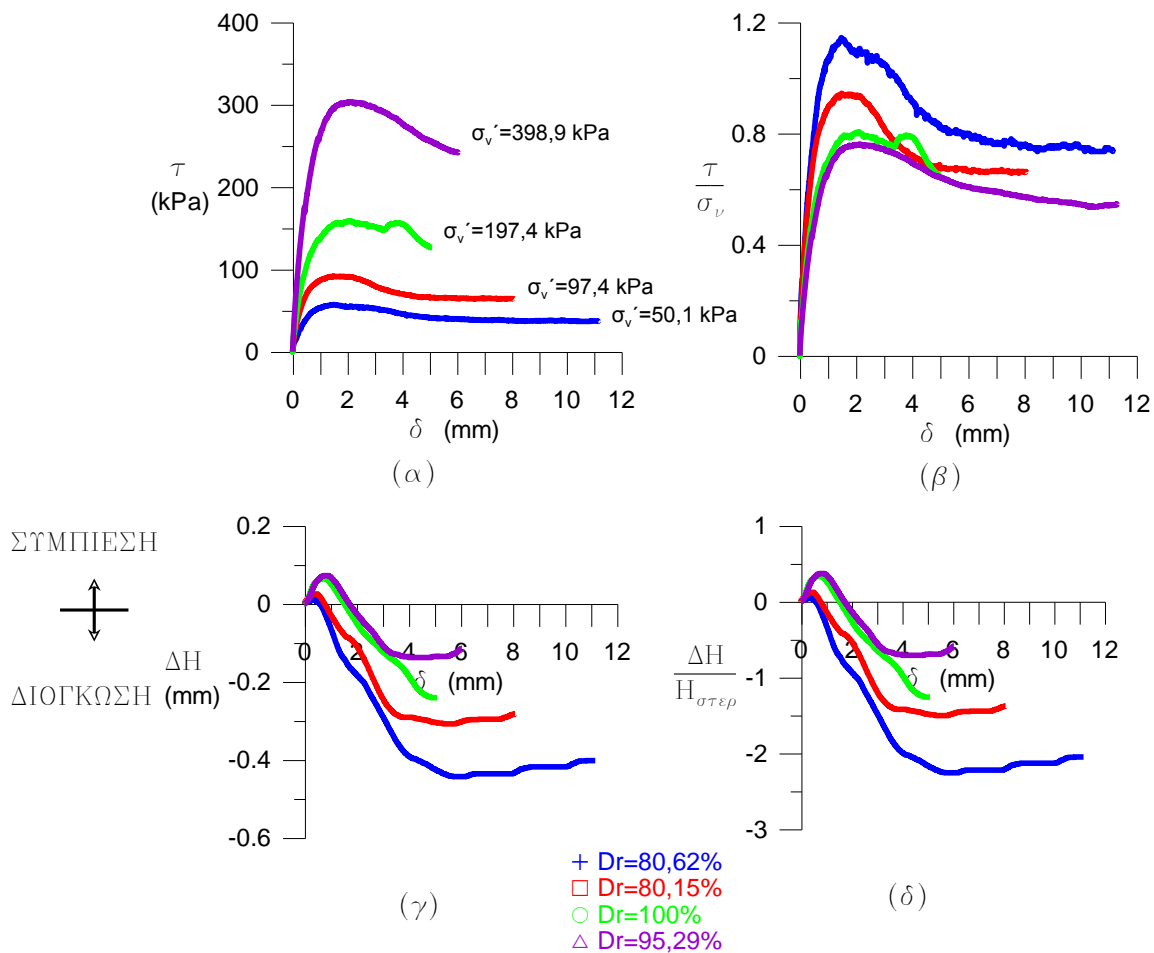
Σχήμα 5.2: Μεταβολή (α) της διατμητικής τάσης τ , (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης τ/σ'_v , (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης ΔH και (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης $\Delta H/H_{\sigma_{τερ}}$ του δοκιμίου με την οριζόντια μετατόπιση δ , για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης σε πυκνά δοκίμια αργιλώδους άμμου M31-1SILT-4KAOL.



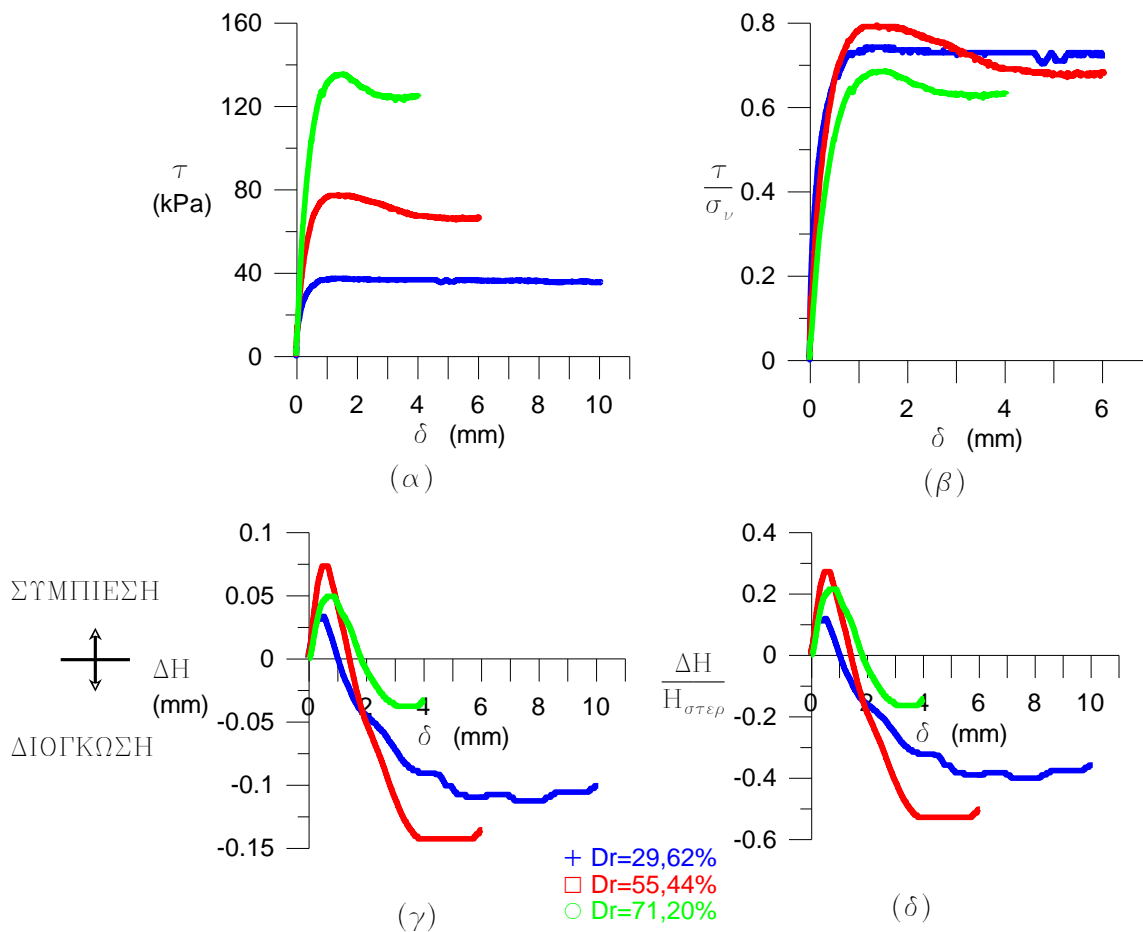
Σχήμα 5.3: Μεταβολή (α) της διατμητικής τάσης τ , (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης τ/σ'_v , (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης ΔH και (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης $\Delta H/H_{\sigma_{τερ}}$ του δοκιμίου με την οριζόντια μετατόπιση δ , για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης της αργιλώδους άμμου M31-1SILT-4KAOL στην κατάσταση μέσης πυκνότητας.



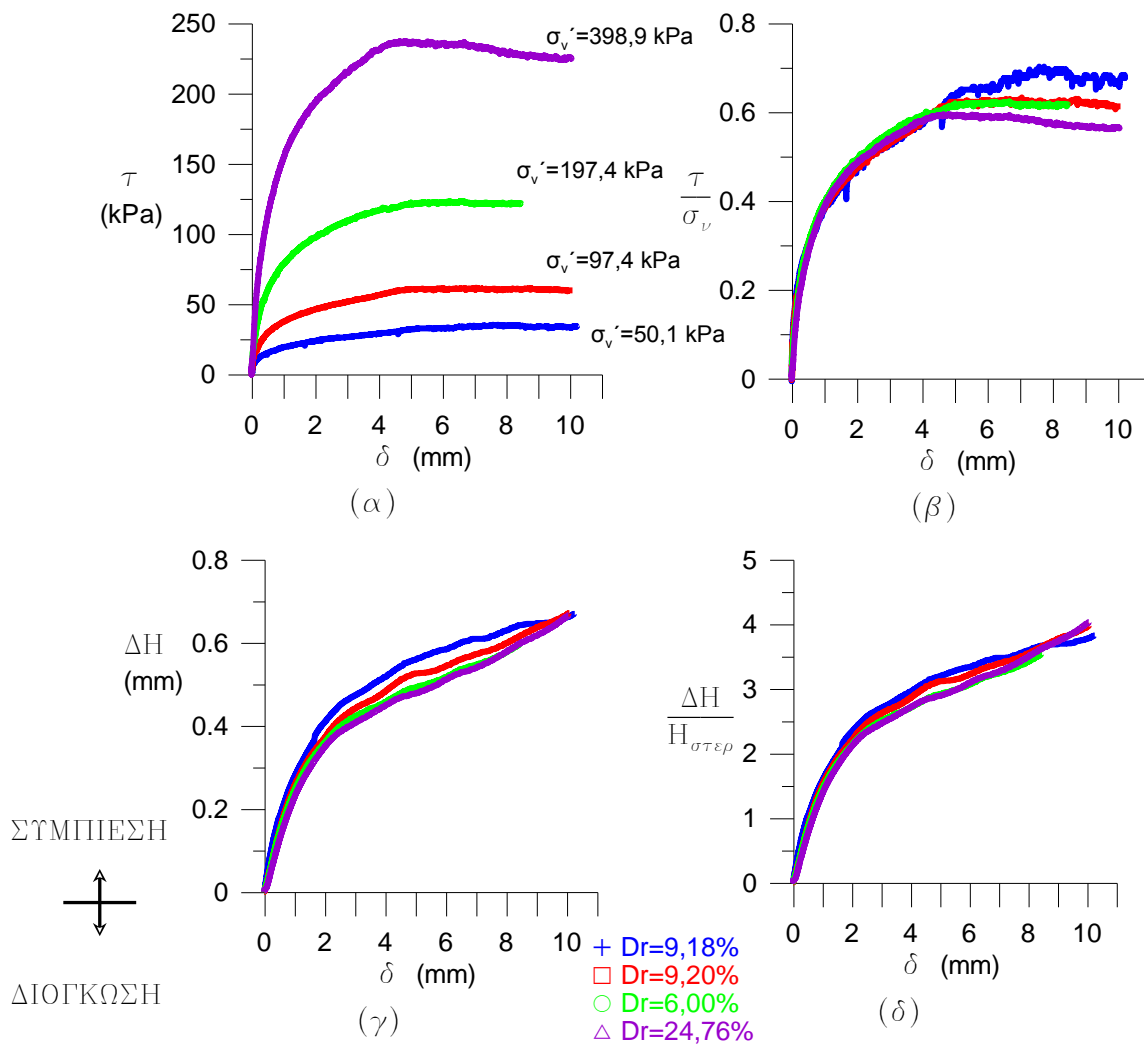
Σχήμα 5.4: Μεταβολή (α) της μέγιστης διατμητικής τάσης, τ_{max} και (β) της κρίσιμης διατμητικής τάσης, τ_{crit} με τη σχετική πυκνότητα D_r κατά το σύνολο των δοκιμών άμεσης διάτμησης της αργιλώδους άμμου, M31-1SILT-4KAOL, σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης.



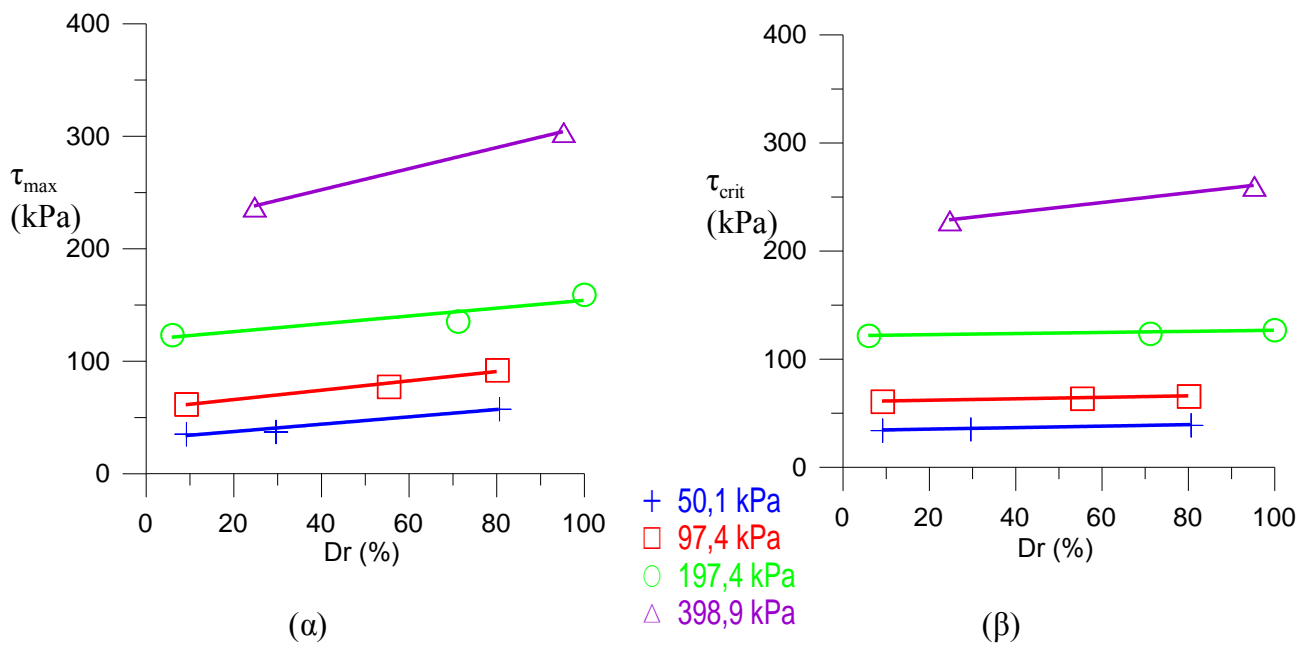
Σχήμα 5.5: Μεταβολή (α) της διατμητικής τάσης τ , (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης τ/σ_v , (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης ΔH και (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης $\Delta H/H_{\sigma_{τερ}}$ του δοκιμίου με την οριζόντια μετατόπιση δ , για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης σε πολύ πυκνά δοκίμια αργιλώδους άμμου M31-3SILT-12KAOL.



Σχήμα 5.6: Μεταβολή (α) της διατμητικής τάσης τ , (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης τ/σ_v , (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης ΔH και (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης $\Delta H/H_{\sigma_{τερ}}$ του δοκιμίου με την οριζόντια μετατόπιση δ , για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης της αργιλώδους άμμου M31-3SILT-12KAOL στην κατάσταση μέσης πυκνότητας.



Σχήμα 5.7: Μεταβολή (α) της διατμητικής τάσης τ , (β) της κανονικοποιημένης διατμητικής τάσης τ/σ_v , (γ) της κατακόρυφης παραμόρφωσης ΔH και (δ) της ανηγμένης κατακόρυφης παραμόρφωσης $\Delta H/H_{\sigma\tau\epsilon\rho}$ του δοκιμίου με την οριζόντια μετατόπιση δ , για τις δοκιμές άμεσης διάτμησης της αργιλώδους άμμου M31-3SILT-12KAOL στην χαλαρή κατάσταση.



Σχήμα 5.8: Μεταβολή (α) της μέγιστης διατμητικής τάσης, τ_{max} , και (β) της κρίσιμης διατμητικής τάσης, τ_{crit} , με τη σχετική πυκνότητα D_r κατά το σύνολο των δοκιμών άμεσης διάτμησης της αργιλώδους άμμου, M31-3SILT-12KAOL, σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης.

6.1. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

- Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προκύπτει ότι η εργαστηριακή μελέτη αναζυμωμένων δοκιμών άμμου με πλαστικά λεπτόκοκκα, επαληθεύει τη θεωρία διάτμησης ως προς τη συμπεριφορά τους σε πυκνή, μέσης πυκνότητας και χαλαρή κατάσταση. Για την πυκνή κατάσταση παρατηρείται η αναμενόμενη διόγκωση, ενώ για τη χαλαρή η αναμενόμενη συμπίεση.
- Για δεδομένο έδαφος, η διατμητική αντοχή των πυκνών δοκιμών είναι μεγαλύτερη από ό,τι των δοκιμών μέσης πυκνότητας που είναι μεγαλύτερη από αυτή των χαλαρών δοκιμών. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 5.4 και 5.8 παρατηρείται πως η επίδραση της D_r στην τ_{max} αυξάνεται με το επίπεδο της σ'_v . Το ίδιο παρατηρείται για την τ_{crit} αλλά η επίδραση είναι μικρότερη συγκριτικά με την τ_{max} . Προκύπτει, λοιπόν, πως για τις άμμους με πλαστικά λεπτόκοκκα η επίδραση της D_r στην τ_{max} είναι εμφανής και αυξάνεται με τη σ'_v , δεν ισχύει όμως το ίδιο για την τ_{crit} , όπου η επίδραση είναι μικρότερη και στις μικρότερες τάσεις αμελείται. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και προηγούμενη μελέτη σε άμμους με μη-πλαστικά λεπτόκοκκα από την Τύρη (2016).
Η επίδραση της D_r στην τ_{max} για τα μείγματα καθαρής άμμου με καολίνη που μελετήθηκαν παρουσιάζεται και στα Σχήματα 6.1 και 6.2 που δίνουν τις περιβάλλουσες αστοχίας για τη μέγιστη και την κρίσιμη κατάσταση, όπου καταδεικνύεται η σημαντική αύξηση της τ_{max} με την αύξηση της D_r κυρίως για τα υψηλά επίπεδα της σ'_v που μελετήθηκαν στην περίπτωση της τ_{max} , ενώ στην περίπτωση της τ_{cr} η επίδραση της D_r είναι σαφώς μικρότερη και ειδικότερα αμελητέα σε τάσεις μικρότερες των 100kPa.
- Η διατμητική αντοχή στην κατάσταση αστοχίας είναι πολύ μεγαλύτερη από τη διατμητική αντοχή στην κρίσιμη κατάσταση για τα πυκνά δοκίμια, ενώ οι δύο είναι παρόμοιες στα χαλαρά δοκίμια, Πίνακας 6.1 και 6.2 αντίστοιχα.
- Από τα Σχήματα 6.1 και 6.2 υπολογίζονται οι παράμετροι διατμητικής αντοχής, δηλαδή η συνοχή c' και η γωνία τριβής ϕ' , οι τιμές των οποίων για τα μελετηθέντα εδάφη παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3. Τα μείγματα που μελετήθηκαν παρουσίασαν περιβάλλουσα αστοχίας που παριστάνεται γραφικά με ευθεία γραμμή, που όμως δε διέρχεται από την αρχή των αξόνων και έτσι παρουσιάζουν συνοχή. Όπως αναμένεται, οι τιμές των ϕ και c είναι μεγαλύτερες στην κατάσταση αστοχίας συγκριτικά με την κρίσιμη κατάσταση, Πίνακας 6.3. Η επίδραση της D_r στις τιμές των παραμέτρων ϕ και c για κάθε μελετηθέν έδαφος παρουσιάζεται και στις δύο καταστάσεις στα Σχήματα 6.3 έως 6.6. Όπως φαίνεται, για δεδομένο ποσοστό λεπτοκόκκων, παρατηρείται αύξηση της γωνίας τριβής ϕ'_{max} και ϕ'_{crit} με την αύξηση της D_r . Η επίδραση αυτή είναι μεγαλύτερη για μικρό ποσοστό λεπτοκόκκων. Σε ό,τι αφορά την επίδραση της D_r στη συνοχή c , παρατηρείται

αύξηση της c με την D_r στην κατάσταση αστοχίας, ενώ στην κρίσιμη κατάσταση μικρή μείωσή της.

- Από τη σύγκριση της επίδρασης του ποσοστού πλαστικών λεπτοκόκκων στη μέγιστη και στην κρίσιμη διατμητική αντοχή που παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.7 έως 6.9 μαζί με τις περιβάλλουσες της καθαρής άμμου M31, προκύπτει πως η αύξηση των πλαστικών λεπτοκόκκων οδηγεί σε μικρή αύξηση της διατμητικής αντοχής για τάσεις μικρότερες των 200kPa. Σε μεγαλύτερες τάσεις παρατηρείται μείωση για το έδαφος με μικρό ποσοστό πλαστικών λεπτοκόκκων και αύξηση για το έδαφος με μεγάλο ποσοστό πλαστικών λεπτοκόκκων.
- Από τη σύγκριση της επίδρασης της πλαστικότητας των λεπτοκόκκων στη μέγιστη και κρίσιμη διατμητική αντοχή που παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.10 έως 6.14 μαζί με τις περιβάλλουσες των εδαφών M31-5SILT και M31-15SILT που μελετήθηκαν σε μείγματα καθαρής άμμου M31 και μη-πλαστικής αμμοίλου D6 από την Τύρη (2016) προκύπτει πως για τάσεις έως 200kPa οι διαφορές είναι αμελητέες. Σε μεγαλύτερες τάσεις παρατηρείται είτε αμελητέα διαφορά, είτε κάποιες διαφορές που όμως αποδίδονται στις διαφορετικές πυκνότητες των δοκιμών.
- Στα Σχήματα 6.15 έως 6.24 παρουσιάζεται η μεταβολή της γωνίας τριβής και της συνοχής στην κατάσταση αστοχίας, ϕ'_{max} και c' , και στην κρίσιμη κατάσταση, ϕ'_{crit} και c'_{crit} , καθώς και οι μεταξύ τους διαφορές, $\phi'_{max}-\phi'_{crit}$ και $c'-c'_{crit}$, με την πυκνότητα, D_r . Για λόγους σύγκρισης, στα διαγράμματα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα της καθαρής άμμου M31. Προκύπτει πως σε κάθε επίπεδο της τάσης στερεοποίησης που μελετήθηκε υπάρχει επίδραση της D_r στα παραπάνω μεγέθη.
Συγκεκριμένα, παρατηρείται αύξηση των γωνιών τριβής ϕ'_{max} , ϕ'_{crit} και $\phi'_{max}-\phi'_{crit}$ με την πυκνότητα, D_r . Για τη συνοχή, παρατηρείται αύξηση της μέγιστης τιμής, c' , και μείωση της κρίσιμης τιμής, c'_{crit} , με την πυκνότητα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στις μεγάλες παραμορφώσεις, ο μηχανισμός διατμητικής αντοχής στο έδαφος είναι κυρίως μηχανισμός τριβής και ως εκτούτου παρατηρούνται μικρές τιμές συνοχής. Επίσης, παρατηρείται πως με την αύξηση του ποσοστού πλαστικών λεπτοκόκκων στο έδαφος παρατηρείται αρχικά μια πτώση της γωνίας τριβής, ϕ'_{max} και ϕ'_{crit} , που όμως στη συνέχεια αυξάνονται πλησιάζοντας τις αντίστοιχες τιμές της καθαρής άμμου. Οι τιμές της αντοχής είναι ελαφρώς μεγαλύτερες για το έδαφος με το μεγαλύτερο ποσοστό πλαστικών λεπτοκόκκων στην κατάσταση αστοχίας. Στην κρίσιμη κατάσταση αντιστρέφονται οι τιμές.
- Για την επίδραση του είδους, δηλαδή της πλαστικότητας, των λεπτοκόκκων στις άμμους, παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.25 έως 6.27, η μεταβολή της γωνίας τριβής στην κατάσταση αστοχίας και στην κρίσιμη κατάσταση, ϕ'_{max} και ϕ'_{crit} αντίστοιχα, καθώς επίσης και της γωνίας διαστολικότητας, $\phi'_{max}-\phi'_{crit}$, με τη σχετική πυκνότητα, D_r , των εδαφών που μελετήθηκαν στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας και των εδαφών που μελετήθηκαν από την Τύρη (2016). Τα πρώτα είναι άμμος με πλαστικά λεπτόκοκκα και τα δεύτερα άμμος με λεπτόκοκκα χωρίς πλαστικότητα. Παρατηρείται πως στα αντίστοιχα

ποσοστά λεπτοκόκκων, η πλαστικότητα οδηγεί γενικά σε μείωση των τιμών της γωνίας τριβής.

- Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την επίδραση του είδους και του ποσοστού λεπτοκόκκων στις άμμους παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.28 έως 6.30. Για τη γωνία τριβής στην κατάσταση αστοχίας, ϕ'_{max} , από το Σχήμα 6.28 προκύπτει πως ενώ η παρουσία μη-πλαστικών λεπτοκόκκων στην άμμο M31 προκαλεί αύξηση με τη σχετική πυκνότητα που εκφράζεται από την εξίσωση (6.1) όπως προτείνεται από την Τύρη (2016), η παρουσία πλαστικών λεπτοκόκκων οδηγεί σε μείωση της ϕ'_{max} . Ωστόσο, οι τιμές της ϕ'_{max} αυξάνονται στα επίπεδα τιμών της καθαρής άμμου M31 με την αύξηση του ποσοστού τους. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την επίδραση της Dr στην ϕ'_{max} των μελετηθέντων εδαφών δίνονται στις εξισώσεις (6.2) και (6.3).

$$\phi'_{max}=0,12 \cdot Dr + 0,653 \cdot Fc + 26,769 \quad (R^2=0,925) \quad (6.1)$$

όπου Fc: ποσοστό μη-πλαστικής ιλύος

$$\phi'_{max}=0,12 \cdot Dr + 23,216 \quad (R^2=0,932) \quad (6.2)$$

για την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL

$$\phi'_{max}=0,058 \cdot Dr + 29,819 \quad (R^2=0,887) \quad (6.3)$$

για την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL

Για τη γωνία τριβής στην κρίσιμη κατάσταση, ϕ'_{crit} , προκύπτει από το Σχήμα 6.29 σχετική σύμπτωση των τιμών για τιμές της $Dr > 60\%$ ανεξαρτήτως του είδους και του ποσοστού λεπτοκόκκων. Οι μεγαλύτερες τιμές της ϕ'_{crit} παρατηρούνται για τις άμμους με μη-πλαστικά λεπτόκοκκα, για τις οποίες δεν υπάρχει επίδραση ούτε του ποσοστού λεπτοκόκκων ούτε της πυκνότητας Dr (Τύρη, 2016). Για το έδαφος με μικρό ποσοστό πλαστικών λεπτοκόκκων M31-1SILT-4KAOL καταγράφονται οι μικρότερες τιμές της ϕ'_{crit} , και προτείνεται η εξίσωση (6.4) για την επίδραση της πυκνότητας Dr.

$$\phi'_{crit}=0,102 \cdot Dr + 21,662 \quad (R^2=0,938) \quad (6.4)$$

Οι τιμές της ϕ'_{crit} για το έδαφος με το μεγαλύτερο ποσοστό πλαστικών λεπτοκόκκων M31-3SILT-12KAOL είναι παρόμοιες με αυτές της καθαρής άμμου M31 και εκφράζονται από την ίδια εξίσωση (6.5)

$$\phi'_{crit}=0,073 \cdot Dr + 26,172 \quad (R^2=0,863) \quad (6.5)$$

Για τη γωνία διαστολικότητας, $\gamma = \phi'_{max} - \phi'_{crit}$, προκύπτει από το Σχήμα 6.30 πως μεγαλύτερες τιμές προκύπτουν για την άμμο με το μεγαλύτερο ποσοστό μη-πλαστικών λεπτοκόκκων. Επίσης, η επίδραση της πυκνότητας Dr στη γωνία γ είναι μεγαλύτερη στις άμμους με μη-πλαστικά λεπτόκοκκα. Από την Τύρη (2016) προτείνονται οι εξισώσεις (6.6) έως (6.8).

i. Καθαρή άμμος M31

$$\gamma=0,053 \cdot D_r+0,254 \quad (R^2=0,639) \quad (6.6)$$

ii. Άμμος με μη-πλαστικά λεπτόκοκκα M31-5SILT

$$\gamma=0,138 \cdot D_r-5,174 \quad (R^2=0,966) \quad (6.7)$$

iii. Άμμος με μη-πλαστικά λεπτόκοκκα M31-15SILT

$$\gamma=0,138 \cdot D_r+1,171 \quad (R^2=0,969) \quad (6.8)$$

Η εξίσωση που προτείνεται για τις άμμου με πλαστικά λεπτόκοκκα που μελετήθηκαν είναι κοινή και για τα δύο εδάφη M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL και ανεξάρτητη του ποσοστού λεπτοκόκκων.

$$\gamma=0,023 \cdot D_r+1,148 \quad (R^2=0,658) \quad (6.9)$$

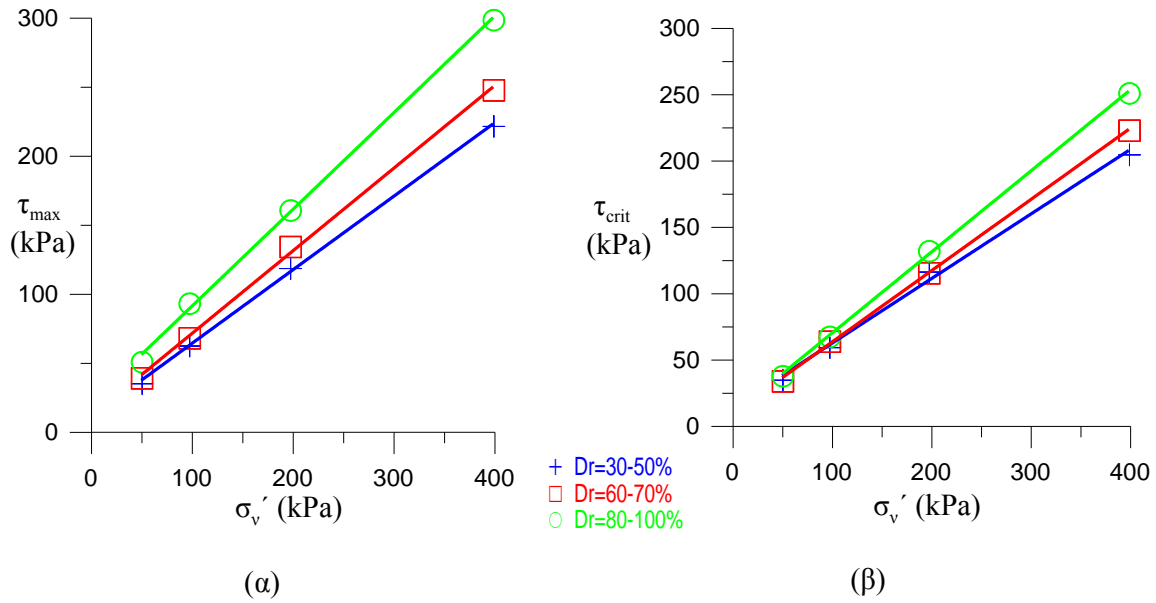
Παρατηρείται μικρότερη επίδραση της D_r από όλα τα εδάφη.

6.2. Συμπεράσματα

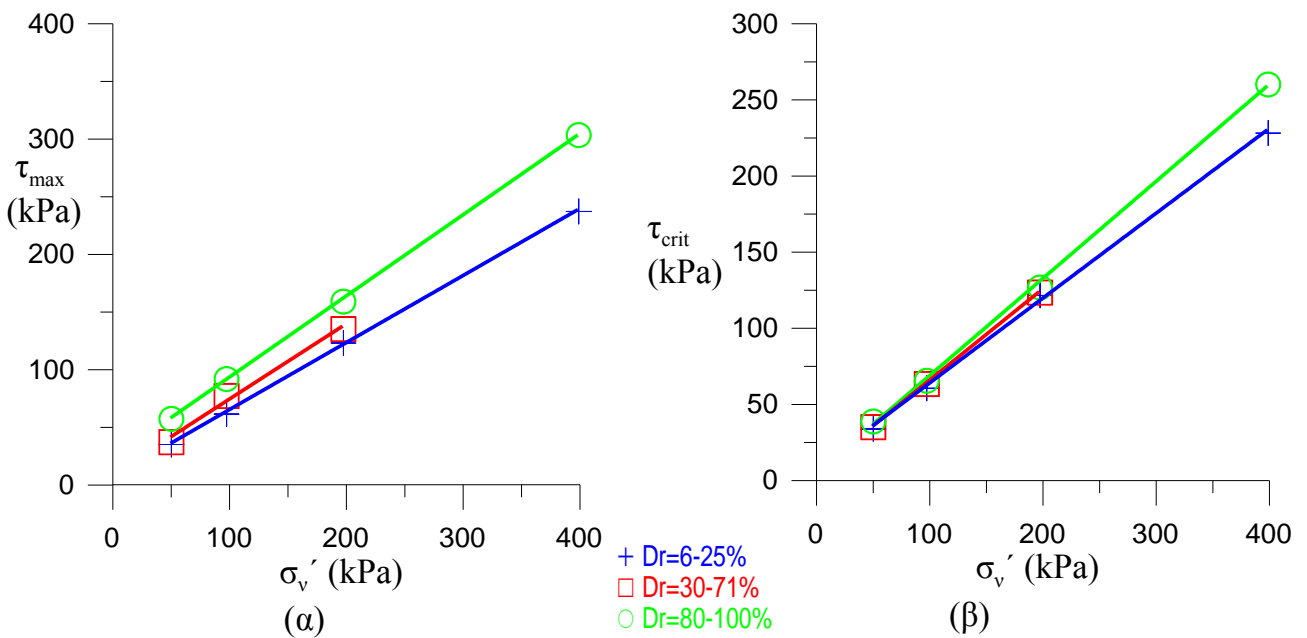
- Η εργαστηριακή μελέτη αναζυμωμένων δοκιμίων άμμου με πλαστικά λεπτόκοκκα επαληθεύει τη θεωρία διάτμησης ως προς τη συμπεριφορά τους σε πυκνή, μέσης πυκνότητας και χαλαρή κατάσταση.
- Η επίδραση της πυκνότητας, D_r , στη διατμητική αντοχή άμμων με πλαστικά και μη-πλαστικά λεπτόκοκκα είναι έντονη στην κατάσταση αστοχίας, τ_{max} , και αυξάνεται με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης, σ_v' . Η επίδραση αυτή μειώνεται στην κρίσιμη κατάσταση.
- Οι περιβάλλουσες αστοχίας των άμμων με πλαστικά και μη-πλαστικά λεπτόκοκκα είναι ευθείες για το εύρος των κατακόρυφων τάσεων που μελετήθηκε ($\sigma_v' = 50, 100, 200, 400 \text{ kPa}$). Ωστόσο, στις άμμους με πλαστικά λεπτόκοκκα η διατμητική αντοχή εκφράζεται από τη γωνία εσωτερικής τριβής και τη συνοχή, ενώ στις άμμους με μη-πλαστικά λεπτόκοκκα μόνο από τη γωνία εσωτερικής τριβής.
- Σε αντίθεση με τις άμμους με μη-πλαστικά λεπτόκοκκα όπου για δεδομένη πυκνότητα η διατμητική αντοχή αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού λεπτοκόκκων, στις άμμους με πλαστικά λεπτόκοκκα παρατηρείται μικρή αύξηση της τ_{max} με το ποσοστό λεπτοκόκκων

που όμως περιορίζεται σε τάσεις $\sigma_v < 200 \text{ kPa}$. Γενικά, όμως, οι διαφορές στη διατμητική αντοχή άμμου με λεπτόκοκκα διαφορετικής πλαστικότητας είναι μικρές σε τάσεις $\sigma_v < 200 \text{ kPa}$.

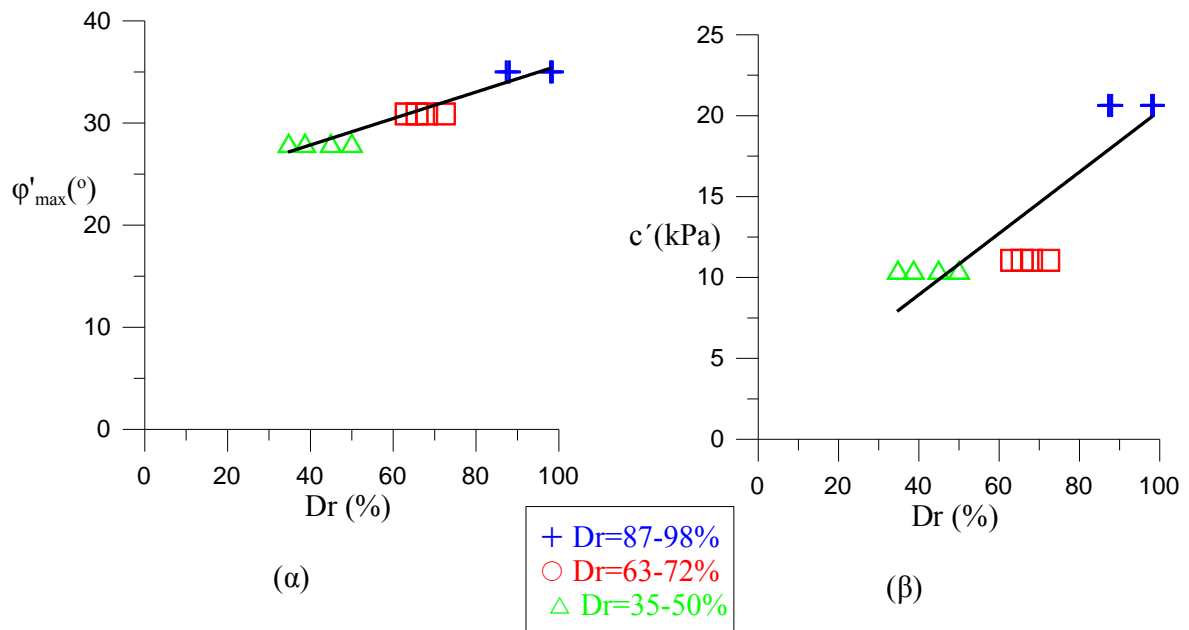
- Στην κατάσταση αστοχίας, οι άμμοι με πλαστικά λεπτόκοκκα παρουσιάζουν αύξηση της γωνίας εσωτερικής τριβής, ϕ'_{\max} , και της συνοχής, c' , με την πυκνότητα. Αύξηση της ϕ'_{\max} με την D_r παρατηρείται επίσης και για τις άμμους με μη-πλαστικά λεπτόκοκκα. Ωστόσο, οι τιμές της ϕ'_{\max} είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση των άμμων με μη-πλαστικά λεπτόκοκκα. Η επίδραση της D_r στη ϕ'_{\max} εκφράζεται από τις εξισώσεις (6.1), (6.2) και (6.3). Παρατηρείται πως η σχέση είναι γραμμική με την ίδια κλίση για όλα τα εδάφη εκτός από την άμμο με το μεγαλύτερο ποσοστό πλαστικών λεπτοκόκκων, όπου η κλίση είναι μικρότερη και άρα η επίδραση της D_r μικρότερη.
- Στην κρίσιμη κατάσταση, για όλες τις άμμους παρατηρείται σύμπτωση των τιμών της γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} , για πυκνότητες $D_r > 60\%$ ανεξαρτήτως της πλαστικότητας και του ποσοστού λεπτοκόκκων, καθώς και της κατακόρυφης τάσης. Σε μικρότερες πυκνότητες ($D_r < 60\%$), η επίδραση της D_r στην ϕ'_{crit} είναι ανύπαρκτη στις άμμους με μη-πλαστικά λεπτόκοκκα, για τις οποίες παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές. Για τις άμμους με πλαστικά λεπτόκοκκα προτείνονται οι σχέσεις (6.4) και (6.5).
- Στην κρίσιμη κατάσταση, η συνοχή των άμμων με πλαστικά λεπτόκοκκα, c_{crit} , εξαρτάται σε μικρότερο βαθμό από την πυκνότητα D_r συγκριτικά με την κατάσταση αστοχίας και κυρίως καταγράφεται μείωση της c_{crit} με την D_r σε αντίθεση με την κατάσταση αστοχίας όπου καταγράφεται αύξηση. Ακόμη, ενώ για δεδομένη πυκνότητα οι τιμές της c' στην κατάσταση αστοχίας είναι παρόμοιες για τα μελετηθέντα εδάφη και συνεπώς ανεξάρτητες του ποσοστού λεπτοκόκκων, στην κρίσιμη κατάσταση η τιμή της c'_{crit} μειώνεται με την αύξηση του ποσοστού λεπτοκόκκων και της πυκνότητας. Αυτό αποδίδεται στη μεταβολή του μηχανισμού αντοχής με την αύξηση της παραμόρφωσης. Δηλαδή καθώς το έδαφος μεταβαίνει από την κατάσταση αστοχίας στην κρίσιμη κατάσταση με την αύξηση της παραμόρφωσης, ο μηχανισμός τριβής γίνεται κυρίαρχος και η συνοχή μειώνεται.
- Η διαφορά της κατάστασης αστοχίας από την κρίσιμη κατάσταση σε όρους της γωνίας εσωτερικής τριβής, όπως παρουσιάζεται με τη γωνία διαστολικότητας $\gamma = \phi'_{\max} - \phi'_{\text{cr}}$, είναι μεγάλη στις άμμους με μη-πλαστικά λεπτόκοκκα και με μεγάλη επίδραση της πυκνότητας D_r . Για τον προσδιορισμό της προτείνονται οι εξισώσεις (6.7) και (6.8). Μικρότερες τιμές της γ και μικρότερη επίδραση παρατηρούνται για την καθαρή άμμο M31, για την οποία προτείνεται η σχέση (6.6). Για τις άμμους με πλαστικά λεπτόκοκκα προτείνεται η σχέση (6.9) όπου και καταδεικνύει τη μικρή επίδραση της πυκνότητας.



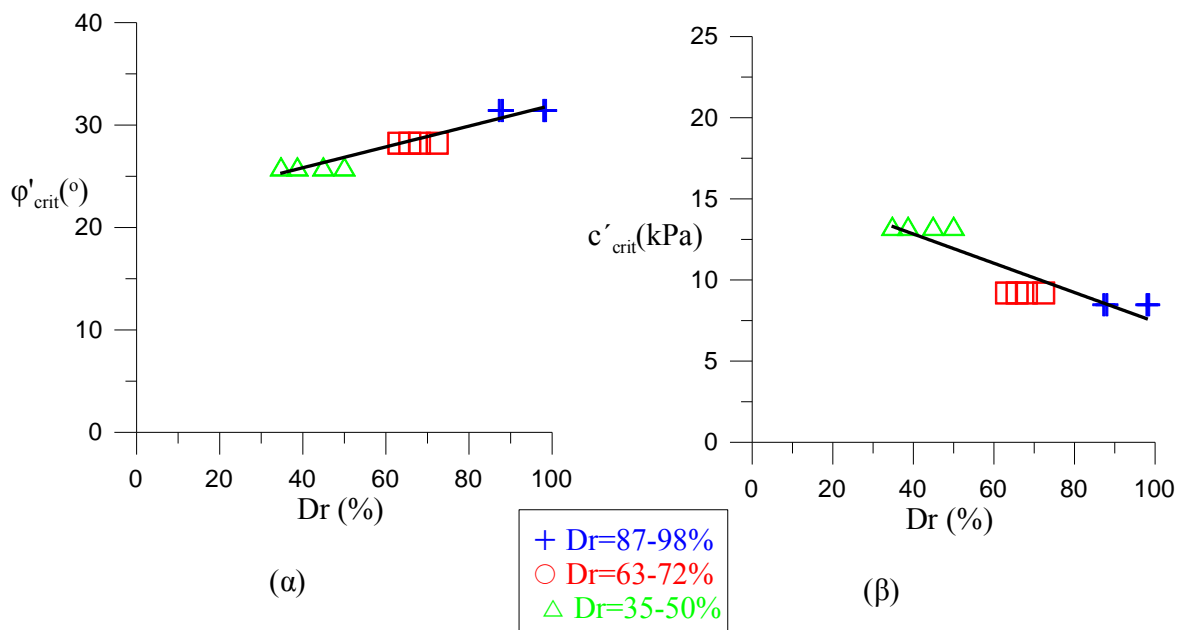
Σχήμα 6.1: Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για το έδαφος M31-1SILT-4KAOL



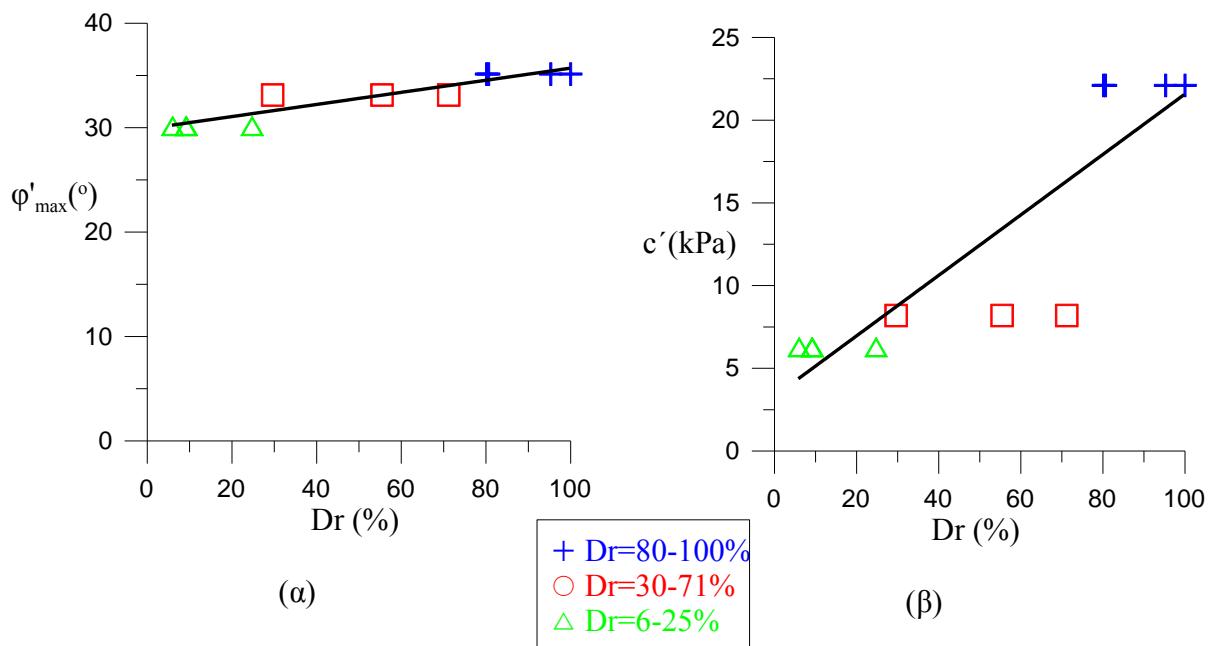
Σχήμα 6.2: Περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για το έδαφος M31-3SILT-12KAOL



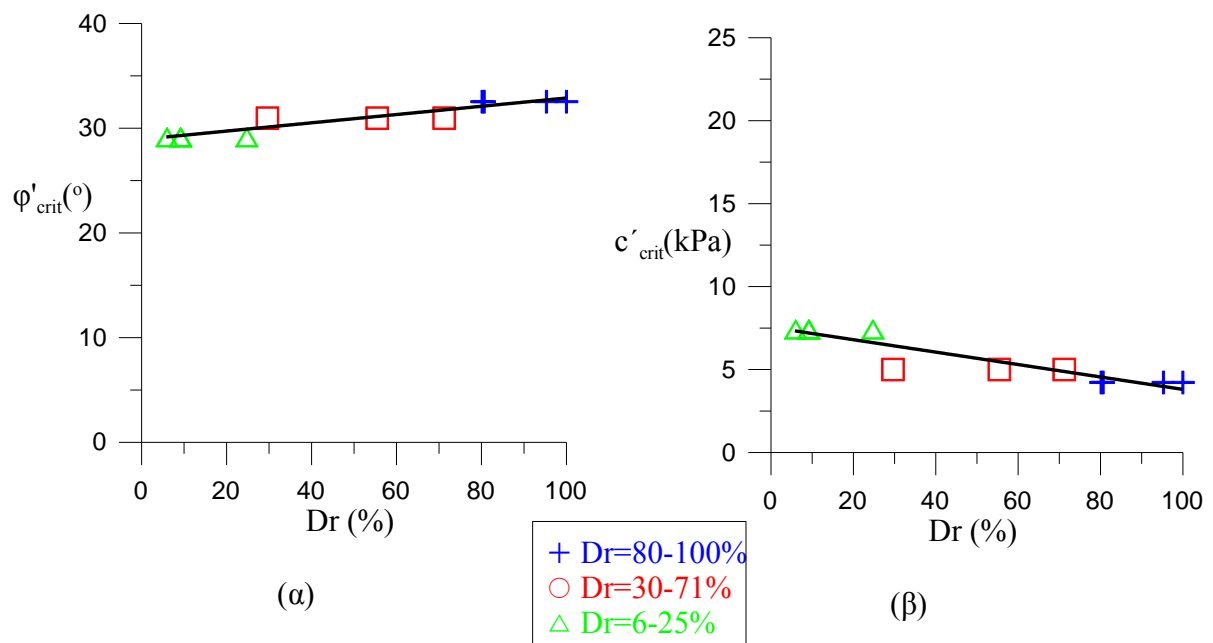
Σχήμα 6.3: Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} και (β) της μέγιστης συνοχής, c' με τη σχετική πυκνότητα D_r για την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL



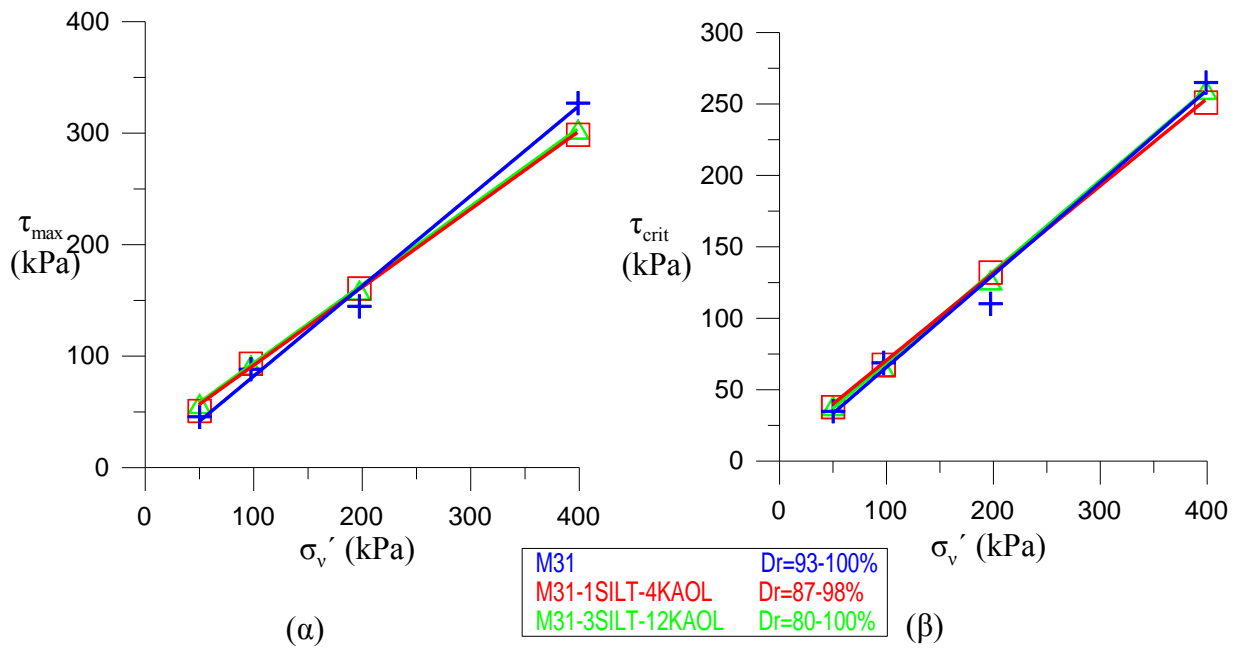
Σχήμα 6.4: Μεταβολή (α) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (β) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα D_r για την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL



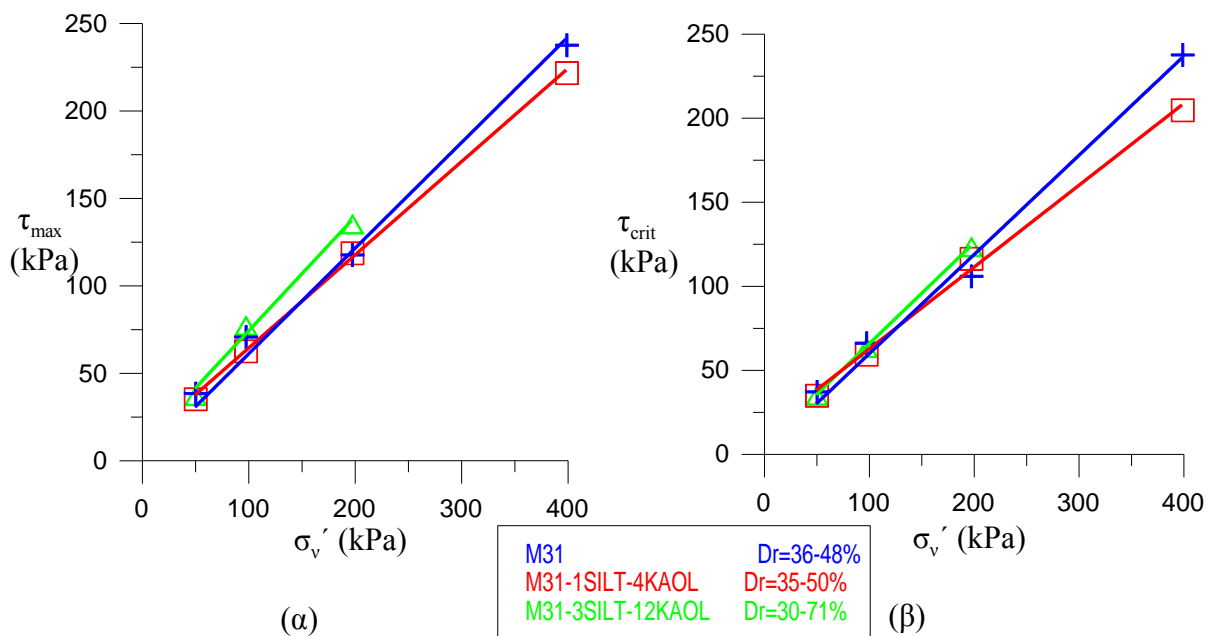
Σχήμα 6.5: Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} και (β) της μέγιστης συνοχής, c' με τη σχετική πυκνότητα Dr για την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL



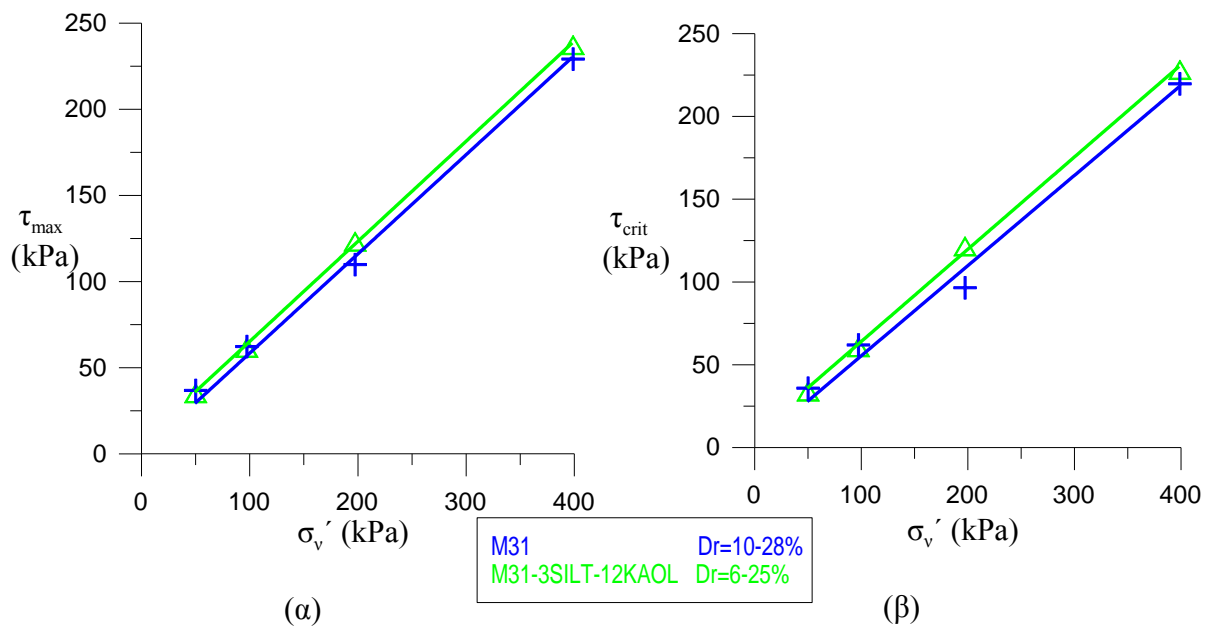
Σχήμα 6.6: Μεταβολή (α) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (β) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα Dr για την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL



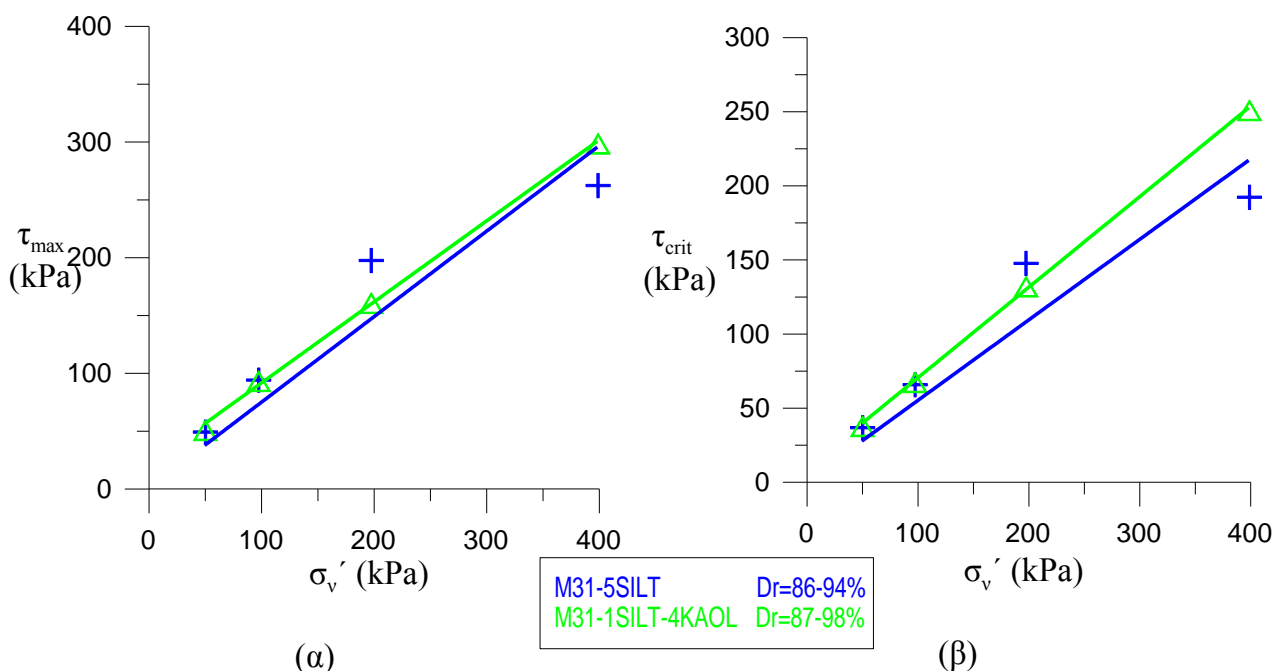
Σχήμα 6.7: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL σε πολύ πυκνά δοκίμια, $Dr=80-100\%$



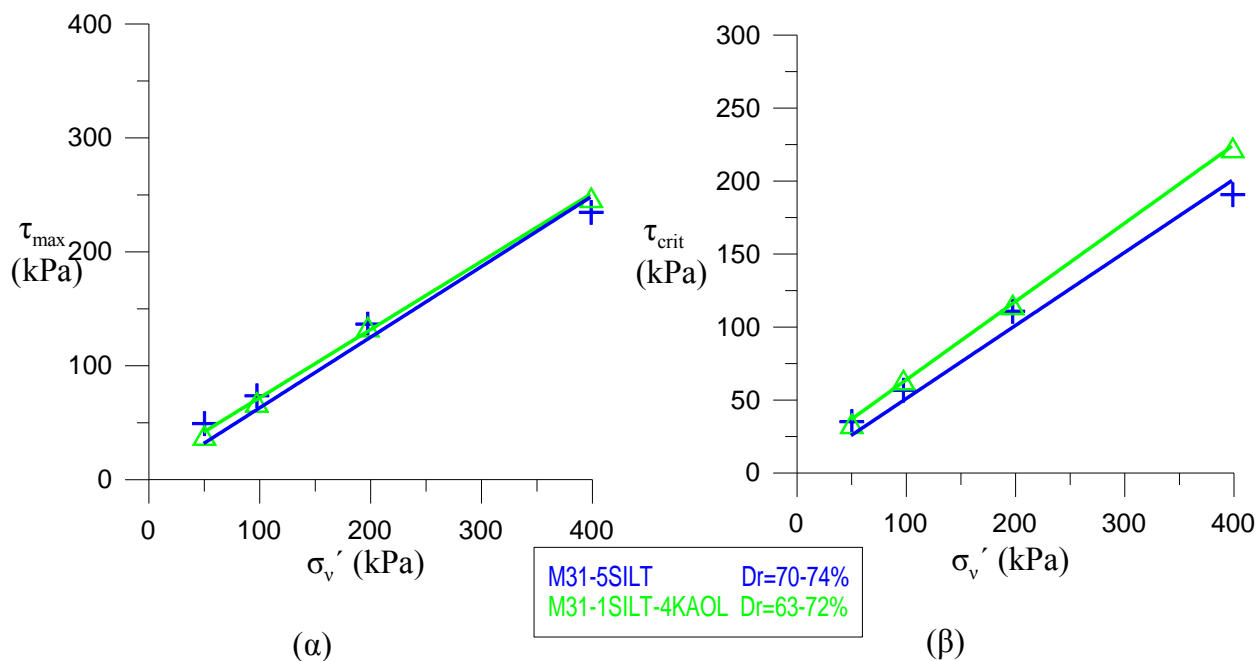
Σχήμα 6.8: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL σε μεσαία πυκνότητα, $Dr=30-72\%$



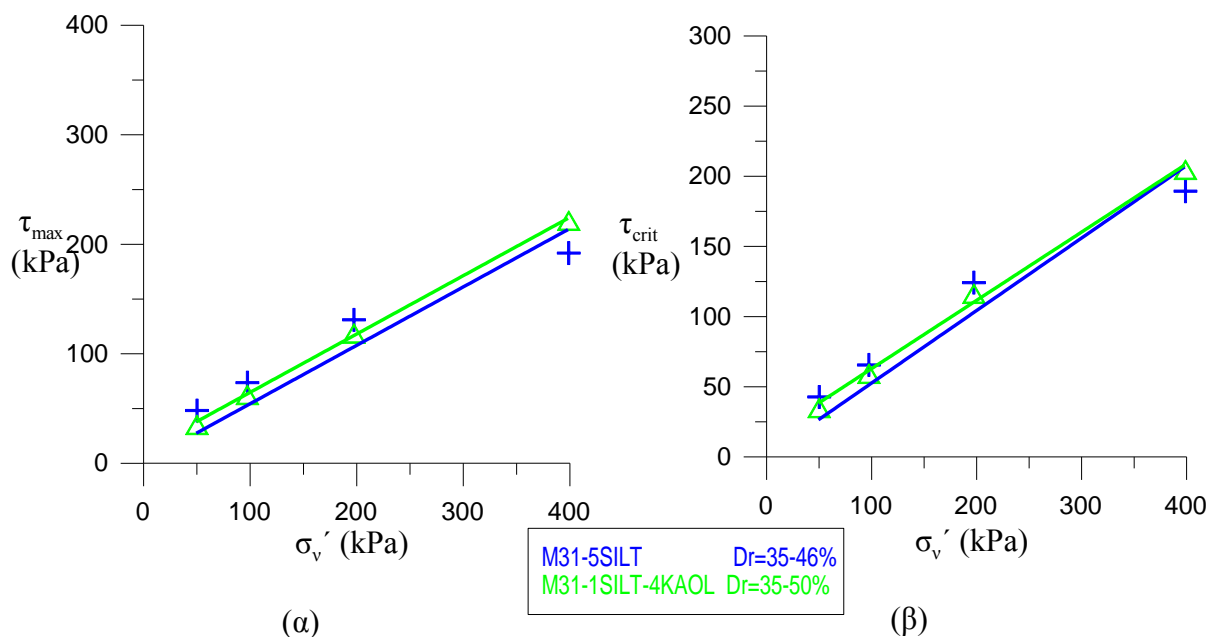
Σχήμα 6.9: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την άμμο M31 και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε χαλαρά δοκίμια, $Dr=6-28\%$



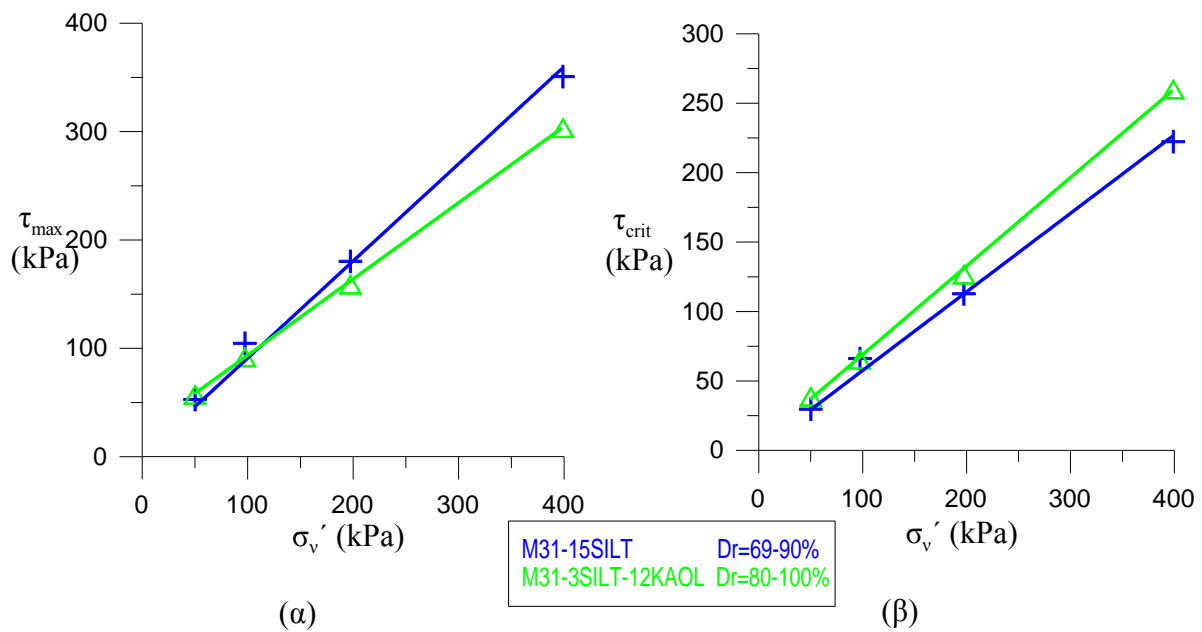
Σχήμα 6.10: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL σε πολύ πυκνά δοκίμια, $Dr=86-98\%$



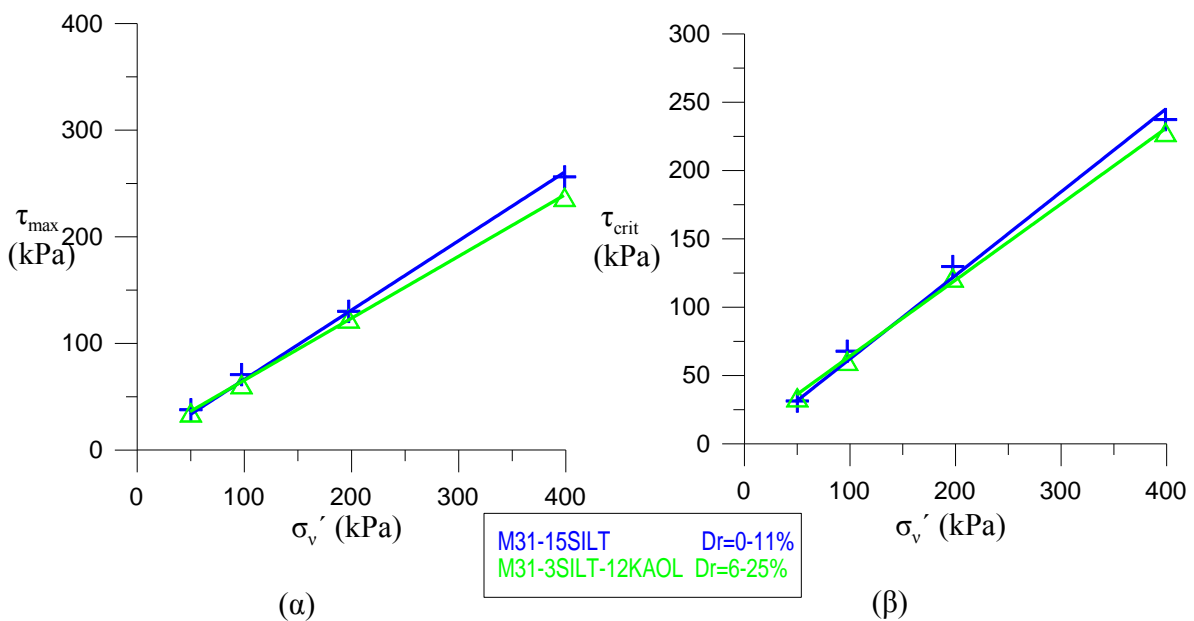
Σχήμα 6.11: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL σε πυκνά δοκίμια, $Dr=63-74\%$



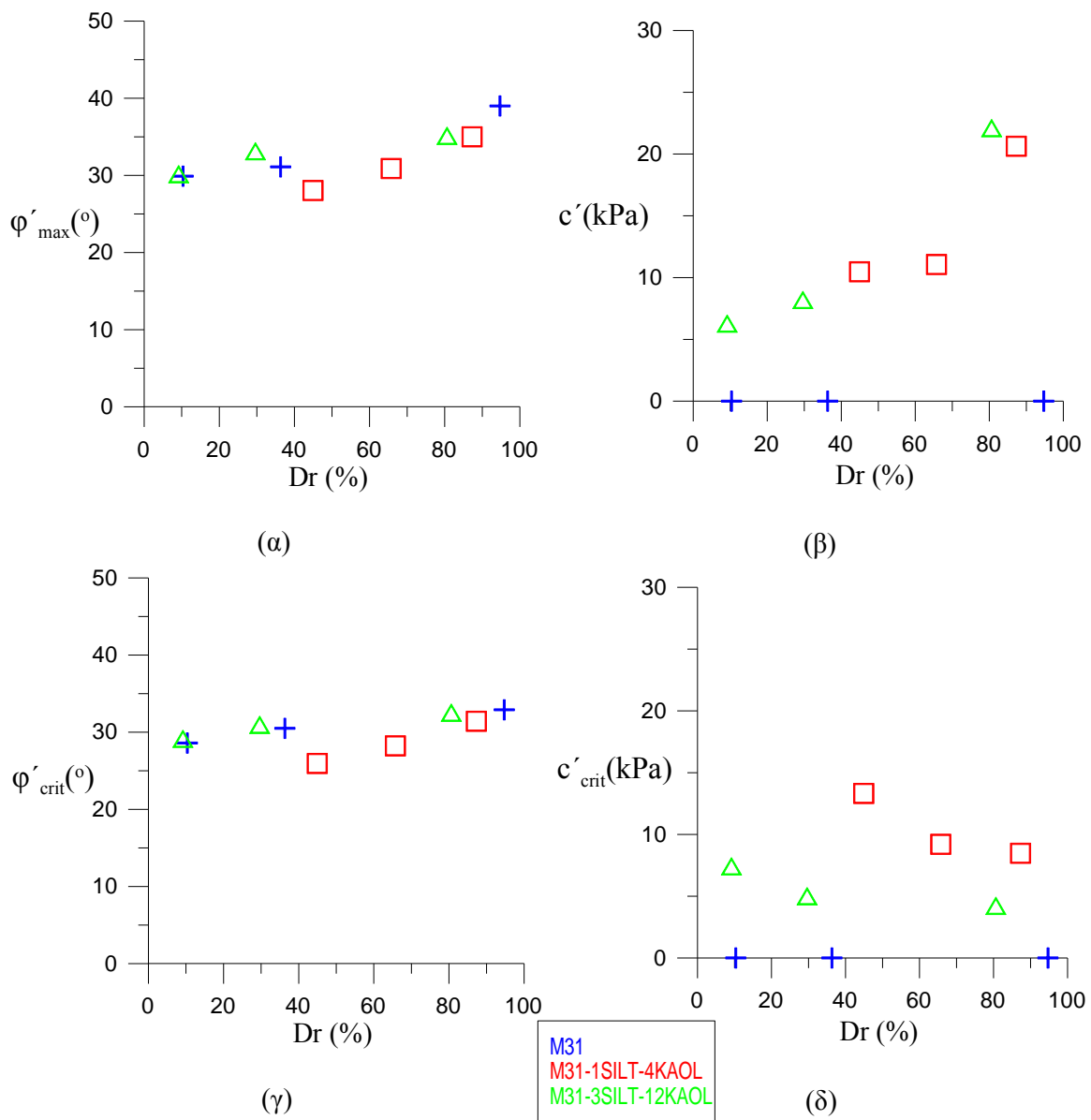
Σχήμα 6.12: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL σε μεσαία πυκνότητα, $Dr=35-50\%$



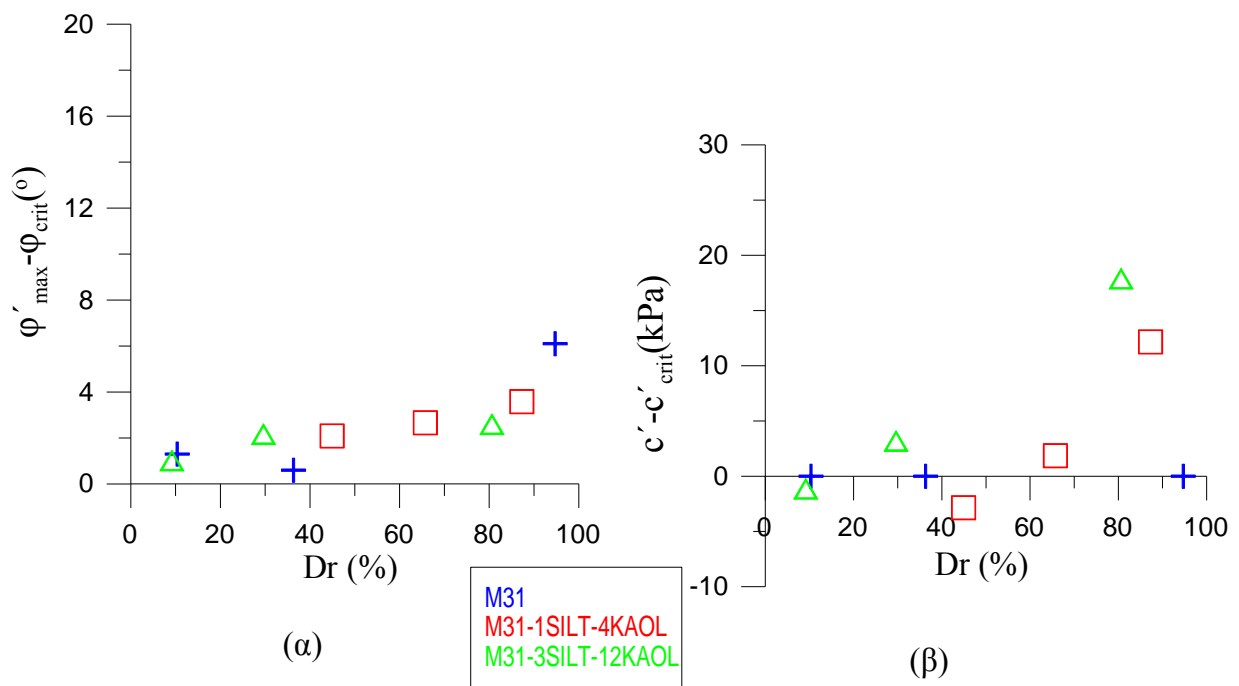
Σχήμα 6.13: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την ιλυώδη άμμο M31-15SILT και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε πολύ πυκνά δοκίμια, $D_r=69-100\%$



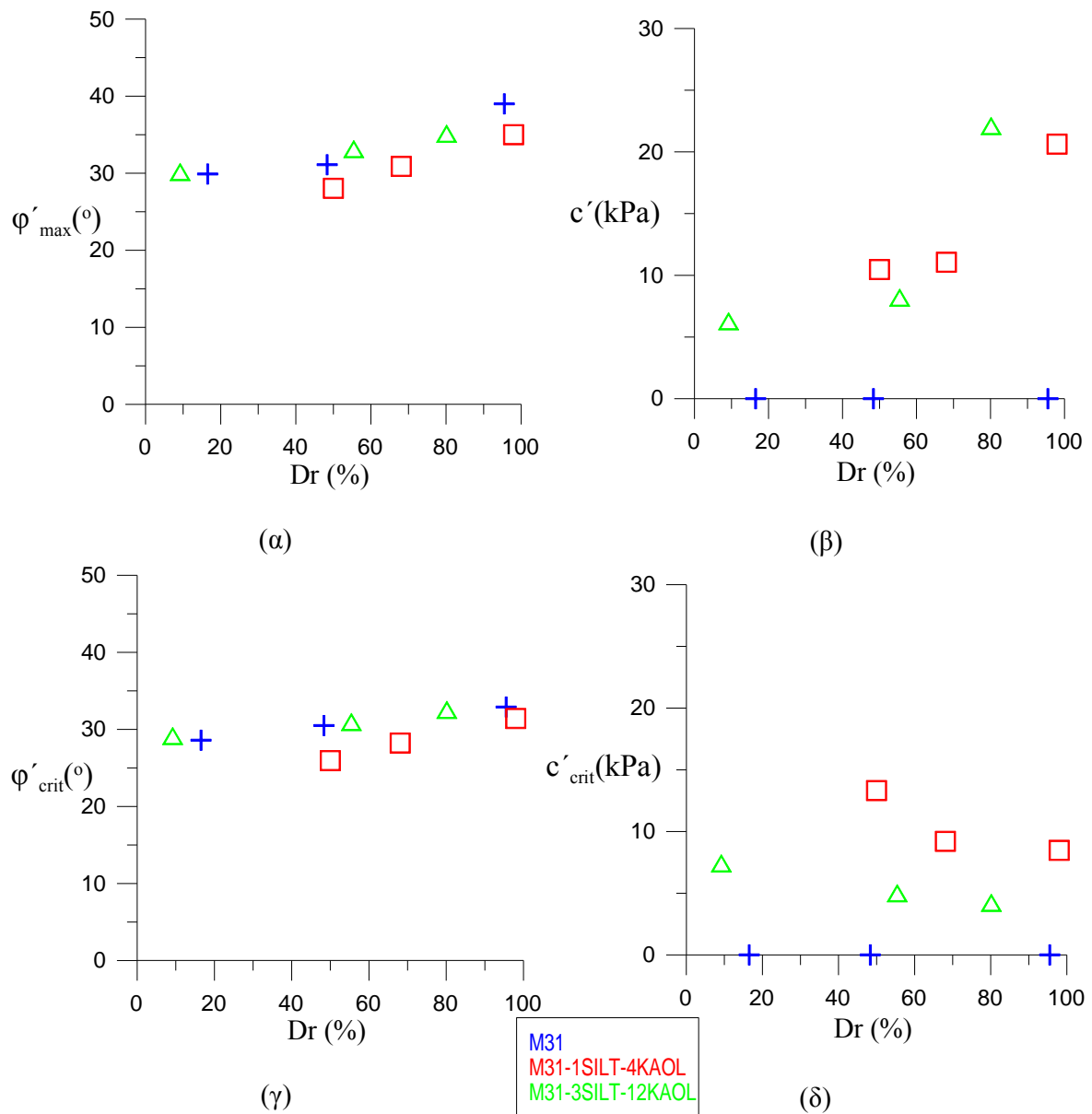
Σχήμα 6.14: Περιβάλλουσες Mohr-Coulomb (α) στην κατάσταση αστοχίας και (β) στην κρίσιμη κατάσταση για την ιλυώδη άμμο M31-15SILT και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε χαλαρά δοκίμια, $D_r=0-25\%$



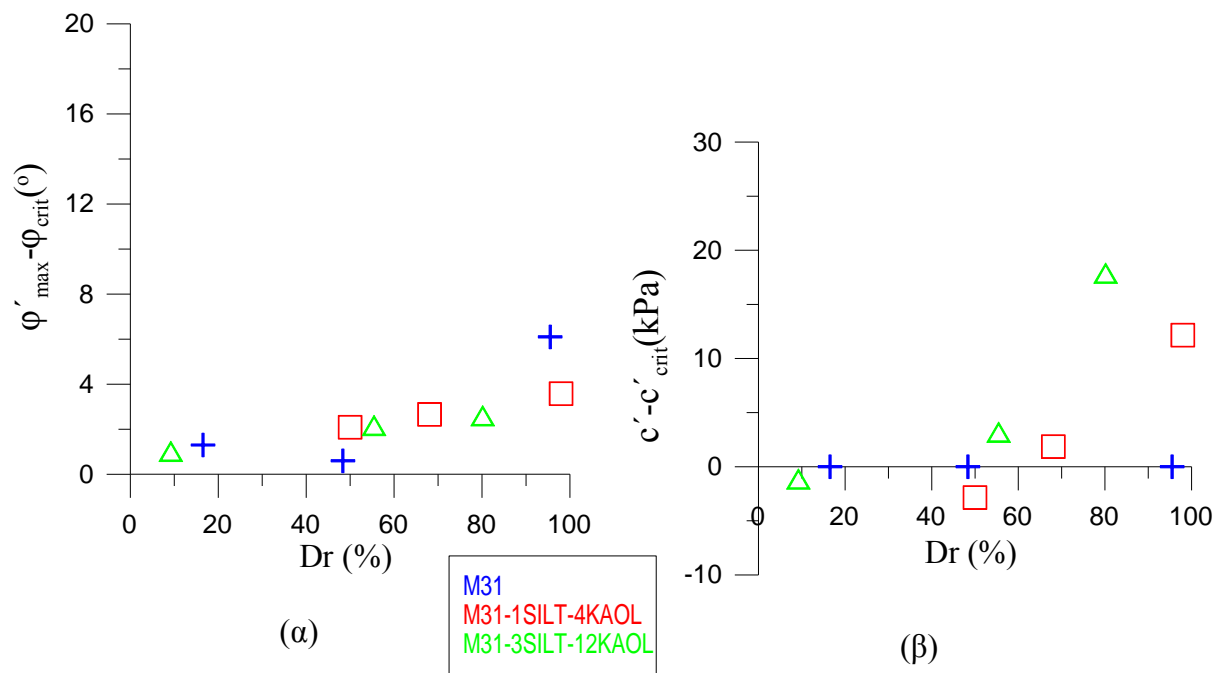
Σχήμα 6.15: Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} , (β) της μέγιστης συνοχής, c' , (γ) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (δ) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα Dr για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v=50,1\text{kPa}$



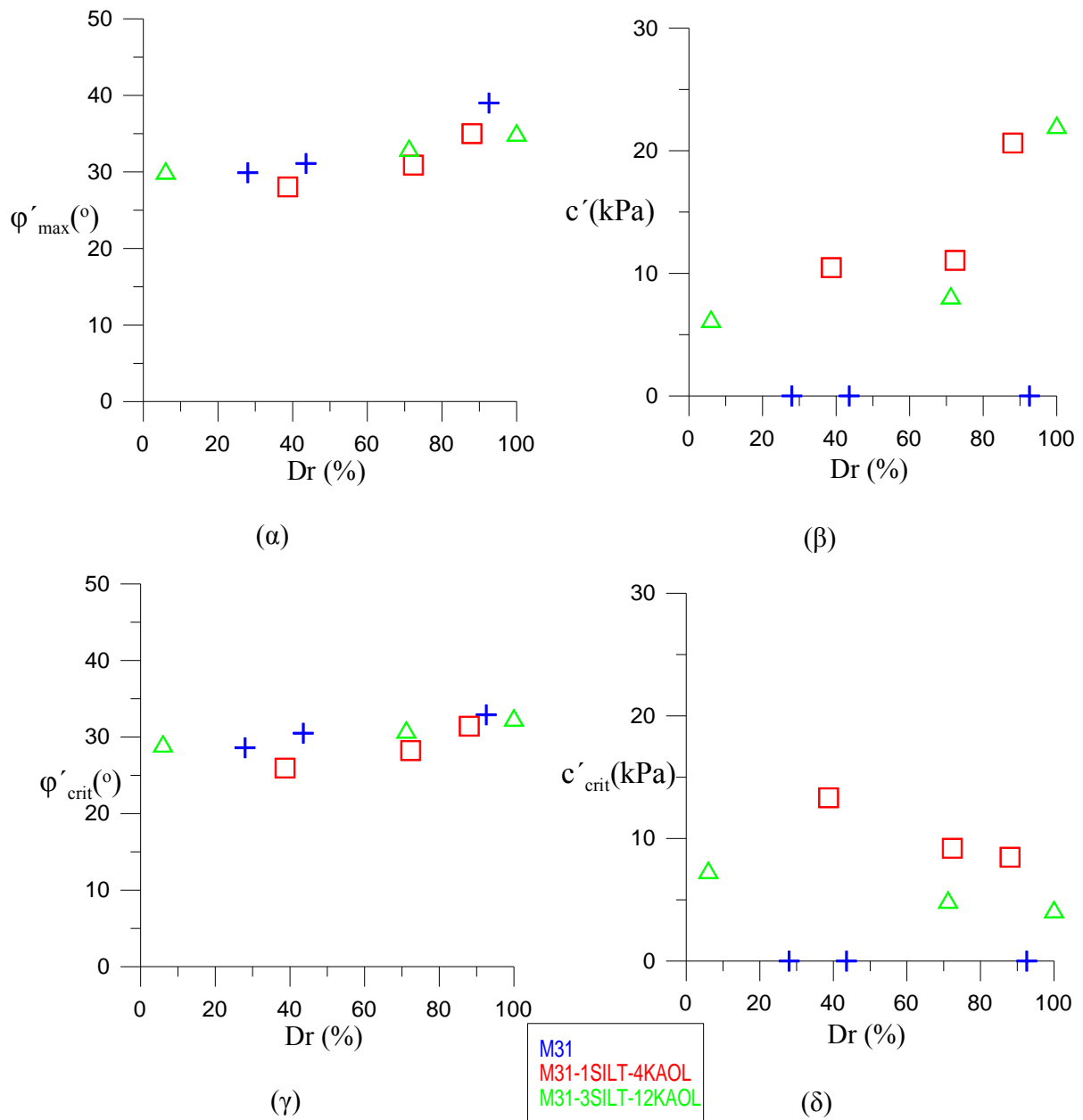
Σχήμα 6.16: Μεταβολή (α) της γωνίας τριβής, $\phi'_{\max} - \phi'_{\text{crit}}$ και (β) της συνοχής, $c' - c'_{\text{crit}}$ με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v = 50,1 \text{ kPa}$



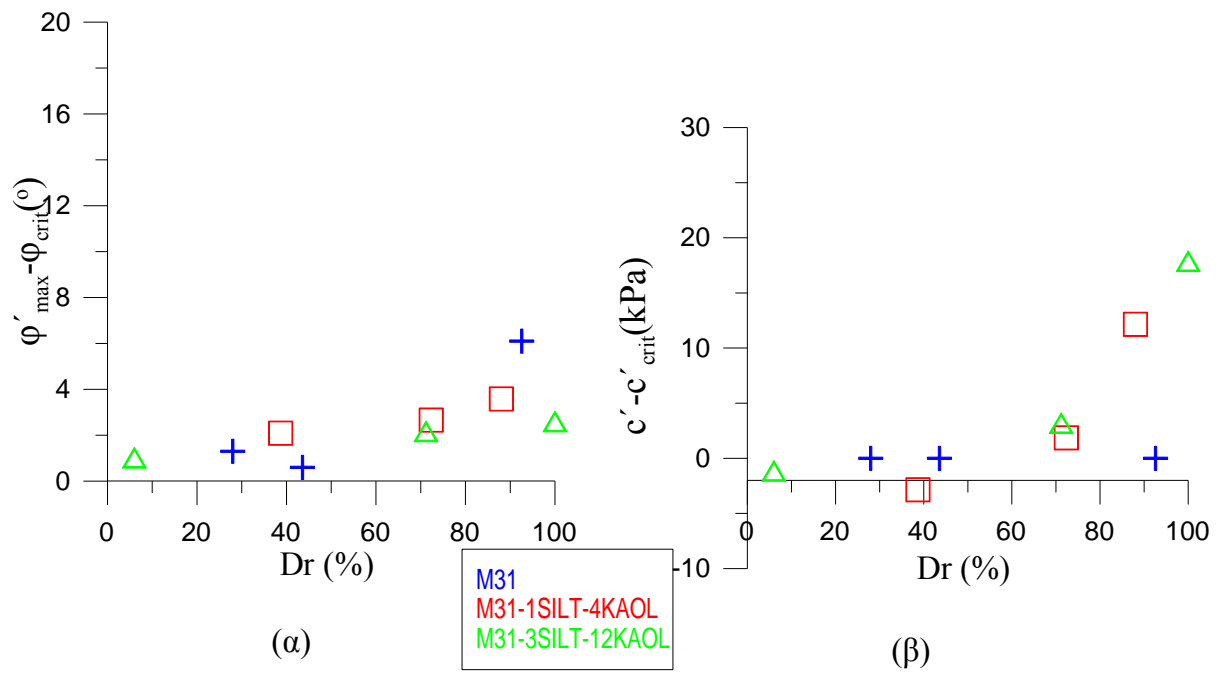
Σχήμα 6.17: Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} , (β) της μέγιστης συνοχής, c' , (γ) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (δ) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα Dr για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v = 97,4 \text{ kPa}$



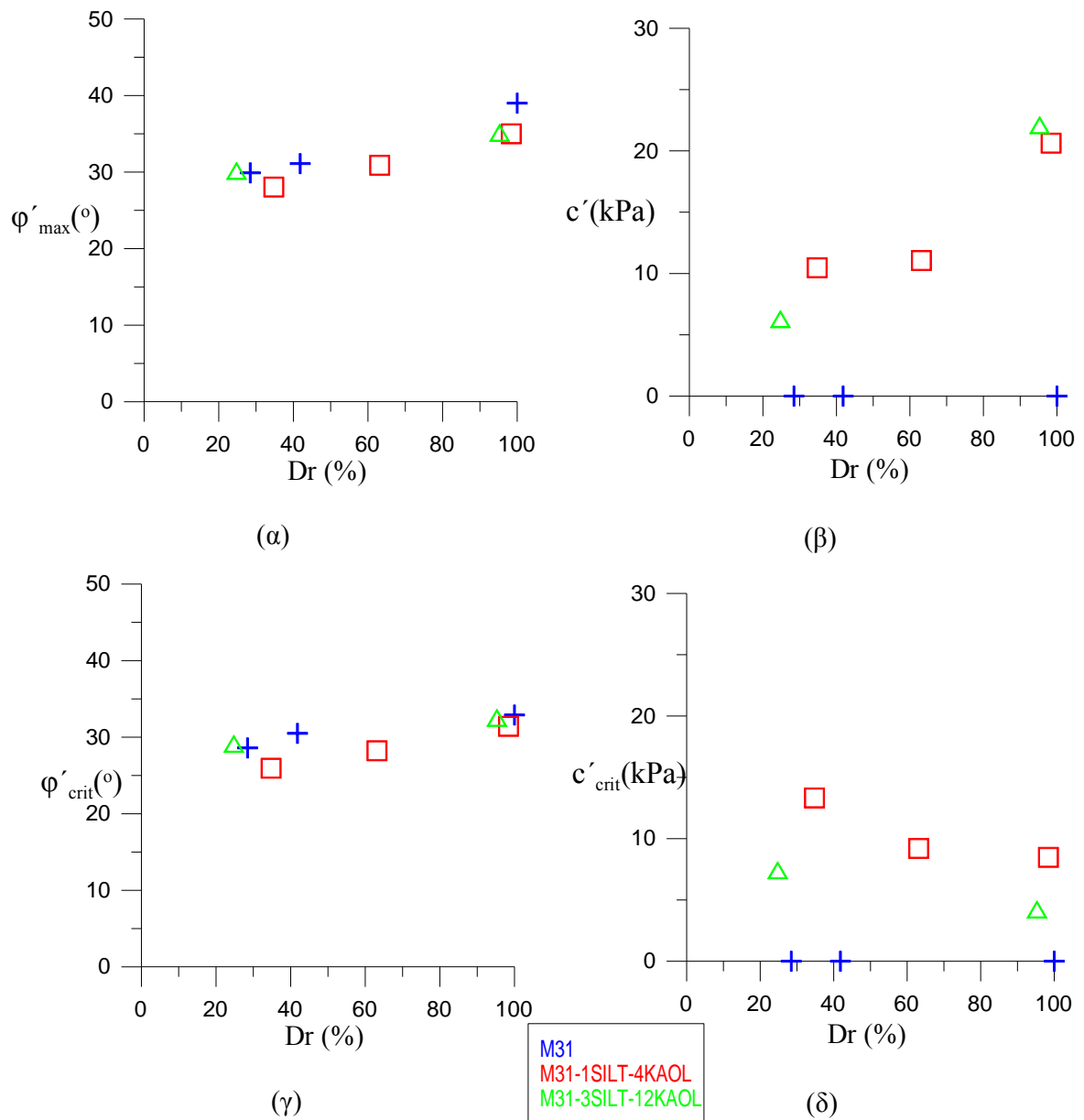
Σχήμα 6.18: Μεταβολή (α) της γωνίας τριβής, $\phi'_{\max} - \phi_{\text{crit}}$ και (β) της συνοχής, $c' - c_{\text{crit}}$ με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v = 97,4 \text{ kPa}$



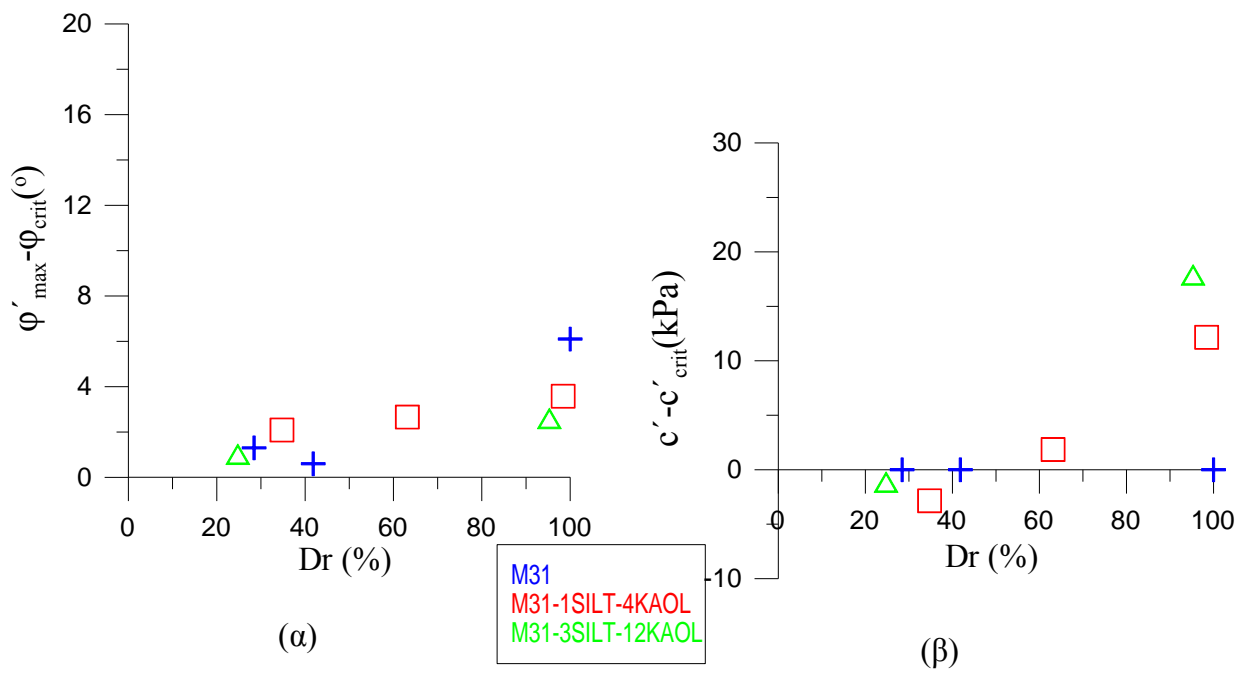
Σχήμα 6.19: Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} , (β) της μέγιστης συνοχής, c' , (γ) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (δ) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα Dr για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v = 197,4 \text{ kPa}$



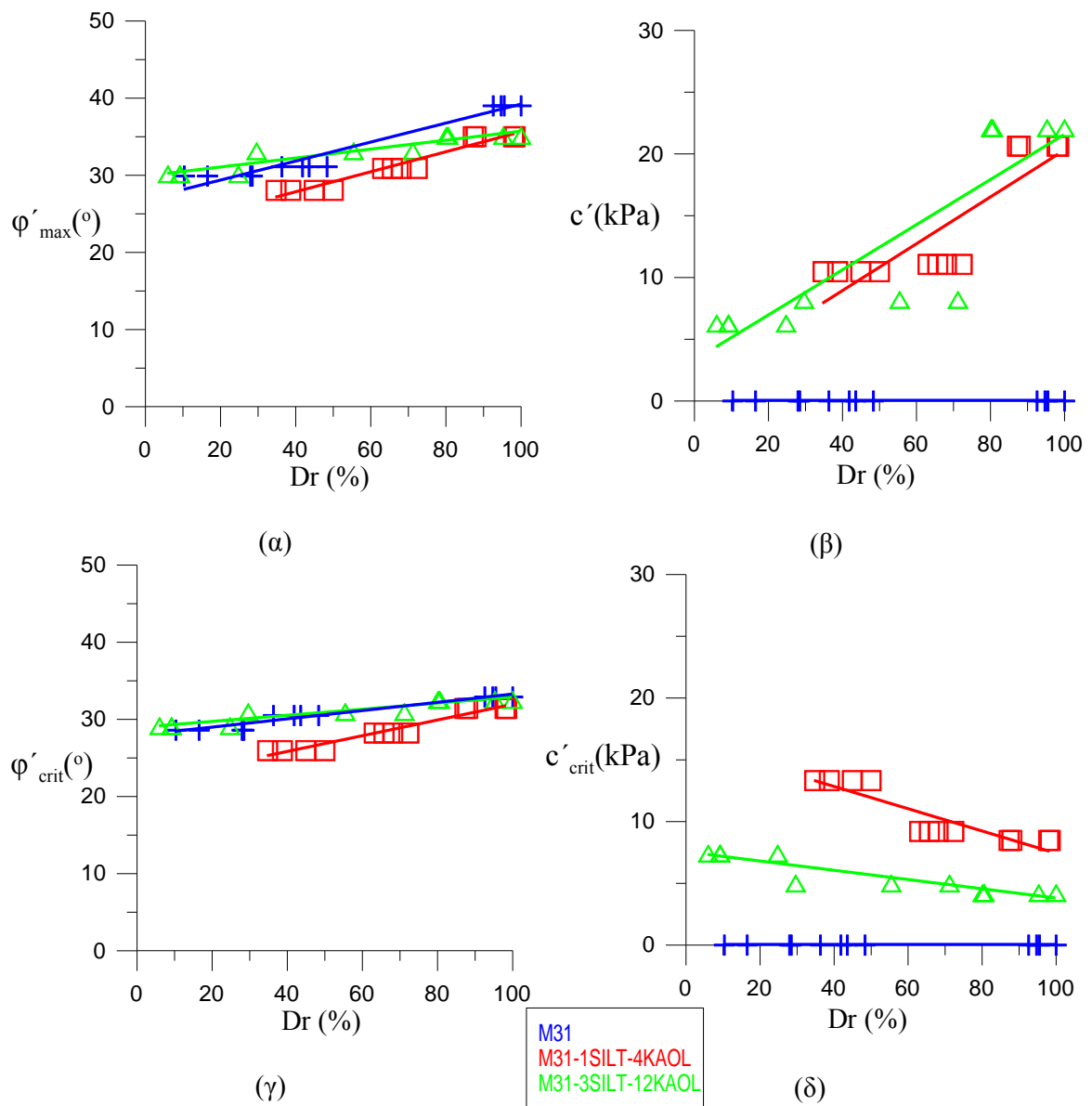
Σχήμα 6.20: Μεταβολή (α) της γωνίας τριβής, $\phi'_{\max} - \phi'_{\text{crit}}$ και (β) της συνοχής, $c' - c'_{\text{crit}}$ με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31, και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v = 197,4 \text{ kPa}$



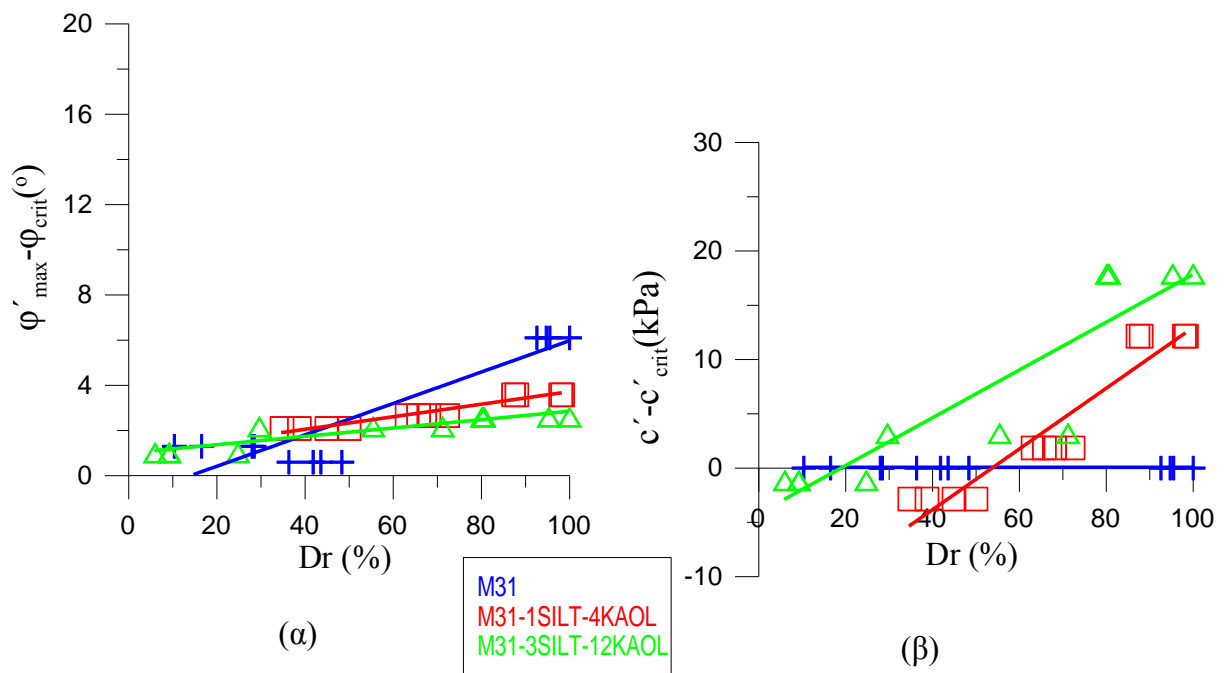
Σχήμα 6.21: Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} , (β) της μέγιστης συνοχής, c' , (γ) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (δ) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα Dr για την άμμο M31, και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v=398,9\text{kPa}$



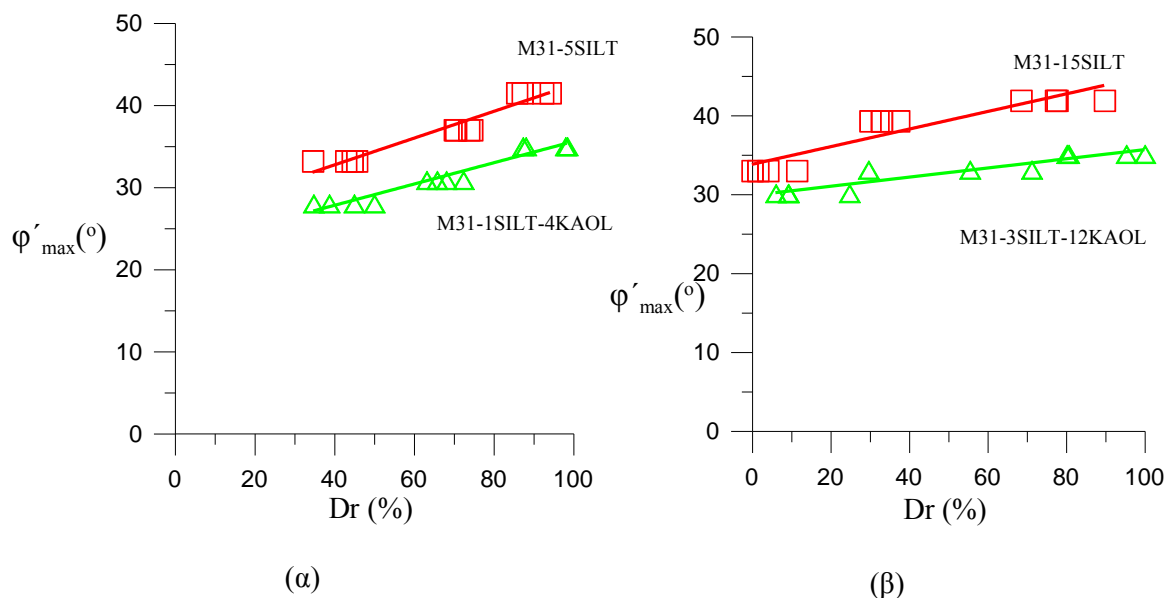
Σχήμα 6.22: Μεταβολή (α) της γωνίας τριβής, $\phi'_{max} - \phi_{crit}$ και (β) της συνοχής, $c' - c'_{crit}$ με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31, και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL για ορθή τάση $\sigma'_v = 398,9 \text{ kPa}$



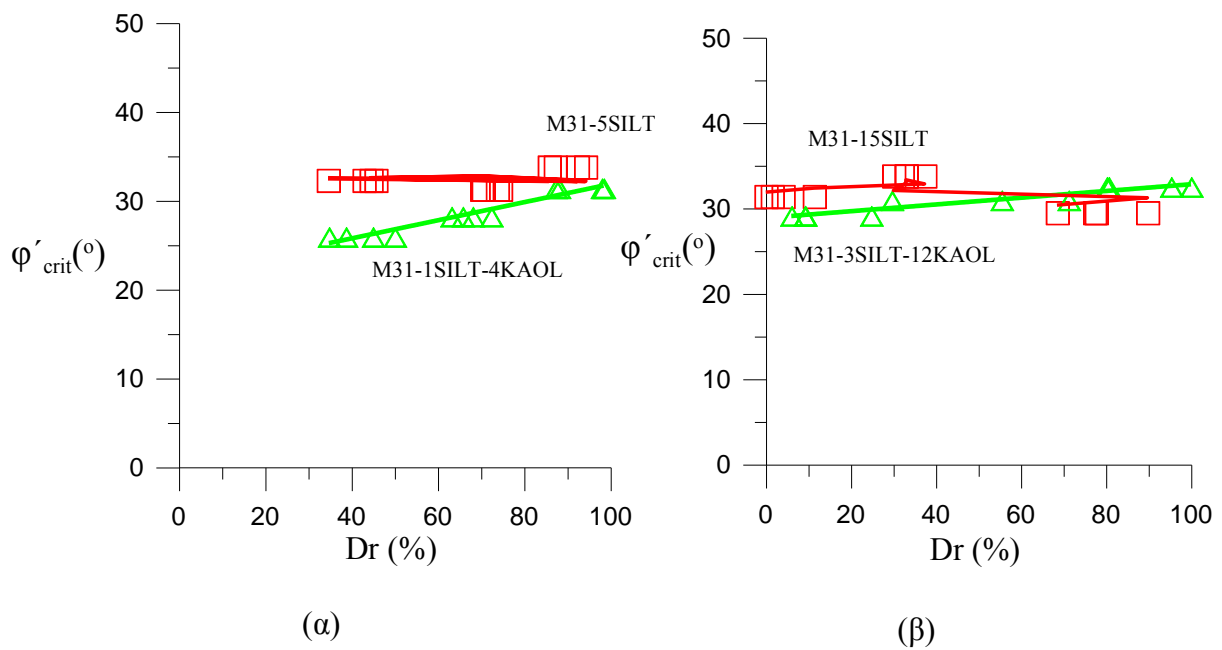
Σχήμα 6.23: Μεταβολή (α) της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} , (β) της μέγιστης συνοχής, c' , (γ) της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} και (δ) της κρίσιμης συνοχής, c'_{crit} , σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης για τα μελετηθέντα εδάφη



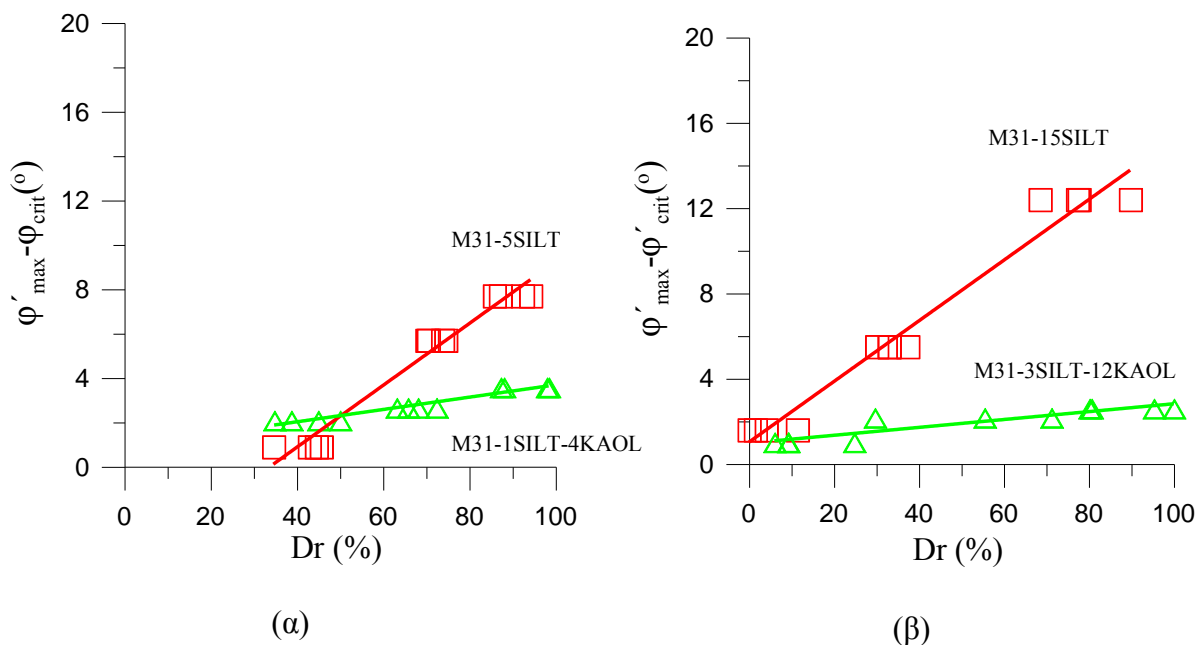
Σχήμα 6.24: Μεταβολή (α) της γωνίας τριβής, $\phi'_{max} - \phi_{crit}$ και (β) της συνοχής, $c' - c_{crit}$ με τη σχετική πυκνότητα D_r για την άμμο M31 και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης



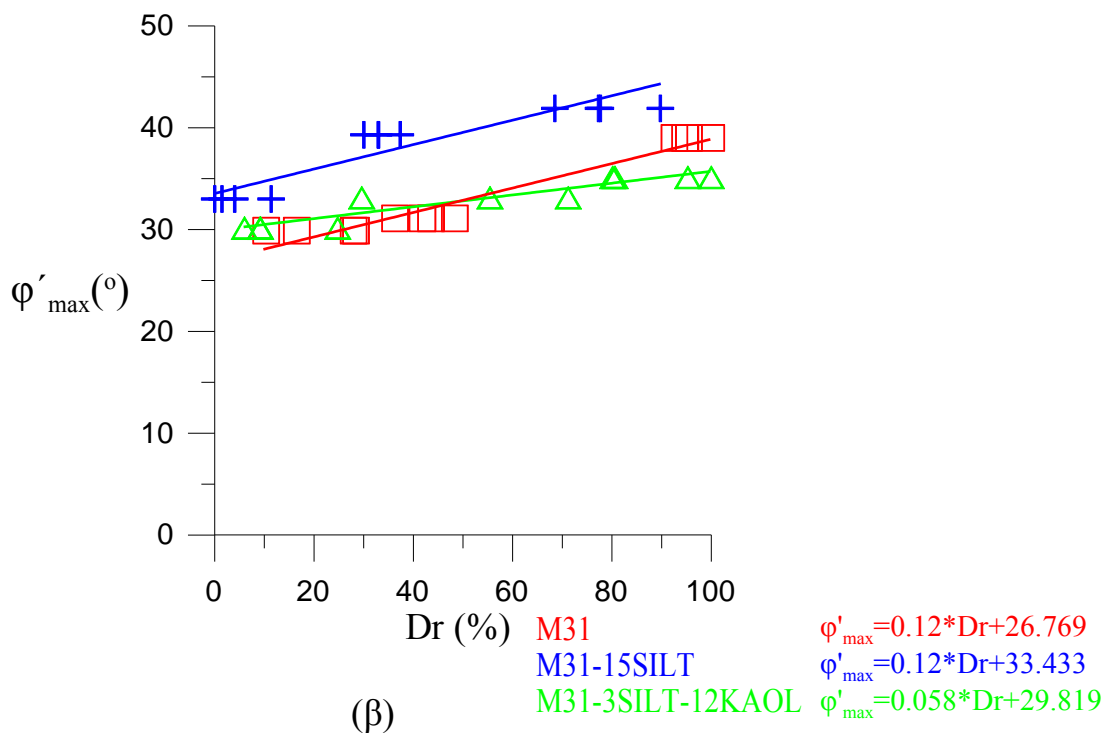
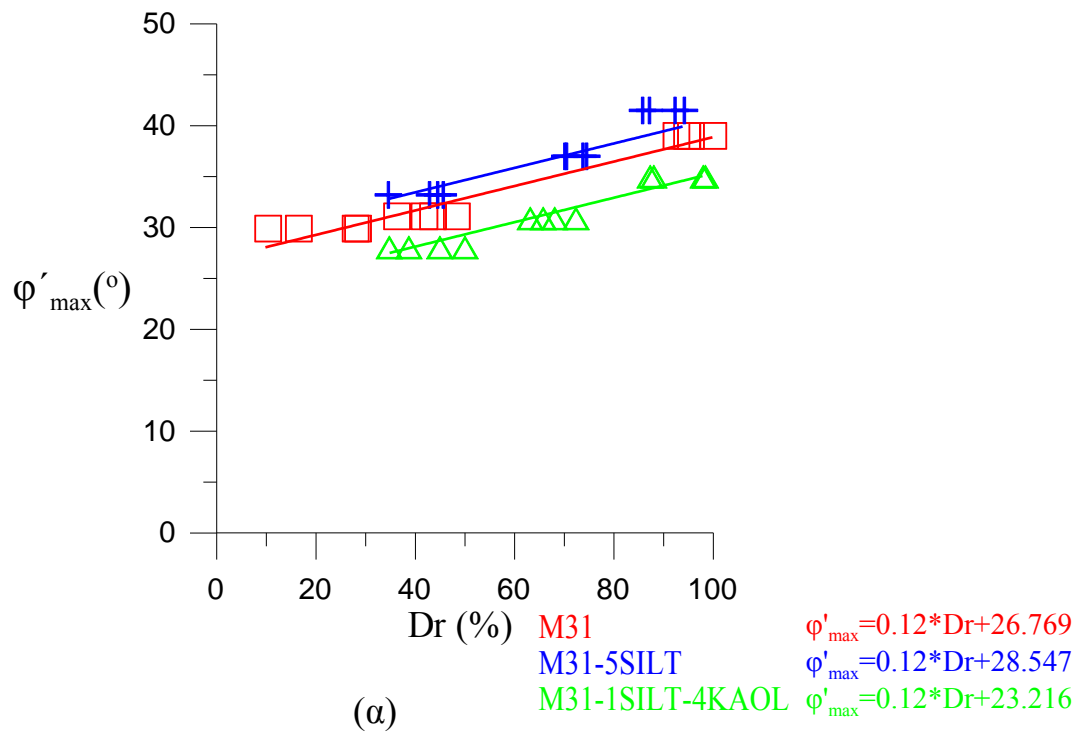
Σχήμα 6.25: Μεταβολή της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ'_{max} , με τη σχετική πυκνότητα D_r για (α) την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL και (β) την ιλυώδη άμμο M31-15SILT και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης



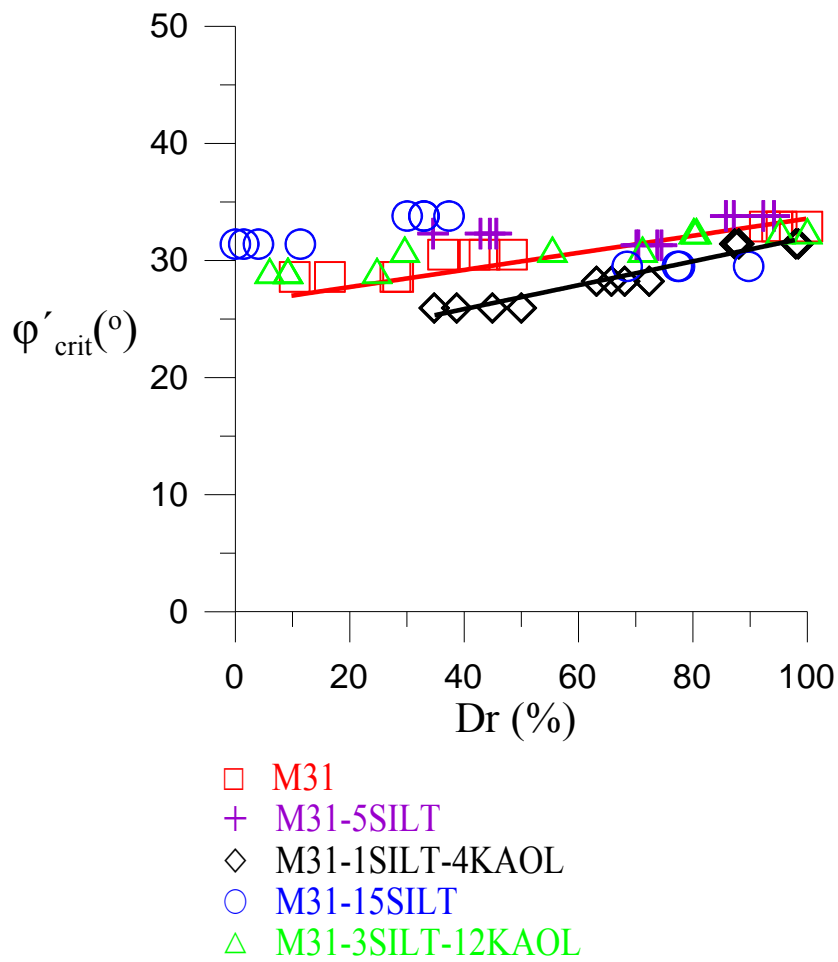
Σχήμα 6.26: Μεταβολή της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα D_r για (α) την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL και (β) την ιλυώδη άμμο M31-15SILT και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης



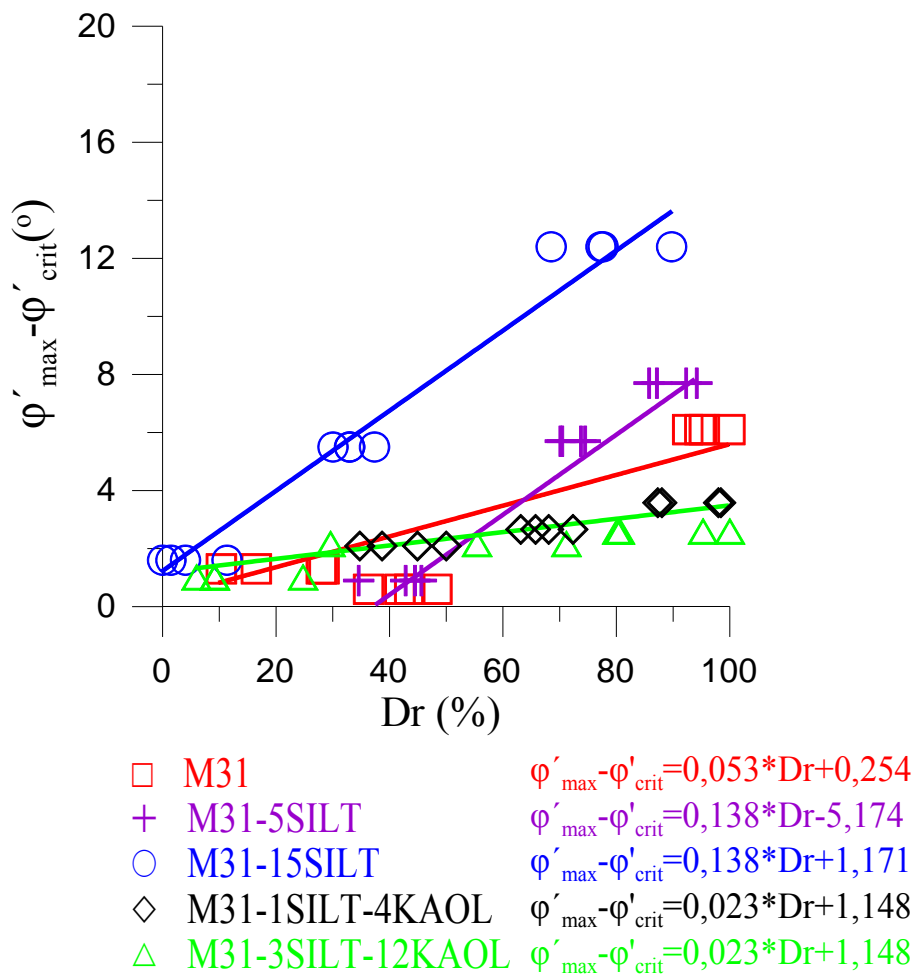
Σχήμα 6.27: Μεταβολή της γωνίας τριβής, $\phi'_{max} - \phi'_{crit}$ με τη σχετική πυκνότητα D_r για (α) την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL και (β) την ιλυώδη άμμο M31-15SILT και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης



Σχήμα 6.28: Μεταβολή της μέγιστης γωνίας τριβής, ϕ_{max} , με τη σχετική πυκνότητα, Dr , για (α) την άμμο M31, την ιλυώδη άμμο M31-5SILT και την αργιλώδη άμμο M31-1SILT-4KAOL και (β) την άμμο M31, την ιλυώδη άμμο M31-15SILT και την αργιλώδη άμμο M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης



Σχήμα 6.29: Μεταβολή της κρίσιμης γωνίας τριβής, ϕ'_{crit} με τη σχετική πυκνότητα, D_r , για την άμμο M31, τις ιλυώδεις άμμους M31-5SILT και M31-15SILT και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης



Σχήμα 6.30: Μεταβολή της γωνίας τριβής, $\varphi'_{\max} - \varphi'_{\text{crit}}$, με την πυκνότητα, D_r για την άμμο M31, τις ιλυώδεις άμμους M31-5SILT και M31-15SILT και τις αργιλώδεις άμμους M31-1SILT-4KAOL και M31-3SILT-12KAOL σε όλες τις τάσεις στερεοποίησης

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης για το έδαφος M31-1SILT-4KAOL

Δοκιμή		Μέγιστη Διατμητική Τάση, τ_{max} (kPa)	Οριζόντια μετακίνηση, δ (mm)	Δείκτης Πόρων, e	Κρίσιμη Διατμητική Τάση, τ_{cr} (kPa)	Οριζόντια μετακίνηση, δ (mm)	Δείκτης Πόρων, e
M31-1SILT-4KAOL-1A	Πολύ πυκνό	50,85	1,086	0,600	37,81	3,883	0,616
M31-1SILT-4KAOL-1B		93,22	1,784	0,576	67,47	4,844	0,590
M31-1SILT-4KAOL-1C		160,70	1,957	0,599	132,01	4,797	0,614
M31-1SILT-4KAOL-1D		298,58	2,063	0,572	250,99	4,613	0,581
M31-1SILT-4KAOL-2A	Πυκνό	39,11	1,418	0,654	33,90	5,998	0,661
M31-1SILT-4KAOL-2B		68,12	2,177	0,646	63,89	5,207	0,646
M31-1SILT-4KAOL-2C		134,29	2,105	0,636	115,39	7,041	0,627
M31-1SILT-4KAOL-2D		247,73	2,251	0,655	222,95	5,501	0,654
M31-1SILT-4KAOL-3A	Μεσαίας πυκνότητας	35,20	5,425	0,695	34,88	9,072	0,689
M31-1SILT-4KAOL-3B		62,58	3,195	0,684	59,32	9,207	0,670
M31-1SILT-4KAOL-3C		118,65	4,209	0,702	116,37	7,764	0,692
M31-1SILT-4KAOL-3D		221,65	4,274	0,704	204,70	8,156	0,680

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα δοκιμών άμεσης διάτμησης για το έδαφος M31-3SILT-12KAOL

Δοκιμή		Μέγιστη Διατμητική Τάση, τ_{max} (kPa)	Οριζόντια μετακίνηση, δ (mm)	Δείκτης Πόρων, e	Κρίσιμη Διατμητική Τάση, τ_{cr} (kPa)	Οριζόντια μετακίνηση, δ (mm)	Δείκτης Πόρων, e
M31-3SILT-12KAOL-2A	Πολύ πυκνό	57,37	1,475	0,471	38,79	6,520	0,493
M31-3SILT-12KAOL-2B		91,92	1,488	0,468	65,52	5,638	0,484
M31-3SILT-12KAOL-2C		159,07	2,116	0,416	126,80	5,000	0,429
M31-3SILT-12KAOL-2D		303,46	2,177	0,427	260,11	4,722	0,434
M31-3SILT-12KAOL-3A	Μεσαίας πυκνότητας	37,16	1,309	0,590	35,08	8,373	0,596
M31-3SILT-12KAOL-3B		77,25	1,377	0,524	63,42	9,176	0,529
M31-3SILT-12KAOL-3C		135,27	1,551	0,483	123,46	3,504	0,487
M31-3SILT-12KAOL-5A	Χαλαρό	35,20	7,590	0,583	33,90	9,089	0,580
M31-3SILT-12KAOL-5B		61,61	7,056	0,585	60,63	9,323	0,578
M31-3SILT-12KAOL-5C		123,21	6,672	0,596	121,58	7,352	0,595
M31-3SILT-12KAOL-5D		237,30	4,654	0,556	228,17	8,039	0,545

Πίνακας 6.3: Τιμές της παραμέτρου αντοχής για τα μελετηθέντα εδάφη

Κατάσταση	Αστοχία		Οριακή κατάσταση	
	$\phi'_{max}(\text{°})$	c_{max} (kPa)	$\phi'_{cr}(\text{°})$	c_{cr} (kPa)
M31-1SILT-4KAOL				
Πολύ πυκνό	35,00	20,63	31,42	8,47
Πυκνό	30,89	11,06	28,23	9,20
Μέσης πυκνότητας	28,04	10,47	25,95	13,32
M31-3SILT-12KAOL				
Πολύ πυκνό	35,13	22,1	32,53	4,22
Μέσης πυκνότητας	33,13	8,19	30,96	5,00
Χαλαρό	30,16	6,28	29,14	7,42

Βαθμονόμηση αναλυτικών ζυγών

Το Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας διαθέτει συνολικά τέσσερις ζυγούς στους οποίους πραγματοποιήθηκαν βαθμονομήσεις. Τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων, καθώς και τα στοιχεία των αναλυτικών ζυγών φαίνονται στα παρακάτω σχήματα και πίνακες.

- AND EK – G 12kg



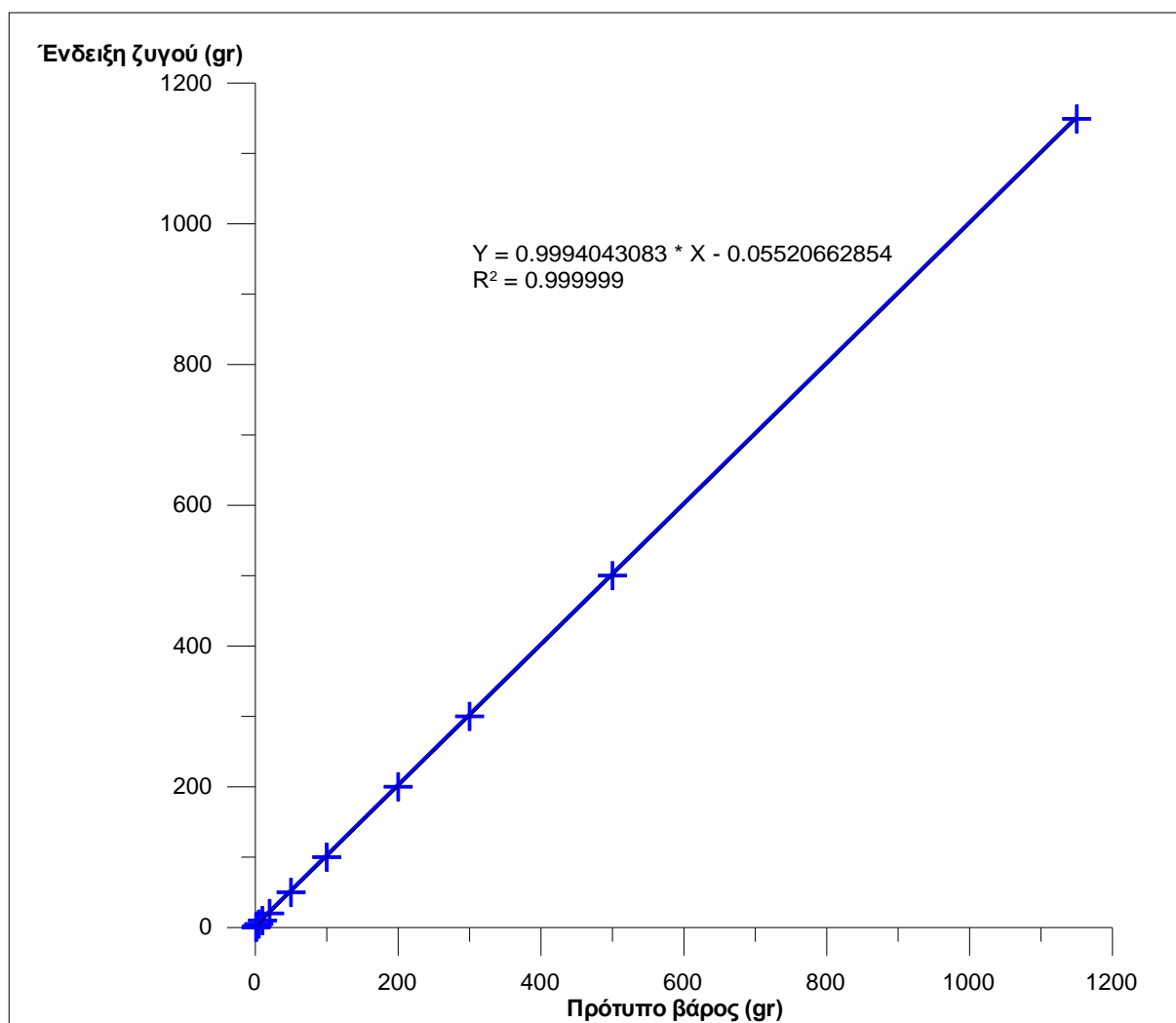
Σχήμα Α.1: Εικόνα του ζυγού AND EK-G

Πίνακας Α.1: Στοιχεία Ζυγού AND EK-G

Μέγιστο Βάρος Ζύγισης	12000g
Ελάχιστο Βάρος Ζύγισης	1g
Επαναληψιμότητα	±1g
Γραμμικότητα	±1g
Καθυστέρηση	2s (περίπου)
Θερμοκρασία Λειτουργίας και Υγρασία	-10°C εως 40°C (14°F - 104°F), RH<85% (προτιμώμενες τιμές λειτουργίας 20°C και RH=50%)
Τροφοδοσία	11 VA

Πίνακας Α.2: Βαθμονόμηση του ζυγού AND EK-G

Πρότυπο Βάρος (g)	Ένδειξη Ζυγού (g)
1150	1149
500	500
300	300
200	200
100	100
50	50
20	20
10	10
5	5
2	2
1	0



Σχήμα Α.2: Βαθμονόμηση ζυγού AND EK – G

- KERN ABJ 220 – 4NM



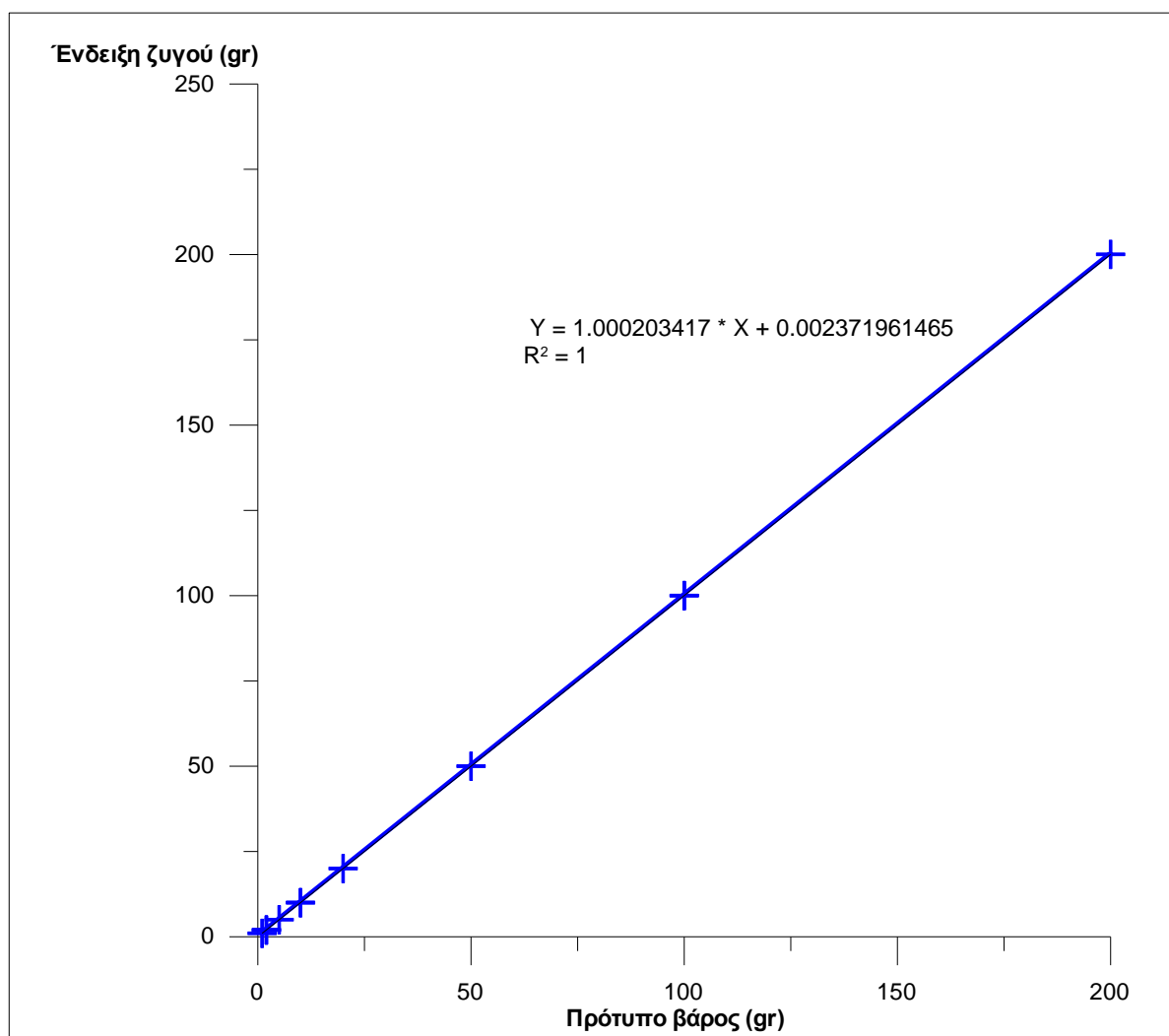
Σχήμα Α.3: Εικόνα του ζυγού KERN ABJ 220 – 4NM

Πίνακας Α.3: Στοιχεία του ζυγού KERN ABJ 220 – 4NM

Ολίσθηση	0,1mg
Μέγιστο Βάρος Ζύγισης	220g
Ελάχιστο Βάρος Ζύγισης	10mg
Διακριτότητα (e)	1mg
Επαναληψιμότητα	0.2mg
Γραμμικότητα	±0.3mg
Καθυστέρηση	3s
Βάρος Βαθμονόμησης	εσωτερικό
Χρόνος Προετοιμασίας	8h
Επιτρεπτές Συνθήκες Περιβάλλοντος	+10°C εως +30°C
Υγρασία Περιβάλλοντος	20-85%
Ηλεκτρική Παροχή	12V, 1.25A
Υψόμετρο	εως 2000m
Χώρος Εγκατάστασης	η συσκευή μπορεί να χρησιμοποιείται μόνο σε εσωτερικούς χώρους

Πίνακας Α.4: Βαθμονόμηση του ζυγού KERN ABJ 220 – 4NM

Πρότυπο Βάρος (g)	Ένδειξη Ζυγού (g)
200	200,0514
100	100,0238
100	100,0021
50	50,0149
20	20,0145
10	10,0031
10	10,0053
5	5,0057
2	2,001
2	2,003
1	1,003



Σχήμα Α.4: Βαθμονόμηση του ζυγού KERN ABJ 220 - 4NM

- KERN PBJ 4200 – 2M



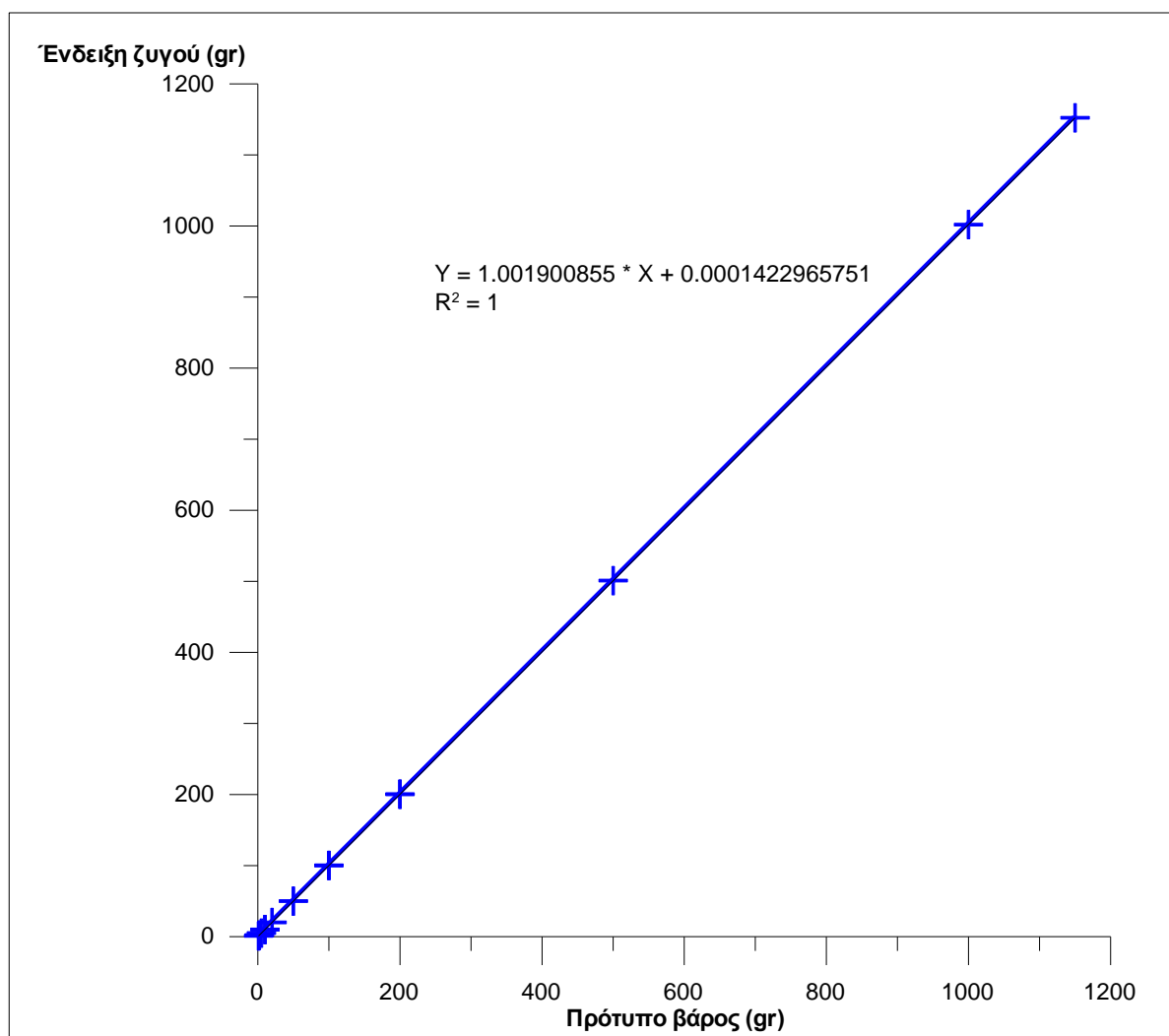
Σχήμα A.5: Εικόνα του ζυγού KERN PBJ 4200 – 2M

Πίνακας A.5: Στοιχεία του ζυγού KERN PBJ 4200 – 2M

Ολίσθηση (d)	0.01g
Μέγιστο Βάρος Ζύγισης (max)	4.2kg
Ελάχιστο Βάρος Ζύγισης (min)	0.5kg
Διακριτότητα (e)	0.1
Κατηγορία Διακρίβωσης	II
Επαναληψιμότητα	0.01g
Γραμμικότητα	±0.02g
Καθυστέρηση	1.5s
Βάρος Βαθμονόμησης	εσωτερικό
Επιτρεπτή Θερμοκρασία Περιβάλλοντος	από +10 °C εως +30 °C
Υγρασία Περιβάλλοντος	max 80%
Εξισορρόπηση Τάσης	12V, 1250 wA
Παρατηρούμε σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες. Ο ζυγός πρέπει να ζεσταθεί για μία ώρα προκειμένου να σταθεροποιηθεί. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας δεν πρέπει να υπάρχουν αντικείμενα στο δίσκο ζύγισης.	

Πίνακας Α.6: Βαθμονόμηση του ζυγού KERN PBJ 4200 - 2M

Πρότυπο Βάρος (g)	Ένδειξη Ζυγού (g)
1150	1152,18
1000	1001,9
500	500,98
200	200,33
200	200,4
100	100,2
100	100,17
50	50,1
20	20,05
10	10,02
10	10,02
5	5,01
2	2
2	2,01
1	1



Σχήμα Α.6: Βαθμονόμηση ζυγού KERN PBJ 4200 - 2M

- Precisa BJ 610C



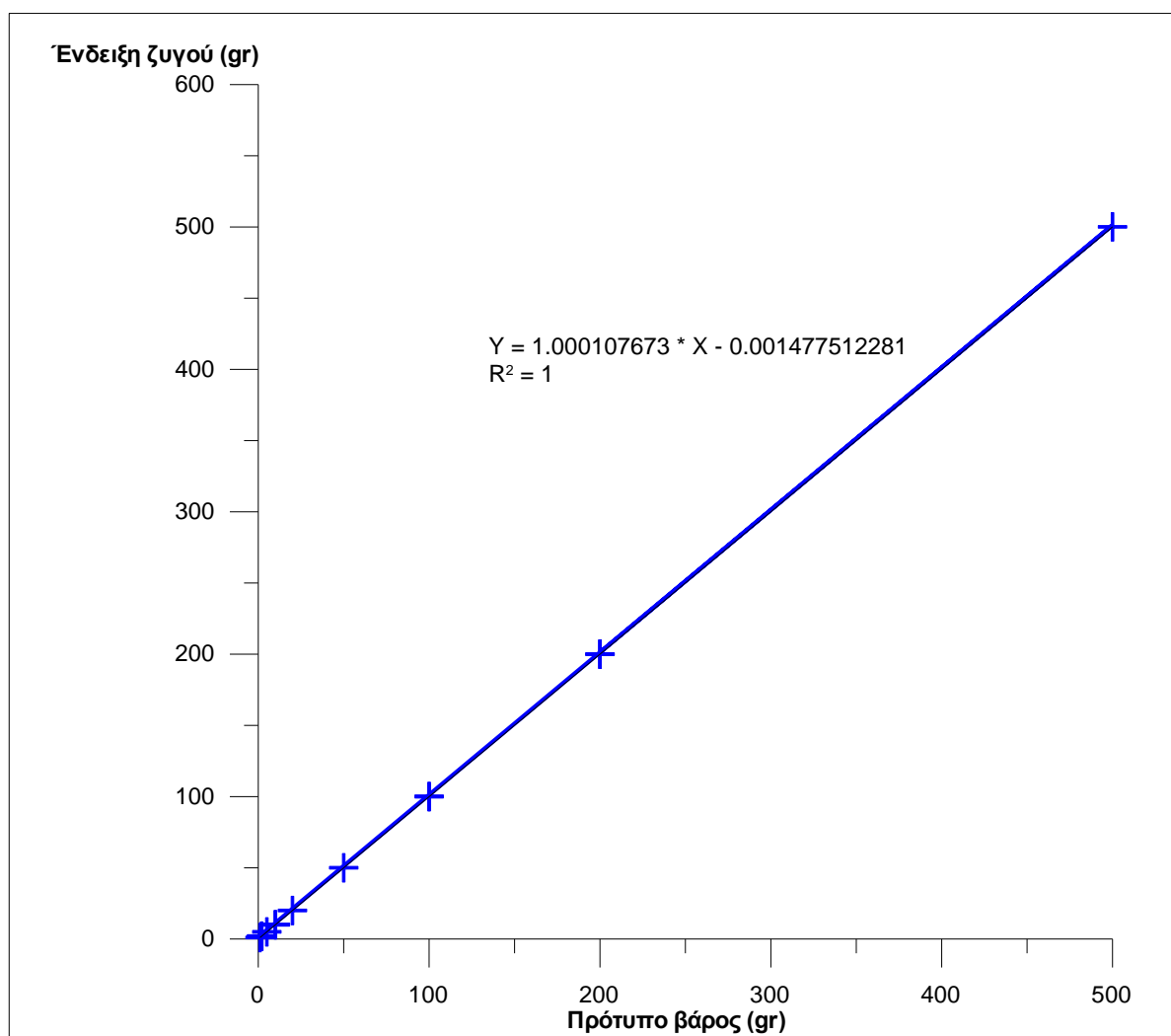
Σχήμα A.7: Εικόνα του ζυγού Precisa BJ 610C

Πίνακας A.7: Στοιχεία του ζυγού Precisa BJ 610C

Μέγιστο Βάρος Ζύγισης (max)	610g
Ελάχιστο Βάρος Ζύγισης (min)	0,5g
Διακριτικότητα (e)	0,1g
Ολίσθηση (d)	0,01g

Πίνακας Α.8: Βαθμονόμηση ζυγού Precisa BJ 610C

Πρότυπο Βάρος (g)	Ένδειξη Ζυγού (g)
200	199,97
200	200,03
500	500,07
100	99,99
100	100,01
50	50,02
20	20,01
10	10
10	10
5	5,01
2	2
2	2
1	1



Σχήμα Α.8: Βαθμονόμηση ζυγού Precisa BJ 610C

Για τις βαθμονομήσεις χρησιμοποιήθηκαν τα πρότυπα βάρη που φαίνονται στον Πίνακα Α.9 και στο Σχήμα Α.9:

Πίνακας Α.9: Πρότυπα βάρη

Πρότυπα Βάρη (gr)	Ποσότητα
500	1
200	1
100	2
50	1
20	1
10	2
5	1
2	2
1	1



Σχήμα Α.9: Πρότυπα βάρη

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Coulomb, C. A., *Essai sur une application des regles maximis et minimus e quelques problems de statique relatives a l' architecture*. Mem. Acad. Roy. Pres. Divers savants. Vol. 7, Paris (1776).
2. Ladd, R., *Preparing Test Specimens Using Undercompaction*, Geotechnical Testing Journal, Vol. 1, No. 1. (1978)
3. Head K. H., *Manual of Soil Laboratory Testing Volume 1: Soil Classification and Compaction Tests*, 1st Edition (1980).
4. Head K. H., *Manual of Soil Laboratory Testing Volume 1: Soil Classification and Compaction Tests*, 3rd Edition (2006).
5. Head K. H., *Manual of Soil Laboratory Testing Volume 2: Permeability, shear strength and compressibility tests*, 2nd Edition (1994).
6. ASTM D 698 – 07 (2007), *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
7. ASTM D 422 – 63 (1998), *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
8. ASTM D 3080 – 98 (1998), *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditons*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
9. ASTM D4254 (2000), *Standard Test Methods for Minmum Index Density and Unit Wright of Soils and Calculation of Relative Densty*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
10. BS 1377: part2 (1990), *Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Classification Tests*, British Standards Institution.
11. BS 1377: part4 (1990), *Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Compaction-related Tests*, British Standards Institution.
12. BS 1377: part7 (1990), *Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Shear Strength Tests (total stress)*, British Standards Institution.
13. Καββαδάς, Μ., (2009), *Στοιχεία Εδαφομηχανικής*, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα
14. Τίκα, Θ. (2006), *Σημειώσεις Εδαφομηχανικής*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

15. Βράννα Α.Δ., (2016), *Εργαστηριακή μελέτη της Μονοτονικής και Ανακοκλικής Συμπεριφοράς Βελτιωμένων Πευστοποιήσιμων Εδαφών*, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
16. Τύρη, Δ.Π., (2016), *Διατμητική Αντοχή Αμμοδών Εδαφών στην Άμεση Διάτμηση*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας