



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

## Βελτίωση μηχανικών χαρακτηριστικών εδαφών με χρήση γεωσυνθετικών: εργαστηριακή διερεύνηση



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΠΥΡΙΔΩΝ Ι. ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων: Ιωάννης Ε. Ζευγώλης,  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**Βελτίωση μηχανικών χαρακτηριστικών  
εδαφών με χρήση γεωσυνθετικών:  
εργαστηριακή διερεύνηση**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΠΥΡΙΔΩΝ Ι. ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων: Ιωάννης Ε. Ζευγώλης,  
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις **20/07/2023**

Ιωάννης Ζευγώλης, Αναπληρωτής Καθ. ΕΜΠ ..... (Υπογραφή)

Παύλος Νομικός, Καθηγητής ΕΜΠ ..... (Υπογραφή)

Ανδρέας Μπενάρδος, Καθηγητής ΕΜΠ ..... (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023



*«...σε όσους έχασαν τη ζωή τους στα Τέμπη  
την τραγική νύχτα της 28 Φεβρουαρίου  
2023...»*



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως θέμα τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς λεπτόκοκκων και αδρόκοκκων εδαφικών υλικών οπλισμένων με γεωύφασμα. Για τις ανάγκες της έρευνας επιλέχθηκαν δυο κλάσματα διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης, με σκοπό την κάλυψη εύρους εδαφικών υλικών. Σύμφωνα με το σύστημα κατάταξης USCS τα χονδρόκοκκα υλικά κατατάχθηκαν ως αργιλώδεις άμμοι, ενώ τα λεπτόκοκκα ως ισχνές αμμώδεις άργιλοι. Το γεωύφασμα που χρησιμοποιήθηκε είναι μη υφαντό και αποτελεί προϊόν γνωστής εταιρίας γεωσυνθετικών. Για τη διερεύνηση της επίδρασης του συγκεκριμένου γεωυφάσματος ως υλικού όπλισης εκτελέστηκαν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών, η ενίσχυση των αργιλωδών άμμων με μια στρώση γεωυφάσματος επιφέρει βελτίωση της αντοχής κατά 24%. Η προσθήκη δεύτερης στρώσης οπλισμού δεν προσδίδει επιπλέον αντοχή, αλλά διαφοροποιεί τον τρόπο αστοχίας, από ψαθυρό σε πλαστικό. Επίσης, η εργαστηριακή έρευνα ανέδειξε προβλήματα στην κατασκευή και μόρφωση δοκιμών (προς εκτέλεση δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης) από τα αμμώδη υλικά και για αυτό τον λόγο δεν εκτελέστηκαν δοκιμές με πυκνότερες διατάξεις οπλισμού. Ιδιαίτερη επίδραση στο μέτρο παραμορφωσιμότητας δεν παρουσιάστηκε. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων σε δοκιμές που έγιναν στην ισχνή αμμώδη άργιλο έδειξε αξιόλογη βελτίωση της αντοχής, ιδιαίτερα κατά την όπλιση με μια και τρεις στρώσεις γεωυφάσματος κατά 13% και 15%, αντίστοιχα. Η επίδραση της δεύτερης και της τέταρτης στρώσης ενίσχυσης είναι ελάχιστη. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η παραμόρφωση κατά την αστοχία δεν επηρεάζεται έντονα με τη χρήση γεωυφασμάτων ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις 1, 2 και 3 στρώσεων γεωυφασμάτων.

**Λέξεις κλειδιά:** γεωσυνθετικά, όπλιση με γεωυφάσματα, δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, αργιλώδεις άμμοι, αμμώδεις άργιλοι, ενίσχυση εδαφών.

# ABSTRACT

## Improvement of mechanical characteristics of soils using geosynthetics: laboratory investigation

By *Christopoulos I. Spyridon*

Thesis Submitted for the Degree

Diploma in Mining and Metallurgical Engineering, School of Mining and Metallurgical Engineering National Technical University of Athens

Supervisor: Dr. Ioannis E. Zevgolis

Associate Professor, NTUA

The present thesis is concerned with the study of the mechanical behaviour of fine and coarse-grained soil materials reinforced with geotextile. Two fractions of different particle size compositions were selected for the purpose of this research, to cover a range of soil materials. According to the USCS classification system, coarse-grained materials were classified as clayey sands, while fine-grained materials were classified as sandy lean clays. The geotextile used is non-woven and is a product of a well-known geosynthetics company. Uniaxial compression tests were performed to investigate the effect of this geotextile as a reinforcement material. According to the results, reinforcing the clay sands with a layer of geotextile fabric results in a 24% improvement in strength. The addition of a second layer of reinforcement does not result to additional strength, but varies the failure mode, from brittle to plastic. Also, the laboratory investigation revealed problems in the creation and forming of specimens, to perform unconfined compression tests, of sandy materials and for this reason tests with denser reinforcement arrangements were not performed. No effect on the deformation modulus was observed. The results of tests carried out on the sandy lean clay showed a remarkable improvement in strength, especially when reinforced with one and three layers of geotextile by 13% and 15%, respectively. The effect of the second and fourth reinforcement layers is negligible. Finally, it was observed that the deformation at failure is not strongly affected using geotextiles especially for the cases of 1, 2 and 3 layers of geotextiles.

**Keywords:** geosynthetics, geotextile reinforcement, uniaxial compression test, clayey sands, sandy lean clays, soil reinforcement.



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνεπάγεται και την περάτωση του κύκλου σπουδών μου στη Σχολή Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Κατά την διάρκεια αυτών των πέντε ετών σφυρηλατήθηκε, ελπίζω, ο μηχανικός τρόπος σκέψης και αποκτήθηκε η ιδιότητα του Μεταλλειολόγου – Μεταλλουργού Μηχανικού, ενώ παράλληλα μου δόθηκε η ευκαιρία να γνωρίσω αντικείμενα και επιστήμες με ξεχωριστό ενδιαφέρον. Ταυτόχρονα, είχα την ευκαιρία να έρθω σε επαφή, μέσα από ανθρώπους που με ενέπνευσαν, με την τέχνη, όπως λένε, της Γεωτεχνικής Μηχανικής η οποία και με κέρδισε, με επακόλουθο την ενασχόληση και την ολοκλήρωση του παρόντος πονήματος.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Ζευγώλη, Αναπληρωτή Καθηγητή του ΕΜΠ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και την παρότρυνση να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον κ. Αναστάσιο Κολλιό εμπνευστή της ιδέας αυτής ο οποίος μου έδωσε, παράλληλα, την ευκαιρία να πραγματοποιήσω το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας στο εργαστήριο της εταιρίας ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΤΕ, μέσα στο οποίο είχα την τύχη να δω και να μάθω πολλά, πέρα από τα πλαίσια της συγκεκριμένης εργαστηριακής διερεύνησης. Ακόμη, ιδιαίτερη αναφορά θα ήθελα να κάνω στον κ. Χάρη Τσιάβο, υπεύθυνο του εργαστηρίου και την κ. Βάσια Πανάγου, έμπειρη γεωλόγο, για την συνεχή στήριξη, τις υποδείξεις, την καθοριστική καθοδήγηση και τις εποικοδομητικές συζητήσεις καθ' όλη την πορεία για την ολοκλήρωση αυτής της σπουδής. Θα ήταν παράληψη να μην ευχαριστήσω τον Γιώργο, το Δημήτρη, τον Κώστα και τη Διονυσία, προσωπικό του εργαστηρίου, οι οποίοι επιμελήθηκαν την εκπαίδευσή μου πάνω στις εργαστηριακές διαδικασίες, μοιράστηκαν μαζί μου χρήσιμες παρατηρήσεις από την εμπειρία τους και με βοήθησαν να επιλύσω οποιαδήποτε τεχνική δυσκολία προέκυψε σε όλο αυτό το διάστημα. Η ανταλλαγή απόψεων που αφορούσαν στο αντικείμενο της έρευνας με τον κ. Αλέξη Δρουδάκη Διδάκτορα Πολιτικό Μηχανικό αποτέλεσε εφαλτήριο για την επιπλέον εμβάθυνση και καλύτερη κατανόηση του αντικειμένου και για αυτό τον λόγο τον ευχαριστώ θερμά. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδελφή για την ηθική υποστήριξη και την κατανόηση που επέδειξαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	vii
ABSTRACT .....	viii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	ix
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	xii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	xv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΑ.....	3
2.1. ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΑ.....	3
2.1.1 Ιστορικά Στοιχεία.....	3
2.1.2 Λειτουργίες και Ιδιότητες των Γεωσυνθετικών.....	4
2.2. ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΑ .....	7
2.2.1 Ιστορικά Στοιχεία.....	7
2.2.2 Μέθοδοι Κατασκευής και Τύποι Γεωυφασμάτων .....	8
2.2.3 Λειτουργίες των Γεωυφασμάτων.....	13
2.2.4 Ιδιότητες των Γεωυφασμάτων .....	16
2.2.5 Σύγκριση Υφαντών και Μη Υφαντών Γεωυφασμάτων .....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	21
3.1. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕ ΑΜΜΟΥΣ.....	21
3.1.1 Στρώσεις Γεωυφάσματος.....	22
3.1.2 Είδος Γεωυφάσματος.....	24
3.1.3 Σχήμα - Μέγεθος Κόκκων .....	25
3.1.4 Πλευρική Τάση.....	26
3.1.5 Μέγεθος Δοκιμίου .....	27
3.1.6 Σύνοψη .....	27

3.2. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕ ΑΡΓΙΛΟΥΣ .....	29
3.2.1 Στρώσεις Γεωυφάσματος.....	29
3.2.2 Είδος Γεωυφάσματος.....	31
3.2.3 Πλευρική Τάση.....	32
3.2.4 Σύνοψη .....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....	35
4.1. ΥΛΙΚΑ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	35
4.1.1 Γεωύφασμα.....	35
4.1.2 Εδαφικά Υλικά .....	37
4.2. ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΟΠΛΙΣΗΣ.....	45
4.2.1 Συμπύκνωση Εδαφικών Υλικών .....	45
4.2.2 Διαδικασία Παρασκευής Δοκιμίων .....	48
4.3. ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	55
5.1. ΑΡΓΙΛΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ.....	56
5.2. ΑΜΜΩΔΗΣ ΙΣΧΝΗ ΑΡΓΙΛΟΣ.....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	78
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΟΣ.....	a
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΣΕ ΑΡΓΙΛΩΔΕΙΣ ΑΜΜΟΥΣ.....	c
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΡΓΙΛΩΔΩΝ ΑΜΜΩΝ.....	i
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΣΕ ΑΜΜΩΔΕΙΣ ΙΣΧΝΕΣ ΑΡΓΙΛΟΥΣ.....	q

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 2.1:</b> Βασικές κατηγορίες γεωσυνθετικών υλικών (Koerner 2012) .....	5
<b>Σχήμα 2.2:</b> Διάδοση γεωφασμάτων (Rankilor 1981).....	8
<b>Σχήμα 2.3:</b> Πρώτες ύλες για την κατασκευή γεωφασμάτων (Koerner 2012).....	9
<b>Σχήμα 2.4:</b> Κατηγορίες πολυμερών ινών (ή νημάτων) στην βιομηχανία των γεωφασμάτων (Koerner 2005) .....	10
<b>Σχήμα 2.5:</b> Παραδείγματα ιστών γεωφασμάτων Μεγέθυνση: (α) x5 , όλα τα υπόλοιπα x30 (Koerner 2012) .....	12
<b>Σχήμα 2.6:</b> Αποτελέσματα δοκιμών κατά Broms (Koerner 2005).....	14
<b>Σχήμα 2.7:</b> Αριστερά: Βαθμός ανισοτροπίας υφαντών και μη υφαντών γεωφασμάτων. Δεξιά: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για γεωφάσματα υφαντά και μη υφαντά (Προφυλλίδης 1985) .....	20
<b>Σχήμα 2.8:</b> Εύρος διαμέτρων πόρων για υφαντά και μη υφαντά γεωφάσματα (Προφυλλίδης 1985).....	20
<b>Σχήμα 3.1:</b> Διατάξεις γεωφάσματος και αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής φόρτισης σε άμμους (Goodarzi & Shahnazari 2019) .....	22
<b>Σχήμα 3.2:</b> Λόγοι εκτροπικών τάσεων οπλισμένων άμμων με 3 και 5 στρώσεις γεωφάσματος (Markou 2006).....	25
<b>Σχήμα 3.3:</b> Λόγος εκτροπικών τάσεων-πλευρική τάση, για δοκίμια με μια, δυο και τρεις στρώσεις γεωφάσματος, R1, R2 και R3 αντίστοιχα (Goodarzi & Shahnazari 2019) .....	26
<b>Σχήμα 3.4:</b> Επίδραση του μεγέθους δοκιμίου (a) στη μέγιστη εκτροπική τάση και (b) στη παραμόρφωση κατά τη θραύση ενισχυμένης άμμου (Markou & Droudakis 2007) .....	27
<b>Σχήμα 3.5:</b> Συσχέτιση μεταξύ αντοχή δοκιμίων οπλισμένων με μία και πέντε στρώσεις γεωφάσματος (Droudakis & Markou 2016).....	30
<b>Σχήμα 3.6:</b> Επίδραση πλευρικής τάσης σε οπλισμένα δοκίμια με πέντε στρώσεις για διαφορετικά γεωφάσματα (Droudakis & Markou 2016) .....	32
<b>Σχήμα 4.1:</b> Φωτογραφία γεωφάσματος MYPEC-Vlies 75G .....	36
<b>Σχήμα 4.2:</b> Γενική άποψη δανειοθαλάμων στην περιοχή του Θριασίου Πεδίου (06/01/2022).....	37
<b>Σχήμα 4.3:</b> Κοντινή άποψη δανειοθαλάμων Αριστερά: Αδρόκοκκα (30/03/2023) Δεξιά: Λεπτόκοκκα (2019).....	38

<b>Σχήμα 4.4:</b> Αριστερά: υλικό κατά την άφιξη εργαστήριο Μέση: ζυγός ακριβείας 0.001g Δεξιά: κλίβανος εργαστηρίου.....	39
<b>Σχήμα 4.5:</b> α) Εξοπλισμός προσδιορισμού ορίου υδαρότητας β) Έδαφος έτοιμο προς χάραξη γ) Βώλος έτοιμος για κυλινδρισμό δ) Ραβδίσκοι που αρχίζουν να θρυμματίζονται, όριο πλαστικής κατάστασης.....	40
<b>Σχήμα 4.6:</b> α) Ξηρό υλικό μετά από τετραμερισμό β) Πλύσιμο υλικού γ) Διάταξη κοκκομέτρησης δ) Πλυμένο και ξηρό υλικό έτοιμο για κοκκομέτρηση.....	41
<b>Σχήμα 4.7:</b> Κοκκομετρική καμπύλη χονδρόκοκκου υλικού.....	42
<b>Σχήμα 4.8:</b> Διαδικασία κοσκίνισης χονδρόκοκκου υλικού από το κόσκινο No.10 (<2mm).....	43
<b>Σχήμα 4.9:</b> Κοκκομετρική καμπύλη χονδρόκοκκου (<2mm) υλικού μετά την κοσκίνιση (Αργιλώδης Άμμος) .....	44
<b>Σχήμα 4.10:</b> Κοκκομετρική καμπύλη λεπτόκοκκου υλικού (Αμμώδης Ισχνή Άργιλος) .....	44
<b>Σχήμα 4.11:</b> Διαδικασία προσδιορισμού βέλτιστης πυκνότητας Proctor α) Ζύγιση κατάλληλης ποσότητας υλικού β) Ογκομέτρηση επιλεγμένης ποσότητας νερού γ) Ενυδάτωση δείγματος (πριν την ανάδευση) δ) Ομοιόμορφα ενυδατωμένο δείγμα μετά την ανάδευση στ) Κόπανος κατά την διαδικασία συμπίκνωσης ζ) Διαμόρφωση τελικής επιφάνειας υλικού, πριν τη ζύγιση .....	46
<b>Σχήμα 4.12:</b> Καμπύλες Proctor α) Αργιλώδης Άμμος και β) Αμμώδης Ισχνή Άργιλος .....	47
<b>Σχήμα 4.13:</b> Συσκευή συμπίκνωσης.....	48
<b>Σχήμα 4.14:</b> Διατάξεις γεωφασμάτων στην Αργιλώδη Άμμο.....	49
<b>Σχήμα 4.15:</b> Διατάξεις γεωφασμάτων στην Αμμώδη Ισχνή Άργιλο .....	51
<b>Σχήμα 4.16:</b> α) Δοκίμιο πριν την μόρφωση και εργαλεία μόρφωσης β,γ και δ) Πλάγια όψη δοκιμίων μη οπλισμένων, οπλισμένων με μια και με δυο στρώσεις γεωφάσματος, αντίστοιχα, πριν και μετά την μόρφωση ε) Κάτοψη διαμορφωμένου και μη δοκιμίου στ) Επίπεδη άνω βάση δοκιμίου .....	53
<b>Σχήμα 4.17:</b> Μηχανή μονοαξονικής θλίψης TRIPLEX MULTI-TESTER 5011 .....	54
<b>Σχήμα 5.1:</b> Αριστερά: Δοκίμιο με μια στρώση γεωφάσματος Δεξιά: Δοκίμιο με δυο στρώσεις γεωφάσματος .....	57
<b>Σχήμα 5.2:</b> Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονική θλίψης Αργιλώδους Άμμου (ST, ST- I και ST-II).....	59

<b>Σχήμα 5.3:</b> Δοκίμια με επιφάνειες αστοχίας (πριν την θραύση) η οποίες δημιουργήθηκαν κατά την διαδικασία της διαμόρφωσης .....	60
<b>Σχήμα 5.4:</b> Παραμορφώσεις κατά την αστοχία Αργιλώδους Άμμου (ST, ST-I και ST-II) .....	61
<b>Σχήμα 5.5:</b> Ψαθυρή αστοχία δοκιμίου (αριστερά) με παράλληλη αστοχία (σχίσσιμο) γεωφάσματος (δεξιά).....	62
<b>Σχήμα 5.6:</b> Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας Αργιλώδους Άμμου (ST, ST-I και ST-II).....	63
<b>Σχήμα 5.7:</b> Επίδραση αριθμού γεωφασμάτων σε κανονικοποιημένες καμπύλες για την Αργιλώδη Άμμο .....	64
<b>Σχήμα 5.8:</b> Μεσοσταθμικές καμπύλες τάσης παραμόρφωσης Αργιλώδους Άμμου .	65
<b>Σχήμα 5.9:</b> Επιλογή καμπυλών τάσεων – παραμορφώσεων.....	66
<b>Σχήμα 5.10:</b> Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης Αμμώδους Ισχνής Αργίλου (II-3, II-A1, II-A2, II-A3, II-A4) .....	70
<b>Σχήμα 5.11:</b> Παραμορφώσεις κατά την αστοχία Αμμώδους Ισχνής Αργίλου (II-3, II-A1, II-A2, II-A3, II-A4) .....	72
<b>Σχήμα 5.12:</b> Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας Αμμώδους Ισχνής Αργίλου (II-3, II-A1, II-A2, II-A3, II-A4).....	73
<b>Σχήμα 5.13:</b> Μέσο μέτρο ελαστικότητας Αμμώδους Ισχνής Αργίλου (II-3, II-A1, II-A2, II-A3, II-A4).....	73

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 2.1:</b> Κύριες λειτουργίες βασικών τύπων γεωσυνθετικών (Ατματζίδης, Koerner 2012) .....	6
<b>Πίνακας 2.2:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας ιδιοτήτων γεωυφασμάτων, ανά κατηγορία (Ατματζίδης, Koerner 2005).....	17
<b>Πίνακας 2.3:</b> Σχέσεις λειτουργιών και ιδιοτήτων γεωυφασμάτων (Ατματζίδης).....	19
<b>Πίνακας 3.1:</b> Επίδραση αριθμού σπλισμών σε άμμο (Goodarzi & Shahnazari 2019) .....	23
<b>Πίνακας 3.2:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε αργιλικά εδάφη ενισχυμένα με 1,2 και 3 στρώσεις γεωυφάσματος (Noorzad & Mirmoradi 2010).....	31
<b>Πίνακας 4.1:</b> Μέτρο εφελκυσμού γεωυφάσματος MYPEC-Vlies 75G, για διάφορες τιμές παραμόρφωσης.....	36
<b>Πίνακας 4.2:</b> Σύνολο ιδιοτήτων γεωυφάσματος MYPEC-Vlies 75G.....	36
<b>Πίνακας 4.3:</b> Όρια Atterberg χονδρόκοκκου υλικού .....	41
<b>Πίνακας 4.4 :</b> Φυσικές ιδιότητες εδαφικών υλικών .....	43
<b>Πίνακας 4.5:</b> Συγκεντρωτικός πίνακας βέλτιστης υγρασίας συμπύκνωσης w και ξηρού φαινομένου βάρους $\gamma_d$ .....	46
<b>Πίνακας 4.6:</b> Ενέργεια Συμπύκνωσης .....	50
<b>Πίνακας 5.1:</b> Αποτελέσματα δοκιμών Αργιλώδους Άμμου: αντοχή, παραμόρφωση (κατά την αστοχία) και παραμορφωσιμότητα .....	58
<b>Πίνακας 5.2:</b> Ομαδοποιημένα αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης Αργιλώδους Άμμου (αντοχή-στατιστική επεξεργασία) .....	60
<b>Πίνακας 5.3:</b> Εύρος τιμών συντελεστή μεταβλητότητας (COV %), για την ανοχή, την παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας (Αργιλώδης Άμμος).....	67
<b>Πίνακας 5.4:</b> Αποτελέσματα δοκιμών Αμμώδους Ισχνής Αργίλου: αντοχή, παραμόρφωση (κατά την αστοχία) και παραμορφωσιμότητα .....	68
<b>Πίνακας 5.5:</b> Ομαδοποιημένα αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης Αμμώδους Ισχνής Αργίλου (αντοχή-στατιστική επεξεργασία).....	70
<b>Πίνακας 5.6:</b> Εύρος τιμών συντελεστή μεταβλητότητας (COV %), για ανοχή, παραμόρφωση και μέτρο ελαστικότητας (Αμμώδης Ισχνή Αργίλος).....	74
<b>Πίνακας 5.7:</b> : Αποτελεσματικότητα δοκιμών Αργιλώδους Άμμου: αντοχή, παραμόρφωση (κατά την αστοχία) και παραμορφωσιμότητα .....	74

**Πίνακας 5.8:** Αποτελεσματικότητα δοκιμών Αμμώδους Ισχνής Αργίλου: αντοχή, παραμόρφωση (κατά την αστοχία) και παραμορφωσιμότητα ..... 74





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια από τις επιστημονικές περιοχές η οποία ανέκαθεν απασχολούσε τους γεωτεχνικούς μηχανικούς και αποτελεί πεδίο μελέτης και έρευνας είναι η βελτίωση των συνθηκών έδρασης των τεχνικών έργων σε προβληματικά εδάφη. Τα παλαιότερα χρόνια υπήρχε η ευχέρεια να παρακαμφθεί το ακατάλληλο έδαφος και η θεμελίωση να πραγματοποιηθεί σε περιοχή με τις επιθυμητές ιδιότητες. Την σύγχρονη εποχή, η αδυναμία εξεύρεσης ελεύθερων χώρων και η σημαντική αύξηση του κόστους χρήσεων γης οδήγησαν σε θεμελίωση πολλών και μάλιστα σημαντικών έργων πάνω σε εδάφη προβληματικά. Πολλοί είναι οι τρόποι αντιμετώπισης του προβλήματος, ένας εκ των οποίων είναι η χρήση γεωυφασμάτων, με σκοπό την βελτίωση της φέρουσας ικανότητας των μη κατάλληλων εδαφών. Πλήθος εφαρμογών, με την χρήση αυτών των υλικών, έχουν πραγματοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία, καθώς κυρίαρχα πλεονεκτήματά τους αποτελούν το πλήθος των προϊόντων που υπάρχουν διαθέσιμα στο εμπόριο και των ιδιοτήτων τους καθώς και η διατήρηση των ιδιοτήτων τους στο πέρασμα του χρόνου.

Στόχο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς αδρόκοκκων και λεπτόκοκκων εδαφών, ενισχυμένων με συγκεκριμένο γεωύφασμα, μέσω δοκιμών μονοαξονικής θλίψης. Παράλληλα, η συγκεκριμένη ερευνητική προσπάθεια αποτελεί σπουδή πάνω στις θεμελιώδεις έννοιες και μεγέθη που διέπουν την επιστήμη της εδαφομηχανικής, καθώς η τριβή, με τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο εργαστήριο, συνιστά αναπόσπαστο κομμάτι στη διαμόρφωση της αντίληψης του μηχανικού. Το συγκεκριμένο θέμα επιλέχθηκε λαμβάνοντας υπόψιν την μέχρι σήμερα προσφορά των προϊόντων αυτών στον γεωτεχνικό κλάδο, αλλά και ελπίζοντας για την ακόμα μεγαλύτερη συμβολή τους στο μέλλον.

Η παρούσα Διπλωματική εργασία περιλαμβάνει 6 Κεφάλαια και Δ Παραρτήματα.

Στο Κεφάλαιο 2 παρατίθενται ιστορικά στοιχεία αλλά και το θεμελιώδες θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με το αντικείμενο των γεωσυνθετικών υλικών. Ακολούθως, γίνεται αναφορά στα αντίστοιχα στοιχεία που αφορούν τα γεωυφάσματα. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται εκτενώς ο τρόπος κατασκευής τους, οι λειτουργίες και οι ιδιότητές τους.

Τέλος, αναφέρονται οι βασικότερες διαφορές των δυο τεχνοτροπιών κατασκευής των γεωυφασμάτων, των υφαντών και των μη υφαντών.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι πληροφορίες που προέκυψαν από την βιβλιογραφική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής της Διπλωματικής εργασίας. Συνοψίζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά του σύνθετου υλικού (έδαφος + γεωύφασμα) κατά την όπλισή του. Γίνεται αναφορά σε μελέτες αδρόκοκκων αλλά και λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών, ενισχυμένων με πλήθος γεωυφασμάτων διαφορετικών χαρακτηριστικών.

Το σύνολο των εργαστηριακών διαδικασιών που ακολουθήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας για την μηχανική συμπεριφορά των οπλισμένων εδαφών με γεωύφασμα παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4. Αρχικά, δίδονται οι απαραίτητες πληροφορίες και ιδιότητες του γεωυφάσματος που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών. Στην συνέχεια, περιγράφονται οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων, των εδαφικών υλικών που μελετήθηκαν και η κατάταξή τους και παρουσιάζονται τα αποτελέσματά τους. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι εργαστηριακές διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την συμπύκνωση, την όπλιση και την τελική διαμόρφωση των δοκιμών. Τέλος, δίνονται πληροφορίες για το μηχάνημα μονοαξονικής θλίψης, στο οποίο εκτελέστηκαν οι δοκιμές, και οι παράμετροι που επιλέχθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και καταγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία και την ανάλυση των αποτελεσμάτων της εργαστηριακής διερεύνησης και από τις παρατηρήσεις που έγιναν στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 γίνεται σύνοψη των κύριων συμπερασμάτων που προκύψαν από την ανάλυση του προηγούμενου Κεφαλαίου. Σε μορφή Παραρτημάτων δίδονται τα διαγράμματα από τις δοκιμές εφελκυστικής αντοχής που είχαν πραγματοποιηθεί από την κατασκευάστρια εταιρία των γεωυφασμάτων, αλλά και τα πρωτογενή αποτελέσματα που καταγράφηκαν από όλες τις εργαστηριακές δοκιμές, που εκτελέστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ ΜΕ ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΑ

## 2.1. ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΑ

### 2.1.1 Ιστορικά Στοιχεία

Από τα αρχαία χρόνια έγιναν προσπάθειες για ενίσχυση του εδάφους, με πρόσμειξη υλικών που θα βελτίωναν την συμπεριφορά του. Με την εξέλιξη του τεχνολογικού πολιτισμού, τα υλικά και οι τεχνικές που εφαρμόζονταν απέκτησαν πιο συστηματικό χαρακτήρα, όμως, λόγω της φύσης των υλικών αυτών (κυρίως ξύλα και θάμνοι), η μικρή διάρκεια ζωής τους, εξαιτίας της φθοράς, αποτελούσε πρόδηλο πρόβλημα. Παρόλα τα εμπόδια, η όπλιση του εδάφους συνεχίζεται ως τις μέρες μας αποτελώντας βασικό εργαλείο στα χέρια του μηχανικού. Στη σύγχρονη εποχή η πρώτη προσπάθεια για ενίσχυση έγινε το 1926 από την Υπηρεσία Αυτοκινητοδρόμων της Νότιας Καρολίνας στις Η.Π.Α. με την χρήση υφάσματος για ενίσχυση έργων οδοποιίας. Μέχρι το ύφασμα να φθαρεί, τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ικανοποιητικά. Κατά τις δεκαετίες του 1950 και 1960 έγιναν τα πρώτα βήματα για την ανάπτυξη νέων υλικών και την ένταξή τους στην αγορά (Koerner 2012). Στις αρχές της δεκαετία του 1970 ο κατάλογος των υλικών, που χρησιμοποιούσε ο Πολιτικός Μηχανικός στις εφαρμογές του, εμπλουτίστηκε ακόμα περισσότερο. Στις μέρες μας υπάρχει μεγάλη ποικιλία υλικών, τα οποία εξυπηρετούν ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών και έχουν γίνει αποδεκτά τόσο από τον κατασκευαστικό όσο και από τον επιστημονικό κόσμο. Αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που σχετίζονται με τα εδάφη, τα πετρώματα και τα υπόγεια νερά και ως επακόλουθο για τον χαρακτηρισμό τους χρησιμοποιείται το πρόθεμα «Γεω». Παράλληλα, για την παραγωγή αυτών των νέων υλικών, οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται προέρχονται από τη βιομηχανία των πλαστικών, δηλαδή ανθρωπογενών προϊόντων, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται ως «συνθετικά». Ο τελικός όρος «Γεωσυνθετικά υλικά» αναφέρεται σε αυτά τα υλικά, τα οποία σε συνδυασμό με τα γεωυλικά, χρησιμοποιούνται σε γεωτεχνικές ή συναφείς κατασκευές (Ατματζίδης).

## 2.1.2 Λειτουργίες και Ιδιότητες των Γεωσυνθετικών

Σύμφωνα με την ASTM (σύμφωνα με το πρότυπο D4439), ένα γεωσυνθετικό ορίζεται ως εξής:

*«geosynthetic, n—a planar product manufactured from polymeric material used with soil, rock, earth, or other geotechnical engineering related material as an integral part of a human-made project, structure, or system.»*

**ΓΕΩΣΥΝΘΕΤΙΚΟ**, επ—ένα επίπεδο προϊόν κατασκευασμένο από πολυμερές υλικό που χρησιμοποιείται με χώμα, βράχο, έδαφος ή άλλο υλικό σχετικό με τη γεωτεχνική μηχανική, ως αναπόσπαστο μέρος ενός ανθρωπογενούς έργου, κατασκευής ή συστήματος.

Τα γεωσυνθετικά υλικά γνώρισαν ταχεία ανάπτυξη και εξακολουθούν να αναπτύσσονται τόσο σε αριθμό όσο και σε ποικιλία. Πολλοί είναι οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτό. Μεταξύ αυτών αναφέρονται (Koerner 2012):

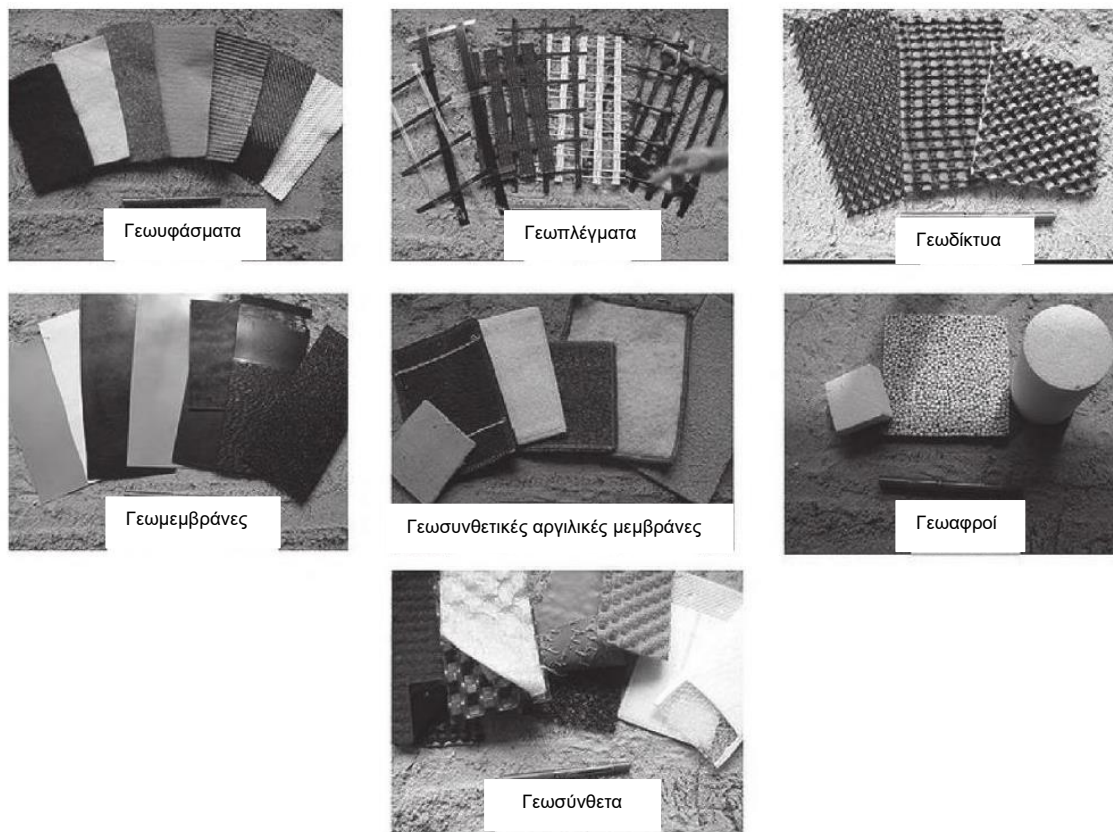
- Είναι αξιόπιστα, καθώς παράγονται σε ελεγχόμενο εργοστασιακό περιβάλλον.
- Τοποθετούνται γρήγορα.
- Αντικαθιστούν το έδαφος ή άλλα κατασκευαστικά υλικά, σε περιπτώσεις δύσκολου σχεδιασμού ή σε περιπτώσεις έλλειψης πρώτων υλών.
- Έχουν ανταγωνιστικό κόστος σε σχέση με εδαφικά ή άλλα κατασκευαστικά υλικά που αντικαθιστούν ή ενισχύουν.
- Έχουν οδηγήσει σε σχεδιασμούς που μέχρι τώρα ήταν αδύνατον να γίνουν.
- Υπάρχει μεγάλο εύρος και ποικιλία υλικών στην αγορά και είναι εύκολα προσβάσιμα.
- Υπάρχουν δεδομένα για αυτά τόσο από εργαστηριακές δοκιμές όσο και από πραγματικές περιπτώσεις.
- Ενσωματώθηκαν στην αγορά μέσω γενικών προδιαγραφών.
- Το ανθρακικό αποτύπωμα είναι πολύ μικρότερο από αυτό των άλλων τεχνικών.

Οι τομείς, στους οποίους τα γεωσυνθετικά υλικά έχουν εισχωρήσει και έχουν αποκτήσει μεγάλη αποδοχή και ευρύ πεδίο εφαρμογών, είναι ο συγκοινωνιακός, ο γεωτεχνικός, ο περιβαλλοντικός, ο υδραυλικός και γενικότερα κάθε δραστηριότητα που σχετίζεται με το έδαφος, τα πετρώματα και τα υπόγεια ύδατα αποτελεί πεδίο εφαρμογής αυτών των υλικών.

Η κατάταξη των γεωσυνθετικών μπορεί να γίνει σε επτά βασικές κατηγορίες (Koerner 2012):

1. Γεωφάσματα ( Geotextiles)
2. Γεωπλέγματα (Geogrids)
3. Γεωδίκτυα (Geonets)
4. Γεωμεμβράνες (Geomembranes)
5. Γεωσυνθετικές Αργιλικές Μεμβράνες (Geosynthetic Clay Liners-GCLs)
6. Γεωαφροί (Geofoam)
7. Γεωσύνθετα (Geocomposites)

Παράδειγμα υλικών που ανήκουν σε αυτές τις κατηγορίες φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



**Σχήμα 2.1:** Βασικές κατηγορίες γεωσυνθετικών υλικών (Koerner 2012)

Τα γεωσυνθετικά επιτελούν πέντε κύριες λειτουργίες: (1) διαχωρισμό, (2) ενίσχυση-όπλιση, (3) φιλτράρισμα, (4) στράγγιση και (5) φραγμό (υγρού ή/και αερίου).

Η χρήση αυτών αποσκοπεί σε δυο κύρια αποτελέσματα: (1) την καλύτερη απόδοση (π.χ. χωρίς φθορά ή διαρροή του υλικού) και (2) την μεγαλύτερη οικονομία σε σχέση με τα συμβατικά υλικά (είτε μέσω μικρότερου κόστους είτε μέσω μεγαλύτερης αντοχής και χρόνου ζωής, μειώνοντας το κόστος συντήρησης και αντικατάστασης).

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται η κύρια λειτουργία που μπορεί να επιτελέσει το κάθε γεωσυνθετικό. Αξίζει να σημειωθεί ότι τις περισσότερες φορές (αν όχι όλες), κατά την χρήση του, το γεωσυνθετικό επιτελεί περισσότερες της μιας λειτουργίες.

*Πίνακας 2.1: Κύριες λειτουργίες βασικών τύπων γεωσυνθετικών (Ατματζίδης, Koerner 2012)*

Κατηγορία Γεωσυνθετικών	Κύρια Λειτουργία				
	Διαχωρισμός	Όπλιση	Φιλτράρισμα	Στράγγιση	Φραγμός
Γεωυφάσματα	•	•	•	•	•*
Γεωπλέγματα		•			
Γεωδίκτυα				•	
Γεωμεμβράνες					•
Γεωσυνθετικές Αργιλικές Μεμβράνες					•
Γεωαφροί	•				
Γεωσύνθετα	•	•	•	•	•

\*Μόνο μετά από εμποτισμό με στεγνωτικό υλικό.

## **2.2. ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΑ**

*«Γεωυφάσματα είναι διαπερατά, συνήθως συνθετικά, υλικά που ομοιάζουν με υφάσματα και ενσωματώνονται σε μια κατασκευή σε συνδυασμό με γεωυλικά με στόχο τη βελτίωση της συμπεριφοράς ή τη μείωση του κόστους.»*

Ορισμός σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D4439, προσαρμοσμένος κατά Koerner (1990).

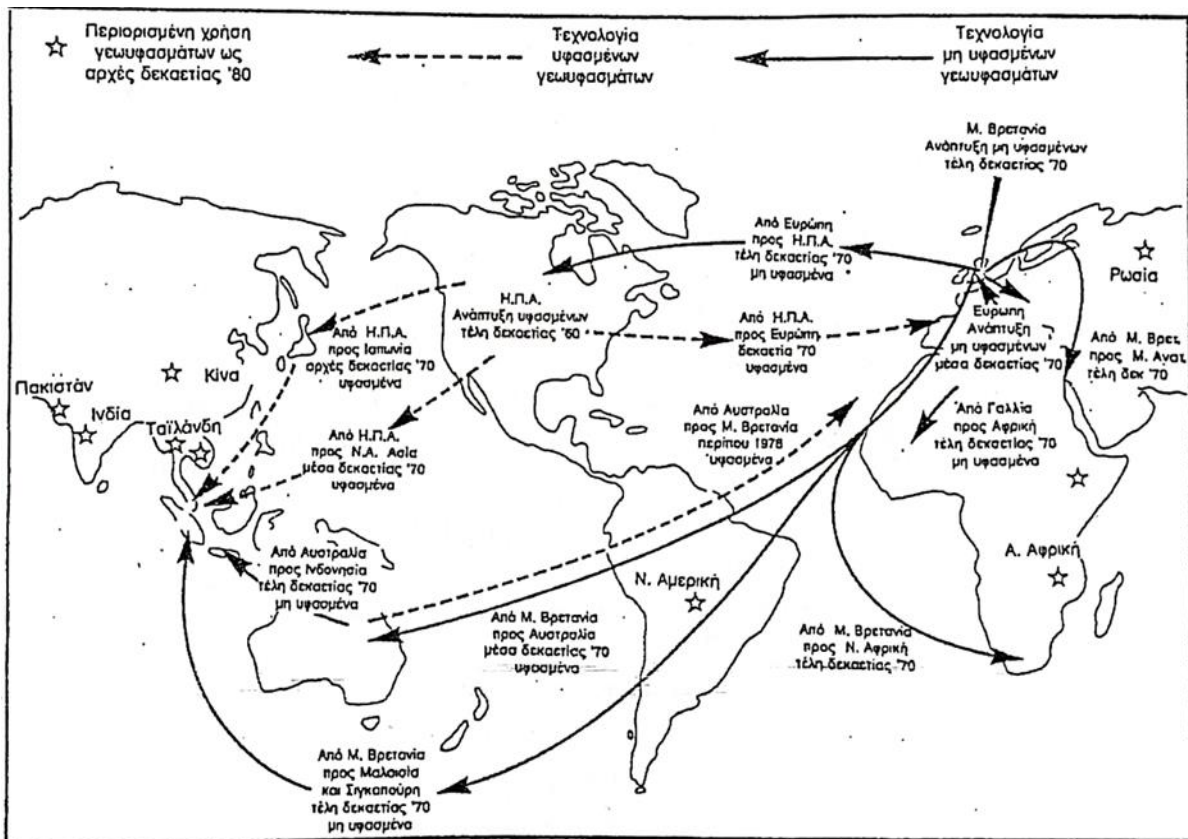
### **2.2.1 Ιστορικά Στοιχεία**

Οι πρώτες εφαρμογές των γεωυφασμάτων όπως είναι γνωστά σήμερα, δηλαδή κατασκευασμένα από ίνες πολυμερών, έγιναν στα μέσα της δεκαετίας του 1950. Στις Η.Π.Α., αρχικά, προορίζονταν για να αποτελέσουν γεωτεχνικά φίλτρα ως εναλλακτική λύση αντί για κοκκώδη υλικά, όμως βρήκαν εφαρμογή και ως υλικά για τον περιορισμό ή την αποτροπή της διάβρωσης. Χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι τύποι από υφαντά προϊόντα, τα οποία όλα χαρακτηρίζονταν από ένα σχετικά υψηλό ποσοστό ελεύθερης επιφάνειας (από 6 έως 30%). Διαπιστώθηκε δε ότι τα γεωυφάσματα έπρεπε να έχουν ικανοποιητική διαπερατότητα, να συγκρατούν το εδαφικό υλικό και, παράλληλα, να έχουν επαρκή αντοχή και παραμορφωσιμότητα. Με αυτό τον τρόπο θεμελιώθηκαν οι αρχές για την χρήση γεωυφασμάτων σε εφαρμογές φίλτρων (Koerner 2012).

Προς το τέλος της δεκαετίας του 1960 η εταιρία Rhone-Poulenc, στη Γαλλία, ξεκίνησε να παράγει μη υφαντά βελονοδιάτρητα γεωυφάσματα, στοχεύοντας σε εντελώς διαφορετικές εφαρμογές. Έμφαση δόθηκε στην ενίσχυση ή τον διαχωρισμό εδαφικών υλικών σε δρόμους χωρίς επίστρωμα, σε αναχώματα σιδηροδρομικών γραμμών και σε χωμάτινα φράγματα ή αναχώματα. Η κύρια λειτουργία σε αυτές τις εφαρμογές ήταν ο διαχωρισμός ή/και η ενίσχυση. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι τα μη υφαντά προϊόντα, με το σχετικά μεγάλο πάχος και την υφή τσόχας, μπορούσαν να μεταφέρουν νερό στην επιφάνειά τους και παράλληλα να λειτουργήσουν σαν στραγγιστήρια. Στις μέρες μας στον όρο γεωύφασμα ενσωματώνονται όλες οι προαναφερθείσες λειτουργίες, όταν το προϊόν τοποθετείται σε εδαφική μάζα (Ατματζίδης). Η παγκόσμια διάδοση των διαφόρων τύπων γεωυφασμάτων φαίνεται στο Σχήμα 2.2 (Rankilor 1981).

Τέλος, άξιο μνείας είναι ότι η μαζική παραγωγή και διάδοση πληροφοριών στον τομέα των γεωυφασμάτων προωθήθηκε αρχικά από τις κατασκευάστριες εταιρίες και, στη συνέχεια, η προσπάθεια αυτή ακολουθήθηκε από τις κρατικές υπηρεσίες, τους





Σχήμα 2.2: Διάδοση γεωυφασμάτων (Rankilor 1981)

εργολάβους, τους μηχανικούς, την επιστημονική και ερευνητική κοινότητα. Το αποκορύφωμα αυτής της δραστηριότητας αποδεικνύεται από τους δυο Οργανισμούς με μακροχρόνια δράση, τον Διεθνή Σύνδεσμο Γεωσυνθετικών Υλικών (International Geosynthetic Society-IGS) και το Ινστιτούτο Γεωσυνθετικών Υλικών (Geosynthetic Institute -GSI) (Koerner 2012).

### 2.2.2 Μέθοδοι Κατασκευής και Τύποι Γεωυφασμάτων

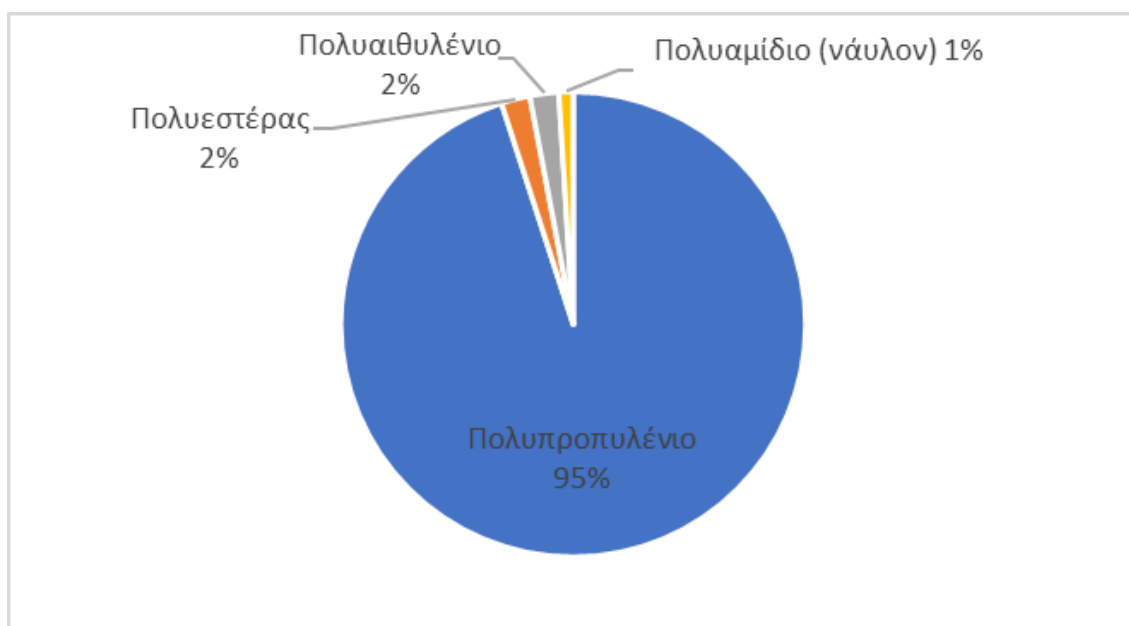
Η επιρροή των κατασκευαστών γεωυφασμάτων θεωρείται εκτεταμένη και θετική στον κλάδο και σε γενικές γραμμές οι ίδιοι έχουν καθορίσει τις τεχνικές παραγωγής και τους τύπους των προϊόντων. Γενικά, κάθε κατασκευαστής παράγει είτε ένα μόνο τύπο γεωυφάσματος για γενική χρήση (που διατίθεται σε διαφορετικά πάχη ή μάζα ανά μονάδα επιφάνειας), το οποίο απευθύνεται σε πιο εκτεταμένο πελατολόγιο, είτε μια ποικιλία προϊόντων, που το καθένα προορίζεται για συγκεκριμένη εφαρμογή. Σε κάθε περίπτωση, τρία είναι τα στοιχεία εκείνα τα οποία καθορίζουν την μεγάλη ποικιλία προϊόντων που υπάρχει στο εμπόριο: (1) το πολυμερές που χρησιμοποιείται σαν

πρώτη ύλη, (2) ο τύπος του νήματος και (3) η μέθοδος κατασκευής του τελικού προϊόντος (Ατματζίδης, Koerner 2012).

### Τύπος Πολυμερούς

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των γεωφασμάτων είναι το πολυπροπυλένιο, ο πολυεστέρας, το πολυαιθυλένιο και το πολυαμίδιο (νάυλον). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, το μεγαλύτερο μέρος κατασκευάζεται από πολυπροπυλένιο, σε ποσοστό 95%.

Αξίζει να σημειωθεί ότι από τα τέσσερα υλικά το πολυπροπυλένιο και το πολυαιθυλένιο έχουν μικρότερο ειδικό βάρος από το νερό, ότι ο πολυεστέρας απορροφά την λιγότερη ποσότητα υγρασίας και ότι, γενικά, όλα τα πολυμερή έχουν σχετικά υψηλό σημείο τήξης. Ευρύ φάσμα πληροφοριών σχετικά με την πρώτη ύλη παρέχεται από όλους τους κατασκευαστές, καθώς οι τιμές αυτές είναι σημαντικές κατά τον σχεδιασμό, αλλά και κατά την χρήση των τελικών γεωφασμάτων.

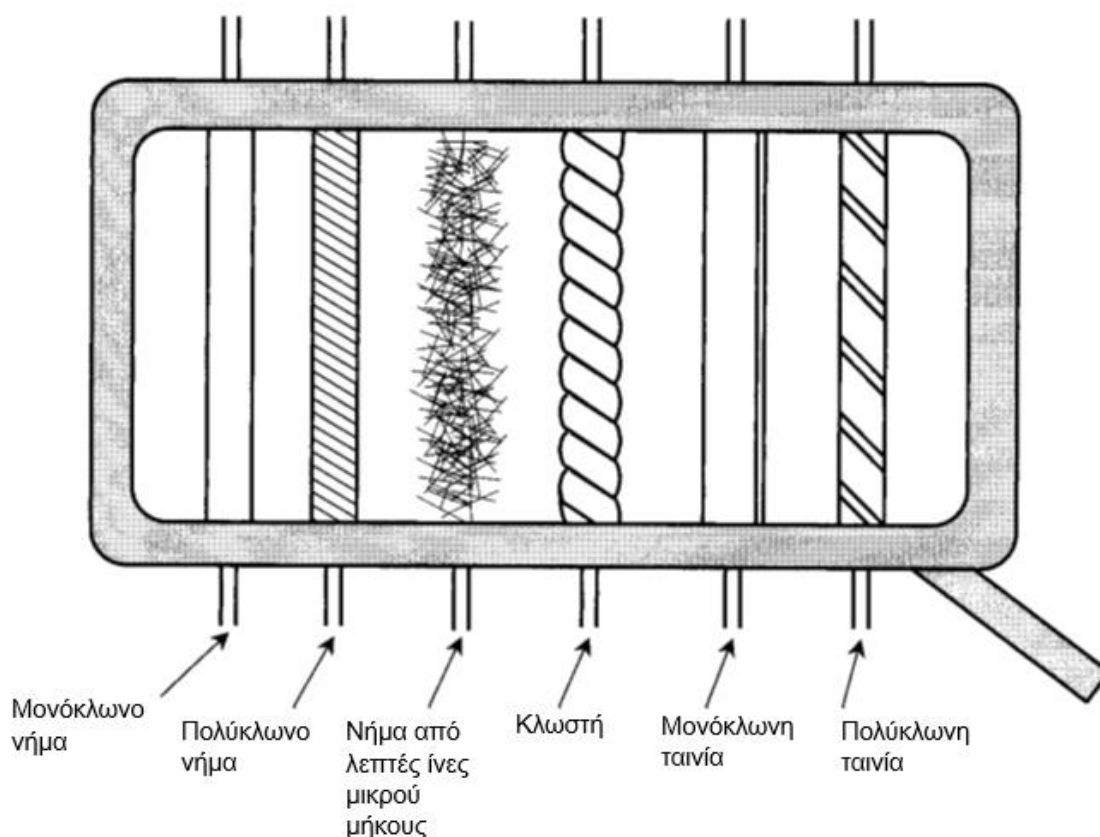


**Σχήμα 2.3:** Πρώτες ύλες για την κατασκευή γεωφασμάτων (Koerner 2012)

### Τύπος Νήματος

Υπάρχουν πέντε βασικές κατηγορίες νημάτων από τα οποία παράγονται τα γεωφάσματα: (1) Μονόκλωνα νήματα, (2) πολύκλωνα νήματα, (3) νήματα από λεπτές ίνες μικρού μήκους, (4) μονόκλωνες ταινίες και (5) πολύκλωνες ταινίες.

Οι πρώτες ύλες είναι συνήθως σε στερεά, κοκκώδη κατάσταση και για να πάρουν τη μορφή ίνας τήκονται, υποβάλλονται σε διέλαση, μέσω ειδικής διάτρητης κεφαλής (που μοιάζει με καταιονιστήρα), και ακολούθως σκληρύνονται με ψύξη. Ταυτόχρονα με την ψύξη ή μετά την ψύξη, οι ίνες εφελκούνται ώστε να μειωθεί η διάμετρός τους και να γίνει πιο ομοιόμορφη η διάταξη των μακρομορίων του πολυμερούς. Έτσι επιτυγχάνεται αύξηση της αντοχής των ινών, μείωση της επιμήκυνσης στην αστοχία και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας (Ατματζίδης). Αυτές οι μεγάλοι μήκους ίνες χρησιμοποιούνται, σαν μονόκλωνο νήμα, για την κατασκευή γεφυφασμάτων. Τα μονόκλωνα νήματα μπορούν επίσης να συνδυαστούν, ώστε να κατασκευαστεί ένα πολύκλωνο νήμα. Κάπως διαφορετικής μορφής είναι τα νήματα που κατασκευάζονται από λεπτές ίνες μικρού μήκους (25 mm ως 100 mm) και που μπορούν να ονομαστούν κλωστής. Οι αρχικές μεγάλοι μήκους ίνες κόβονται σε μικρά μήκη και ακολούθως συστρίβονται ή κλώθονται σε μεγάλα μήκη (κλωστής). Ο τελευταίος τύπος νήματος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή γεφυφασμάτων ονομάζεται ταινία και έχει διατομή ορθογωνική. Παράγεται από ένα συνεχές λεπτό φύλλο πολυμερούς, που κόβεται σε νήματα (ταινίες) με κατάλληλα μαχαίρια ή φλέβες πεπιεσμένου αέρα. Οι ταινίες



**Σχήμα 2.4:** Κατηγορίες πολυμερών ινών (ή νημάτων) στην βιομηχανία των γεφυφασμάτων (Koerner 2005)

μπορούν και αυτές να συνδυαστούν και να διαμορφωθεί πολύκλινη ταινία (Koerner 2005). Στο Σχήμα 2.4 φαίνονται οι κατηγορίες ινών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.

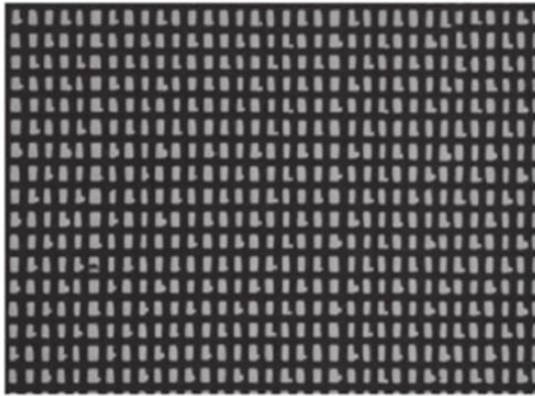
### Μέθοδος Κατασκευής

Τα νήματα (μονόκλινα, πολύκλινα, κλωστές, ταινίες) χρησιμοποιούνται για την κατασκευή γεωφασμάτων, που, ανάλογα με τη μέθοδο διαμόρφωσης του ιστού τους, διακρίνονται σε υφαντά, μη υφαντά και πλεκτά (ωστόσο σήμερα τα πλεκτά υφάσματα σπάνια χρησιμοποιούνται για την κατασκευή γεωφασμάτων).

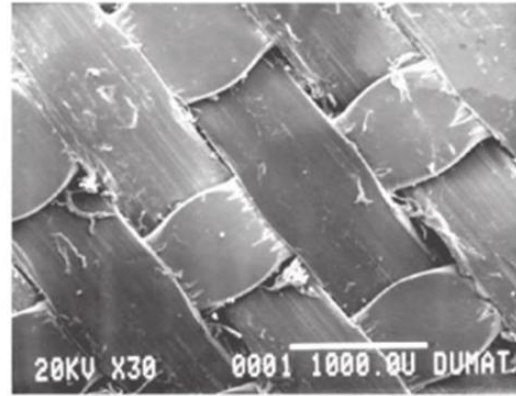
Τα υφαντά γεωυφάσματα κατασκευάζονται με την κλασική υφαντουργική τεχνική, δηλαδή οι σειρές των νημάτων πλέκονται μεταξύ τους και συνδέονται με μηχανικό τρόπο. Η διαδικασία κατασκευής των μη υφαντών γεωφασμάτων διαφέρει πολύ από αυτή των υφαντών και περιλαμβάνει τέσσερα στάδια: (1) προετοιμασία, (2) διαμόρφωση του ιστού, (3) συγκόλληση του ιστού και (4) επιδιόρθωση αστοχιών. Η προετοιμασία, η οποία είναι κοινή για όλα τα γεωυφάσματα, αφορά το στάδιο κατά το οποίο οι πρώτες ύλες (τα πολυμερή) επεξεργάζονται, έτσι ώστε να παραχθούν οι ίνες, και πραγματοποιείται με την διαδικασία που έχει περιγραφεί ανωτέρω. Στο δεύτερο στάδιο, οι ίνες μετά την ψύξη τοποθετούνται σε μεταφορική ταινία, όπου σχηματίζεται ένας συνεχής ιστός. Στόχος αυτού του σταδίου είναι η ομοιόμορφη κατανομή των ινών και η διαμόρφωση του επιθυμητού προσανατολισμού. Ο επιθυμητός προσανατολισμός (συνηθέστερα είναι ο τυχαίος) επιτυγχάνεται με διάφορες τεχνικές, όπως περιστροφή του μηχανήματος κατασκευής των ινών, ηλεκτρικά φορτία, ανάδευση με φλέβες αέρος ή μεταβολή της ταχύτητας της μεταφορικής ταινίας. Στη συνέχεια οι ίνες συγκολλώνται με μηχανική, θερμική ή χημική επεξεργασία και το προϊόν τυλίγεται σε μορφή ρολού. (Ατματζίδης)

Κατά την μηχανική επεξεργασία εμπλοκής των ινών (η οποία είναι η πιο συνήθης διεργασία συγκόλλησης μη υφαντών γεωφασμάτων), ο ιστός των ινών οδηγείται κάτω από μια ομάδα αγκαθωτών βελονών, οι οποίες εκτελούν παλινδρομική κίνηση, κάθετα στο επίπεδο μεταφοράς του, όπου τον διαπερνούν. Το τελικό προϊόν ονομάζεται βελονοδιάτρητο γεωύφασμα και γενικά η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την παραγωγή προϊόντων με μεγάλη μάζα ανά μονάδα επιφάνειας, όμως με σημαντικό όγκο. Η χημική επεξεργασία περιλαμβάνει ψεκασμό ή εμποτισμό του ιστού με ακρυλική ρητίνη και στη συνέχεια σκλήρυνση και πιθανώς κυλινδρισμό. Συχνά

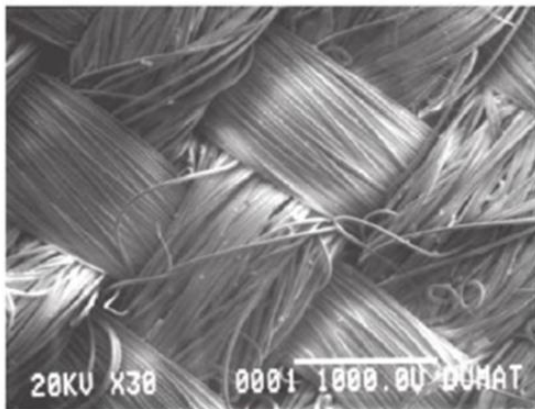
χρησιμοποιείται φλέβα ξηρού αέρα, για να στεγνώσει το προϊόν και να ανοιχτούν οι πόροι του. Η τελική επιφάνεια του γεωφάσματος είναι σκληρή και τραχεία. Τα θερμικά συγκολλημένα γεωφάσματα αποτελούνται από συνεχείς ίνες ή νήματα, που συγκολλώνται στις θέσεις διασταύρωσης του με τήξη, καθώς ο ιστός περνά μέσα από



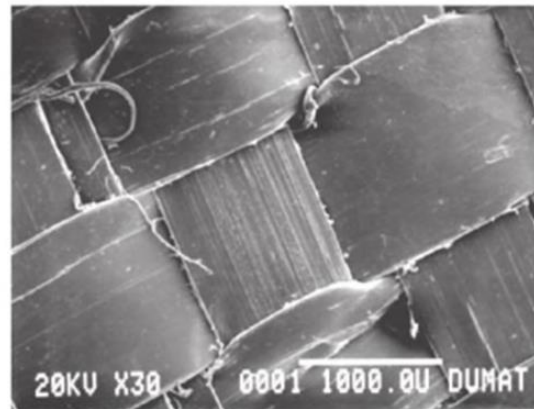
α) Υφαντό, μονόκλωνο νήμα



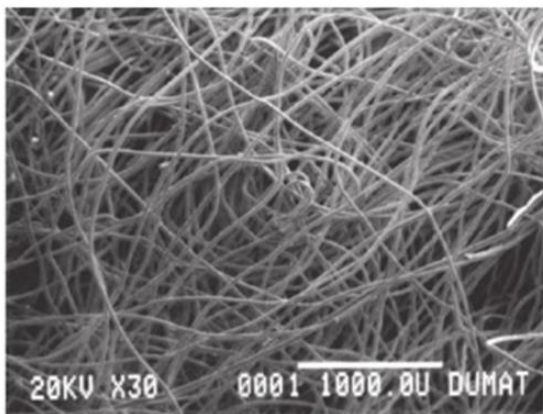
β) Υφαντό, μονόκλωνο νήμα



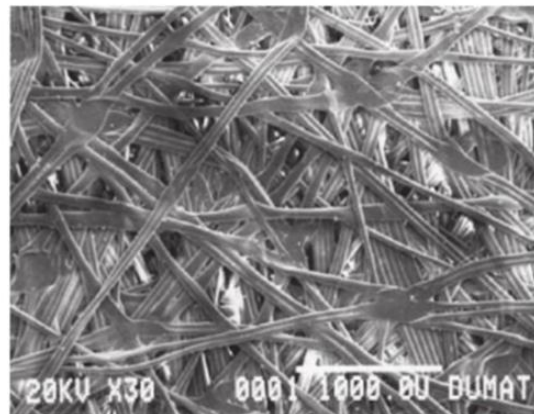
γ) Υφαντό, πολύκλωνο



δ) Υφαντό, μονόκλωνη ταινία



ε) Μη υφαντό, βελονοδιάτρητο



στ) Μη υφαντό, θερμικά συγκολλημένο

**Σχήμα 2.5:** Παραδείγματα ιστών γεωφασμάτων Μεγέθυνση: (α) x5 , όλα τα υπόλοιπα x30 (Koerner 2012)

φούρνο ή από δυο θερμαινόμενους κυλίνδρους, που περιστρέφονται αντίθετα ο ένας προς τον άλλον. Τα τελικά υφάσματα είναι δύσκαμπτα και επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αντοχή (στις περιπτώσεις προϊόντων χαμηλού βάρους) σε σχέση με αντίστοιχα προϊόντα που παράγονται με άλλες τεχνικές συγκόλλησης. (Koerner 2012)

### **2.2.3 Λειτουργίες των Γεωυφασμάτων**

Ο σωστός σχεδιασμός έργων με γεωυφάσματα βασίζεται στην κατάλληλη επιλογή προϊόντος, ώστε αυτό να λειτουργήσει αποτελεσματικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου και τις επί τόπου συνθήκες. Οι βασικές λειτουργίες των γεωυφασμάτων είναι πέντε: (1) φίλτρο, (2) στράγγιση, (3) διαχωρισμός, (4) φραγμός υγρασίας και (5) ενίσχυση-οπλισμός. Όπως όλα τα γεωσυνθετικά, που εκτός από την κύρια λειτουργία επιτελούν, παράλληλα, και άλλες, έτσι και τα γεωυφάσματα κατά την χρήση τους μπορούν να επιτελέσουν μια σειρά λειτουργιών. Στην συνέχεια περιγράφονται οι κύριες λειτουργίες που προσφέρουν τα γεωυφάσματα (Ατματζίδης).

Το γεωύφασμα λειτουργεί σαν φίλτρο όταν επιτρέπει την κάθετη προς την επιφάνειά του ροή υγρού, αλλά όχι εδαφικού υλικού. Το γεωύφασμα λειτουργεί σαν τα κλασικά γεωτεχνικά φίλτρα τα κατασκευασμένα από κοκκώδη υλικά. Βασικές ιδιότητες για την λειτουργία του ως φίλτρο είναι η διαπερατότητα, το μέγεθος των κενών, η κατανομή των κενών και η μακροβιότητα, με την έννοια της πιθανότητας απόφραξης του, προϊόντος του χρόνου.

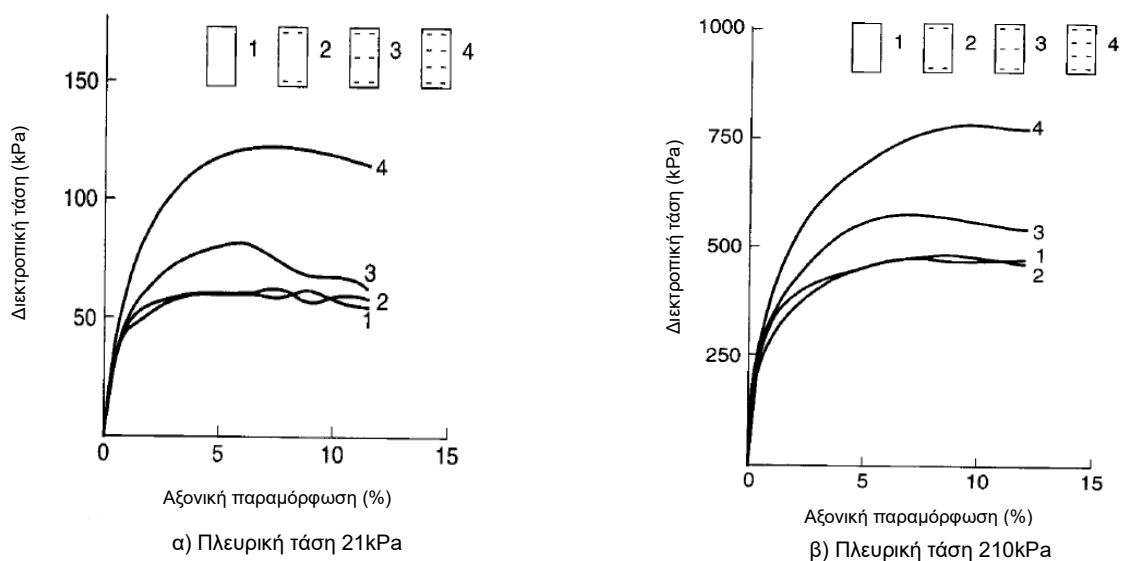
Το γεωύφασμα εκτελεί την λειτουργία της στράγγισης όταν επιτρέπει την παράλληλη προς την επιφάνειά του κίνηση του υγρού, αλλά όχι την ταυτόχρονη μετακίνηση εδαφικού υλικού. Τα γεωυφάσματα με σχετικά μεγάλο πάχος ενδείκνυνται για αυτές τις εφαρμογές, καθώς η ροή του υγρού στο εσωτερικό τους πραγματοποιείται ευκολότερα. Προβάδισμα στη συμπεριφορά, ένεκα του πάχους τους, έχουν τα μη υφασμένα βελονοδιάτρητα γεωυφάσματα. Όπως και κατά την περίπτωση των φίλτρων, ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ιδιότητες της διαπερατότητας, του μεγέθους και της κατανομής των κενών και της απόφραξης σε σχέση με την πάροδο του χρόνου.

Η λειτουργία του διαχωρισμού επιτυγχάνεται όταν το γεωύφασμα τοποθετείται μεταξύ δυο ανόμοιων υλικών, με σκοπό αυτά να μην αναμειγνύονται. Οι κύριες ιδιότητες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του σαν διαχωριστή είναι η αντοχή του σε εφελκυσμό, σε σχισμό και σε διάτρηση.

Το γεωύφασμα λειτουργεί σαν φραγμός υγρασίας όταν ελαχιστοποιεί, κατά το δυνατόν περισσότερο, την ροή υγρού εκατέρωθεν της επιφάνειάς του. Το γεωύφασμα εξ ορισμού είναι διαπερατό, οπότε αυτή η λειτουργία επιτυγχάνεται με εμπότισμό του με κάποιο ασφαλτικό γαλάκτωμα ή με κάποιο πολυμερές ή σε συνδυασμό με γεωμεμβράνη. Η κύρια ιδιότητα που αφορά την συμπεριφορά του γεωυφάσματος ως στεγανού σχετίζεται με την ποσότητα υδατμού που μπορεί να διοχετευθεί μέσα από το υλικό.

Η λειτουργία της ενίσχυσης ή όπλισης, η οποία είναι αυτή που μελετήθηκε και πειραματικά στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής εργασίας, επιτυγχάνεται με την εισαγωγή γεωυφάσματος εντός του εδάφους. Αποτελεί συνέπεια της αλληλεπίδρασης των δυο υλικών, καθώς τα γεωυφάσματα είναι υλικά τα οποία προσδίδουν εφελκυστική αντοχή και μπορούν να συμπληρώσουν αποτελεσματικά τα εδαφικά υλικά τα οποία έχουν υψηλή θλιπτική, αλλά χαμηλή εφελκυστική αντοχή.

Σύμφωνα με τον Koerner (2005), καλά διαβαθμισμένες ιλύες και άργιλοι χαμηλής αντοχής αποτελούν κυρίαρχα υλικά για όπλιση με γεωύφασμα. Συμπληρώνει ο ίδιος, ότι η βελτίωση της αντοχής μπορεί να αξιολογηθεί με ποικίλους τρόπους. Δοκιμές τριαξονικής φόρτισης, οι οποίες εκπονήθηκαν από τον Broms αντικατοπτρίζουν την ωφέλιμη επίδραση του γεωυφάσματος, όταν αυτό τοποθετηθεί με τον σωστό τρόπο. Το Σχήμα 2.6 δείχνει δυο εφαρμογές τριαξονικών δοκιμών σε δοκίμια πυκνής άμμου, με πλευρική πίεση 21kPa και 210kPa αντίστοιχα, για διαφορετική διάταξη του γεωυφάσματος εντός του εδάφους. Και στις δυο περιπτώσεις, η καμπύλη 1



**Σχήμα 2.6:** Αποτελέσματα δοκιμών κατά Broms (Koerner 2005)

αντιπροσωπεύει την διατμητική αντοχή του εδάφους χωρίς την ένθεση γεωυφάσματος. Στη καμπύλη 2 έχει τοποθετηθεί γεωύφασμα στο άνω και κάτω άκρο του εδαφικού δοκιμίου και δεν παρατηρείται βελτίωση στην διατμητική αντοχή του. Δεδομένου ότι οι θέσεις που τοποθετήθηκε το γεωύφασμα είναι οι νεκρές ζώνες στην συμβατική τριαξονική δοκιμή, η παρατηρούμενη συμπεριφορά είναι λογική και έγινε για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Αυτό μας διδάσκει ότι η τοποθέτηση του γεωυφάσματος σε λάθος θέση, δεν παρουσιάζει θετική επίδραση στο σύνθετο υλικό. Κατά την τοποθέτηση του γεωυφάσματος στο κέντρο του δοκιμίου, όπως φαίνεται στην καμπύλη 3, ή στο 1/3 του ύψους, όπως στην καμπύλη 4, η θετική επίδραση του είναι εμφανής. Σε αυτές τις περιπτώσεις το γεωύφασμα διακόπτει πιθανά επίπεδα διάτμησης και επιδρά στην αύξηση της συνολικής διατμητικής αντοχής του ενισχυμένου, πλέον, εδάφους. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι δυο στρώσεις γεωυφάσματος που τοποθετήθηκαν στο 1/3 του ύψους (καμπύλη 4) επιφέρουν καλύτερα αποτελέσματα από την μονή στρώση στο κέντρο του δοκιμίου (καμπύλη 3).

Οι κύριες ιδιότητες που ενδιαφέρουν κατά την λειτουργία της όπλισης-ενίσχυσης είναι η αντοχή σε εφελκυσμό, το μέτρο ελαστικότητας, η παραμόρφωση και η συμπεριφορά σε ερπυσμό.

Στη γενική λειτουργία της ενίσχυσης του εδάφους με γεωυφάσματα εμπíπτον τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί, οι οποίοι είναι ο μηχανισμός μεμβράνης, ο μηχανισμός διάτμησης και ο μηχανισμός αγκύρωσης.

**Μηχανισμός Μεμβράνης:** Το γεωύφασμα λειτουργεί σαν μεμβράνη όταν εδράζεται σε παραμορφώσιμο έδαφος και ασκείται σε αυτό κάθετη, προς την επιφάνειά του, φόρτιση. Το αποτέλεσμα αυτής της φόρτισης είναι η ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο γεωύφασμα, ανάλογα με το βάθος στο οποίο βρίσκεται από το σημείο εφαρμογής της φόρτισης.

**Μηχανισμός Διάτμησης:** Σε αυτή την περίπτωση το γεωύφασμα φορτίζεται με σταθερό φορτίο κάθετα προς το επίπεδό του και το επίπεδο αστοχίας συμπίπτει με την διεπιφάνεια εδάφους-γεωυφάσματος. Διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται στην επιφάνεια επαφής όταν το σύνθετο υλικό φορτίζεται και παραμορφώνεται.

**Μηχανισμός Αγκύρωσης:** Ο μηχανισμός αγκύρωσης είναι παρόμοιος με τον μηχανισμό διάτμησης, μόνο που σε αυτή την περίπτωση το έδαφος δρα και στις δυο πλευρές του γεωυφάσματος, καθώς το γεωύφασμα τείνει να εξολκευθεί από αυτό. Η



εργαστηριακή διάταξη είναι παρόμοια με αυτή της άμεσης διάτμησης, όμως εδώ το άνω και κάτω εδαφικό υλικό παραμένει σταθερό και στα δυο μισά της συσκευής, ενώ το γεωύφασμα τοποθετείται στο κέντρο αυτών, εκτεινόμενο εκτός της συσκευής. Και σε αυτή την περίπτωση, αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις στο εσωτερικό του γεωυφάσματος.

#### **2.2.4 Ιδιότητες των Γεωυφασμάτων**

Η πληθώρα των διαφορετικών τύπων γεωυφασμάτων που υπάρχουν στο εμπόριο έχει δημιουργηθεί από τις ίδιες τις κατασκευάστριες εταιρίες, με σκοπό να μπορούν να εξυπηρετούν τις ανάγκες που υπάρχουν στους τεχνικούς κλάδους, στους οποίους αυτά βρίσκουν εφαρμογή. Οι διαφορετικές πρώτες ύλες και η ποικιλία τεχνικών που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των γεωυφασμάτων έχει ως επακόλουθο έναν μεγάλο αριθμό ιδιοτήτων που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του κάθε προϊόντος. Για τον προσδιορισμό του μεγαλύτερου μέρους αυτών των ιδιοτήτων υπάρχουν πιστοποιημένα πρότυπα εργαστηριακών ή επιτόπου δοκιμών, από διεθνείς και κρατικούς οργανισμούς. Επιπλέον, για τις ιδιότητες που δεν υφίστανται ακόμα πρότυπα για γεωυφάσματα χρησιμοποιούνται εγκεκριμένα πρότυπα για έλεγχο υφασμάτων (Ατματζίδης).

Οι ιδιότητες των γεωυφασμάτων είναι πέντε και διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- 1. Φυσικές ιδιότητες:** αφορούν την γεωμετρία και το βάρος του υλικού.
- 2. Υδραυλικές ιδιότητες:** αναφέρονται στην ποσοτικοποίηση της ευκολίας με την οποία κινούνται τα ρευστά μέσω των γεωυφασμάτων.
- 3. Μηχανικές ιδιότητες:** είναι ενδεικτικές της αντίστασης που παρουσιάζει το υλικό σε μηχανική καταπόνηση από επιβαλλόμενα φορτία ή/και λόγω των συνθηκών που επικρατούν κατά την τοποθέτηση του στο πεδίο.
- 4. Ιδιότητες ανθεκτικότητας στον χρόνο:** αφορούν την συμπεριφορά του υλικού σε συνάρτηση με τον χρόνο, δηλαδή κατά τον ερπυσμό και την χαλάρωση.
- 5. Ιδιότητες αποδόμησης:** αναφέρονται σε διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν την δομή των πολυμερών και κατ' επέκταση το γεωύφασμα (π.χ. υπεριώδης ακτινοβολία, χημικά, βιολογικοί παράγοντες).

Οι δυο τελευταίες κατηγορίες ιδιοτήτων αφορούν την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά των γεωφασμάτων. Οι μηχανικές είναι ιδιαίτερα σημαντικές κατά την λειτουργία της ενίσχυσης-όπλισης και του διαχωρισμού και οι υδραυλικές για τα τις λειτουργίες της στράγγισης και του φιλτραρίσματος. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζεται το σύνολο των ιδιοτήτων ταξινομημένες ανά κατηγορία.

**Πίνακας 2.2:** Συγκεντρωτικός πίνακας ιδιοτήτων γεωφασμάτων, ανά κατηγορία (Ατματζίδης, Koerner 2005)

Κατηγορίες	Φυσικές	Υδραυλικές	Μηχανικές	Ανθεκτικότητας στον χρόνο	Αποδόμησης
Ιδιότητες	Ειδικό Βάρος	Πορώδες	Συμπιεστότητα	Ερπυσμός	Αντοχή σε Χημικά
	Μάζα ανά Μονάδα Επιφανείας	Ποσοστό Ελεύθερης Επιφανείας	Ανοχή Συρραφής	Αντοχή σε Απόξεση	Αντοχή σε Θερμότητα
		Φαινόμενος Μέγεθος Κόκκων	Ανοχή σε Κόπωση	Απόφραξη	
	Πάχος	Διαπερατότητα	Ανοχή σε Διάρρηξη	Ανοχή σε Κρούση	Αντοχή σε Υπεριώδη Ακτινοβολία & Καιρικές Συνθήκες
	Ακαμψία		Ανοχή σε Σχισμό		
			Ανοχή σε Διάτρηση		
	Συγκράτηση Στερεών	Αλληλεπίδραση Εδάφους-Γεωφάσματος			

Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει σε τρεις ιδιότητες που σχετίζονται άμεσα με την συμπεριφορά του γεωφάσματος όταν αυτό προορίζεται να λειτουργήσει σαν οπλισμός: (1) Αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό, (2) Αλληλεπίδραση εδάφους-γεωφάσματος και (3) Φαινόμενο μέγεθος κόκκων (Apparent Opening Size-AOS).

Η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό αποτελεί την σημαντικότερη ιδιότητα, ανεξαρτήτως λειτουργίας, των γεωφασμάτων για την επιλογή του κατάλληλου υλικού στην εκάστοτε εφαρμογή. Από τις δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού που πραγματοποιούνται προκύπτουν διαγράμματα φορτίου (kN/μονάδα πλάτους) -

παραμόρφωσης (%-επιμήκυνση/αρχικό μήκος). Από την καμπύλη αυτή προσδιορίζονται τέσσερα μεγέθη:

1. Μέγιστο φορτίο θραύσης (για την μετατροπή του φορτίου σε τάση, μπορεί να διαιρεθεί με το αρχικό πάχος του γεωυφάσματος, αν και αυτό δεν συνιστάται, αφού το πάχος του δοκιμίου μεταβάλλεται κατά το πέρασ της δοκιμής).
2. Παραμόρφωση κατά την θραύση.
3. Ανηγμένο (ανά μονάδα όγκου) έργο θραύσης (υπολογίζεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης).
4. Μέτρο εφελκυσμού (υπολογίζεται από τη κλίση στο αρχικό τμήμα της καμπύλης φορτίου-παραμόρφωσης).

Το τελευταίο μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της ευθείας που ενώνει την αρχή των αξόνων με σημείο που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο ποσοστό παραμόρφωσης (π.χ. 5,7,10 ή 35%).

Η αλληλεπίδραση εδάφους- γεωυφάσματος είναι και αυτή σημαντική μηχανική ιδιότητα και προσδιορίζεται μέσω της δοκιμών άμεσης διάτμησης ή εξόλκευσης. Μέσω αυτής υπολογίζεται η φαινόμενη γωνία τριβής μεταξύ εδάφους και γεωυφάσματος και η συνάφεια των δυο υλικών.

Το φαινόμενο μέγεθος κόκκων (Apparent Opening Size -AOS), είναι ιδιότητα η οποία δηλώνει το μέγιστο μέγεθος κόκκων, το οποίο μπορεί να περάσει μέσα από το γεωύφασμα. Παρόλο που η ιδιότητα αυτή ανήκει στην κατηγορία των υδραυλικών ιδιοτήτων, από τις τιμές της μπορεί να προσδιοριστεί η συναρμογή μεταξύ εδαφικού υλικού και γεωυφάσματος, καθώς η πορομετρία του γεωυφάσματος επηρεάζει την εμπλοκή των κόκκων στην επιφάνεια του. Σύμφωνα με τον Koerner (2005) αυτή η δοκιμή εμπεριέχει αρκετές αδυναμίες.

Όπως έχει προαναφερθεί, τα γεωυφάσματα κατά τη χρήση τους, στις περισσότερες των περιπτώσεων, επιτελούν επιπλέον της μίας λειτουργίας, οπότε κατά τον σχεδιασμό και την επιλογή του κατάλληλου προϊόντος θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν το σύνολο των απαραίτητων ιδιοτήτων για κάθε λειτουργία που επιτελείται. Σε κάθε άλλη περίπτωση, ο συσχετισμός μιας λειτουργίας με μια κύρια ιδιότητα -και όχι με το σύνολο των ιδιοτήτων- μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα κατά τον σχεδιασμό ή στην επιλογή γεωυφάσματος για μια κατασκευή. Στον Πίνακα 2.3 συνοψίζονται οι σχέσεις μεταξύ λειτουργιών και γεωυφασμάτων.

Πίνακας 2.3: Σχέσεις λειτουργιών και ιδιοτήτων γεωφασμάτων (Ατματζίδης)

Ιδιότητες	Λειτουργίες			
	Διαχωρισμός	Οπλισμός	Φιλτράρισμα	Στράγγιση
Πάχος	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Αντοχή σε εφελκυσμό	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Μέτρο εφελκυσμού	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Αντοχή σε διάρρηξη	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Αντοχή σε διάτρηση	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Αντοχή σε σχισμό	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Αντοχή σε κρούση	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Αντοχή συρραφής	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Συμπιεστότητα	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Φαινόμενη γωνία τριβής	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Πορώδες	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ποσοστό ελεύθερης επιφάνειας	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Φαινόμενο μέγεθος κόκκων	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Υδραυλική επιτρεπτότητα	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Υδραυλική μεταβιβαστικότητα	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Ερπυσμός	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Απόξεση	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Απόφραξη	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Αποδόμηση	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ιδιότητα σημαντική για τη λειτουργία

Ιδιότητα που μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία

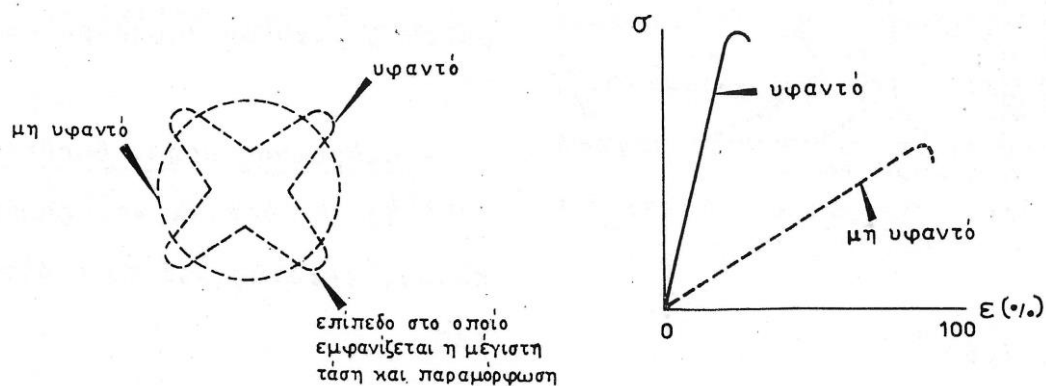
Ιδιότητα που δεν επηρεάζει τη λειτουργία

## 2.2.5 Σύγκριση Υφαντών και Μη Υφαντών Γεωφασμάτων

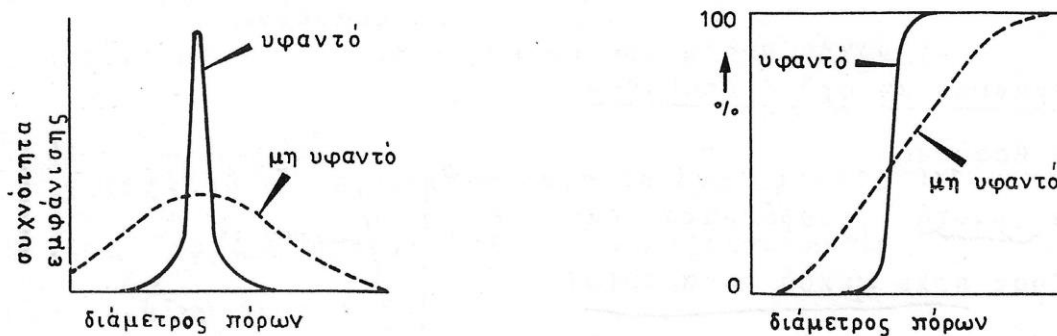
Οι δυο διαφορετικοί τρόποι κατασκευής των γεωφασμάτων έχουν σαν αποτέλεσμα την ανάπτυξη ιδιαίτερων ιδιοτήτων. Αρχικά, ο τρόπος κατασκευής επηρεάζει το επίπεδο στο οποίο εμφανίζονται η μέγιστη τάση και παραμόρφωση. Τα υφαντά γεωφάσματα έχουν μεγάλο βαθμό ανισοτροπίας, αφού η μέγιστη τιμή τάσης και παραμόρφωσης εμφανίζεται στις δυο διευθύνσεις ύφανσης. Αντίθετα, τα μη υφαντά παρουσιάζουν περίπου ισότροπη συμπεριφορά (Σχήμα 2.7 αριστερά). Επίσης, τα υφαντά γεωφάσματα παρουσιάζουν πολύ μικρή παραμόρφωση και μεγάλη αντοχή. Ως προς την αντοχή, οι τιμές που δίνονται από τους κατασκευαστές αφορούν την μέγιστη τιμή κατά την ευνοϊκότερη διεύθυνση, αγνοώντας εντελώς την ανισοτροπία (Σχήμα 2.7 δεξιά). Τελευταία αλλά σημαντική διαφορά αποτελεί η πορομετρία των δυο

κατηγοριών, καθώς τα μη υφαντά έχουν μεγάλο εύρος διαμέτρων, γεγονός που τους προσφέρει πολύ καλές διηθητικές ικανότητες. Τα υφαντά, εξαιτίας του τρόπου κατασκευής τους, παρουσιάζουν μικρότερη ευελιξία ως προς την διάμετρο των πόρων (Σχήμα 2.8). (Προφυλλίδης 1985)

Συνοψίζοντας, η παρούσα σύγκριση δεν γίνεται με σκοπό να αναδειχθεί ως επικρατέστερος κάποιος από τους δυο τρόπους κατασκευής. Αυτή η διαφοροποίηση και το ευρύ φάσμα ιδιοτήτων που προσφέρεται στην αγορά αποτελούν τις κύριες αιτίες για τις οποίες τα γεωυφάσματα βρίσκουν τόσο εκτεταμένο πεδίο εφαρμογής και αποδοχής από τον τεχνικό κλάδο. Τέλος, η επιλογή του κατάλληλου τύπου γεωυφάσματος αποτελεί ένα πρόβλημα τεχνικοοικονομικό, όπου πέρα από τις μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος, θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψιν και το κόστος αγοράς του.



**Σχήμα 2.7:** Αριστερά: Βαθμός ανισοτροπίας υφαντών και μη υφαντών γεωυφασμάτων. Δεξιά: Διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για γεωυφάσματα υφαντά και μη υφαντά (Προφυλλίδης 1985)



**Σχήμα 2.8:** Εύρος διαμέτρων πόρων για υφαντά και μη υφαντά γεωυφάσματα (Προφυλλίδης 1985)

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

Ο ασφαλής και οικονομικός σχεδιασμός έργων από οπλισμένο έδαφος με γεωύφασμα απαιτεί την γνώση είτε της μηχανικής συμπεριφοράς του σύνθετου υλικού (έδαφος + γεωύφασμα) είτε του μηχανισμού αλληλεπίδρασης στην διεπιφάνεια εδάφους-γεωυφάσματος. Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης μελετάται με δοκιμές άμεσης διάτμησης όπου το έδαφος ολισθαίνει πάνω στην επιφάνεια του γεωυφάσματος ή με δοκιμές εξόλκευσης όπου το γεωύφασμα βρίσκεται εγκιβωτισμένο στην εδαφική μάζα και έλκεται ως ότου να ολισθήσει. Η μηχανική συμπεριφορά του σύνθετου υλικού ερευνάται εργαστηριακά με διατάξεις δοκιμών τριαξονικής φόρτισης (Markou 2006).

Στα πλαίσια της παρούσα διπλωματικές έγιναν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, με σκοπό την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς αμμωδών και αργιλικών εδαφών κατά την όπλιση τους με συγκεκριμένο γεωύφασμα. Πληθώρα εργαστηριακών ερευνών έχουν πραγματοποιηθεί για την μελέτη αυτής της συμπεριφοράς τόσο σε αργιλικά όσο και σε αμμώδη εδαφικά υλικά. Στο κεφάλαιο αυτό, αναφέρονται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής εργασίας. Παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής φόρτισης σε άμμους και αργίλους καθώς και μονοαξονικής φόρτισης σε αργίλους.

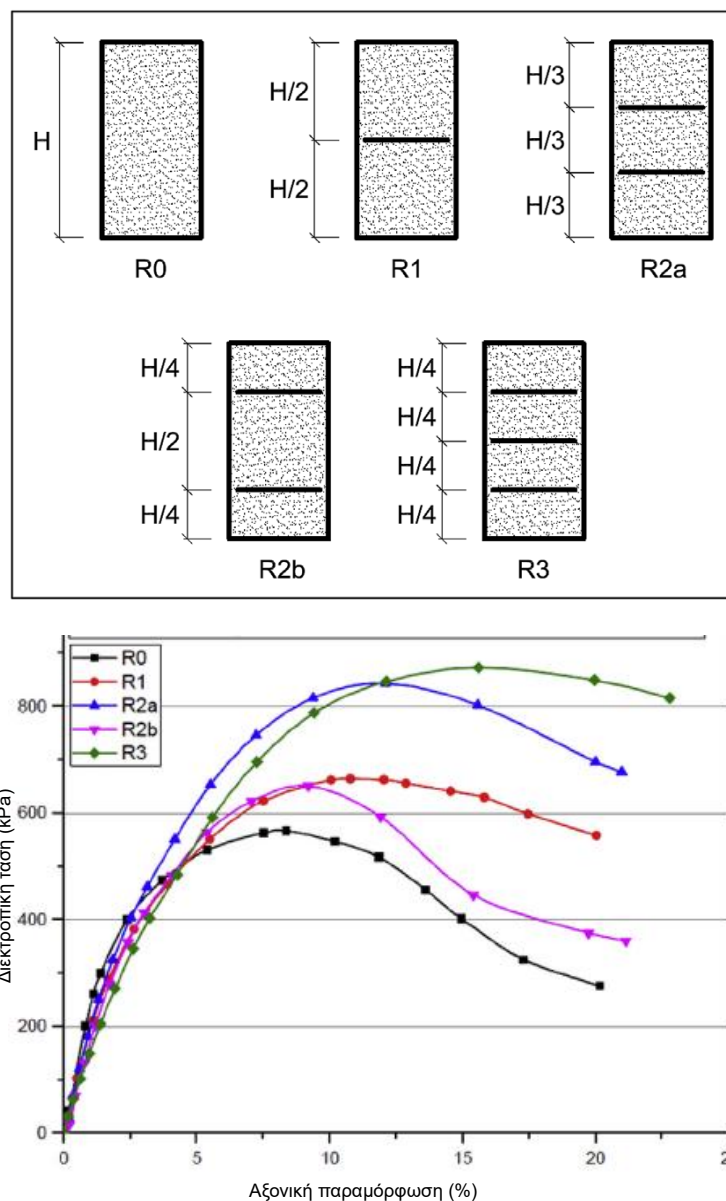
### **3.1. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕ ΑΜΜΟΥΣ**

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής φόρτισης που πραγματοποιήθηκαν σε αμμώδη υλικά οπλισμένα με γεωύφασμα. Οι κύριοι παράγοντες των οποίων η επίδραση, στην συμπεριφορά του σύνθετου υλικού, έχει μελετηθεί είναι οι εξής:

- Στρώσεις Γεωυφάσματος
- Είδος Γεωυφάσματος
- Σχήμα - Μέγεθος Κόκκων
- Πλευρική Τάση
- Μέγεθος Δοκιμίου

### 3.1.1 Στρώσεις Γεωφάσματος

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την ενίσχυση του εδάφους με γεωφάσμα είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των οπλισμών, αφού αυξάνοντας την πυκνότητα τους, δηλαδή και το πλήθος τους, αυξάνεται και το κόστος της κατασκευής. Η αύξηση των στρώσεων των ενθεμάτων οδηγεί σε αύξηση της αντοχής του οπλισμένου εδάφους (Markou 2006, Markou et al. 2006a). Επίσης, η προσθήκη επιπλέον στρώσεων οπλισμού οδήγησε σε αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας (Markou 2006). Γενικότερα η συμμετρική τοποθέτηση του οπλισμού επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα, καθώς το σύστημα έδαφος - γεωφάσμα λειτουργεί συνεργατικά σαν



**Σχήμα 3.1:** Διατάξεις γεωφάσματος και αποτελέσματα δοκιμών τριαξονικής φόρτισης σε άμμους (Goodarzi & Shahnazari 2019)

ένα ενιαίο σώμα. Ο Koerner (2005), επιβεβαιώνει ότι η τοποθέτηση του οπλισμού εγγυτέρα στο άνω και κάτω άκρο του δοκιμίου δεν επιφέρει βελτίωση στην μηχανική συμπεριφορά του, δηλαδή είναι προτιμότερο οι στρώσεις του οπλισμού να ισαπέχουν τόσο μεταξύ τους όσο και από τα άκρα του δοκιμίου. Επίσης, οι Goodarzi & Shahnazari (2019) εκτέλεσαν δοκιμές σύμφωνα με τις διατάξεις που φαίνονται στο Σχήμα 3.1, και παρόλο που οι περιπτώσεις R2a και R2b έχουν εκάστη δυο ενθέματα, στην πρώτη η βελτίωση της αντοχής είναι μεγαλύτερη. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι η μέγιστη αξονική παραμόρφωση παρατηρείται στο κέντρο του δείγματος (Goodarzi & Shahnazari 2019, Markou et al. 2006b), γεγονός που υποδηλώνει ότι η ενίσχυση θα πρέπει να τοποθετείται κοντά στην περιοχή όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη παραμόρφωση (Goodarzi & Shahnazari 2019), με σκοπό την ενίσχυση της αδύναμης ζώνης. Τέλος, έχει παρατηρηθεί ότι σε μικρές παραμορφώσεις (<3%) το γεωφάσμα δεν αυξάνει την αντοχή του εδάφους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, χωρίς να λάβει κάποιες παραμορφώσεις, δεν μπορεί να παραλάβει φορτία και να λειτουργεί υπέρ της αντοχής, πρέπει πρώτα να παραμορφωθεί, έπειτα να ενεργοποιηθούν οι εφελκυστικές δυνάμεις και να παρουσιαστεί βελτίωση.

Σύμφωνα με τους Goodarzi & Shahnazari (2019) αμμώδη δοκίμια οπλισμένα με μία στρώση μη υφαντού γεωφάσματος επιδεικνύουν αύξηση της αντοχής κατά 20% σε σχέση με τα μη οπλισμένα. Συμπληρώνει, επίσης, ότι με δυο φύλλα ενίσχυσης η αντοχή αυξάνεται, επιπλέον, κατά 26%, ενώ η προσθήκη τρίτου γεωφάσματος δεν έχει κάποια ουσιαστική επίδραση (προσδίδει 1% σε σχέση με τις δυο στρώσεις) (Πίνακας 3.1).

*Πίνακας 3.1: Επίδραση αριθμού οπλισμών σε άμμο (Goodarzi & Shahnazari 2019)*

Στρώσεις Γεωφάσματος	Τάση (kPa)	Αύξηση Τάσης (%)		Παραμόρφωση (%)	Αύξηση Παραμόρφωσης (%)	
0	567			8		
1	683	20% <sup>§</sup>	20%*	11.5	30% <sup>§</sup>	30%*
2	858	26% <sup>§</sup>	51%*	12.5	8% <sup>§</sup>	36%*
3	867	1% <sup>§</sup>	53%*	16	22% <sup>§</sup>	50%*

<sup>§</sup>: Σε σχέση με τον προηγούμενο αριθμό στρώσεων γεωφάσματος.

\*: Σε σχέση με το μη οπλισμένο δοκίμιο.



Οι Markou & Droudakis (2007) αναφέρουν ότι αντοχή του ενισχυμένου δοκιμίου με τρεις στρώσεις γεωυφάσματος αυξάνεται από 1.7 έως 3 φορές. Με πέντε στρώσεις όπλισης η αύξηση έχει εύρος από 2 έως 6, το ίδιο επιβεβαιώνει και ο Markou (2006), ανάλογα τον τύπο του γεωυφάσματος και το μέγεθος των κόκκων της άμμου. Οι παραμορφώσεις παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση με τιμές από 40-420%, εξαρτώμενες και από τους παράγοντες που θα αναλυθούν στην συνέχεια.

### **3.1.2 Είδος Γεωυφάσματος**

Στην ενισχυμένη άμμο με υφαντά γεωυφάσματα παρατηρείται αύξηση της αντοχής ανεξάρτητα από τις ιδιότητες, το υλικό κατασκευής και τον τρόπο τοποθέτησης του γεωυφάσματος (π.χ. κάθετη τοποθέτηση των ενστρώσεων). Για όπλιση με πέντε στρώσεις γεωυφάσματος η αντοχή είναι 1.8 έως 3.1 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την αντοχή του άοπλου εδάφους. Τα οπλισμένα δοκίμια παρουσιάζουν και αυξημένες παραμορφώσεις. Οι τιμές τους κυμαίνονται μεταξύ 3-9 %, ανάλογα από την πλευρική τάση που εφαρμόζεται. Οι ιδιότητες και το υλικό κατασκευής του γεωυφάσματος δεν επηρεάζουν την παραμορφωσιμότητά του. Η διαδικασία κατασκευής του υφάσματος ενδέχεται να επιδρά και στα δυο μεγέθη χωρίς, όμως να έχει μελετηθεί στοχευμένα το μέγεθος και ο τρόπος επίδρασης. (Markou et al. 2006a)

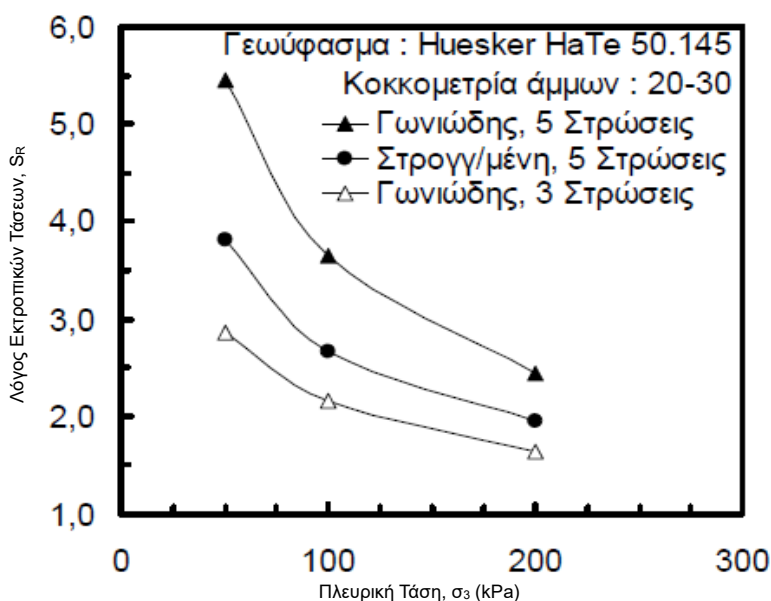
Σε αντίθεση με τα υφαντά, στα μη υφαντά γεωυφάσματα ο τύπος του υφάσματος επηρεάζει την αντοχή αλλά και την παραμορφωσιμότητα του εδάφους. Τα θερμικά συγκολλημένα γεωυφάσματα παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές αντοχής, ακολουθούν τα βελονοδιάτρητα με θερμικά επεξεργασμένες επιφάνειες και ουραγό αποτελούν τα βελονοδιάτρητα (Markou et al. 2006b). Σύμφωνα άποψη, σχετικά με την υψηλότερη αντοχή που παρατηρείται στα θερμικά συγκολλημένα έναντι των άλλων, μη υφαντών γεωυφασμάτων, εκφράζει και ο Koerner (2012). Αντίστροφα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν για την παραμόρφωση αστοχίας των υφασμάτων, αφού χαμηλότερες τιμές έδωσαν τα θερμικά συγκολλημένα ενώ υψηλότερες τα βελονοδιάτρητα (Markou et al. 2006b). Η αντοχή παρατηρείται αυξημένη κατά 1.25 (δηλ. 20%) όταν προστίθεται μια στρώση όπλισης, ενώ για πέντε στρώσεις παρουσιάζει διακύμανση από 1.25 - 4.6 φορές σε σχέση με το μη ενισχυμένο έδαφος.

Σύμφωνα με τους Goodarzi & Shahnazari (2019) η αύξηση της μάζας ανά μονάδα όγκου του γεωυφάσματος αυξάνει την μέγιστη εφελκυστική αντοχή του αλλά και το κόστος του. Σε δοκιμές που έγιναν με γεωυφάσματα αυξανόμενης μάζας ανά μονάδα

όγκου παρατηρήθηκε βελτίωση της αντοχής του σύνθετου υλικού, όμως τονίζουν ότι σε συνάρτηση με την άνοδο του κόστους η βελτίωση αυτή δεν είναι πάντα οικονομικά βιώσιμη (Goodarzi & Shahnazari 2019). Για την εύρεση της βέλτιστης οικονομοτεχνικής λύσης στο εκάστοτε τεχνικό έργο και την επιλογή του κατάλληλου γεωυφάσματος θα πρέπει να πραγματοποιούνται δοκιμές για να διαπιστωθεί αν η επιλογή ενός προϊόντος με μεγαλύτερη μάζα, και ακολούθως υψηλότερη τιμή, θα αποδώσει τα αντίστοιχη βελτίωση στο σύνθετο υλικό.

### 3.1.3 Σχήμα - Μέγεθος Κόκκων

Έχει παρατηρηθεί ότι η αντοχή και η παραμόρφωση σε οπλισμένες άμμους με γωνιώδεις κόκκους είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή των άμμων που έχουν στρογγυλεμένους κόκκους (Markou 2006). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2, η ενίσχυση αμμωδών εδαφών, με 5 στρώσεις γεωυφάσματος, μπορεί να επιφέρει από διπλασιασμό ως και τετραπλασιασμό (στις άμμους με στρογγυλεμένους κόκκους) ή ως και εξαπλασιασμό (στις άμμους με υπογωνιώδεις κόκκους) της αντοχής τους. Η παραμόρφωση μπορεί να παρουσιάσει αύξηση 130-230% επί του άοπλου εδάφους (Markou 2006). Ακόμη, όσο μειώνεται το μέγεθος των κόκκων η αντοχή του σύνθετου υλικού αυξάνεται, αφού η επιφάνεια μεταξύ γεωυφάσματος και εδαφικού υλικού είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των επαφών και κατ' επέκταση της συνάφειας εδάφους - γεωυφάσματος (Markou 2006, Goodarzi & Shahnazari

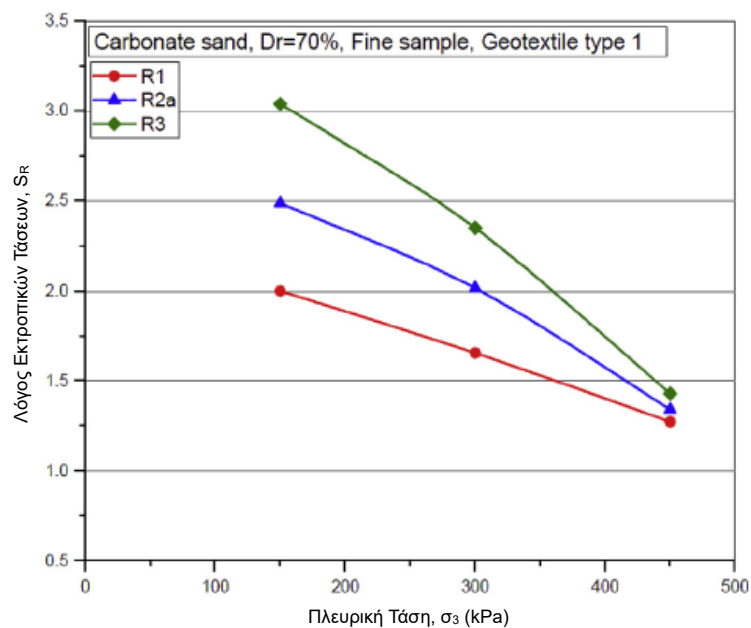


**Σχήμα 3.2:** Λόγοι εκτροπικών τάσεων οπλισμένων άμμων με 3 και 5 στρώσεις γεωυφάσματος (Markou 2006)

2019). Τέλος, δοκίμια οπλισμένης άμμου με στρογγυλεμένους κόκκους παρουσιάζουν τιμές παραμόρφωσης αστοχίας χαμηλότερες από τις άμμους με υπογωνιώδεις κόκκους (Markou 2006).

### 3.1.4 Πλευρική Τάση

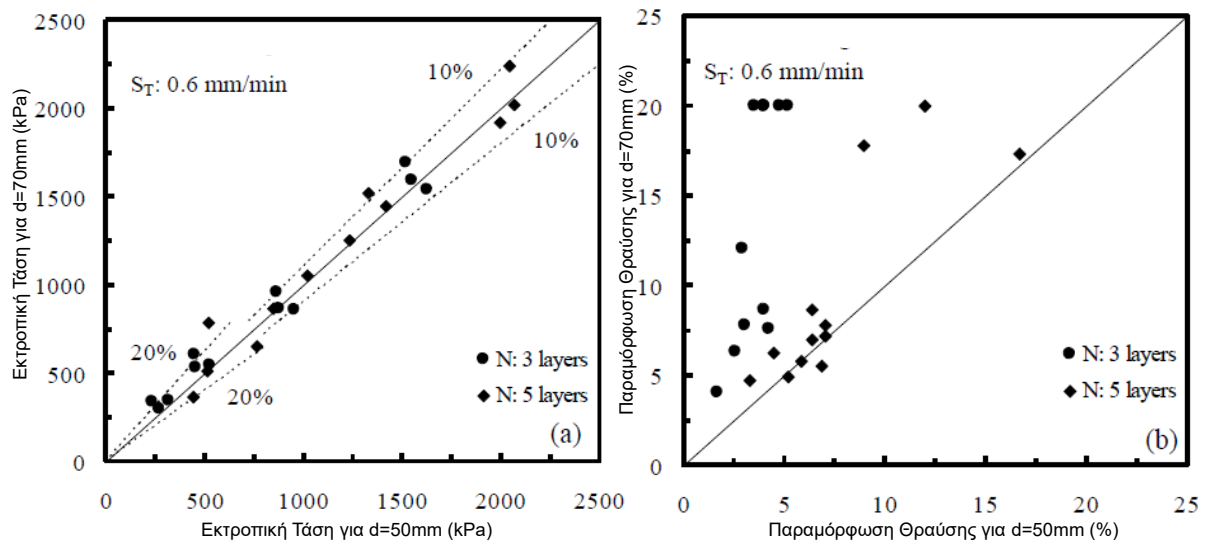
Η λόγος των διεκτροπικών τάσεων  $S_R$  (δηλαδή η δικετορποκή τάση του οπλισμένου δοκιμίου προς την τάση του άοπλου), ελαττώνεται καθώς αυξάνεται η πλευρική τάση (Σχλημα 3.3) ανεξάρτητα το είδος του γεωυφάσματος (Markou 2006, Markou et al. 2006a, Markou et al. 2006b, Goodarzi & Shahnazari 2019). Αυτό φανερώνει, ότι σε μεγάλα βάθη, όπου οι πλευρικές τάσεις είναι μεγαλύτερες, η ενίσχυση με γεωυφάσματα έχει μικρή συμβολή στην αντοχή αμμώδους εδάφους (Goodarzi & Shahnazari 2019). Αντίθετα, σημαντική αύξηση παρατηρείται όταν οι πλευρικές τάσεις είναι μικρές. Αντίθετα, η παραμόρφωση αστοχίας οπλισμένης άμμου αυξάνεται με την αύξηση της πλευρικής τάσης (Markou 2006, Markou et al. 2006a). Στα μη υφαντά γεωυφάσματα, έχει παρατηρηθεί ότι δεν προκύπτει επίδραση στην παραμόρφωση αστοχίας λόγω μεταβολής της πλευρικής τάσης (Markou et al. 2006b), όμως αυτό είναι κάτι που δεν επιβεβαιώνεται σε όλες τις πειραματικές διατάξεις (Markou & Droudakis 2007), οπότε δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα.



**Σχήμα 3.3:** Λόγος εκτροπικών τάσεων-πλευρική τάση, για δοκίμια με μια, δυο και τρεις στρώσεις γεωυφάσματος, R1, R2 και R3 αντίστοιχα (Goodarzi & Shahnazari 2019)

### 3.1.5 Μέγεθος Δοκιμίου

Σε δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με δοκίμια διαφορετικών διαστάσεων, διαμέτρου 50mm - ύψους 101mm και διαμέτρου 70mm - ύψους 141mm, παρατηρήθηκε ότι η επιρροή στη μέγιστη αντοχή του υλικού είναι αμελητέα, όμως η απόκλιση στην παραμόρφωση αστοχίας είναι αξιοσημείωτη. Γενικότερα στο μεγαλύτερο δοκίμιο η παραμόρφωση παρουσίαζε μεγαλύτερες τιμές (Markou & Droudakis 2007). Εν κατακλείδι, δεν θεωρείται ότι το μέγεθος του δοκιμίου έχει κάποια επίδραση στα τελικά αποτελέσματα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.4 (Markou & Droudakis 2007).



**Σχήμα 3.4:** Επίδραση του μεγέθους δοκιμίου (a) στη μέγιστη εκτροπική τάση και (b) στη παραμόρφωση κατά τη θραύση ενισχυμένης άμμου (Markou & Droudakis 2007)

### 3.1.6 Σύνοψη

#### Αντοχή

Συνοψίζοντας, απόρροια όλων των προαναφερθέντων ερευνητικών προσπαθειών αποτελούν τα απόμεινα. Σε κάθε περίπτωση η όπλιση του εδάφους με γεωυφάσματα οδηγεί σε αύξηση της αντοχής τους. Επίσης, η πύκνωση των οπλισμών, δηλαδή η αύξηση του αριθμού των ενθεμάτων, έχει σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της αντοχής. Η τοποθέτηση των οπλισμών πρέπει να γίνεται με τρόπο τέτοιο έτσι ώστε να επικρατούν ίσες αποστάσεις μεταξύ τους και να υπάρχει συμμετρία στο δοκίμιο. Τα υφαντά γεωυφάσματα επιφέρουν αύξηση της αντοχής από 1.8 έως 3.1 φορές, ενώ τα μη υφαντά από 1.25 έως 4.6, με καλύτερα αποτελέσματα να έχουν τα θερμικά συγκολλημένα, ανάλογα τον αριθμό των στρώσεων. Επίσης, η αύξηση του βάρους του γεωυφάσματος συνεπάγεται υψηλότερη αντοχή, αυξάνοντας όμως και το κόστος.

Οι γωνιώδεις και μικρού μεγέθους κόκκοι έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τους στρογγυλεμένους και μεγάλους κόκκους. Στις τριαξονικές δοκιμές η αύξηση της πλευρικής τάσης έχει ως επακόλουθο την μείωση της συνεισφοράς τους γεωυφάσματος στη βελτίωση της αντοχής. Τέλος, το μέγεθος των δοκιμίου δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα των δοκιμών ως προς τον παράγοντα της αντοχής.

### Παραμορφώσεις

Γενικότερα, σε δοκιμές τριαξονικής φόρτισης που έγιναν σε δοκίμια άμμου οπλισμένη με γεωύφασμα παρατηρήθηκαν αυξημένες τιμές στην παραμόρφωση. Επίσης, η προσθήκη επιπλέον στρώσεων οπλισμού οδήγησε σε περαιτέρω αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας. Η παραμόρφωση αστοχίας τόσο στα υφαντά, όσο και στα μη υφαντά παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές. Στα μη υφαντά υπάρχει διαφοροποίηση ανάλογα τον τρόπο κατασκευής τους, με υψηλότερες τιμές να αποδίδουν τα βελονοδιάτρητα. Οι γωνιώδεις κόκκοι αυξάνουν την παραμορφωσιμότητα του γεωσύνθετου υλικού, σε σχέση με του στρογγυλεμένους. Στην οπλισμένη άμμο, η αύξηση της πλευρικής τάσης συνεπάγεται την αύξηση της παραμόρφωσης, γεγονός που όμως δεν παρατηρείται πάντα όταν η ενίσχυση γίνεται με μη υφαντά γεωυφάσματα.

## 3.2. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕ ΑΡΓΙΛΟΥΣ

Σε σχέση με τις άμμους, μικρότερος αριθμός ερευνητικών προσπαθειών έχουν γίνει για την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς αργιλικών υλικών ενισχυμένων με γεωυφάσματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από επιλεγμένες δημοσιεύσεις, δοκιμών τριαξονικής και μονοαξονικής φόρτισης. Οι παράγοντες που έχουν μελετηθεί και επηρεάζουν την συμπεριφορά του σύνθετου υλικού είναι οι κατωτέρω:

- Στρώσεις Γεωυφάσματος
- Είδος Γεωυφάσματος
- Πλευρική Τάση

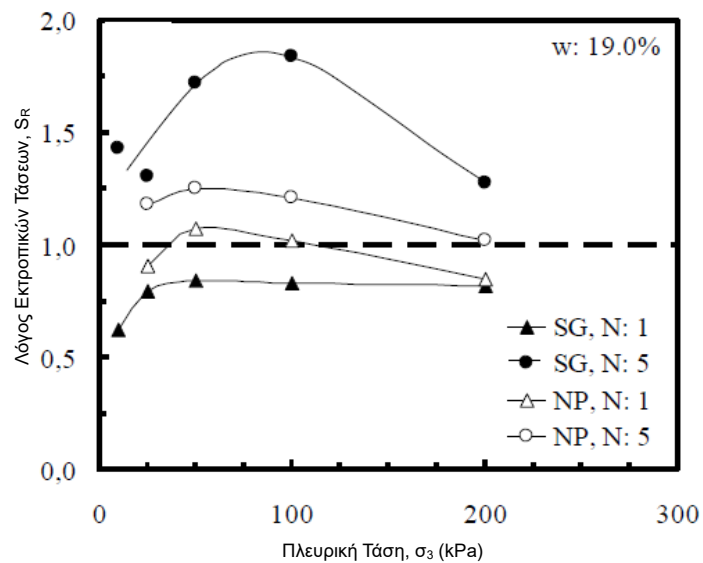
### 3.2.1 Στρώσεις Γεωυφάσματος

#### Δοκιμές Τριαξονικής Φόρτισης

Όπως στις άμμους, έτσι και στις αργίλους η πύκνωση των στρώσεων ενίσχυσης οδηγεί στην αύξηση της αντοχής του σύνθετου υλικού (Droudakis & Markou 2016, Noorzad & Mirmoradi 2010). Περαιτέρω αύξηση της αντοχής, κατά την πύκνωση των στρώσεων γεωυφάσματος (1,2 και 3 στρώσεις) παρατηρήθηκε από τους Noorzad & Mirmoradi (2010). Σύμφωνα με τους Droudakis & Markou (2016) ο λόγος διεκτροπικών τάσεων με προσθήκη μίας στρώσης γεωυφάσματος δεν παρουσιάζει απαραίτητα τιμές μεγαλύτερες της μονάδας, δηλαδή η αντοχή του δοκιμίου ενδέχεται να μειωθεί κατά την όπλιση με μία στρώση γεωυφάσματος (Σχήμα 3.5 τρίγωνα). Η ένθεση πέντε στρώσεων παρουσιάζει λόγο από 1 έως 2, διαπίστωση που συμφωνεί και με άλλες εργαστηριακές έρευνες (Ingold 1983), δηλαδή η όπλιση μπορεί να επιφέρει έως και διπλάσια αντοχή σε σχέση με το μη ενισχυμένο δοκίμιο (Σχήμα 3.5 κύκλοι). Η προσθήκη μια στρώσης γεωυφάσματος οδηγεί σε παραμορφώσεις μικρότερες από αυτές που παρατηρούνται σε μη οπλισμένα δοκίμια, ενώ η όπλιση με πέντε στρώσεις έχει ως συνέπεια την αύξηση της (Droudakis & Markou 2016).

Επίσης, όπως αναφέρθηκε και στις άμμους, για να αρχίσει να εκτελεί την λειτουργία της όπλισης, το γεωύφασμα, θα πρέπει πρώτα να έχει αναλάβει κάποια παραμόρφωση. Από δοκιμές που έγιναν από τους Noorzad & Mirmoradi (2010) οι παραμορφώσεις αυτές θα πρέπει να είναι της τάξης του 5%. Σε τιμές μικρότερες αυτού

το ορίου, για τα συγκεκριμένα γεωυφάσματα, η επίδραση που είχε το μέσο ενίσχυσης ήταν αμελητέα.



**Σχήμα 3.5:** Συσχέτιση μεταξύ αντοχή δοκιμών οπλισμένων με μία και πέντε στρώσεις γεωυφάσματος (Droudakis & Markou 2016)

### Δοκιμές Μονοαξονικής Φόρτισης

Αύξηση της αντοχής αλλά και της παραμόρφωσης του εδάφους παρατηρήθηκε και σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης που εκτέλεσαν οι Noorzad & Mirmoradi (2010). Βελτίωση αυτής της συμπεριφοράς παρατηρήθηκε με πύκνωση των ενθεμάτων. Σύμφωνα με τους ίδιους η ερμηνεία αυτής της συμπεριφορά θα μπορούσε να είναι ότι τα στρώματα γεωυφάσματος παρεμποδίζουν το επίπεδο αστοχίας μέσα στο δείγμα, κατανέμοντας τις τάσεις ομοιόμορφα μέσα στο έδαφος και ως εκ τούτου, αυξάνοντας τη συνολική αντοχή του ενισχυμένου εδάφους.

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποίησαν οι Noorzad & Mirmoradi (2010). Παρατηρείται ότι με την ένθεση τριών στρώσεων γεωυφάσματος η αντοχή αυξήθηκε κατά 40 %. Αξιοσημείωτο είναι ότι με την προσθήκη δυο στρώσεων η αντοχή αυξήθηκε κατά 35% και με την προσθήκη μιας ακόμα στρώσης η επιπλέον αύξηση ήταν 5%. Η παραμόρφωση παρουσίασε συνολική αύξηση 104% σε σύγκριση με το μη οπλισμένο δείγμα.

**Πίνακας 3.2:** Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε αργιλικά εδάφη ενισχυμένα με 1,2 και 3 στρώσεις γεωφάσματος (Noorzad & Mirmoradi 2010)

Στρώσεις	Τάση (kPa)	Αύξηση Τάσης (%)	Παραμόρφωση (%)	Αύξηση Παραμόρφωσης (%)
0	225		2.5	
1	260	16%	3	20%
2	300	15%	4.2	40%
3	315	5%	5.1	21%
<b>Σύνολο</b>		40%		104%

\*Το ποσοστό αύξησης της τάσης και της παραμόρφωσης υπολογίζονται σε σχέση με τη προηγούμενη τιμή.

### 3.2.2 Είδος Γεωφάσματος

#### Δοκιμές Τριαξονικής Φόρτισης

Οι Ingold (1983), Droudakis & Markou (2016) και Noorzad & Mirmoradi (2010) εκτέλεσαν δοκιμές τριαξονικής φόρτισης σε πλήρως κορεσμένες αργίλους με προσθήκη διαπερατών γεωφασμάτων και αδιαπέρατων φύλλων αλουμινίου. Παρατηρήθηκε ότι η αντοχή των δοκιμίων που ενισχύθηκαν με τα φύλλα αλουμινίου μειώθηκε κατά 50 % σε σχέση με το μη οπλισμένο. Αυτό αποδόθηκε στη αύξηση της πίεσης των πόρων στη διεπιφάνεια εδάφους - αλουμινίου. Η χρήση διαπερατών γεωφασμάτων οδηγεί στην, εν μέρη, ομοιόμορφη διάχυση της πίεσης των πόρων σε όλο το δοκίμιο και όχι στην δημιουργία ασθενούν ζώνης στην διεπιφάνεια, με αποτέλεσμα την αποφυγή της πρόωρης αστοχίας και της μείωσης της αντοχής του σύνθετου υλικού. Την άποψη αυτή επιβεβαιώνουν και οι Fabian και Fourier (1986), καθώς αναφέρουν ότι διαπερατά γεωφάσματα μπορούν να αυξήσουν την αντοχή αστράγγιστης αργίλου σχεδόν κατά 40%, και ότι τα μη διαπερατά την μειώνουν κατά ίδιο ποσοστό.

Το είδος του γεωφάσματος (υφαντά και μη) δεν επηρεάζει την μέγιστη παραμόρφωση του δοκιμίου (Droudakis & Markou 2016).

Γενικότερα αξίζει να σημειωθεί ότι τα μη υφαντά γεωφάσματα παρουσιάζουν μεγάλες παραμορφώσεις κατά την αστοχία τους, με αποτέλεσμα να είναι σχεδόν αρκετά δύσκολο να διαρρηχθούν κατά τις εργαστηριακές δοκιμές τριαξονικής φόρτισης.

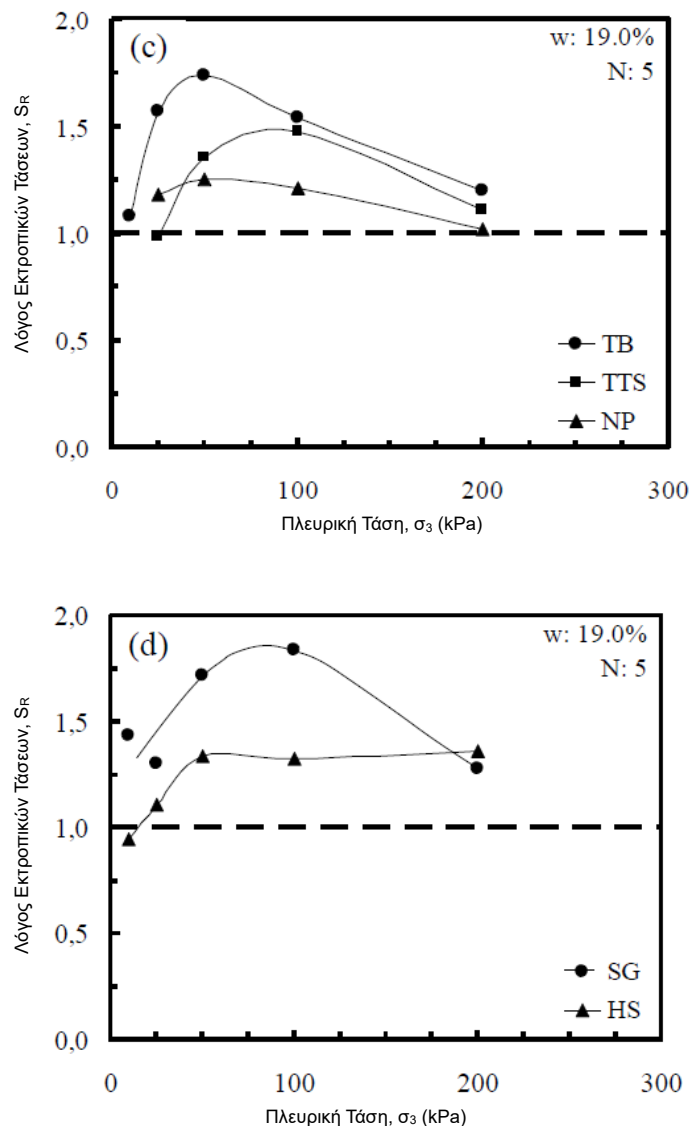
#### Δοκιμές Μονοαξονικής Φόρτισης



Σε δοκιμές που πραγματοποίησαν οι Noorzad & Mirmoradi (2010) με δυο μη υφαντά γεωφάσματα διαφορετικής διαπερατότητας διαπιστώθηκε ότι αυτό με την υψηλότερη διαπερατότητα είχε μεγαλύτερη επιρροή στο έδαφος και έδωσε υψηλότερες τιμές αντοχής.

### 3.2.3 Πλευρική Τάση

Η αύξηση της πλευρικής τάσης σε χαμηλές τιμές, έως 50kPa, οδηγεί σε αύξηση της μέγιστης αντοχής, για τιμές μεταξύ 50kPa και 100kPa παρουσιάζει την μέγιστη τιμή και για τιμές μεγαλύτερες η αντοχή δεν παρουσιάζει ευκρινή ακολουθία (Σχήμα 3.6). Η αξονική παραμόρφωση δεν επηρεάζεται από την πλευρική τάση (Droudakis & Markou 2016).



**Σχήμα 3.6:** Επίδραση πλευρικής τάσης σε οπλισμένα δοκίμια με πέντε στρώσεις για διαφορετικά γεωφάσματα (Droudakis & Markou 2016)

### 3.2.4 Σύνοψη

#### Αντοχή

Εν συντομία, έχει παρατηρηθεί από δοκιμές τριαξονικής και ανεμπόδιστης θλίψης ότι η ενίσχυση αργιλικών εδαφών με την προσθήκη γεωφασμάτων παρουσιάζει αύξηση στην αντοχή του υλικού έως δυο φορές. Η πύκνωση των στρώσεων του οπλισμού επιδίδει αύξηση της αντοχής σε σχέση με αραιή ενίσχυση. Επιπλέον, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η διαπερατότητα του γεωφάσματος, καθώς μεγαλύτερες τιμές διαπερατότητας έχουν ως αποτέλεσμα βελτιωμένη αντοχή. Η αύξηση της πλευρική τάσης έως 100kPa συνεπάγεται την ταυτόχρονη βελτίωση της αντοχής, ενώ για τιμές μεγαλύτερες η αντοχή παρουσιάζει μείωση.

#### Παραμορφώσεις

Γενικότερα οι παραμορφώσεις που παρατηρηθήκαν στα δοκίμια ήταν 20%(σύμβαση ως παραμόρφωση αστοχίας στις τριαξονικές δοκιμές), αφού μέγιστη τάση δεν καταγράφηκε. Το είδος, δηλαδή οι ιδιότητες, του γεωφάσματος δεν επιδρούν στην παραμορφωσιμότητα.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ**

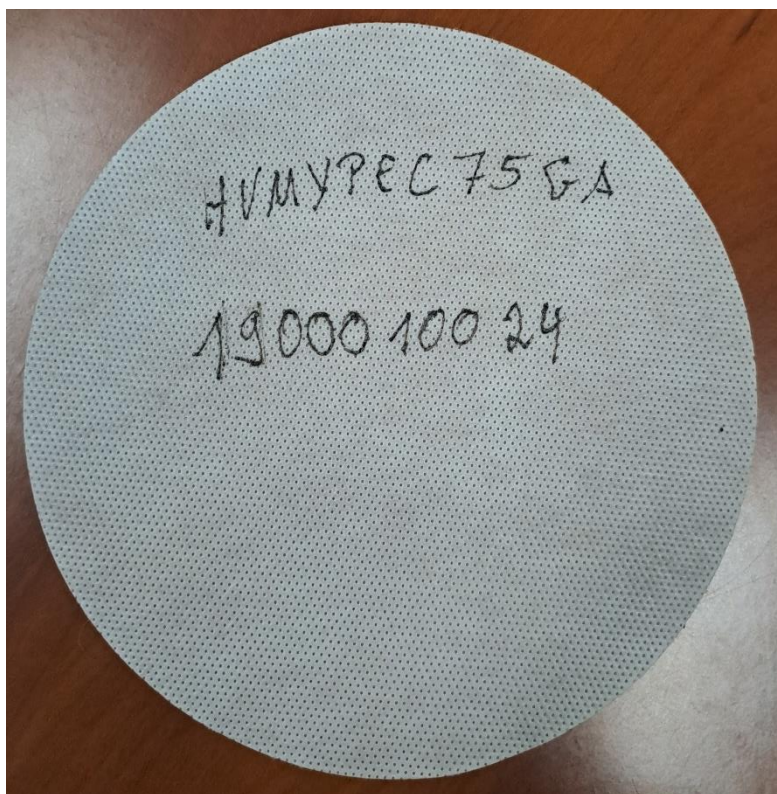
Κύριος στόχος αυτής της ερευνητικής προσπάθειας είναι η μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν εδάφη που σπλιζονται με γεωύφασμα. Στο προηγούμενο Κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό την συλλογή χρήσιμων πληροφοριών που έχουν αποκτηθεί από άλλες ερευνητικές προσπάθειες, στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των υλικών (γεωύφασμα και εδαφικά υλικά) που χρησιμοποιήθηκαν και περιγράφονται οι εργαστηριακές διατάξεις και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την παρασκευή και την εξέταση των σπλισμένων δοκιμίων.

### **4.1. ΥΛΙΚΑ ΜΕΛΕΤΗΣ**

Η δημιουργία του σπλισμένου εδάφους με τη χρήση γεωυφασμάτων επιβάλλει την ένθεση φύλλων γεωυφάσματος εντός του εδαφικού υλικού. Είναι φανερό ότι τα χαρακτηριστικά του νέου σύνθετου υλικού είναι συνάρτηση των επιμέρους χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν τόσο το έδαφος όσο και το γεωύφασμα που χρησιμοποιείται για αυτό το σκοπό. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται το γεωύφασμα και τα εδαφικά υλικά, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργαστηριακής διερεύνησης.

#### **4.1.1 Γεωύφασμα**

Το γεωύφασμα που χρησιμοποιήθηκε είναι μη υφαντό, της εταιρίας HUESKER, φέρει την ονομασία MYPEC-Vlies 75G και αποτελεί νέο προϊόν, το οποίο δεν κυκλοφορεί ακόμα στην αγορά (Σχήμα 4.1). Οι ιδιότητές του ελέγχθηκαν και προσδιορίστηκαν κατά τις γερμανικές προδιαγραφές DIN-EN. Η μάζα του είναι  $75\text{g/m}^2$  και το πάχος του  $0.42\text{mm}$ . Το μέγιστο φορτίο θραύσης κατά την διεύθυνση παραγωγής είναι  $3.4\text{kN/m}$ , ενώ κατά την εγκάρσια διεύθυνση είναι  $2.1\text{kN/m}$ . Η μέγιστη παραμόρφωση κατά την διεύθυνση παραγωγής και κατά την κάθετη της είναι  $37.6\%$  και  $37.3\%$ , αντίστοιχα. Το μέτρο εφελκυσμού για διάφορα ποσοστά παραμόρφωσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1. Τέλος, το φαινόμενο μέγεθος κόκκων  $O_{90}$  είναι ίσο με  $0.055\text{mm}$ . Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται, συγκεντρωτικά, το σύνολο των ιδιοτήτων του συγκεκριμένου γεωυφάσματος.



Σχήμα 4.1: Φωτογραφία γεωυφάσματος ΜΥΡΕC-Vlies 75G

Πίνακας 4.1: Μέτρο εφελκυσμού γεωυφάσματος ΜΥΡΕC-Vlies 75G, για διάφορες τιμές παραμόρφωσης

Μέτρο Εφελκυσμού E (kN/m)	Παραμόρφωση ε (%)			
	2.5	5	7.5	10
MD	37.6	31.25	28.12	22.8
CD	18.8	17.0	14.92	12.5

MD: Κατά τη διεύθυνση παραγωγής

CD: Κάθετα στη διεύθυνση παραγωγής

Πίνακας 4.2: Σύνολο ιδιοτήτων γεωυφάσματος ΜΥΡΕC-Vlies 75G

Κατηγορία Ιδιότητας	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
Φυσικές	Βάρος <sup>#</sup>	75	g/m <sup>2</sup>
	Πάχος	0.42	mm
Μηχανικές	Μέγιστο Φορτίο Θραύσης	3.4 / 2.1*	kN/m
	Παραμόρφωση στη Θραύση ε	37.6 / 37.3*	%
	Μέτρο Εφελκυσμού E (ε=7.5%)	28.12 / 14.92*	kN/m
Υδραυλική	Φαινόμενο Μέγεθος Κόκκων O <sub>90</sub>	0.055	mm

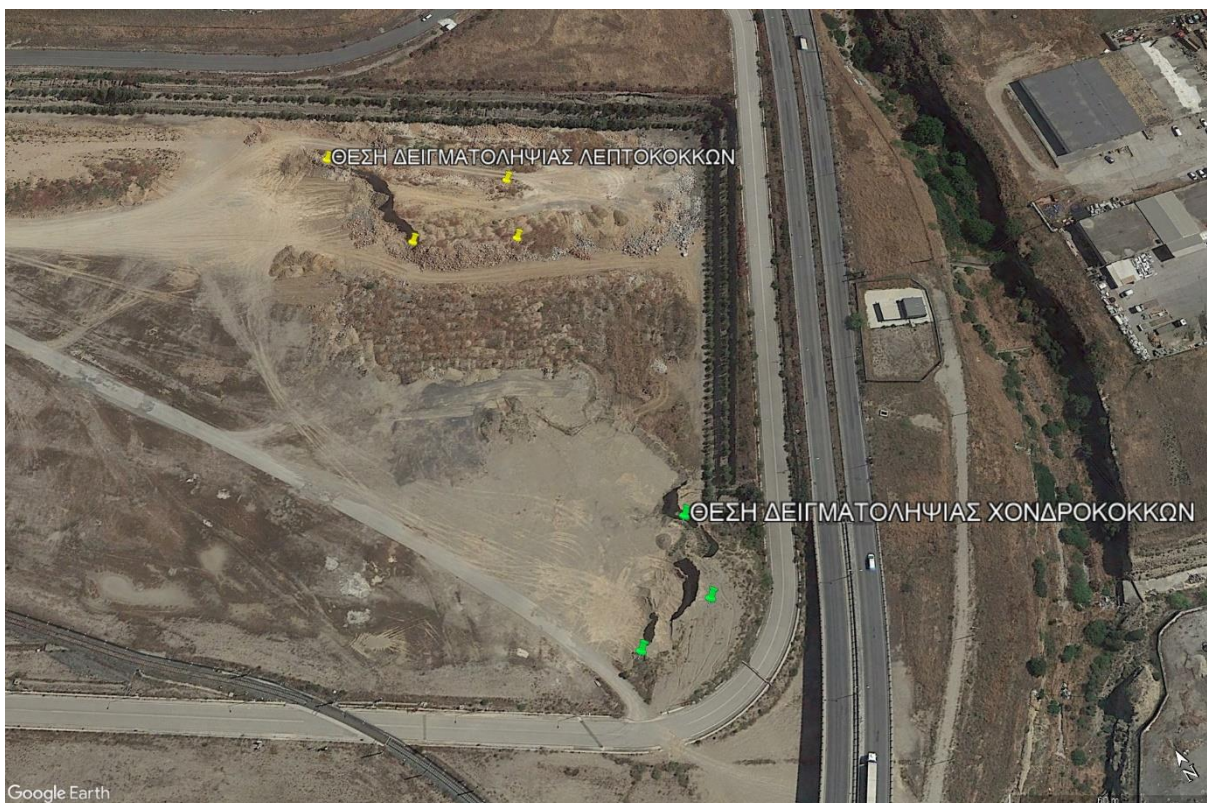
<sup>#</sup>:Μάζα ανά Μονάδα Επιφανείας

\*:Κατά τη / Κάθετα στη διεύθυνση παραγωγής

#### 4.1.2 Εδαφικά Υλικά

Τα δυο εδαφικά υλικά, των οποίων η μηχανική συμπεριφορά μελετήθηκε κατά την όπλιση τους με το γεώφασμα ΜΥΡΕC-Vlies 75G, είναι ένα λεπτόκοκκο και ένα αδρόκοκκο. Η δειγματοληψία, ο προσδιορισμός των απαραίτητων φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων και η προετοιμασία των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν με τον ίδιο τρόπο και για τα δυο υλικά. Ο συγγραφέας της παρούσας Διπλωματικής εργασίας πραγματοποίησε τις ανωτέρω διαδικασίες για το χονδρόκοκκο υλικό, οι οποίες θα παρουσιασθούν αναλυτικά στην ενότητα αυτή. Οι αντίστοιχες ενέργειες για το λεπτόκοκκο κλάσμα πραγματοποιήθηκαν από το προσωπικό του εργαστηρίου της εταιρίας ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΤΕ και θα παρουσιασθούν μόνο τα αποτελέσματά τους.

Τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν συλλέχθηκαν από δυο παραπλήσιους δανειοθαλάμους στο Θριάσιο Πεδίο Αττικής (Σχήμα 4.2). Στο Σχήμα 4.3 φαίνονται, από κοντινή λήψη, στα αριστερά ο δανειοθάλαμος των λεπτόκοκκων υλικών και στα δεξιά αυτός των κοκκωδών.



**Σχήμα 4.2:** Γενική άποψη δανειοθαλάμων στην περιοχή του Θριασίου Πεδίου (06/01/2022)



**Σχήμα 4.3:** Κοντινή άποψη δανειοθαλάμων Αριστερά: Αδρόκοκκα (30/03/2023) Δεξιά: Λεπτόκοκκα (2019)

Το υλικό τοποθετήθηκε σε σάκους, σφραγίστηκε αεροστεγώς, έτσι ώστε να μην αλλοιωθεί η φυσική υγρασία του, και μεταφέρθηκε στο εργαστήριο (Σχήμα 4.4 αριστερά). Στο εργαστήριο ελήφθη αντιπροσωπευτική ποσότητα δείγματος για τον προσδιορισμό της φυσικής υγρασίας. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της υγρασίας, οποτεδήποτε ήταν απαραίτητο σε όλη την πειραματική διαδικασία, πραγματοποιήθηκε ως εξής: Ποσότητα δείγματος λαμβάνεται σε ειδική κάψα και ζυγίζεται, στη συνέχεια τοποθετείται στον φούρνο για 24 ώρες, σε θερμοκρασία 105-110°C (Σχήμα 4.4 μέση και δεξιά). Στη συνέχεια, ζυγίζεται και τοποθετείται εκ νέου στον φούρνο έως ότου το βάρος του να σταθεροποιηθεί. Τέλος, αφαιρείται το τελικό από το αρχικό βάρος και υπολογίζεται το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας, σύμφωνα με τον Τύπο 4.1. Το βάρος της κάψας που τοποθετείται το δείγμα είναι γνωστό και αφαιρείται από τους υπολογισμούς. Η τιμή της φυσικής υγρασίας του χονδρόκοκκου δείγματος κυμάνθηκε μεταξύ 7% και 8.3%.

$$W = \frac{\text{Βάρος Νερού } (G_w)}{\text{Ξηρό Βάρος Δείγματος } (G_d)} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Στη συνέχεια, το σύνολο του υλικού ξηράνθηκε και προσδιορίστηκαν τα Όρια Atterberg (Όριο Υδαρότητας-LL και Όριο Πλασιμότητας-PL) και η κοκκομετρική καμπύλη.

Για τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg λαμβάνεται επαρκής ποσότητα δείγματος διερχομένου από το κόσκινο Νο.40 (<0.425mm). Για το όριο υδαρότητας λαμβάνεται μέρος από το διερχόμενο υλικό (Σχήμα 4.5 α) και ζυμώνεται επαρκώς με τόσο απεσταγμένο νερό, ώστε να σχηματιστεί μια μαλακή – πλαστική μάζα. Αυτή



**Σχήμα 4.4:** Αριστερά: υλικό κατά την άφιξη εργαστήριο Μέση: ζυγός ακριβείας 0.001g Δεξιά: κλίβανος εργαστηρίου

τοποθετείται και επιπεδώνεται στο κέντρο του κυπέλλου της συσκευής CASAGRANDE με την βοήθεια της σπαθίδας, με προσοχή, έτσι ώστε να μην εγκλειστούν φυσαλίδες εντός της μάζας του δείγματος (Σχήμα 4.5 β). Το μεγαλύτερο βάθος του δείγματος πρέπει να είναι 1cm. Το εντός του κυπέλλου έδαφος, διαιρείται με μια σταθερή διαδρομή του οργάνου χαράξεως κατά μήκος της διαμέτρου που διέρχεται από το μέσο του στηρίγματος του κυπέλλου, έτσι ώστε να σχηματιστεί μία καθαρή απότομη χαραγή προδιαγεγραμμένων διαστάσεων. Με την περιστροφή του στρόφαλου της συσκευής η λεκάνη πέφτει ρυθμικά πάνω στο βάθρο του οργάνου μέχρις ότου η χαραγή κλείσει σε μήκος 12.7mm περίπου. Μετά το πέρας της δοκιμής καταγράφεται ο αριθμός των κτύπων που χρειάστηκαν για να κλείσει η χαραγή καθώς και η υγρασία του δείγματος στην περιοχή όπου έκλεισε η χαραγή. Ο αποδεκτός αριθμός κτύπων για το κλείσιμο της χαραγής περιορίζεται μεταξύ 20 και 30. Το όριο υδαρότητας είναι η υγρασία που καταγράφηκε.

Για τον προσδιορισμό του ορίου πλασιμότητας, δείγμα αναμιγνύεται με απεσταγμένο νερό μέχρις ότου η μάζα καταστεί αρκετά πλαστική και να μπορεί να μορφωθεί σε βώλο (Σχήμα 4.5 γ). Η μάζα αυτή κυλινδρώνεται μεταξύ των δακτύλων και συμριδωμένης γυάλινης πλάκας με την ακριβώς απαιτούμενη πίεση, ώστε να κυλινδρωθεί σε ραβδίσκο ομοιόμορφης διαμέτρου σε όλο το μήκος της. Όταν η διάμετρος του ραβδίσκου καταστεί περίπου 3mm, ο ραβδίσκος θραύεται σε τεμάχια. Στη συνέχεια, συμπιέζονται τα τεμάχια μεταξύ τους έως ότου αποκτήσουν ομοιόμορφη μάζα και επαναλαμβάνεται η κυλίνδρωση. Η εναλλαγή συνεχίζεται μέχρι που ο ραβδίσκος αρχίζει να θρυμματίζεται και αποκτήσει διάμετρο περίπου 3mm (Σχήμα 4.5



δ). Το όριο πλασιμότητας υπολογίζεται ως η περιεχόμενη υγρασία αυτών των τεμαχίων.



**Σχήμα 4.5:** α) Εξοπλισμός προσδιορισμού ορίου υδαρότητας β) Έδαφος έτοιμο προς χάραξη γ) Βώλος έτοιμος για κυλινδρισμό δ) Ραβδίσκοι που αρχίζουν να θρυμματίζονται, όριο πλαστικής κατάστασης

Για την κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα, με τη διαδικασία του τετραμερισμού, λαμβάνεται επαρκής ποσότητα ξηρού υλικού, το οποίο ζυγίζεται (Σχήμα 4.6 α). Στη συνέχεια, το υλικό πλένεται, με τη βοήθεια τρεχούμενου νερού (Σχήμα 4.6 β και δ), στο κόσκινο No.200 ( $<0.063\text{mm}$ ) με σκοπό να απομακρυνθούν τα λεπτόκοκκα κλάσματα (άργιοι και ιλύες). Το υπόλοιπο ξηραίνεται στους  $105-110^{\circ}\text{C}$  και ζυγίζεται. Η διαφορά των δυο μετρήσεων είναι το βάρος των λεπτόκοκκων (άργιοι και ιλύες). Το αποξηραμένο υλικό, που παρέμεινε στο κόσκινο μετά την πλύση, αδειάζεται στην στήλη με τα κατάλληλα κόσκινα και κοσκινίζεται (Σχήμα 4.6 γ). Το συγκρατούμενο σε κάθε κόσκινο ζυγίζεται και καταγράφεται. Το διερχόμενο από το τελευταίο κόσκινο (το

No.200) προστίθεται στο βάρος τον λεπτόκοκκων. Η διαφορά βάρους ανάμεσα στο αρχικό ζύγισμα και στο σύνολο των συγκρατούμενων υλικών των διαφορετικών κοσκίνων δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 1% του αρχικού βάρους. Τέλος, κατασκευάζεται η κοκκομετρική καμπύλη από το ποσοστό διερχομένων από το κάθε κόσκινο.



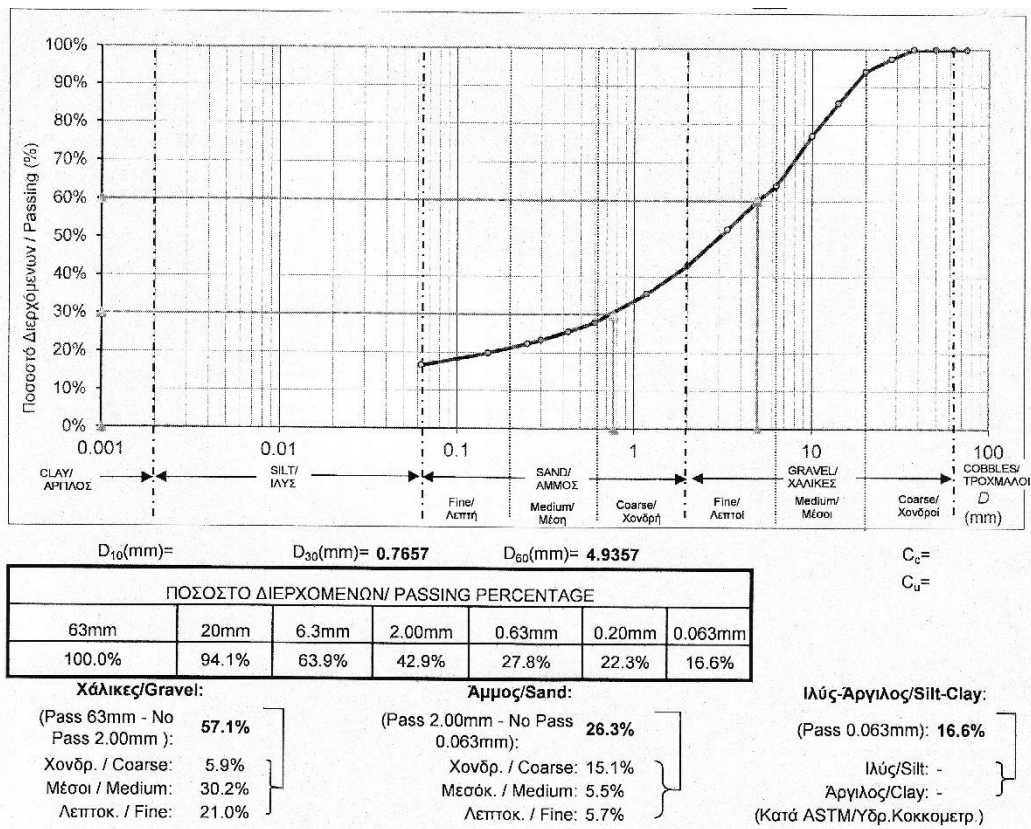
Σχήμα 4.6: α) Ξηρό υλικό μετά από τετραμερισμό β) Πλύσιμο υλικού γ) Διάταξη κοκκομέτρησης δ) Πλυμένο και ξηρό υλικό έτοιμο για κοκκομέτρηση.

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα όρια Atterberg του χονδρόκοκκου υλικού.

Πίνακας 4.3: Όρια Atterberg χονδρόκοκκου υλικού

Όριο Υδαρότητας LL (%)	Όριο Πλασιμότητας PL (%)	Δείκτης Πλασιμότητας $I_p$
23.7	16.7	7

Η κοκκομετρική καμπύλη του χονδρόκοκκου υλικού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7: Κοκκομετρική καμπύλη χονδρόκοκκου υλικού

Δεδομένης της κοκκομετρίας και των ορίων Atterberg, το χονδρόκοκκο υλικό κατατάχθηκε, κατά το Unified Soil Classification System (USCS), ως Ιλυοαργιλώδεις Χάλικες με Άμμο – GC-GM. Όσον αφορά το υλικό αυτό, ελλόχευαν οι εξής κίνδυνοι: α) να παρουσιάσει προβλήματα στην συναρμογή και την συμβατότητα με το γεωύφασμα -καθώς το συγκεκριμένο προϊόν είναι χαμηλής εφελκυστικής αντοχής και προορίζεται για εδάφη μικρότερης κοκκομετρικής διαβάθμισης- και β) να εμφανίσει δυσκολία κατά τη διαμόρφωση των δοκιμίων, για την πραγματοποίηση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης, δεδομένης της μειωμένης συνοχής ενός τόσο χονδρόκοκκου υλικού. Εξαιτίας των ανωτέρω, αποφασίστηκε η κοσκίνιση όλης της ποσότητας του υλικού από το κόσκινο No.10 (<2mm, όριο χαλίκων-άμμων) (Σχήμα 4.8). Στο καινούργιο υλικό, εφεξής χονδρόκοκκο (<2mm), πραγματοποιήθηκαν εκ νέου κοκκομετρικές αναλύσεις και προσδιορισμοί ορίων Atterberg για τον χαρακτηρισμό των φυσικών ιδιοτήτων του. Στα Σχήματα 4.9 και 4.10, αντίστοιχα, παρουσιάζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες των δυο υλικών που μελετήθηκαν, τελικά, στην παρούσα ερευνητική προσπάθεια.

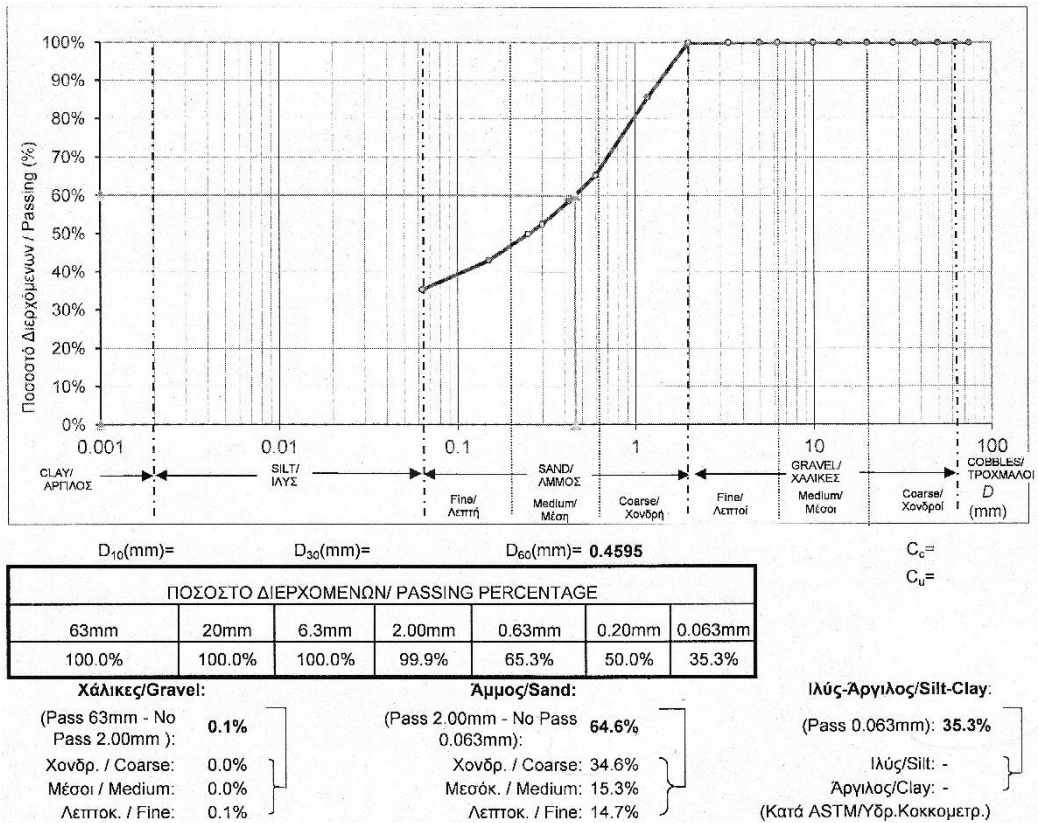


**Σχήμα 4.8:** Διαδικασία κοσκίνισης χονδρόκοκκου υλικού από το κόσκινο No.10 (<2mm)

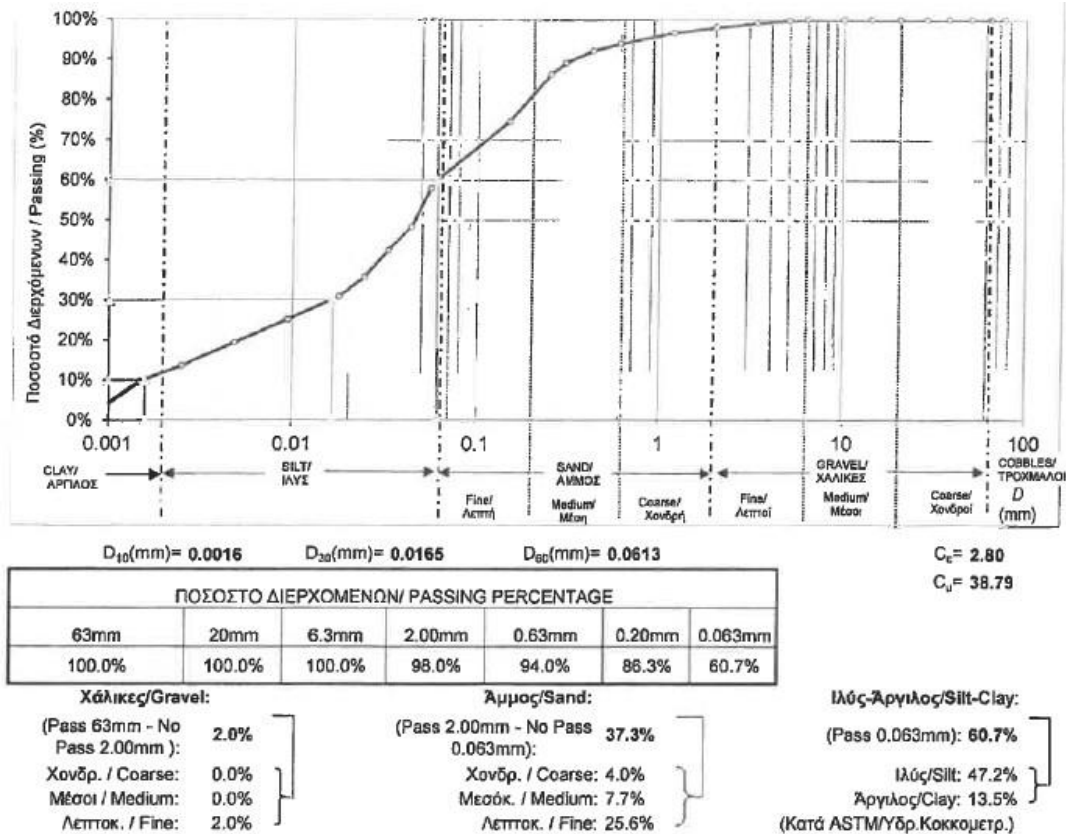
Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται, επίσης, οι φυσικές ιδιότητες τους. Κατά USCS, το χονδρόκοκκο (<2mm) κλάσμα κατατάσσεται ως Αργιλώδης Άμμος – SC και το λεπτόκοκκο ως Αμμώδης Ισχνή Άργιλος – CL. Από το Σχήμα 4.10 παρατηρείται ότι το λεπτόκοκκο υλικό είναι μια καλώς διαβαθμισμένη άργιλος. Επίσης, για το χονδρόκοκκο υλικό δεν πραγματοποιήθηκε δοκιμή αρεομέτρου για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής διαβάθμισης των λεπτόκοκκων κλασμάτων, γι' αυτό απουσιάζει από το διάγραμμα το αντίστοιχο τμήμα.

**Πίνακας 4.4 :** Φυσικές ιδιότητες εδαφικών υλικών

Υλικό	Κατάταξη USCS	Συμβολισμός	Φυσική Υγρασία W (%)	Όριο Υδαρότητας LL (%)	Όριο Πλασιμότητας PL (%)	Δείκτης P <sub>i</sub>
Χονδρόκοκκο (<2mm)	Αργιλώδης Άμμος	SC	7.0-8.3	24.7	17	7.7
Λεπτόκοκκο	Αμμώδης Ισχνή Άργιλος	CL	-	23.5	14.3	9.2



Σχήμα 4.9: Κοκκομετρική καμπύλη χονδρόκοκκου (<2mm) υλικού μετά την κοσκίνιση (Αργιλώδης Άμμος)



Σχήμα 4.10: Κοκκομετρική καμπύλη λεπτόκοκκου υλικού (Αμμόδης Ισχνή Άργιλος)

## 4.2. ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΟΠΛΙΣΗΣ

Αντικειμενικός σκοπός μιας εργαστηριακής διερεύνησης σχετικής με την ενίσχυση με γεωυφάσματα λεπτόκοκκων και χονδροκόκκων εδαφών είναι η καλύτερη δυνατή προσομοίωση των συνθηκών που επικρατούν στο πεδίο, σε πραγματικές εφαρμογές. Με γνώμονα το σκεπτικό αυτό, επιλέχθηκαν τρόποι για την τοποθέτηση των γεωυφασμάτων εντός του εδαφικού υλικού, προσεγγίζοντας τις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται οι τρόποι αυτοί, αλλά και η διαδικασία μόρφωσης των δοκιμίων.

### 4.2.1 Συμπύκνωση Εδαφικών Υλικών

Αναπόσπαστο κομμάτι κατά την όπλιση του εδάφους με γεωύφασμα αποτελεί η συμπύκνωσή του εδαφικού υλικού μεταξύ των στρώσεων της ενίσχυσης, στον επιθυμητό βαθμό. Για την εκτέλεση των πειραμάτων της παρούσας μελέτης, προσδιορίστηκε η βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης μέσω της μεθόδου Proctor.

Καθώς το σύνολο του υλικού διέρχεται από το κόσκινο με διάμετρο 16mm, σύμφωνα με την προδιαγραφή EN 13286.02, επιλέχθηκε η τροποποιημένη μέθοδος Proctor και μήτρα με διάμετρο 100mm, ύψος 120mm και ύψος δακτυλίου 450mm.

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής, λήφθηκε ξηρό υλικό και χωρίστηκε σε πέντε αντιπροσωπευτικά δείγματα, το καθένα μάζας τριών κιλών και τοποθετήθηκε σε διαφορετικές λεκάνες (Σχήμα 4.11 α). Στην πρώτη λεκάνη προστέθηκαν 120gr νερού, στη δεύτερη 240gr, στην τρίτη 360gr, στην τέταρτη 480gr, στην πέμπτη 600gr (Σχήμα 4.11 β και γ) και αναδευτήκαν έως ότου κατανεμήθηκε ομοιόμορφα η υγρασία σε όλη την μάζα του υλικού (Σχήμα 4.11 δ). Στη συνέχεια, έλαβε χώρα η διαδικασία της συμπύκνωσης. Σύμφωνα με το πρότυπο, ίση ποσότητα υλικού μοιράστηκε σε πέντε στρώσεις, όπου η κάθε μια συμπυκνώθηκε με 25 κτύπους (Σχήμα 4.11 ε). Η τελική στρώση δεν ξεπέρασε το ύψος της μήτρας, χωρίς τον δακτύλιο, πάνω από 10mm, όπως ορίζει το πρότυπο. Η μήτρα αφαιρέθηκε από τον κόπανο, αφαιρέθηκε ο δακτύλιος, με προσοχή και επιπεδώθηκε η τελική επιφάνεια του υλικού (Σχήμα 4.11 στ). Στην συνέχεια, ζυγίστηκε η μήτρα με το συμπυκνωμένο υλικό και καταγράφηκε η μάζα της. Τέλος, αφαιρέθηκε το υλικό από το εσωτερικό της μήτρας και λήφθηκε δείγμα για την μέτρηση της υγρασίας, με τη συνήθη διαδικασία. Η διαδικασία επαναλήφθηκε και για τα υπόλοιπα αντιπροσωπευτικά δείγματα για να δοθούν τουλάχιστον τέσσερεις

προσδιορισμοί της υγρασίας του δείγματος. Από τα δεδομένα αυτά κατασκευάστηκε η καμπύλη Proctor για την Αργιλώδη Άμμο που φαίνεται στο Σχήμα 4.12α . Αντίστοιχα, στο σχήμα 4.12 β παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την Αμμώδη Ισχνή Άργιλο.

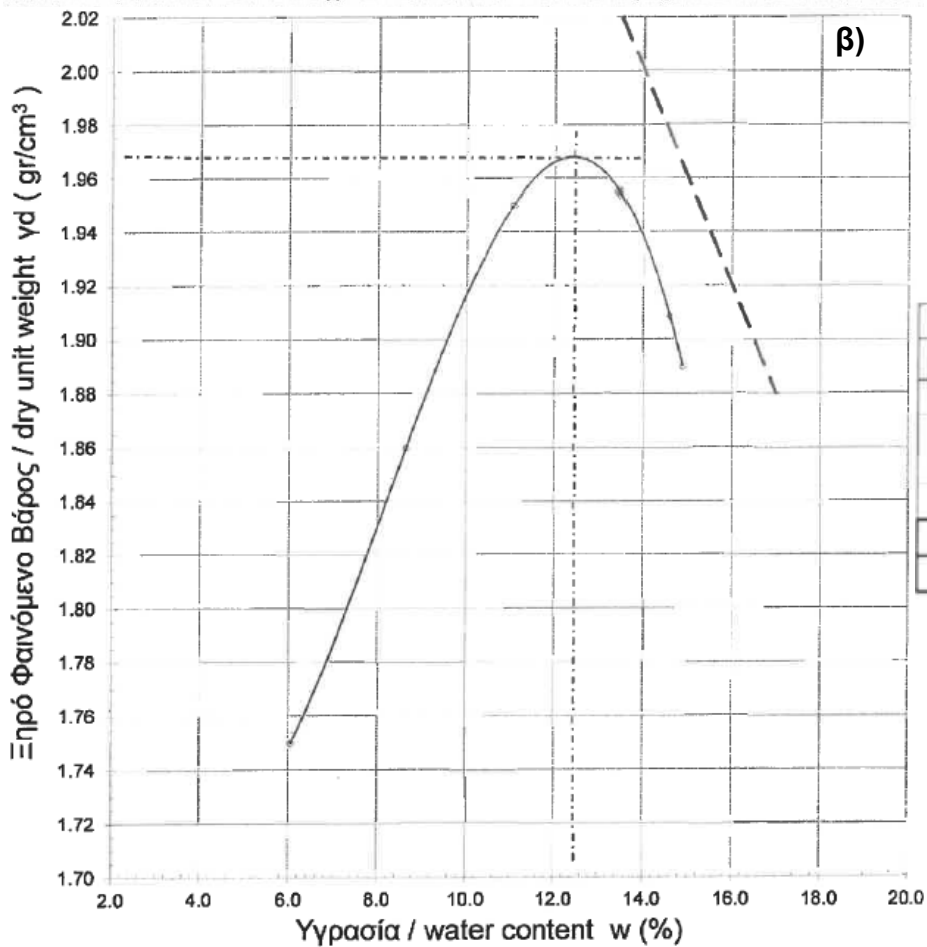
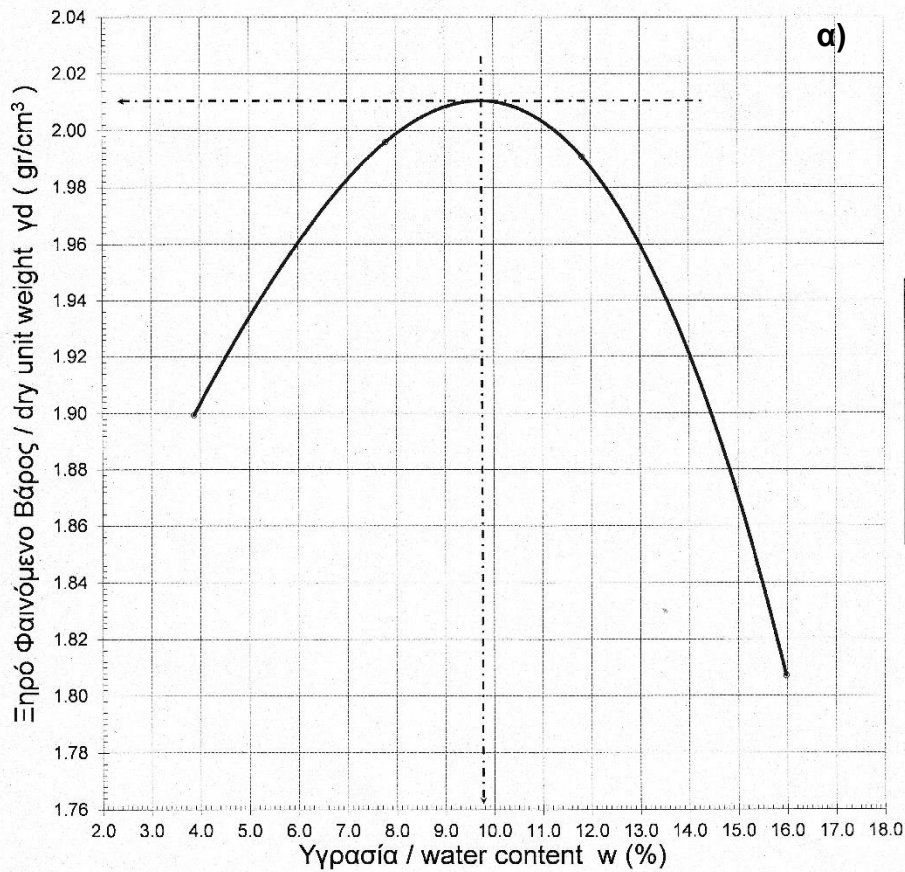
Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται, επίσης, οι τιμές της βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης,  $W$  και του ξηρού φαινόμενου βάρους,  $\gamma_d$  των δυο υλικών.

**Πίνακας 4.5:** Συγκεντρωτικός πίνακας βέλτιστης υγρασίας συμπίκνωσης  $w$  και ξηρού φαινόμενου βάρους  $\gamma_d$

Υλικό	Συμβολισμός	W (%)	$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )
Αργιλώδης Άμμος	SC	9.8	2.01
Αμμώδης Ισχνή Άργιλος	CL	12.4	1.96



**Σχήμα 4.11:** Διαδικασία προσδιορισμού βέλτιστης πυκνότητας Proctor α) Ζύγιση κατάλληλης ποσότητας υλικού β) Ογκομέτρηση επιλεγμένης ποσότητας νερού γ) Ενυδάτωση δείγματος (πριν την ανάδευση) δ) Ομοιόμορφα ενυδατωμένο δείγμα μετά την ανάδευση στ) Κόπανος κατά την διαδικασία συμπίκνωσης ζ) Διαμόρφωση τελικής επιφάνειας υλικού, πριν τη ζύγιση



Σχήμα 4.12: Καμπύλες Proctor α) Αργιλώδης Άμμος και β) Αμμώδης Ισχνή Άργιλος



#### 4.2.2 Διαδικασία Παρασκευής Δοκιμών

Η μελέτη για την βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της Αργιλώδους Άμμου, έγινε σε δοκίμια οπλισμένα με μία και με δυο στρώσεις γεωυφάσματος. Η συμπεριφορά αυτών των δοκιμών συγκρίθηκε με τα αντίστοιχα μηχανικά χαρακτηριστικά που επέδειξαν τα μη οπλισμένα δοκίμια. Σκοπός αυτής της ενότητας είναι να παρουσιαστεί ο τρόπος κατασκευής και όπλισης των δοκιμών.



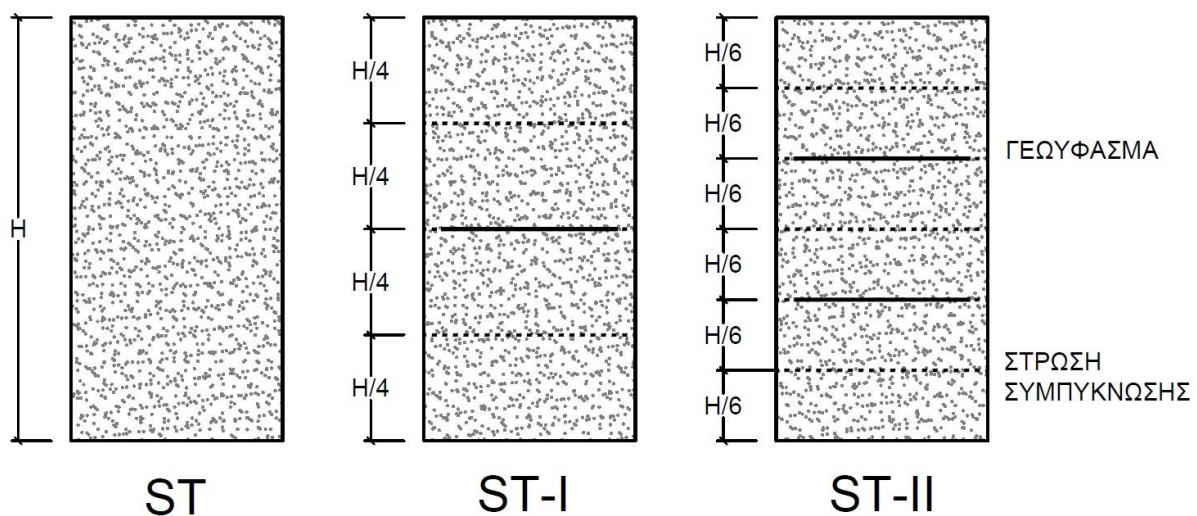
*Σχήμα 4.13: Συσκευή συμπίκνωσης*

Όλα τα δοκίμια συμπυκνώθηκαν με την βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης  $w=9.8\%$ , που υπολογίσθηκε από την δοκιμή Proctor (Σχήμα 4.13). Για κάθε δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν 2551gr ξηρού υλικού στα οποία προστέθηκαν 250gr νερού. Στην συνέχεια, το υλικό αυτό αναδεύονταν επαρκώς, έτσι ώστε η υγρασία να κατανομηθεί ομοιόμορφα σε όλη την ποσότητα του υλικού, και αφήνονταν για ωρίμανση μια μέρα με σκοπό την βέλτιστη ενυδάτωση του εδαφικού ιστού. Από την ποσότητα του υλικού που παρασκευαζόταν για κάθε δοκίμιο, οπλισμένα και άοπλα, χρησιμοποιούνταν 2350gr τα οποία ισομοιράζονταν στις αντίστοιχες στρώσεις που επιλέχθηκαν για την συμπίκνωση του κάθε δοκιμίου.

Τα μη οπλισμένα δοκίμια συμπυκνώθηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές της τροποποιημένης δοκιμής Proctor, δηλαδή πέντε στρώσεις ίδιας ποσότητας εδαφικού υλικού (2350gr/5στρώσεις = 470gr/στρώση), έκαστη συμπυκνωμένη με 25 κτύπους. Συνολικά δηλαδή 125 κτύποι. Αυτό επιλέχθηκε καθώς η διαδικασία αυτή ορίζεται από τις προδιαγραφές και αποτελεί τον αποδεκτό τρόπο για την συμπύκνωση αμμωδών εδαφών (Σχήμα 4.14 ST).

Τα οπλισμένα δοκίμια με μια στρώση γεωφάσματος κατασκευάστηκαν από τέσσερις στρώσεις εδαφικού υλικού, όπου η καθεμία περιείχε 587.5gr (2350gr/4στρώσεις). Δεδομένου ότι η ποσότητα του εδαφικού υλικού που περιείχε η κάθε στρώση ήταν περισσότερη (σε σχέση με αυτή του άοπλου), για την συμπύκνωση επιλέχθηκαν 31 τύποι σε κάθε στρώση και συνολικά 124 κτύποι έτσι ώστε η ενέργεια συμπύκνωσης που δέχεται κάθε στρώση να είναι ανάλογη με αυτή που δίδεται στο υλικό του μη οπλισμένου δείγματος και η συνολική ενέργεια να είναι παρόμοια (125 κτύποι στο άοπλο-124 στο οπλισμένο με μια στρώση). Το γεωφάσμα τοποθετήθηκε μεταξύ της δεύτερης και τρίτης στρώσης, μετά την συμπύκνωση της δεύτερης (Σχήμα 4.14 ST-I).

Τα δοκίμια με ένθεση δυο φύλλων γεωφασμάτων κατασκευάστηκαν από έξι στρώσεις εδαφικού υλικού, όπου η κάθε μια περιείχε 392gr (2350gr/6στρώσεις). Σε αυτή την περίπτωση η συμπύκνωση έγινε με 21 κτύπους σε κάθε στρώση, αφού η μικρότερη ποσότητα εδαφικού υλικού απαιτούσε μικρότερη ενέργεια συμπύκνωσης. Η συνολική ενέργεια συμπύκνωσης ήταν και πάλι η ίδια, δηλαδή 21 κτύποι επί 6 στρώσεις, συνολικά 126 κτύποι. Σε αυτή την περίπτωση τα δυο φύλλα γεωφάσματος



Σχήμα 4.14: Διατάξεις γεωφασμάτων στην Αργιλώδη Άμμο

τοποθετήθηκαν μετά την συμπίκνωση της δεύτερης και της τέταρτης στρώσης, σε παράλληλη διάταξη (Σχήμα 4.14 ST-II).

Ο αριθμός των κτύπων κατά την διαδικασία συμπίκνωσης των οπλισμένων δοκιμίων, με μια και με δυο στρώσεις γεωφάσματος, επιλέχθηκε έτσι ώστε η συνολική Ενέργεια Συμπύκνωσης,  $E_{comp}$  να είναι ίδια με αυτή που προσφέρεται στην τροποποιημένη δοκιμή Proctor και κατ' επέκταση στο μη οπλισμένο δοκίμιο. Η ποσότητα αυτής της ενέργειας υπολογίζεται από τον Τύπο 4.2 (Budhu 2020, Das 2010) και είναι  $2697 \text{ kJ/m}^3$  για την τροποποιημένη δοκιμή Proctor.

$$E_{comp} = \frac{W_h \cdot h_d \cdot N_b \cdot N_l}{V_m} \quad (4.2)$$

Όπου  $W_h$  = το βάρος του τύπτρου

$h_d$  = το ύψος πτώσης του τύπτρου

$N_d$  = ο αριθμός των κρούσεων σε κάθε στρώση

$N_l$  = ο αριθμός των στρώσεων

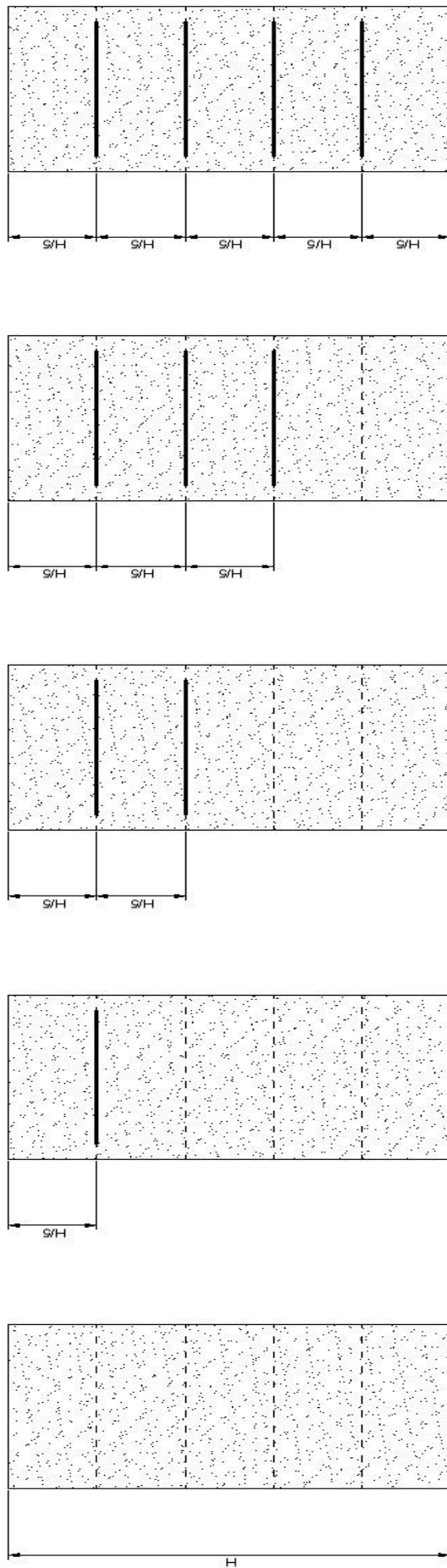
$V_m$  = ο όγκος του συμπυκνωμένου εδάφους

Η συνολική Ενέργεια Συμπύκνωσης που προσφέρθηκε σε κάθε δοκίμιο παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.6.

*Πίνακας 4.6: Ενέργεια Συμπύκνωσης*

Αριθμός Γεωφασμάτων	Αριθμός Στρώσεων $N_l$	Αριθμός Κρούσεων ανά Στρώση $N_d$	Συνολικός Αριθμός Κτύπων	Ενέργεια Συμπύκνωσης $E_{comp} \text{ (kJ/m}^3\text{)}$
<b>0</b>	5	25	125	<b>2697</b>
<b>1</b>	4	31	124	<b>2676</b>
<b>2</b>	6	21	126	<b>2719</b>

Η διατάξεις των στοιχείων όπλισης που χρησιμοποιήθηκαν για την Αμμώδη Ισχνή Άργιλο παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.14.



- - - - - ΣΤΡΩΣΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ  
 ————— ΓΕΩΦΑΣΜΑ

Σχήμα 4.15: Διατάξεις γεωφασμάτων στην Αρμώδη Ισχνή Άργιλο

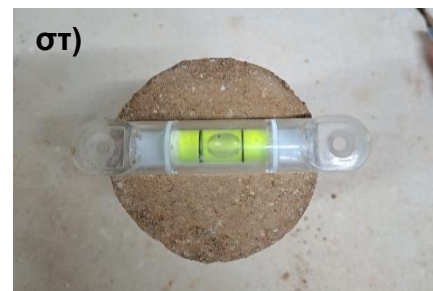
### 4.3. ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Μετά την συμπύκνωση τους, τα δοκίμια εξάγονταν από την μήτρα με τη βοήθεια εξολκέα και διαμορφώνονταν στις προβλεπόμενες διαστάσεις για την εκτέλεση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης (Σχήμα 4.14 α). Σύμφωνα με τα πρότυπα ο λόγος ύψους προς διάμετρο πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 1.8 - 2.5 και ο μέγιστος κόκκος του δοκιμίου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το 1/6 της διαμέτρου του. Για μεγαλύτερη ομοιομορφία και ελαχιστοποίηση των αβεβαιοτήτων, ο λόγος αυτός περιορίστηκε μεταξύ 1.9 - 2.15 με εύρος υψών και διαμέτρων 12.5 - 13.5 και 5.8 - 6.8, αντίστοιχα. Το μήκος της διαμέτρου ήταν εντός των προβλεπόμενων τιμών σε σχέση με το μέγιστο μέγεθος κόκκου. Εκτός από την προσεκτική διαμόρφωση των περι τον άξονα του δοκιμίου επιφανειών (Σχήμα 4.14 β-δ), ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε και στην επίπεδη μόρφωση της άνω και κάτω βάσης, έτσι ώστε κατά την θλίψη του δοκιμίου οι ασκούμενες δυνάμεις να κατανέμονται ομοιόμορφα σε ολόκληρη την επιφάνεια (Σχήμα 4.14 ε και στ). Στην συνέχεια, το δοκίμιο ζυγιζόταν και το βάρος του καταγραφόταν με ακρίβεια. Στην όλη διαδικασία ελήφθη πρόνοια ώστε να μην υπάρχουν καθυστερήσεις που οδηγούν σε αλλοίωση της υγρασίας του δείγματος. Στις περιπτώσεις που ήταν απαραίτητη η διακοπή, το δοκίμιο τυλίχθηκε με μεμβράνη, ώστε να προφυλαχθεί.

Ανάλογα με την σκληρότητα του υλικού, την συνοχή και την αναμενόμενη αντοχή του δοκιμίου, επιλέχθηκε και εφαρμόστηκε στην μηχανή θραύσης ο κατάλληλος δακτύλιος (Σχήμα 4.15). Η ταχύτητα της δοκιμής ήταν, επίσης, κοινή για όλα τα δοκίμια και βάσει πινάκων ορίστηκε σε 1.2mm/min. Τέλος, τα δοκίμια τοποθετούνταν στην μηχανή θραύσης κατά την φορά συμπύκνωσής τους, δηλαδή η κατώτερη στρώση της συμπύκνωσης αποτελούσε και την βάση έδρασης των δοκιμίων. Κατά την διάρκεια της δοκιμής καταγράφονταν μακροσκοπικές παρατηρήσεις και λαμβάνονταν φωτογραφίες πριν και μετά την αστοχία. Μετά το πέρας της δοκιμής, λαμβανόταν δείγμα από το εσωτερικό των δοκιμίων για καταγραφή της υγρασίας, για τυχόν αποκλίσεις από την αναμενόμενη. Στο Παραρτήματα Β και Γ υπάρχουν διαθέσιμα τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών που εκτελέστηκαν καθώς και το αντίστοιχο φωτογραφικό υλικό.

Για την αποφυγή της διαδικασίας μόρφωσης και των δυσκολιών που συνεπάγεται, υπάρχει η δυνατότητα παρασκευής αναζυμωμένων δοκιμίων με την χρήση της συσκευής Harvard Miniature Compaction, όπου ο λόγος ύψους-διαμέτρου είναι 2.15

(ύψος 7.153cm και ύψος 3.334 cm) και δεν χρειάζεται περαιτέρω διαμόρφωση μετά την διαδικασία συμπύκνωσης. Για περισσότερες πληροφορίες μπορεί κανείς να ανατρέξει στην αντίστοιχη βιβλιογραφία (Παπαχαρίσης et al.).



**Σχήμα 4.16:** α) Δοκίμιο πριν την μόρφωση και εργαλεία μόρφωσης β,γ και δ) Πλάγια όψη δοκιμίων μη οπλισμένων, οπλισμένων με μια και με δυο στρώσεις γεωφάσματος, αντίστοιχα, πριν και μετά την μόρφωση ε) Κάτοψη διαμορφωμένου και μη δοκιμίου στ) Επίπεδη άνω βάση δοκιμίου



*Σχήμα 4.17: Μηχανή μονοαξονικής θλίψης TRIPLEX MULTI-TESTER 5011*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Ένας από τους βασικότερους στόχους ενίσχυσης εδαφικών δοκιμών με γεωύφασμα είναι η αύξηση της αντοχής και η βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του σύνθετου υλικού. Η αξιολόγηση των γεωυφασμάτων βασίζεται, κυρίως, στην εξέταση δοκιμών που οφείλουν να προσομοιώνουν το δυνατόν καλύτερα τις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο. Όπως προέκυψε από την βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε (Κεφάλαιο 3), ως πιο διαδεδομένες μέθοδοι αξιολόγησης της αντοχής οπλισμένων δοκιμών με γεωύφασμα θεωρούνται οι δοκιμές ανεμπόδιστης (μονοαξονικής) θλίψης και τριαξονικής φόρτισης. Η αντοχή του ενισχυμένου εδάφους σε ανεμπόδιστη θλίψη δεν αποτελεί αξιόπιστη παράμετρο σχεδιασμού, καθώς δεν θεωρείται αντιπροσωπευτική της επί τόπου αντοχής του οπλισμένου εδάφους. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη δοκιμή αποτελεί ένα εύχρηστο εργαλείο για την πραγματοποίηση αναλύσεων λόγω της απλότητας που την διακρίνει. Από την άλλη πλευρά, η δοκιμή τριαξονικής φόρτισης -αν και περισσότερο πολύπλοκη και χρονοβόρα- προσομοιώνει περισσότερο ικανοποιητικά τις *in situ* συνθήκες, επιτρέποντας τον αξιόπιστο προσδιορισμό των παραμέτρων του εδαφικού υλικού. Δεδομένου του χρόνου που απαιτείται για την εκπαίδευση και την εξοικείωση εκτέλεσης δοκιμών με την συσκευή τριαξονικής φόρτισης, αλλά και των λοιπών εργασιών που συνεπάγονται την περάτωση μιας Διπλωματικής εργασίας εντός του προβλεπόμενου χρονικού ορίου (βιβλιογραφική ανασκόπηση, επεξεργασία - ερμηνεία αποτελεσμάτων, συγγραφή, κ.α.), αποφασίστηκε να εκτελεστούν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης, για την μελέτη του παρόντος θέματος.

Στο Κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές που εκτελέστηκαν. Αρχικά, γίνεται παράθεση των αποτελεσμάτων σε μορφή πινάκων και στη συνέχεια σχολιάζονται οι καμπύλες τάσεων και παραμορφώσεων σε σχέση με το πλήθος των ενθεμάτων οπλισμού. Τα συμπεράσματα που τελικά προκύπτουν, συγκρίνονται με πληροφορίες που προέρχονται από τη βιβλιογραφία.

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι όλες οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με το λεπτόκοκκο κλάσμα (Αμμώδης Ισχνή Άργιλος - CL) πραγματοποιήθηκαν από το προσωπικό της εταιρίας ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΤΕ. Ο



συγγραφέας της παρούσας Διπλωματικής εργασίας πραγματοποίησε μόνο την επεξεργασία, την ανάλυση και τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων αυτών.

## 5.1. ΑΡΓΙΛΩΔΗΣ ΑΜΜΟΣ

Γενικά, οι μορφές των καμπυλών, που παρατίθενται συγκεντρωμένες στο Παράρτημα Β, δεν παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις σε σχέση με το πλήθος των ενθεμάτων όπλισης. Στις περισσότερες περιπτώσεις εμφανίζουν ένα ευθύγραμμο τμήμα, κατά το μεγαλύτερο μέρος τους, το οποίο δηλώνει την γραμμική σχέση μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων. Τελικά, μετά την ευθύγραμμη περιοχή, καταλήγουν σε ένα τμήμα καμπύλης μορφής, με ήπια κλίση και τα κοίλα στραμμένα προς τα κάτω, το οποίο υποδηλώνει την περιοχή αστοχίας των δοκιμίων.

*Γενικά διακρίνονται δύο τύποι αστοχίας: ο ψαθυρός και ο πλαστικός τύπος. Ως ψαθυρός χαρακτηρίζεται ο τύπος αστοχίας κατά τον οποίο ένα δοκίμιο δεν έχει την δυνατότητα να διατηρήσει την αντοχή του σε υψηλά επίπεδα μετά την αστοχία, με αποτέλεσμα αυτή να μειώνεται με ταχύ ρυθμό. Σε μια τέτοια περίπτωση το καμπύλο τμήμα παρουσιάζει έντονη κλίση, η οποία διαμορφώνεται από την παρουσία ενός απότομου κλάδου πτώσης. Αντίθετα, κατά τον πλαστικό τύπο αστοχίας το δοκίμιο είναι σε θέση να διατηρεί την αντοχή του σε υψηλά επίπεδα ακόμη και μετά την αστοχία. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο κλάδος πτώσης εμφανίζει μικρή κλίση. (Δρουδάκης 2009)*

Προσδιορισμός του τύπου αστοχίας δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από τα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων, καθώς δεν αποτελεί ευδιάκριτο στοιχείο η κλίση του καμπύλου τμήματος, δηλαδή της περιοχής πέριξ της αστοχίας. Μακροσκοπικά, όμως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1 (και στα υπόλοιπα σχήματα του Παρατήματος Γ), τα μη οπλισμένα δοκίμια καθώς και αυτά με μια στρώση γεωφάσματος επέδειξαν ψαθυρή θραύση με ταυτόχρονη διαμόρφωση επιπέδου διατμητικής αστοχία. Παρόμοια συμπεριφορά, σχετικά με τον τρόπο θραύσης, έχει παρατηρηθεί και από τους Goodarzi & Shahnazari (2019). Οι κλίσεις  $\beta$  των επιπέδων αυτών έλαβαν τιμές  $75^\circ - 80^\circ$ . Σύμφωνα με την γνωστή εξίσωση  $\beta=45^\circ+\varphi/2$  μπορεί να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της γωνίας τριβής,  $\varphi$ , του οπλισμένου εδάφους με μια στρώση γεωφάσματος, η οποία φαίνεται να κυμαίνεται από  $60^\circ$  έως  $70^\circ$ . Αντίθετα, τα δοκίμια με δυο στρώσεις οπλισμού, μετά την αστοχία, ήταν σε θέση να διατηρήσουν κάποιο ποσοστό της μέγιστης αντοχής τους. Στις περιπτώσεις όπου δεν

παρατηρήθηκε ψαθυρή θραύση -κυρίως στα δοκίμια με δυο στρώσεις οπλισμού- η αστοχία ξεκινούσε από το ανώτερο επίπεδο, συνεχιζόταν στο ενδιάμεσο στρώμα και κατέληγε στην βάση. Στις περιοχές όπου αστοχία έτεμνε το γεωύφασμα παρατηρούνταν χρονική καθυστέρηση στην πρόοδο των επιπέδων θραύσης. Δηλαδή, το δοκίμιο δεν αστοχούσε συνολικά, αλλά υπήρχε διαδοχική μετάβαση της αστοχίας από το ανώτερο στο κατώτερο στρώμα.

Από τις καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων προσδιορίστηκε το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας,  $E_{tan}$  όλων των δοκιμών, το οποίο εκφράζει την ακαμψία του υλικού. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται η μέγιστη αντοχή, η παραμόρφωση αστοχίας και το μέτρο ελαστικότητας για το σύνολο των δοκιμών που έγιναν.



**Σχήμα 5.1:** Αριστερά: Δοκίμιο με μια στρώση γεωυφάσματος Δεξιά: Δοκίμιο με δυο στρώσεις γεωυφάσματος

*Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα δοκιμών Αργιλώδους Άμμου: αντοχή, παραμόρφωση (κατά την αστοχία) και παραμορφωσιμότητα*

Πλήθος Οπλισμών	Ονομασία Δοκιμίου	Τάση (kPa)	Παραμόρφωση (%)	$E_{tan}$ (MPa)
0	ST-2	689.07	3.77	22.7
0	ST-4	655.12	3.23	25.0
0	ST-7	722.39	4.19	22.5
0	ST-8	715.88	4.39	18.5
0	ST-9	868.13	4.19	23.0
0	ST-10	866.3	5.24	20.0
<b>Μέση Τιμή</b>		<b>752.8</b>	<b>4.2</b>	<b>22.0</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>		91.7	0.7	2.3
<b>COV</b>		<b>12.2%</b>	<b>16.0%</b>	<b>10.5%</b>

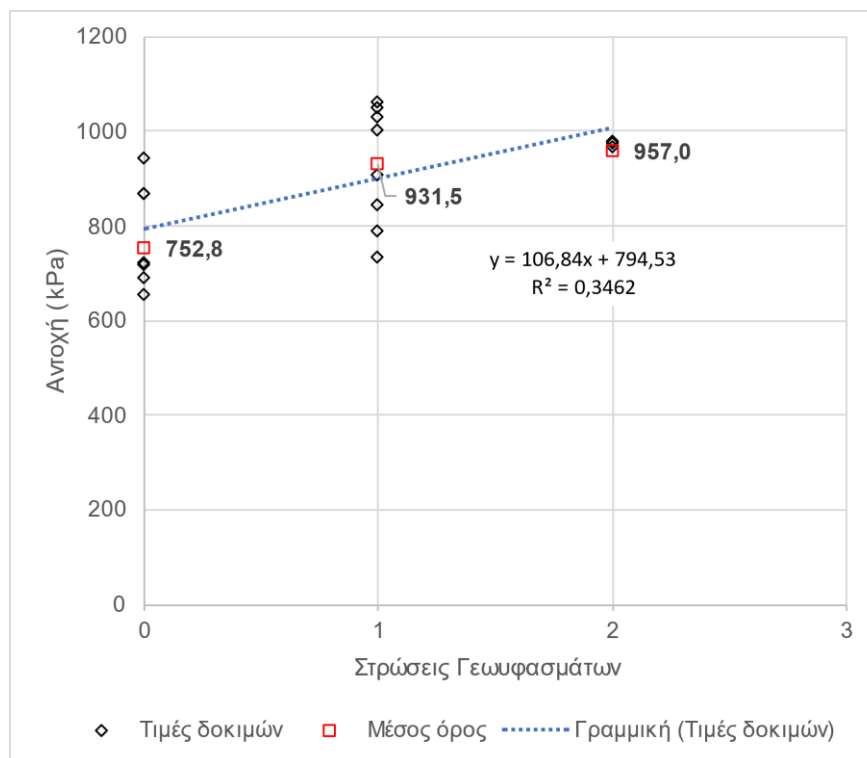
  

Πλήθος Οπλισμών	Ονομασία Δοκιμίου	Τάση (kPa)	Παραμόρφωση (%)	$E_{tan}$ (MPa)
1	ST-I_2	941.38	4.12	27.7
1	ST-I_4	788.78	4.15	25.0
1	ST-I_5	1062.76	4.65	26.6
1	ST-I_6	1002.89	4.55	25.0
1	ST-I_7	1049.15	4.58	26.6
1	ST-I_8	732.67	4.15	20.8
1	ST-I_9	845.69	5.54	20.6
1	ST-I_10	1028.86	4.62	25.0
<b>Μέση Τιμή</b>		<b>931.5</b>	<b>4.5</b>	<b>24.7</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>		127.1	0.5	2.6
<b>COV</b>		<b>13.6%</b>	<b>10.2%</b>	<b>10.7%</b>

Πλήθος Οπλισμών	Ονομασία Δοκιμίου	Τάση (kPa)	Παραμόρφωση (%)	$E_{tan}$ (MPa)
2	ST-II_5	906.91	4.48	23.3
2	ST-II_6	975.29	4.96	26.0
2	ST-II_7	968.19	4.51	25.8
2	ST-II_8	977.7	5.58	21.6
<b>Μέση Τιμή</b>		<b>957.02</b>	<b>4.88</b>	<b>24.2</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>		33.7	0.5	2.1
<b>COV</b>		<b>3.5%</b>	<b>10.5%</b>	<b>8.7%</b>

Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζονται τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε συνάρτηση με το πλήθος των στρώσεων γεωφασμάτων. Επίσης, για κάθε ομάδα δοκιμών (είτε μη οπλισμένα είτε με μια και με δυο στρώσεις γεωφάσματος) απεικονίζεται ο μέσος όρος αντοχής ανά ομάδα δοκιμών (με κόκκινο τετράγωνο). Η γραμμή τάσης στο διάγραμμα ( $y = 109.07x + 780.67$ ) έχει προσδιοριστεί από το σύνολο των δοκιμών, αλλά ουσιαστικά είναι η ίδια με αυτή που προκύπτει από τον μέσο όρο των αντοχών ( $y = 102.1x + 778.35$ ). Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της γραμμής τάσης ( $y = 109.07x + 780.67$ ), η αντοχή αυξάνεται κατά 12-14%, με μειούμενο ρυθμό όσο πυκνώνεται ο αριθμός των στρώσεων, η οποία όμως δεν αντιπροσωπεύει τα πραγματικά αποτελέσματα, όπως αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.



**Σχήμα 5.2:** Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονική θλίψης Αργιλώδους Άμμου (ST, ST-I και ST-II)

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2 η όπλιση με μία στρώση γεωφάσματος παρουσιάζει αξιόλογη βελτίωση της αντοχής, κατά 24%, σε σχέση με το μη οπλισμένο δοκίμιο. Η συγκεκριμένη τιμή αρκετά ικανοποιητική, καθώς συμφωνεί με άλλες ερευνητικές προσπάθειες (Goodarzi & Shahnazari 2019) οι οποίες αναφέρουν, αντίστοιχα βελτίωση της τάξης του 20%. Η προσθήκη δεύτερης στρώσης ενίσχυσης προσδίδει πολύ μικρή αύξηση, της τάξης του 3%. Ουσιαστικά το δεύτερο φύλλο γεωφάσματος

δεν προσδίδει επιπλέον αντοχή. Η έλλειψη ενισχυτικού στοιχείο στο μέσον του δοκιμίου, ενδεχόμενος, να οδήγησε σε αυτή την συμπεριφορά, καθώς η ύπαρξη οπλισμού στον περιοχή αυτή, αποτελεί καθοριστικό γεγονός για τη βελτίωσης της αντοχής, όπως σημειώνεται και στη βιβλιογραφία (Markou et al. 2006b). Η παρούσα υπόθεση θα μπορούσε να διερευνηθεί με την προσθήκη τριών στρώσεων όπλισης το οποίο, όμως δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί σε αυτή την ερευνητική προσπάθεια.

**Πίνακας 5.2:** Ομαδοποιημένα αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης Αργιλώδους Άμμου (αντοχή-στατιστική επεξεργασία)

Στρώσεις γεωφασμάτων	Μέση τιμή αντοχής (kPa) $\mu$	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής μεταβλητότητας COV	Αύξηση αντοχής
0	752.8	91.7	12.2%	-
1	931.5	127.1	13.6%	24%
2	957.0	33.7	3.5%	3%

Γενικότερα, κατά την εκτέλεση δοκιμών με αμμώδη υλικά, αποτελεί αντικειμενική δυσκολία η διαμόρφωση των δειγμάτων στις κατάλληλες διαστάσεις εξαιτίας της μειωμένης συνοχής που επιδεικνύουν τα υλικά αυτής της σύστασης. Η χαμηλή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα κλάσματα, τα οποία λειτουργούν ως συνδετικό υλικό, οδηγεί σε μειωμένη συνοχή και στη δημιουργία επιφανειών αδυναμίας, οι οποίες, όπως αποδείχθηκε, κατά την εξόλκευση του δείγματος από την μήτρα συμπύκνωσης

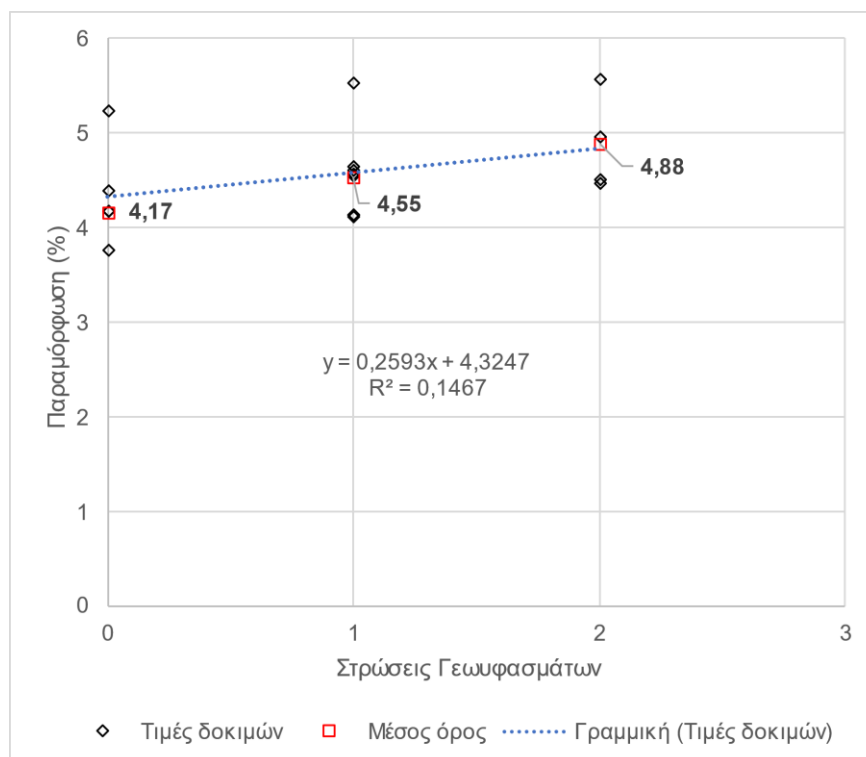


**Σχήμα 5.3:** Δοκίμια με επιφάνειες αστοχίας (πριν την θραύση) η οποίες δημιουργήθηκαν κατά την διαδικασία της διαμόρφωσης

και κατά την διαδικασία διαμόρφωσης του δοκιμίου αστοχούν. Τέτοιου είδους επιφάνειες παρατηρήθηκαν τόσο στα δοκίμια με μια στρώση σπλισμού, όσο και σε αυτά με δυο. Στα πρώτα, οι περιοχές αυτές ήταν επιφανειακές, καθώς κατά την διαμόρφωση και την αφαίρεση του περιττού υλικού δεν παρουσίασαν εμμονή προς το εσωτερικό, με αποτέλεσμα το τελικό δοκίμιο να παραμείνει ακέραιο. Στις περιπτώσεις με τα δυο ενθέματα ενίσχυσης, παρουσιάζονταν έντονες ρωγματώσεις κατά την εξόλκευση από την μήτρα, οι οποίες κατά την διαδικασία διαμόρφωσης οδηγούνταν σε πλήρη αστοχία τις κατώτερης στρώσης (Σχήμα 5.3).

Αποφυγή των εν λόγω προβλημάτων είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την σχεδίαση αυτοσχέδιων διατάξεων συμπύκνωσης, στις επιθυμητές διαστάσεις, για την αποφυγή της διαδικασίας διαμόρφωσης, η οποία αναπόφευκτα διαταράσσει το δοκίμιο. Ασφαλώς, μείζον πρόβλημα, το οποίο είναι απαραίτητο να λυθεί, αποτελεί ο υπολογισμός και η παροχή της σωστής ενέργειας συμπύκνωσης, έτσι ώστε να μην υπάρχουν παρεκκλίσεις από τα εκάστοτε πρότυπα.

Στο Σχήμα 5.4 απεικονίζονται οι τιμές παραμόρφωσης των δοκιμίων κατά την αστοχία, για το σύνολο των δοκιμών (μη σπλισμένα - με μια και με δυο στρώσεις γεωφάσματος). Οι τιμές παρουσιάζουν ανοδική τάση, με την προσθήκη μίας στρώσης γεωφάσματος να προσδίδει αύξηση στην παραμόρφωση κατά 9%, σε



**Σχήμα 5.4:** Παραμορφώσεις κατά την αστοχία Αργιλώδους Άμμου (ST, ST-I και ST-II)



**Σχήμα 5.5:** Ψαθυρή αστοχία δοκιμίου (αριστερά) με παράλληλη αστοχία (σχίσσιμο) γεωυφάσματος (δεξιά)

σχέση με τα άοπτα δοκίμια. Η ένθεση και δεύτερου οπλισμού επιφέρει επιπλέον βελτίωση της τάξης του 7%. Σε δοκιμές τριαξονικής φόρτισης, η οποίες έχουν πραγματοποιηθεί από άλλους ερευνητές, έδειξαν μεγάλο εύρος σχετικά με το ποσοστό βελτίωσης της παραμόρφωσης. Η συνολική αύξηση της παραμόρφωσης, με τη προσθήκη δυο στρώσεων γεωυφασμάτων, είναι της τάξης του 17% και κρίνεται ιδιαίτερα αξιόλογη, ιδίως σε αμμώδη υλικά τα οποία είναι δύσκαμπτα.

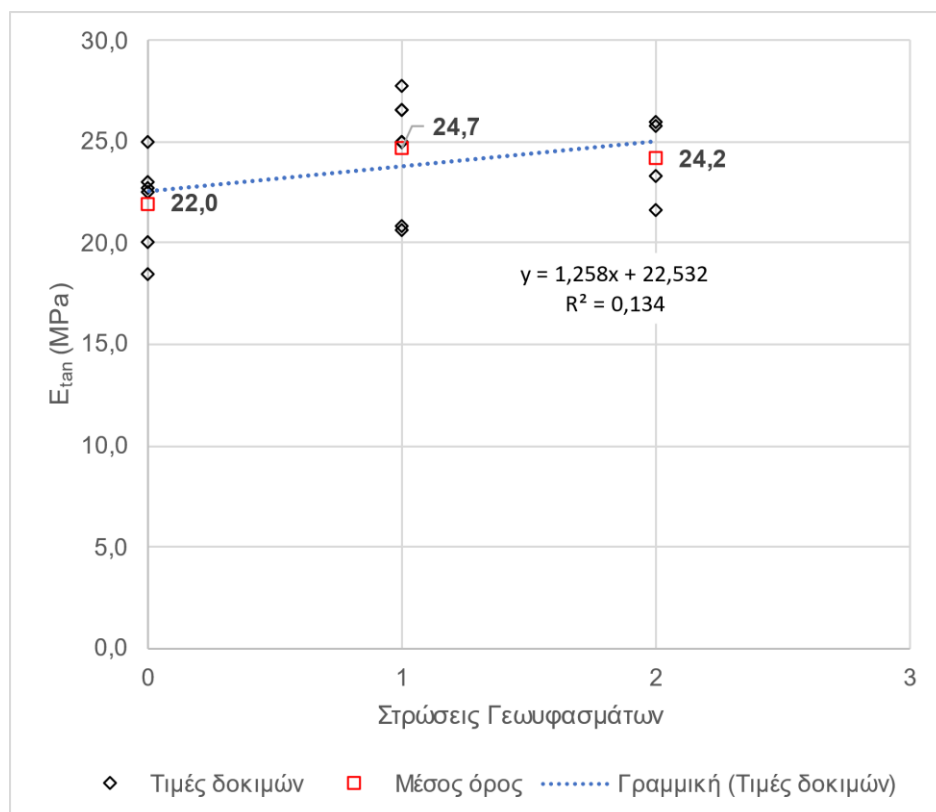
Τα δοκίμια με μία στρώση γεωυφάσματος αστόχησαν ψαθυρά, κατά την πλειοψηφία τους, και επέδειξαν μέγιστη αντοχή περίπου 1MPa. Παράλληλα, παρατηρήθηκε και αστοχία (σχίσσιμο) του γεωυφάσματος (Σχήμα 5.5). Αυτή η συμπεριφορά, σε συνδυασμό με την αύξηση της αντοχής που καταγράφηκε, υποδηλώνει την επίτευξη υψηλού βαθμού συνεργασίας μεταξύ γεωυφάσματος και εδάφους, με επακόλουθο την λειτουργία τους ως ενιαίο σώμα. Επίσης, το σχίσσιμο του γεωυφάσματος αποτελεί ένδειξη ότι ο συνδυασμός των δυο αυτών υλικών δεν δύναται να προσφέρει υψηλότερες τιμές αντοχής. Περαιτέρω αύξηση της αντοχής του υπάρχοντος εδαφικού υλικού θα μπορούσε να επιτευχθεί με χρήση διαφορετικού γεωυφάσματος ή, ενδεχομένως, με πύκνωση του αριθμού των ενθεμάτων.

Όπως σχολιάστηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, παρόλο που η όπλιση με δεύτερο στρώμα γεωυφάσματος δεν προσδίδει αξιόλογη αύξηση στη αντοχή του υλικού φαίνεται να επιδρά σημαντικά στον τρόπο αστοχίας του. Το σύνολο των δοκιμών που εκτελέστηκαν με δύο στρώσεις ενίσχυσης, μετά την ανώτερη τιμή

αντοχής συνέχισαν να λαμβάνουν φορτία και δεν εμφάνισαν ακαριαία, συνεχή, επιφάνεια αστοχίας. Αυτή η συμπεριφορά κρίνεται αξιόλογη, καθώς, στις περιπτώσεις εκείνες κατά τις οποίες δεν απαιτείται περαιτέρω αύξηση της αντοχής, αλλά το ζητούμενο είναι ο έλεγχος του τρόπου αστοχίας και η σταδιακή εξέλιξή του, η προσθήκη δεύτερης στρώσης γεωφάσματος μπορεί να επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 5.6 δίνεται η μεταβολή του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας. Σύμφωνα με την γραμμή τάσης παρατηρείται μια αυξητική τάση της τάξης του 12% (3MPa) κατά την προσθήκη μιας στρώσης γεωφάσματος. Η όπλιση με δεύτερη στρώση δεν επιφέρει επιπλέον αύξηση στον μέτρο ελαστικότητας.

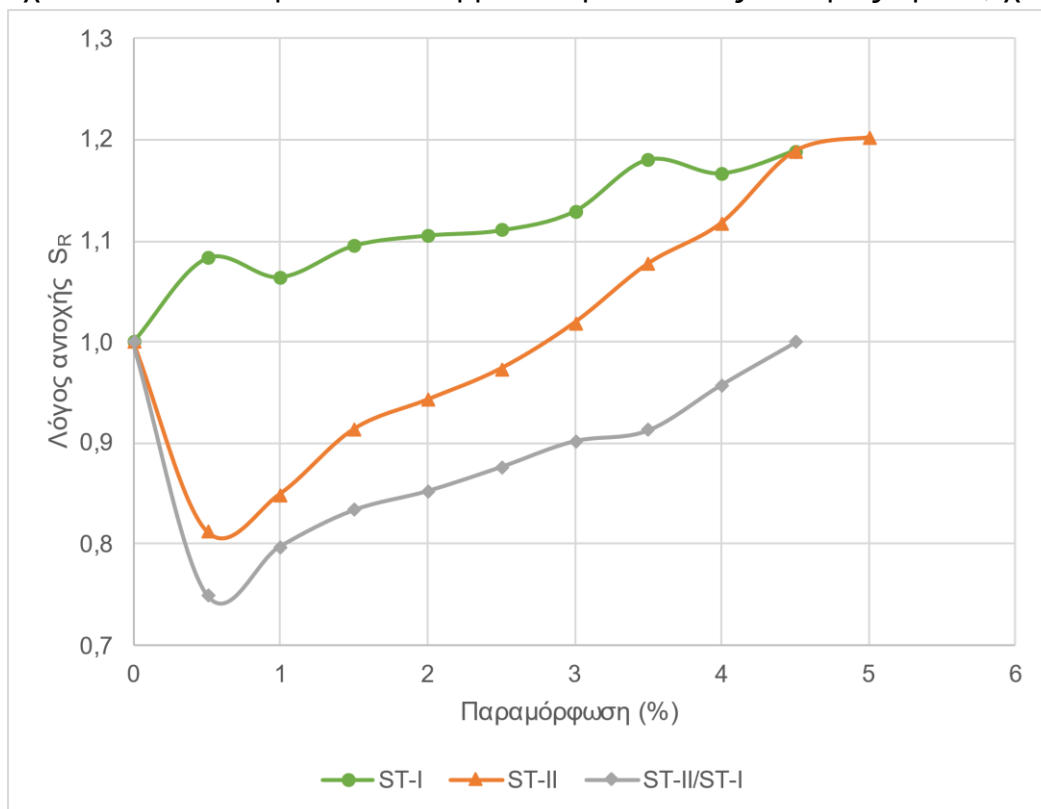
Στο Σχήμα 5.7 απεικονίζονται οι καμπύλες της κανονικοποιημένης τάσης συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης για τον προσδιορισμό του ποσοστού ενίσχυσης στα οπλισμένα δοκίμια. Η κανονικοποιημένη τάση  $S_R$  ορίζεται ως το πηλίκο της αντοχής των ενισχυμένων δοκιμίων προς την αντοχή των μη οπλισμένων, στην ίδια παραμόρφωση.



**Σχήμα 5.6:** Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας Αργιλώδους Άμμου (ST, ST-I και ST-II)



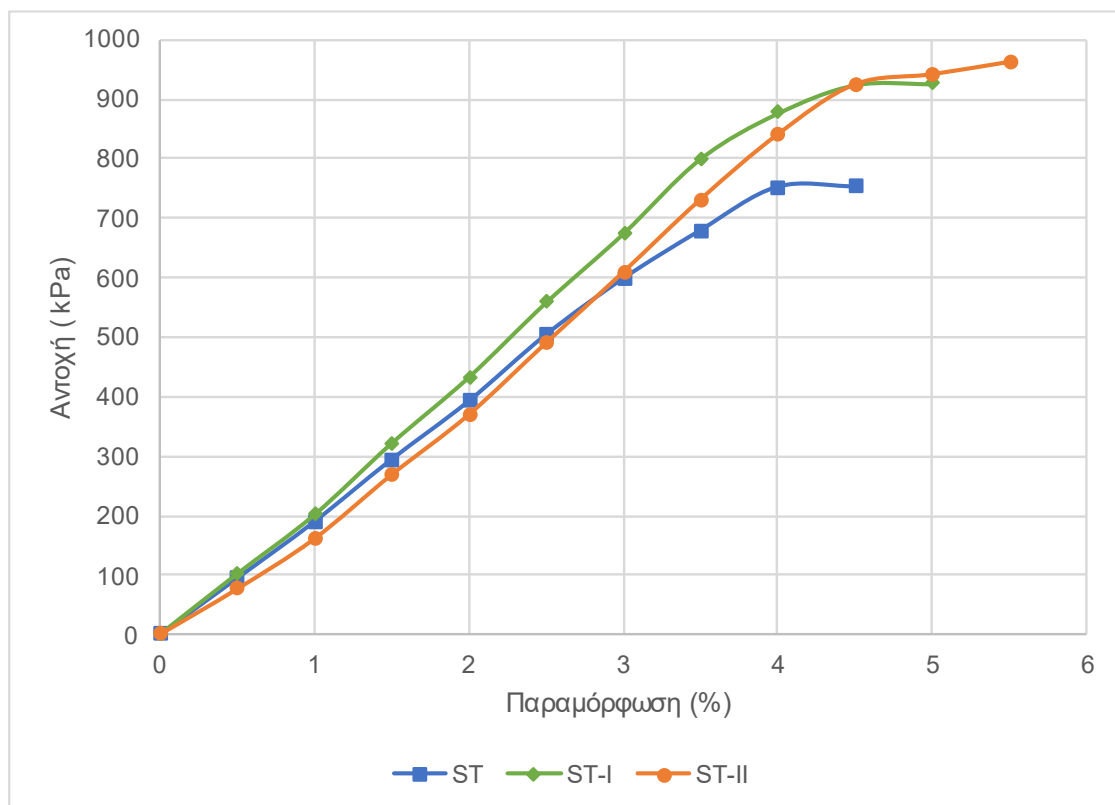
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7, ο λόγος  $S_R$  για παραμορφώσεις μικρότερες του 3% σε οπλισμένα δοκίμια με δυο στρώσεις γεωυφάσματος είναι μικρότερος της μονάδας. Αυτό αντικατοπτρίζει πως, για χαμηλές παραμορφώσεις, η αντοχή των ενισχυμένων δοκιμίων (με δυο στρώσεις) είναι μικρότερη από αυτή των άοπλων. Με άλλα λόγια, η κινητοποιημένη εφελκυστική δύναμη του γεωυφάσματος δεν επαρκεί για να αυξήσει την αντοχή του δείγματος σε παραμορφώσεις μικρότερες του 3%. Αυτή η καθυστέρηση στην κινητοποίηση της εφελκυστικής αντοχής μπορεί να αποδοθεί και στην συμπίεση που επιδέχεται το γεωύφασμα στα πρώτα στάδια της δοκιμής, ειδικά στην περίπτωση αυτή όπου συνυπάρχουν δυο στρώσεις, άρα το συνολικό πάχος του γεωυφάσματος είναι το διπλάσιο. Καθώς αυξάνεται η αξονική παραμόρφωση και κινητοποιείται η εφελκυστική δύναμη του γεωυφάσματος, αυξάνεται και ο λόγος  $S_R$ . Αυτή η συμπεριφορά συμφωνεί και με τις παρατηρήσεις των Goodarzi & Shahnazari (2019). Η συγκεκριμένη τιμή, του 3%, βρίσκεται εντός του εύρους τιμών που υπάρχουν στην βιβλιογραφία (Goodarzi & Shahnazari 2019) και κυμαίνονται μεταξύ 2 – 5%. Στα δείγματα με μία στρώση γεωυφάσματος δεν παρατηρείται αυτή η συμπεριφορά, διότι το χρησιμοποιούμενο γεωύφασμα έχει εκ φύσεως αρκετά μικρό πάχος (σε σχέση με άλλα προϊόντα) και το μισό σε σχέση με αυτό που έχουν συνολικά οι δυο στρώσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αναλαμβάνει εφελκυστικές δυνάμεις άμεσα, χωρίς να



**Σχήμα 5.7:** Επίδραση αριθμού γεωυφασμάτων σε κανονικοποιημένες καμπύλες για την Αργιλώδη Άμμο

προηγείται σημαντική μεταβολή του πάχους του, η οποία να επηρεάζει την λειτουργία. Εξαιτίας αυτού ο λόγος  $S_R$  είναι μεγαλύτερος της μονάδας για το σύνολο των παραμορφώσεων (πράσινη καμπύλη). Η γκρι καμπύλη του Σχήματος 5.7 απεικονίζει τον λόγο της αντοχή των ενισχυμένων δοκιμίων με μία στρώση γεωφάσματος προς την αντοχή αυτών με δυο στρώσεις ενίσχυσης. Παρατηρείται ότι μέχρι αστοχίας των πρώτων, σε παραμορφώσεις της τάξεως του 4.5%, παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές αντοχής από τα δοκίμια με δυο στρώσεις οπλισμού, αφού ο λόγος είναι μικρότερος της μονάδας.

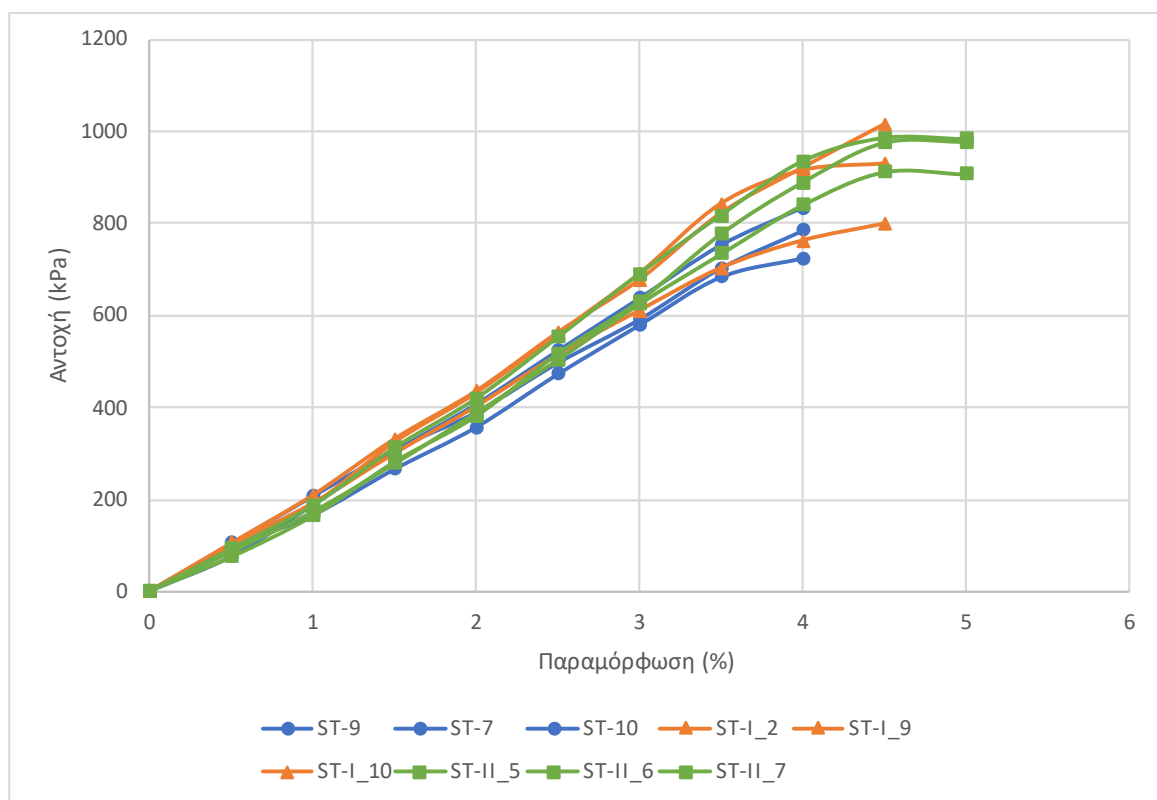
Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζονται οι μεσοσταθμικές καμπύλες για τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν (άοπλο-ST, μια στρώση γεωφάσματος-ST-I και δυο στρώσεις γεωφάσματος-ST-II). Είναι εμφανές ότι τα οπλισμένα δοκίμια για παραμόρφωση 4.5%, όπου είναι και η μέγιστη των μη οπλισμένων, παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή κατά 150kPa, χωρίς να υπάρχει διαφοροποίηση ανάμεσα σε αυτό με την μία και τις δυο στρώσεις ενίσχυσης. Επίσης, για αντοχή 750kPa, δηλαδή την μέγιστη του ST, η καμπύλη ST-II παρουσιάζει μειωμένη παραμόρφωση μεγέθους 3.5%, ενώ η ST-I 3.2% τιμές μικρότερες σε σχέση με την αντίστοιχη του μη ενισχυμένου δοκίμιου που είναι 4%. Αυτή η συμπεριφορά αντικατοπτρίζει την συνεισφορά του γεωφάσματος



**Σχήμα 5.8:** Μεσοσταθμικές καμπύλες τάσης παραμόρφωσης Αργιλώδους Άμμου

στην μείωση των παραμορφώσεων κατά την διάρκεια άσκησης του φορτίου και ιδιαίτερα την σημασία της στρώσης στο μέσον του δοκιμίου, η οποία επιδρά στην περαιτέρω μείωση τους.

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται επιλεγμένες καμπύλες τάσης παραμόρφωσης, από το σύνολο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν εκ των οποίων συνοψίζονται τα εξής: (α) τα οπλισμένα δοκίμια με μια στρώση (πορτοκαλί καμπύλες) εμφανίζουν στο σύνολό τους μεγαλύτερες τιμές αντοχής από τα υπόλοιπα δοκίμια, για παραμορφώσεις μικρότερες του 2.5%. (β) τα οπλισμένα δοκίμια με δυο στρώσεις ενίσχυσης (πράσινες καμπύλες) παρουσιάζουν μεγαλύτερες παραμορφώσεις αστοχίας (5%) από τα υπόλοιπα και μικρότερες τιμές αντοχής για παραμορφώσεις κάτω του 2%. (γ)



**Σχήμα 5.9:** Επιλογή καμπυλών τάσεων – παραμορφώσεων

Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει το εύρος των τιμών του συντελεστή μεταβλητότητας (COV %), που προέκυψε από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, για τα τρία βασικά μεγέθη που μελετήθηκαν: την μέγιστη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, την παραμόρφωση κατά την αστοχία και το μέτρο ελαστικότητας. Επίσης στον ίδιο Πίνακα παρατίθενται η διακύμανση που έχει ο συντελεστής αυτός, σύμφωνα με την

βιβλιογραφία (Baecher & Christian 2003, Rethati 1988). Σε όλες τις περιπτώσεις συνάδει με αυτή και μάλιστα οι πειραματικές τιμές βρίσκονται εγγύτερα στο κατώτερο όριο, γεγονός που επιβεβαιώνει, στατιστικά τουλάχιστον, την ποιότητα των αποτελεσμάτων.

**Πίνακας 5.3:** Εύρος τιμών συντελεστή μεταβλητότητας (COV %), για την ανοχή, την παραμόρφωση και το μέτρο ελαστικότητας (Αργιλώδης Άμμος)

		Διακύμανση COV (%)	
		Βιβλιογραφία*	Πειραματικές τιμές
<b>Μέγεθος</b>	<b>UCS<sup>§</sup></b>	3 - 60	3.5 - 13.6
	<b>ε</b>	18 - 33	10.2 - 16
	<b>E</b>	2 - 42	8.7 - 12.7

\*Baecher & Christian (2003), Rethati (1988)

<sup>§</sup>Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης (Unconfined Compressive Strength)

## 5.2. ΑΜΜΩΔΗΣ ΙΣΧΝΗ ΑΡΓΙΛΟΣ

Οι μορφές των καμπυλών (Παράρτημα Δ) παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις, ανάλογα τον αριθμών των οπλισμών που περιέχουν τα δοκίμια. Τα μη οπλισμένα, εμφανίζουν καμπυλότητα σε ολόκληρο το μήκος τους με την κλίση της να μειώνεται εγγύτερα στην περιοχή αστοχίας. Με την προσθήκη όπλισης, διαφοροποίηση παρατηρείται στο αρχικό τμήμα τη καμπύλης, το οποίο ευθυγραμμίζεται, δηλαδή οι τάσεις και οι παραμορφώσεις παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά. Με την πύκνωση της ενίσχυσης το ευθύγραμμο τμήμα καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση χωρίς, όμως, να επηρεάζεται η περιοχή αστοχίας.

Μακροσκοπικές παρατηρήσεις δεν πραγματοποιήθηκαν, καθώς δεν ήταν διαθέσιμο το αντίστοιχο οπτικό υλικό.

Από τις καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων προσδιορίστηκε το εφαπτομενικό και το μέσο μέτρο ελαστικότητας, όλων των δοκιμών. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται η μέγιστη αντοχή, η παραμόρφωση αστοχίας και το μέτρο ελαστικότητας για το σύνολο των δοκιμών που έγιναν.

*Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα δοκιμών Αμμώδους Ισχνής Αργίλου: αντοχή, παραμόρφωση (κατά την αστοχία) και παραμορφωσιμότητα.*

Πλήθος Οπλισμών	Ονομασία Δοκιμίου	Τάση (kPa)	Παραμόρφωση (%)	$E_{tan}$ (MPa)	$E_{av}$ (MPa)
0	3_1	86.63	9.56	8.75	8.8
0	3_2	76.3	7.71	10.7	10.3
0	3_3	85.24	7.51	15.8	16.2
<b>Μέση Τιμή</b>		<b>82.7</b>	<b>8.26</b>	<b>11.75</b>	<b>11.77</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>		5.6	1.1	3.6	3.9
<b>COV</b>		<b>6.8%</b>	<b>13.7%</b>	<b>31.0%</b>	<b>33.2%</b>

Πλήθος Οπλισμών	Ονομασία Δοκιμίου	Τάση (kPa)	Παραμόρφωση (%)	$E_{tan}$ (MPa)	$E_{av}$ (MPa)
1	A_1_1	102.17	8.14	17.1	17
1	A_1_2	93.15	8.8	12.7	11.4
1	A_1_3	85.94	7.9	10.6	10.3
<b>Μέση Τιμή</b>		<b>93.8</b>	<b>8.28</b>	<b>13.47</b>	<b>13.00</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>		8.1	0.5	3.3	3.5
<b>COV</b>		<b>8.7%</b>	<b>5.6%</b>	<b>24.6%</b>	<b>27.2%</b>

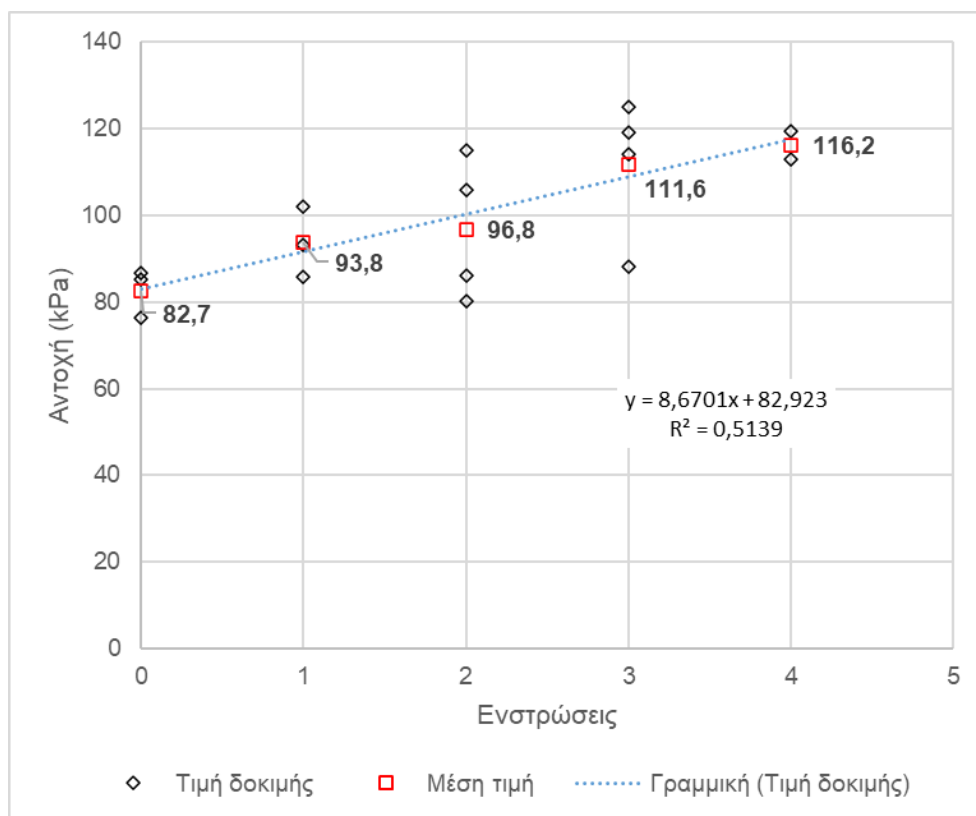
Πλήθος Όπλισμών	Ονομασία Δοκιμίου	Τάση (kPa)	Παραμόρφωση (%)	$E_{tan}$ (MPa)	$E_{av}$ (MPa)
2	A_2_1	114.98	8.77	15.1	13.2
2	A_2_2	86.12	7.47	12.9	12.5
2	A_2_3	80.13	9.22	9	9.1
2	A_2_4	105.91	8.53	11.8	11.1
<b>Μέση Τιμή</b>		<b>96.79</b>	<b>8.50</b>	<b>12.20</b>	<b>11.48</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>		16.4	0.7	2.5	1.8
<b>COV</b>		<b>16.9%</b>	<b>8.7%</b>	<b>20.8%</b>	<b>15.8%</b>

Πλήθος Όπλισμών	Ονομασία Δοκιμίου	Τάση (kPa)	Παραμόρφωση (%)	$E_{tan}$ (MPa)	$E_{av}$ (MPa)
3	A_3_1	119.03	7.31	17.8	19
3	A_3_2	125.14	8.83	19.3	19.8
3	A_3_3	88.07	7.17	15.4	15.8
3	A_3_4	114.27	7.55	15.3	15
<b>Μέση Τιμή</b>		<b>111.63</b>	<b>7.72</b>	<b>16.95</b>	<b>17.40</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>		16.3	0.8	1.9	2.4
<b>COV</b>		<b>14.6%</b>	<b>9.8%</b>	<b>11.5%</b>	<b>13.5%</b>

Πλήθος Όπλισμών	Ονομασία Δοκιμίου	Τάση (kPa)	Παραμόρφωση (%)	$E_{tan}$ (MPa)	$E_{av}$ (MPa)
4	A_4_1	119.4	9.12	15.4	19
4	A_4_2	113.06	10.64	11.7	14.6
<b>Μέση Τιμή</b>		<b>116.23</b>	<b>9.88</b>	<b>13.55</b>	<b>16.80</b>
<b>Τυπική Απόκλιση</b>		4.5	1.1	2.6	3.1
<b>COV</b>		<b>3.9%</b>	<b>10.9%</b>	<b>19.3%</b>	<b>18.5%</b>

Στο Σχήμα 5.8 απεικονίζονται τα αποτελέσματα (όλων) των δοκιμών αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (16 στο σύνολο) συναρτήσεως του αριθμού στρώσεων γεωφασμάτων. Επίσης, για κάθε ομάδα δοκιμών (χωρίς όπλιση, μία, δύο, τρεις και τέσσερις στρώσεις γεωφασμάτων) απεικονίζεται και ο μέσος όρος αντοχής ανά ομάδα δοκιμών (με κόκκινο τετράγωνο). Η γραμμή τάσης στο διάγραμμα ( $y = 8.67x + 82.92$ ) έχει προσδιορισθεί από όλες τις δοκιμές, αλλά πρακτικά είναι η ίδια με αυτή που προκύπτει βάσει των μέσων όρων των αντοχών ( $y = 8.49x + 83.25$ ). Μεσοσταθμικά (κάνοντας χρήση της εξίσωσης της γραμμής τάσης  $y = 8.67x + 82.92$ ),

η αύξηση στην αντοχή με την αύξηση του αριθμού των γεωφασμάτων, είναι της τάξης του 8-10%.



**Σχήμα 5.10:** Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης Αμμώδους Ισχυής Αργίλου (II-3, II-A1, II-A2, II-A3, II-A4)

Σύμφωνα με τον Πίνακα 5.4, η αύξηση στην αντοχή είναι άξια λόγου στην περίπτωση προσθήκης μίας στρώσης γεωφάσματος (13% αύξηση σε σχέση με το άοπλο δοκίμιο) και τριών στρώσεων (15% αύξηση σε σχέση με το δοκίμιο με δύο στρώσεις). Στην περίπτωση που υπάρχει μία στρώση γεωφάσματος και προστεθεί δεύτερη, ή στην περίπτωση που υπάρχουν τρεις στρώσεις και προστεθεί τέταρτη, η αύξηση στην αντοχή είναι πολύ μικρή (3-4%). Η συνολική αύξηση της αντοχής με την προσθήκη τριών στρώσεων γεωφάσματος είναι τη τάξης του 35%.

**Πίνακας 5.5:** Ομαδοποιημένα αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης Αμμώδους Ισχυής Αργίλου (αντοχή-στατιστική επεξεργασία)

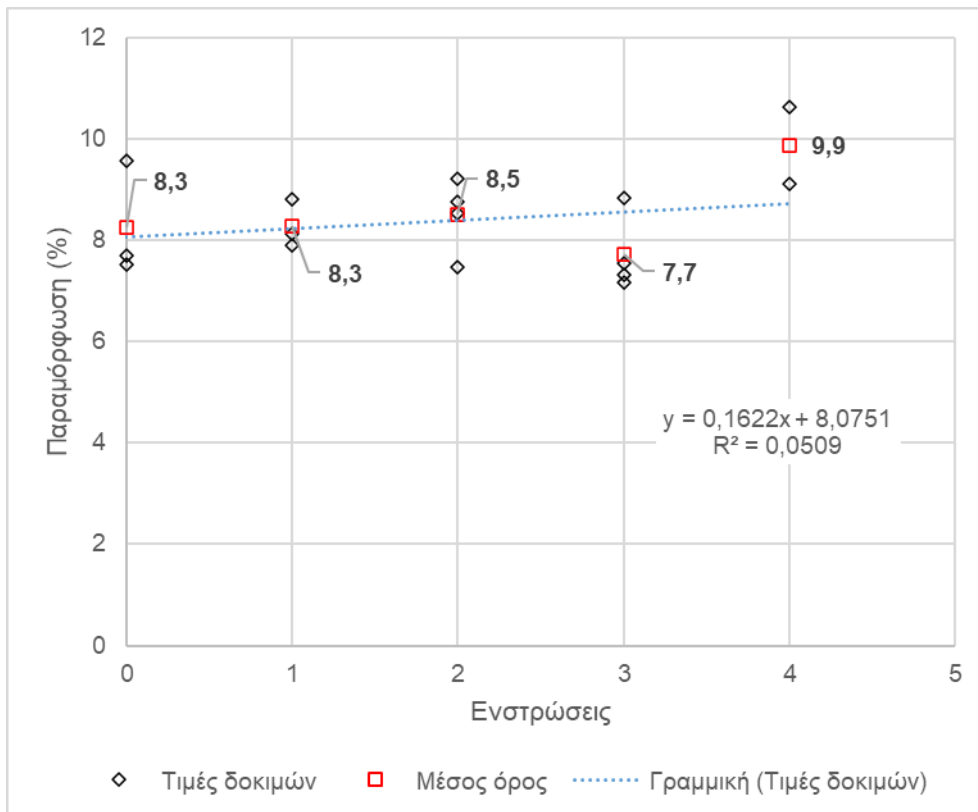
Στρώσεις γεωφασμάτων	Μέση τιμή αντοχής(kPa) $\mu$	Τυπική απόκλιση $\sigma$	Συντελεστής μεταβλητότητας COV	Αύξηση αντοχής
0	82.7	5.6	6.8%	-
1	93.8	8.1	8.0%	13%
2	96.8	16.4	16.9%	3%
3	111.6	16.3	14.6%	15%
4	116.2	4.5	3.9%	4%

Αυτή η τιμή συμφωνεί με την έρευνα των Noorzad & Mirmoradi (2010), η οποία έγινε και αυτή σε αργιλώδη υλικά με ίδιο αριθμώ στρώσεων οπλισμού και τα αποτελέσματά έδειξαν αύξηση της αντοχής κατά 40%. Διαφοροποίηση παρατηρείται στον τρόπο κατά τον οποίο η προσθήκη κάθε στρώσης επιδρά στην αύξηση της αντοχής. Στα πειράματα που εκτέλεσαν οι Noorzad & Mirmoradi (2010) (Πίνακας 3.2) είναι φανερό ότι ο πρώτες δυο στρώσεις οπλισμού προσέφεραν το μεγαλύτερο ποσοστό βελτίωσης, ενώ στην αργιλώδη ισχνή άμμο (Πίνακας 5.4) μεγαλύτερη προσφορά είχαν οι πρώτη και η τρίτη στρώση. Αυτή η συμπεριφορά ενδέχεται να οφείλεται στην διαφορετική διάταξη των οπλισμών, καθώς στην περίπτωση της ισχνής αργίλου το πρώτο φύλλο γεωυφάσματος τοποθετούνταν στην ανώτερη στρώση και κατά την πύκνωση της ενίσχυσης διαδοχικά, από πάνω προς τα κάτω, πληρώνονταν και οι υπόλοιπες στρώσεις (Σχήμα 4.14). Αντίθετα, η διάταξη που χρησιμοποίησαν οι Noorzad & Mirmoradi (2010) ήταν συμμετρική και το κάθε φύλλο γεωυφάσματος απείχε ίση απόσταση από τα άκρα του δοκιμίου (διατάξεις Σχήματος 3.1 εκτός R2b)

Η τιμή του συντελεστή μεταβλητότητας COV (7-17%) σε όλες τις περιπτώσεις συνάδει με βιβλιογραφικές τιμές COV για αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης. Σε κάθε περίπτωση όμως, η διασπορά των αποτελεσμάτων (βλ. Σχήμα 5.8) δείχνει ότι για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων ως προς τον βαθμό βελτίωσης της αντοχής, πρέπει να πραγματοποιηθούν αρκετές δοκιμές. Δηλαδή, με μία - δύο ή και ακόμα τρεις δοκιμές, τα συμπεράσματα δεν θα είναι αξιόπιστα. Για παράδειγμα, μία δοκιμή στο μη οπλισμένο έδωσε αντοχή 86.63kPa, ενώ μία δοκιμή με δύο στρώσεις γεωυφάσματος έδωσε 80.13kPa.

Στο Σχήμα 5.9 απεικονίζονται οι τιμές της παραμόρφωσης των δοκιμίων κατά την αστοχία, για όλες τις ομάδες δοκιμών (χωρίς όπλιση, μία, δύο, τρεις και τέσσερις στρώσεις γεωυφασμάτων). Γενικά, παρατηρείται ότι η παραμόρφωση κατά την αστοχία δεν επηρεάζεται έντονα με τη χρήση γεωυφασμάτων, γεγονός το οποίο δεν συμβαδίζει με άλλες βιβλιογραφικές αναφορές (Noorzad & Mirmoradi 2010) κατά τις οποίες αναμένεται αύξηση τουλάχιστον 15% ακόμη και κατά την ένθεση μιας στρώσης ενίσχυσης. Ιδιαίτερα για τις περιπτώσεις 1, 2 και 3 στρώσεις γεωυφασμάτων η μέση παραμόρφωση κατά την αστοχία κυμαίνεται μεταξύ 7.7% και 8.5% (ενώ για την περίπτωση 4 στρώσεων είναι 9.9%).

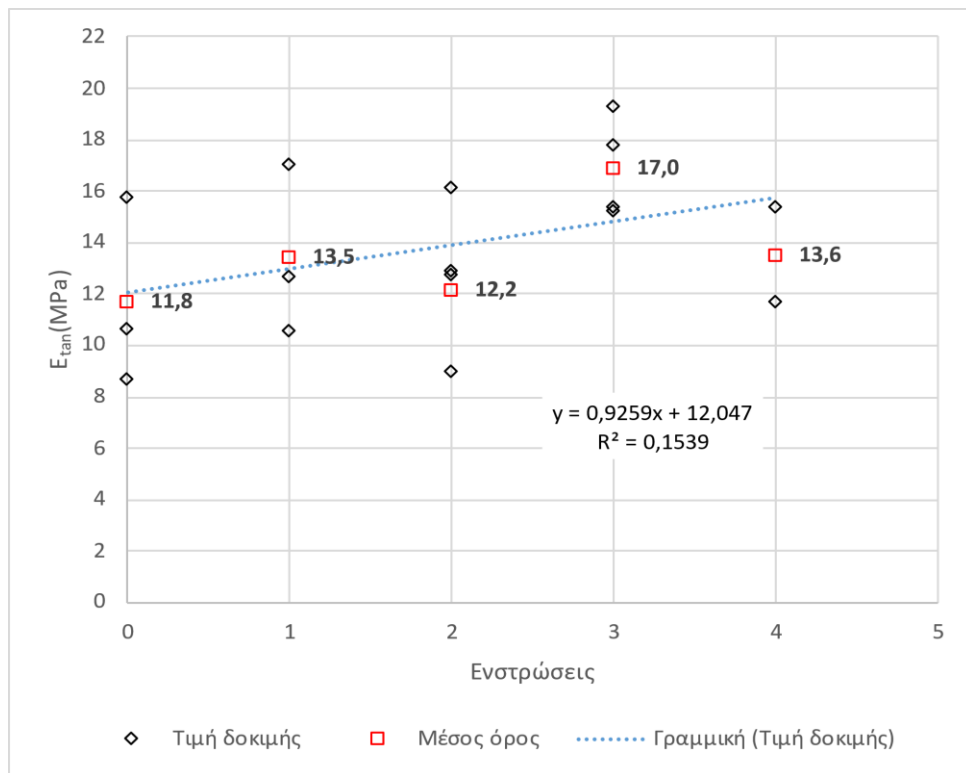




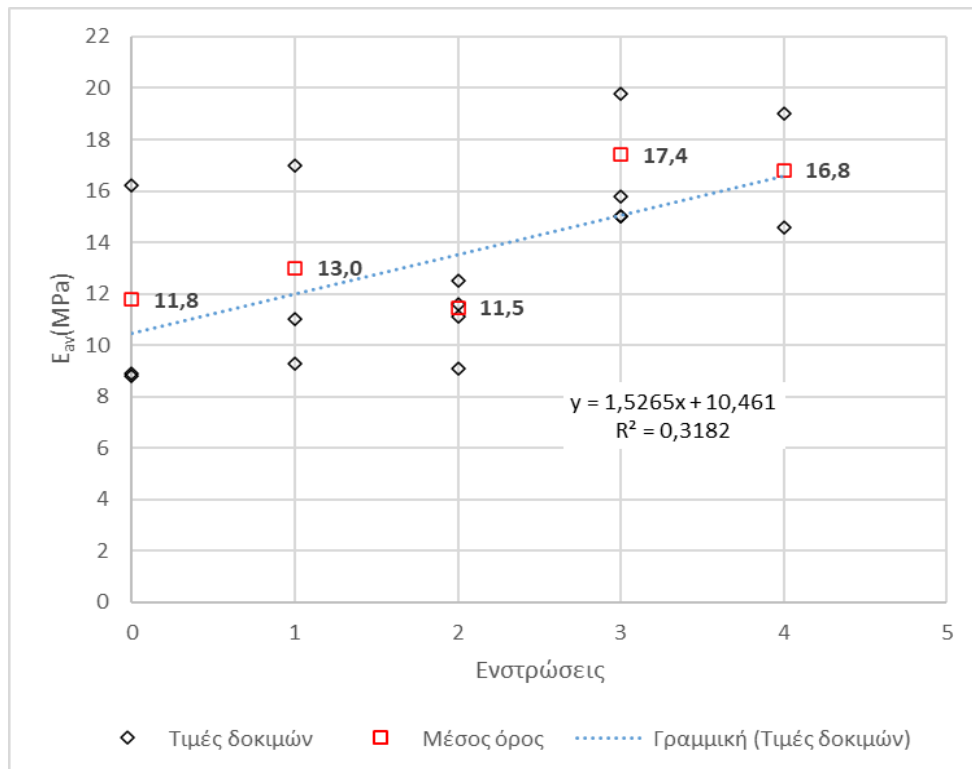
**Σχήμα 5.11:** Παραμορφώσεις κατά την αστοχία Αμμόδους Ισχνής Αργίλου (II-3, II-A1, II-A2, II-A3, II-A4)

Στο Σχήμα 5.10 και Σχήμα 5.11 δίνονται η μεταβολή του μέσου και εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας, αντίστοιχα (σε γενικές γραμμές οι τιμές του μέσου μέτρου ελαστικότητας είναι κοντά στις τιμές του εφαπτομενικού, με εξαίρεση τις δύο δοκιμές I-A4, όπου υπάρχει μια διαφορά της τάξης του 20%). Σύμφωνα με τις γραμμές τάσεις (Σχ. 5.10, Σχ. 5.11), παρατηρείται μία ελαφρώς αυξητική τάση στο E κατά 1 έως 1.5MPa ανά προσθήκη στρώσης γεωφάσματος. Όμως η διασπορά των αποτελεσμάτων είναι τέτοια που δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Για παράδειγμα, ο μέσος όρος των μέσων μέτρων ελαστικότητας για δύο στρώσεις γεωφασμάτων είναι χαμηλότερος από τους αντίστοιχους μέσους όρους για μηδέν ή μία στρώση γεωφάσματος.

Στον Πίνακα 5.6 παρατίθεται το εύρος τιμών που έλαβαν οι συντελεστές μεταβλητότητας της αντοχής, της παραμόρφωσης και του μέτρου ελαστικότητας. Σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές συνάδουν με τις αντίστοιχες βιβλιογραφικές αναφορές με την αντοχή και την παραμορφωσιμότητα να έχουν μικρή διακύμανση και χαμηλές τιμές.



**Σχήμα 5.12:** Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας Αμμόδους Ισχνής Αργίλου (II-3, II-A1, II-A2, II-A3, II-A4)



**Σχήμα 5.13:** Μέσο μέτρο ελαστικότητας Αμμόδους Ισχνής Αργίλου (II-3, II-A1, II-A2, II-A3, II-A4)

Το μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος (20%) με αποτέλεσμα οι πειραματικές τιμές της παρούσας έρευνας να καταλαμβάνουν και χαμηλές αλλά και υψηλές τιμές του εύρους που αναφέρεται στην βιβλιογραφία

**Πίνακας 5.6:** Εύρος τιμών συντελεστή μεταβλητότητας (COV %), για ανοχή, παραμόρφωση και μέτρο ελαστικότητας (Αμμώδης Ισχνή Άργιλος)

Μέγεθος	Διακύμανση COV(%)		
	UCS <sup>§</sup>	Βιβλιογραφία*	Πειραματικές τιμές
		E	3-60
E	E	18-33	5.6-13.7
E	E	2-42	11.5-33.2

\*Baecher & Christian (2003), Rethati (1988)

§Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης (Unconfined Compressive Strength)

Στους Πίνακες 5.7 και 5.8 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η αποτελεσματικότητα του γεωυφάσματος για τα δυο εδαφικά υλικά. Άξια αναφοράς αποτελούν: (α) η εξαιρετικά μικρή αύξηση της αντοχής κατά την προσθήκη της δεύτερης στρώσης στην αργιλώδη άμμο (β) η μείωση των μέτρων ελαστικότητας σε αρκετές περιπτώσεις και (γ) η ελάχιστη επίδραση της δεύτερης και τέταρτης στρώσης όπλισης στην αμμώδη άργιλο με την παράλληλη μείωση του μέτρου ελαστικότητας και στις δυο περιπτώσεις.

**Πίνακας 5.7:** Αποτελεσματικότητα δοκιμών Αργιλώδους Άμμου: αντοχή, παραμόρφωση (κατά την αστοχία) και παραμορφωσιμότητα

Στρώσεις γεωυφάσματος	Μέση Αντοχή (kPa)	Μεταβολή αντοχής	Μέση παραμόρφωση (kPa)	Μεταβολή παραμόρφωσης	Μέσο E <sub>tan</sub> (MPa)	Μεταβολή E <sub>tan</sub>
0	752.8		4.2		22.0	
1	931.5	24%	4.5	9%	24.7	12%
2	957.0	3%	4.9	7%	24.2	-2%
<b>Σύνολο</b>		21%		17%		9%

**Πίνακας 5.8:** Αποτελεσματικότητα δοκιμών Αμμώδους Ισχνής Αργίλου: αντοχή, παραμόρφωση (κατά την αστοχία) και παραμορφωσιμότητα

Στρώσεις γεωυφάσματος	Μέση Αντοχή (kPa)	Μεταβολή αντοχής	Μέση παραμόρφωση (kPa)	Μεταβολή παραμόρφωσης	Μέσο E <sub>tan</sub> (MPa)	Μεταβολή E <sub>tan</sub>
0	82.7		8.3		11.8	
1	93.8	13%	8.3	0%	13.5	13%
2	96.8	3%	8.5	3%	12.2	-10%
3	111.6	15%	7.7	-10%	17.0	28%
4	116.2	4%	9.9	28%	13.6	-25%
<b>Σύνολο</b>		41%		20%		15%

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Βασικό αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη της επίδρασης προσθήκης στρώσεων γεωφασμάτων, που έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία οπλισμού, εντός του εδαφικού υλικού για την βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Για τις ανάγκες της εργαστηριακής διερεύνησης χρησιμοποιήθηκαν ένα μη υφαντό γεώφασμα της εταιρίας HUESKER και δυο κλάσματα εδαφικού υλικού διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης, ένα αδρόκοκκο -κατά USCS κατατάσσεται ως αργιλώδης άμμος- και ένα λεπτόκοκκο -μια αμμώδης ισχνή άργιλος.

Στο πρώτο μέρος της έρευνας προσδιορίστηκαν οι φυσικές (φυσική υγρασία, κοκκομετρική διαβάθμιση και όρια Atterberg) και μηχανικές ιδιότητες (βέλτιστη υγρασία συμπίκνωσης και ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή) των δυο υλικών. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν σχεδιάστηκαν και εκτελέστηκαν μια σειρά δοκιμών ώστε να τεκμηριωθούν οι μηχανικές ιδιότητες του οπλισμένου εδάφους. Για τον σκοπό αυτό, έγινε παραγωγή ενισχυμένων δοκιμών με φύλλα γεωφασμάτων, τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης. Για την παραγωγή των ενισχυμένων δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η συσκευή συμπίκνωσης Proctor με διαφορετική διάταξη για τον κάθε τύπο δοκιμίου (με μια και με δυο στρώσεις οπλισμού) αλλά σε όλες τις περιπτώσεις με περιεχόμενη υγρασία την βέλτιστη της συμπίκνωσης.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν και οι παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργαστηριακής διερεύνησης συνοψίζονται στα ακόλουθα συμπεράσματα:

### Γενικές Παρατηρήσεις

- Βασικό παράγοντα για την αποτελεσματική εκτέλεση δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης αποτελεί η προσεκτική και με σωστό τρόπο διαμόρφωση των δοκιμών. Η παράλληλη διαμόρφωση των κάθετων πλευρών, δημιουργία επίπεδης άνω και κάτω βάσης και η λείανσή τους έτσι ώστε να μην υπάρχουν κόκκοι που προεξέχουν (ειδικά στα κοκκώδη υλικά) αποτελούν θεμελιώδεις παράγοντες για την επιτυχή εκτέλεση της δοκιμής.
- Η κατασκευή δοκιμών, τα οποία περιέχουν υψηλό ποσοστό αμμωδών κλασμάτων, παρουσιάζουν δυσκολίες τόσο κατά την συμπίκνωση όσο και κατά

την διαμόρφωση. Η προσθήκη περισσότερων των δυο στρώσεων οπλισμού είναι αμφίβολο κατά πόσο μπορεί να πραγματοποιηθεί επιτυχώς και εξαρτάται από την συνοχή του υλικού και κατ' επέκταση άμεσα από το ποσοστό των λεπτόκοκκων κλασμάτων που περιέχονται.

### Αποτελεσματικότητα

- Στην αργιλώδη άμμο η προσθήκη μια στρώσης οπλισμού, στο μέσο του δοκιμίου, επιφέρει αξιοσημείωτη βελτίωση στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη κατά 24%.
- Δύο στρώσεις ενίσχυσης, στο 1/3 του ύψους, έχουν αμελητέα επίδραση στην αύξηση της αντοχής αυτού του υλικού (3% σε σχέση με την μια στρώση), επηρεάζουν, όμως, τον τρόπο θραύσης του, αφού η αστοχία επέρχεται με βραδύτερο ρυθμό, ξεκινώντας από το ανώτερο και συνεχίζοντας στα κατώτερα σχηματίζοντας τελικά, μια επιφάνεια διατμητικής αστοχίας, ίδιας κλίσης με αυτή των δοκιμίων με μία στρώση οπλισμού.
- Οι δυο ανωτέρω παρατηρήσεις αναδεικνύουν τη σημαντικότητα της ύπαρξης οπλισμού στο μέσο του ύψους του δοκιμίου. Η απώλεια αυτής της στρώσης επηρεάζει σημαντικά το ποσοστό αύξησης της αντοχής.
- Κατά την όπλιση με μία στρώση γεωυφάσματος παρατηρήθηκαν υψηλότερες τιμές αντοχής, σε σχέση με το μη οπλισμένο, από τα πρώτα στάδια επιβολής του φορτίου γεγονός που αποδίδεται άμεση ανάληψη εφελκυστικών δυνάμεων από το στοιχείο όπλισης. Διαφορετική συμπεριφορά εμφανίζει το δοκίμιο με δυο στρώσεις ενίσχυσης, καθώς για την εμφάνιση βελτιωμένης αντοχής επιβάλλεται αρχικά παραμόρφωση του υλικό κατά 3%.
- Αξιόλογη αύξηση στην παραμόρφωση, της τάξης του 17%, της αργιλώδους άμμου παρατηρήθηκε με την προσθήκη δυο στρώσεων οπλισμού και κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική σε υλικό αυτής της κοκκομετρίας που εκ φύσεως παρουσιάζει υψηλή ακαμψία. Η πρώτη στρώση δεν επέδειξε ιδιαίτερη βελτίωση.
- Στα αμμώδη υλικά, μια στρώση οπλισμού οδηγεί σε αύξηση του μέτρου ελαστικότητας κατά 12%, ενώ η δεύτερη στρώση σε μείωση της τάξης του 2%.
- Τα δοκίμια της αμμώδους ισχνής αργίλου επέδειξαν αύξηση της αντοχής κυρίως κατά την ένθεση μιας και τριών στρώσεων γεωυφάσματος κατά 15%, σε σχέση με την αντοχή με μια στρώση λιγότερη. Η προσθήκη δεύτερου και τέταρτου

φύλλου γεωυφάσματος δεν επιφέρει αξιοσημείωτη βελτίωση ( της τάξης του 3-4%). Σε αυτή την περίπτωση η πρώτη στρώση γεωυφάσματος τοποθετούνταν μεταξύ της ανώτερης και της υποκείμενης της στρώσης και κατά την πύκνωσή τους προστίθεντο διαδοχικά από πάνω προς τα κάτω.

- Η παραμόρφωσή δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την προσθήκη του συγκεκριμένου γεωυφάσματος, εμφανίζοντας αυξητική τάση μικρής έκτασης, η οποία δεν χαρακτηρίζεται αξιόλογη.
- Στα αργιλικά κλάσματα αξιόλογη αύξηση του μέτρου ελαστικότητας παρατηρείται με την ύπαρξη μιας και τριών στρώσεων ενίσχυσης κατά 13 και 28%, αντίστοιχα. Η ένθεση δεύτερης στρώσης επιφέρει μείωση κατά 10% ενώ η τέταρτη κατά 25%.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## Βιβλία

- [1] Ατματζίδης, Δ., *Σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος: «Γεωσυνθετικά»*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [2] Ατματζίδης, Δ.Κ. και Αθανασόπουλος, Γ.Α., 2001. *ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ – ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΕΔΑΦΩΝ*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [3] Δρουδάκης, Α., 2009. *Αποτελεσματικότητα ενέσεων εμποτισμού εδαφών με λεπτόκοκκα τσιμέντα*. Διδακτορική Διατριβή. Ξάνθη: Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Ξάνθης.
- [4] Παπαχαρίσης, Ν., Γραμματικόπουλος, Ι., Μάνου-Ανδρεάδη, Ν., 2005. *ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ*. Β' ΕΚΔΟΣΗ. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Κυριακίδη.
- [5] Προφυλλίδης, Β., 1985. *ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ – ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Γαρταγάνη.
- [6] Baecher, G.B. and Christian, J.T., 2003. *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- [7] Budhu, M., 2020. *ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ & ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ*. 3<sup>η</sup> Έκδοση. Πάτρα: Εκδόσεις GOTSIS.
- [8] Das, B.M., 2010. *PRINCIPLES OF GEOTECHNICAL ENGINEERING*. 7<sup>th</sup> Edition. Stamford: Cengage Learning.
- [9] Ingold, T.S., 1982. *REINFORCED EARTH*. London: Published by Thomas Telford Ltd.
- [10] Koerner, R.M., 2005. *DESIGNING WITH GEOSYNTHETICS*. 5<sup>th</sup> Edition. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- [11] Koerner, R.M., 2012. *DESIGNING WITH GEOSYNTHETICS*. 6<sup>th</sup> Edition. U.S.A.: Xlibris Corporation.
- [12] Rankilior, P.R., 1983. *Membranes in Ground Engineering*. New York: Published by John Wiley and Sons.
- [13] Rethati, L., 1998. *Probabilistic solution in geotechnics*. Translated from Hungarian by S. Bars. Budapest: Akademiai Kiado Budapest.

## Συνέδρια και Περιοδικά

- [1] Droudakis, A.I. and Markou, I.N., 2016. 'Mechanical behavior of a fine-grained soil reinforced with geotextiles.
- [2] Droudakis, A.I. and Markou, I.N., 2007. 'Mechanical Behavior of Soil-Geotextile Composites: Effect of Soil Type', *Proc., 13th International Conference on Experimental Mechanics, Alexandroupolis, Greece.*
- [3] Fabian, A.G. and Fourie, A.B., 1986. 'Performance of geotextile – reinforced clay samples in undrained triaxial tests, *Geotextiles and Geomembranes* 4: 53-63.
- [4] Goodarzi, S. and Shahnazari, H., 2019. 'Strength enhancement of geotextile-reinforced carbonate sand', *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2), pp. 128–139.
- [5] Ingold, T.S. 1983. 'Reinforced clay subject to undrained triaxial loading', *Journal of Geotechnical Engineering* 109: 738-744.
- [6] Markou, I.N., Droudakis, A.I. and Sirkelis G., 2006a. 'Sand – woven geotextile interaction by triaxial compression tests', *Proc., 5th Hellenic conf. on geotechnical & geoenvironmental engineering, Xanthi, Greece.* (Ελληνικά)
- [7] Markou, I.N., Droudakis, A.I. and Sirkelis G., 2006b. 'Sand – non woven geotextile interface friction angle by triaxial compression tests', *Proc., 5th Hellenic conf. on geotechnical & geoenvironmental engineering, Xanthi, Greece.* (Ελληνικά)
- [8] Markou, I.N., 2006. 'Shear Strength and Mechanical Behavior of Sands Reinforced with Geotextiles', *Proc., 5th Hellenic conf. on geotechnical & geoenvironmental engineering, Xanthi, Greece.* (Ελληνικά)
- [9] Markou, I.N. and Droudakis, A.I., 2007. 'Behavior of reinforced sand: Effect of triaxial compression testing factors', in *New Horizons in Earth Reinforcement.* CRC Press.
- [10] Noorzad, R. and Mirmoradi, S.H., 2010. 'Laboratory evaluation of the behavior of a geotextile reinforced clay', *Geotextiles and Geomembranes*, 28(4), pp. 386–392.

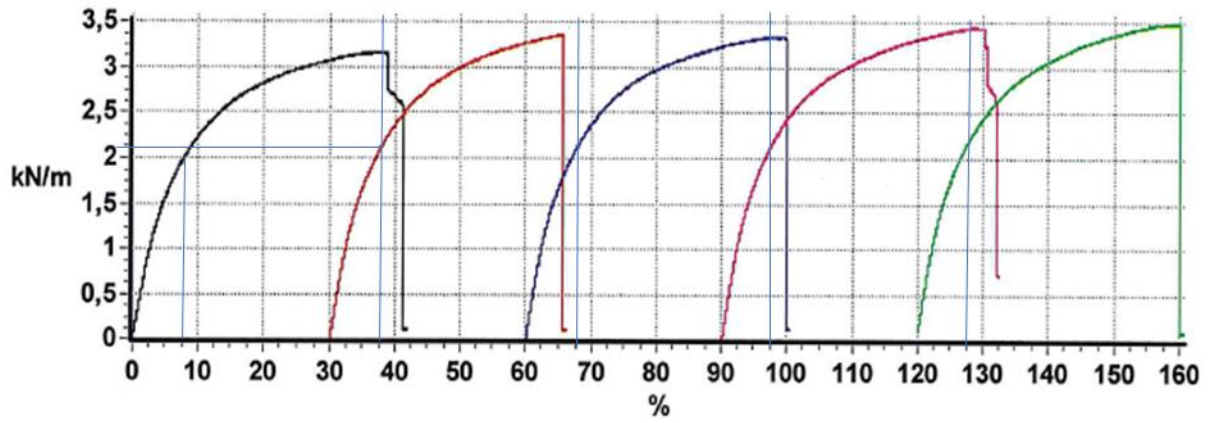




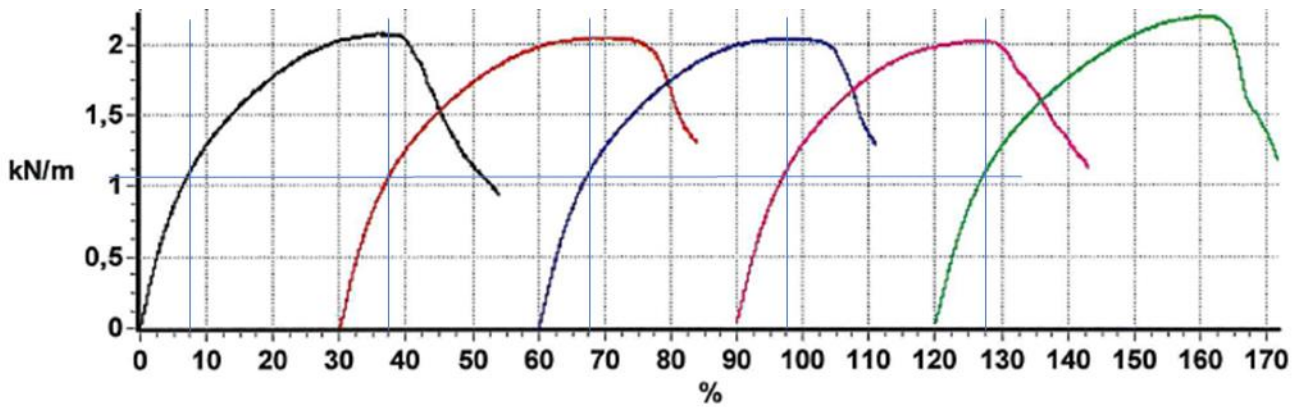
## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α**

### **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΟΣ**

## ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - MD



## ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - CD



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β**

### **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΣΕ ΑΡΓΙΛΩΔΕΙΣ ΑΜΜΟΥΣ**

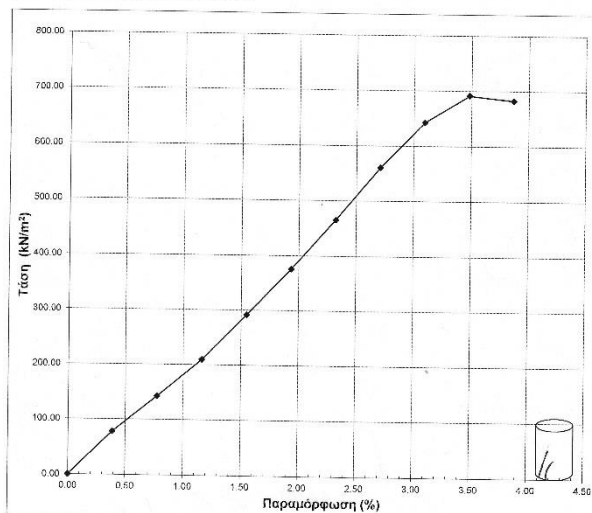
# ΧΩΡΙΣ ΓΕΩΦΑΣΜΑ – ΣΤ

## 1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ημερομηνία εκτέλεσης : 11/04/2022  
 Ταχύτητα παραμόρφωσης : 1.3 mm/min  
 Διάμετρος δοκιμίου : 7.20 cm  
 Ύψος δοκιμίου : 15.50 cm  
 Είδος δείγματος : Β  
 Μέγιστη αξονική τάση : 691.16 kN/m<sup>2</sup>  
 Αντίστοιχη παραμόρφωση : 3.48 %  
 Φορτίο θραύσης : 291.41 Kg

Φυσική υγρασία : 9.9 %  
 Υγρό φαινόμενο βάρος : 22.51 kN/m<sup>3</sup>  
 Ξηρό φαινόμενο βάρος : 20.48 kN/m<sup>3</sup>  
 Ειδικό βάρος : 2.69  
 Δείκτης πόρων : 0.313

## 2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.



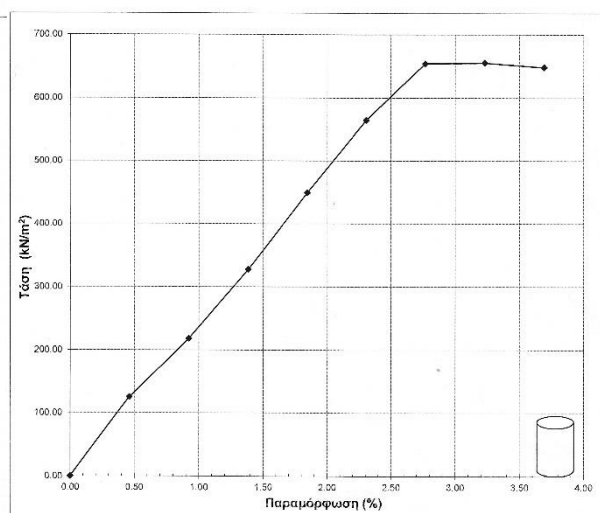
ST-2

## 1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ημερομηνία εκτέλεσης : 25/04/2023  
 Ταχύτητα παραμόρφωσης : 1.2 mm/min  
 Διάμετρος δοκιμίου : 6.00 cm  
 Ύψος δοκιμίου : 13.00 cm  
 Είδος δείγματος : Β  
 Μέγιστη αξονική τάση : 655.12 kN/m<sup>2</sup>  
 Αντίστοιχη παραμόρφωση : 3.23 %  
 Φορτίο θραύσης : 191.32 Kg

Φυσική υγρασία : 9.9 %  
 Υγρό φαινόμενο βάρος : 22.16 kN/m<sup>3</sup>  
 Ξηρό φαινόμενο βάρος : 20.15 kN/m<sup>3</sup>  
 Ειδικό βάρος : 2.69  
 Δείκτης πόρων : 0.335

## 2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.



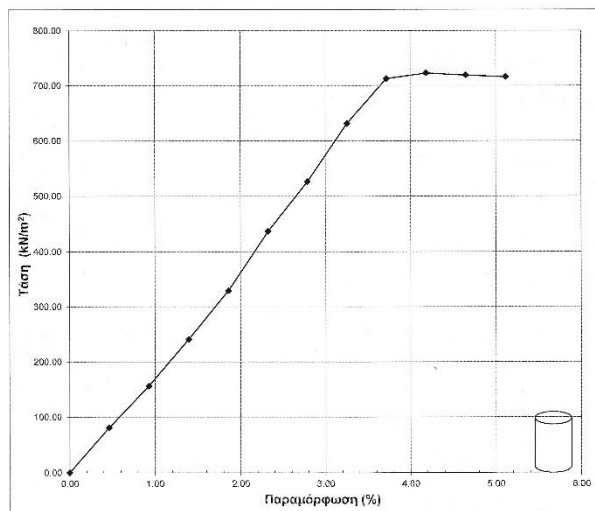
ST-4

## 1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ημερομηνία εκτέλεσης : 13/06/2023  
 Ταχύτητα παραμόρφωσης : 1.2 mm/min  
 Διάμετρος δοκιμίου : 6.80 cm  
 Ύψος δοκιμίου : 12.90 cm  
 Είδος δείγματος : Β  
 Μέγιστη αξονική τάση : 722.39 kN/m<sup>2</sup>  
 Αντίστοιχη παραμόρφωση : 4.19 %  
 Φορτίο θραύσης : 273.67 Kg

Φυσική υγρασία : 9.6 %  
 Υγρό φαινόμενο βάρος : 22.51 kN/m<sup>3</sup>  
 Ξηρό φαινόμενο βάρος : 20.53 kN/m<sup>3</sup>  
 Ειδικό βάρος : 2.69  
 Δείκτης πόρων : 0.310

## 2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.



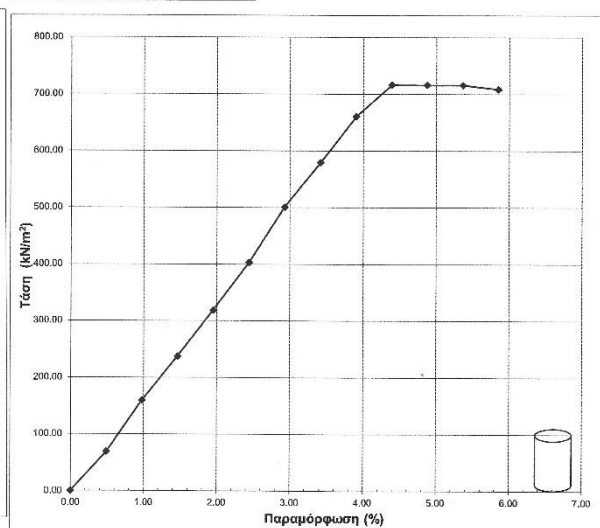
ST-7

## 1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ημερομηνία εκτέλεσης : 22/06/2023  
 Ταχύτητα παραμόρφωσης : 1.2 mm/min  
 Διάμετρος δοκιμίου : 6.50 cm  
 Ύψος δοκιμίου : 12.30 cm  
 Είδος δείγματος : Β  
 Μέγιστη αξονική τάση : 715.88 kN/m<sup>2</sup>  
 Αντίστοιχη παραμόρφωση : 4.39 %  
 Φορτίο θραύσης : 250.87 Kg

Φυσική υγρασία : 9.7 %  
 Υγρό φαινόμενο βάρος : 23.35 kN/m<sup>3</sup>  
 Ξηρό φαινόμενο βάρος : 21.30 kN/m<sup>3</sup>  
 Ειδικό βάρος : 2.69  
 Δείκτης πόρων : 0.263

## 2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

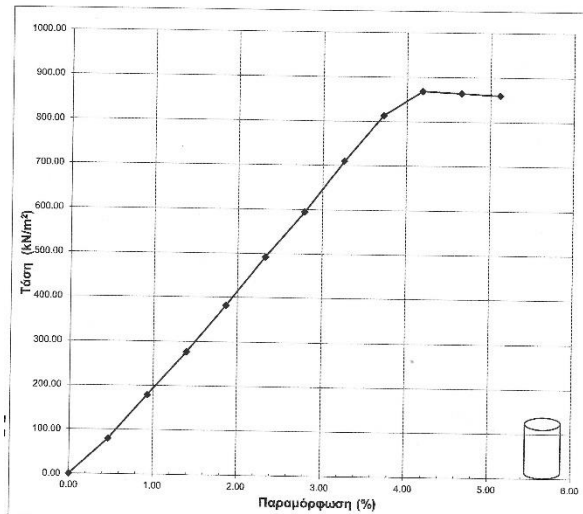


ST-8

**1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.**

Ημερομηνία εκτέλεσης :	22/06/2023	Φυσική υγρασία :	9.4 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	21.98 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.70 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	20.10 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	12.90 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.338
Μέγιστη αξονική τάση :	868.13 kN/m <sup>2</sup>		
Αντιστοίχη παραμόρφωση :	4.19 %		
Φορτίο θραύσης :	319.28 Kg		

**2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.**

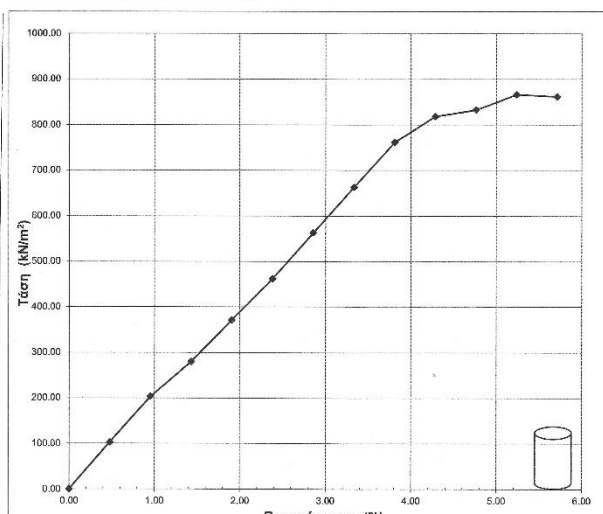


**ST-9**

**1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.**

Ημερομηνία εκτέλεσης :	22/06/2023	Φυσική υγρασία :	9.4 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	22.08 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.40 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	20.73 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	12.60 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.297
Μέγιστη αξονική τάση :	866.30 kN/m <sup>2</sup>		
Αντιστοίχη παραμόρφωση :	5.24 %		
Φορτίο θραύσης :	283.94 Kg		

**2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.**



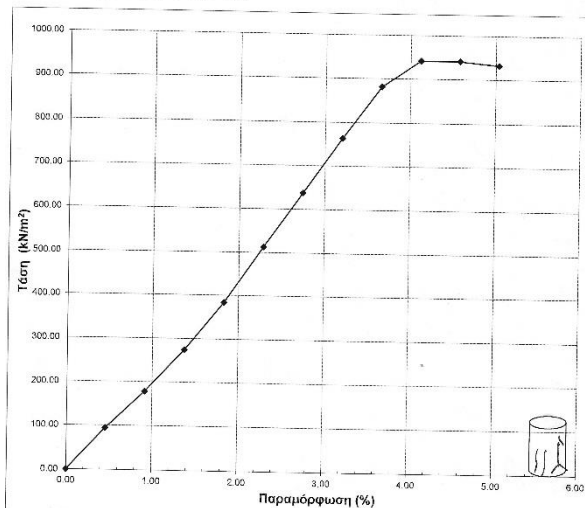
**ST-10**

# ΜΙΑ ΣΤΡΩΣΗ ΓΕΩΦΑΣΜΑΤΟΣ – ST-I

## 1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ημερομηνία εκτέλεσης :	26/04/2023	Φυσική υγρασία :	9.9 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	21.58 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.00 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	19.63 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	13.10 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.370
Μέγιστη αξονική τάση :	941.38 kN/m <sup>2</sup>		
Αντίστοιχη παραμόρφωση :	4.12 %		
Φορτίο θραύσης :	278.74 Kg		

## 2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

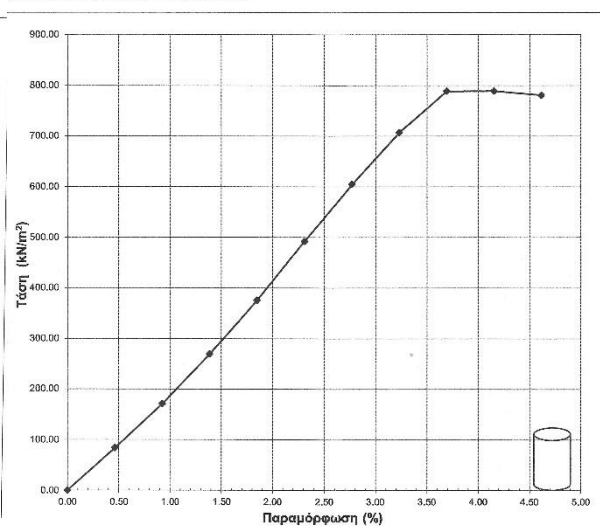


ST-I\_2

## 1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ημερομηνία εκτέλεσης :	27/03/2023	Φυσική υγρασία :	9.5 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	21.54 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.20 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	19.88 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	13.00 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.367
Μέγιστη αξονική τάση :	788.78 kN/m <sup>2</sup>		
Αντίστοιχη παραμόρφωση :	4.15 %		
Φορτίο θραύσης :	248.33 Kg		

## 2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

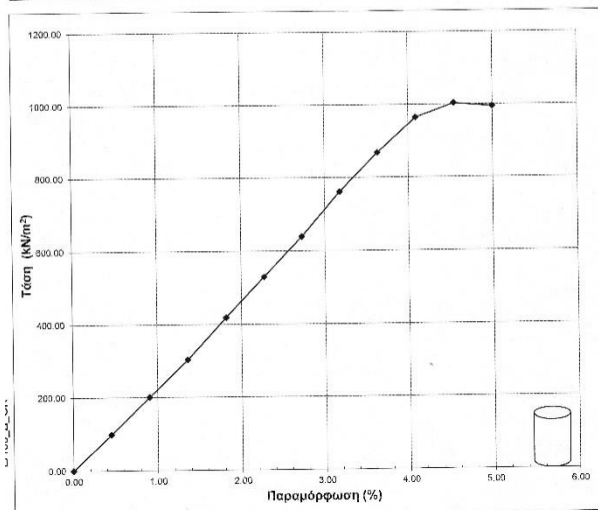


ST-I\_4

## 1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ημερομηνία εκτέλεσης :	09/06/2023	Φυσική υγρασία :	8.8 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	21.40 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.80 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	19.68 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	13.20 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.367
Μέγιστη αξονική τάση :	1002.89 kN/m <sup>2</sup>		
Αντίστοιχη παραμόρφωση :	4.65 %		
Φορτίο θραύσης :	381.37 Kg		

## 2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

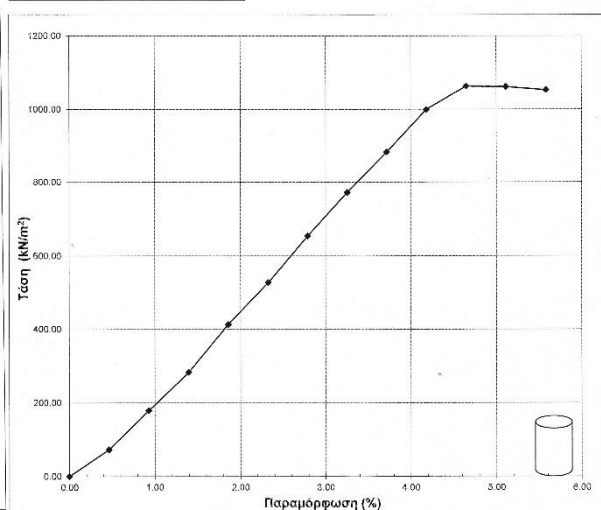


ST-I\_5

## 1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ημερομηνία εκτέλεσης :	09/06/2023	Φυσική υγρασία :	8.0 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	22.08 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.70 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	20.44 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	12.90 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.316
Μέγιστη αξονική τάση :	1082.76 kN/m <sup>2</sup>		
Αντίστοιχη παραμόρφωση :	4.65 %		
Φορτίο θραύσης :	394.04 Kg		

## 2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

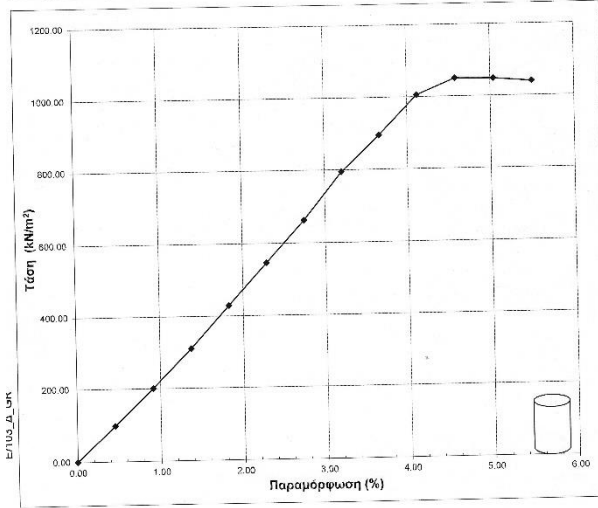


ST-I\_6

**1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.**

Ημερομηνία εκτέλεσης :	09/06/2023	Φυσική υγρασία :	8.2 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	21.02 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.80 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	19.42 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	13.10 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.385
Μέγιστη αξονική τάση :	1049.16 kN/m <sup>2</sup>		
Αντίστοιχη παραμόρφωση :	4.58 %		
Φορτίο θραύσης :	400.37 Kg		

**2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.**

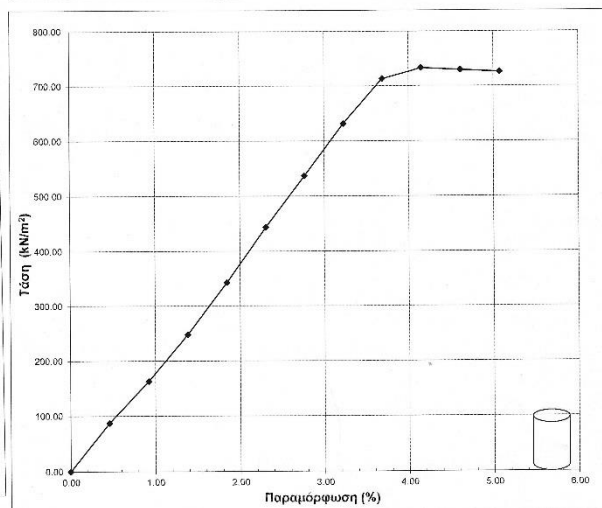


**ST-I\_7**

**1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.**

Ημερομηνία εκτέλεσης :	13/06/2023	Φυσική υγρασία :	9.7 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	22.00 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.80 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	20.06 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	13.00 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.341
Μέγιστη αξονική τάση :	732.67 kN/m <sup>2</sup>		
Αντίστοιχη παραμόρφωση :	4.15 %		
Φορτίο θραύσης :	277.47 Kg		

**2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.**

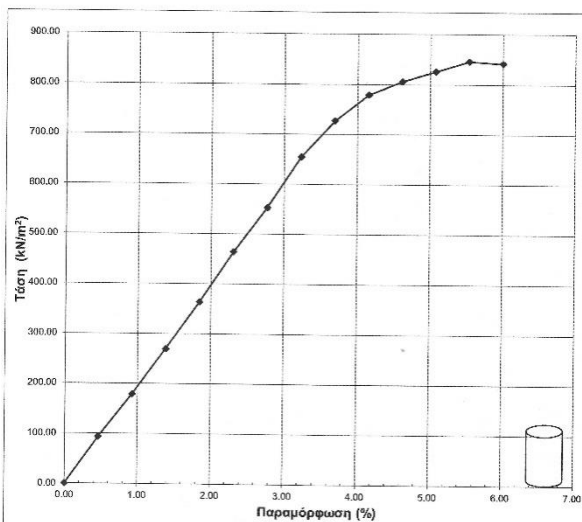


**ST-I\_8**

**1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.**

Ημερομηνία εκτέλεσης :	22/06/2023	Φυσική υγρασία :	9.5 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	21.99 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.70 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	20.08 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	13.00 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.340
Μέγιστη αξονική τάση :	845.69 kN/m <sup>2</sup>		
Αντίστοιχη παραμόρφωση :	5.54 %		
Φορτίο θραύσης :	315.48 Kg		

**2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.**

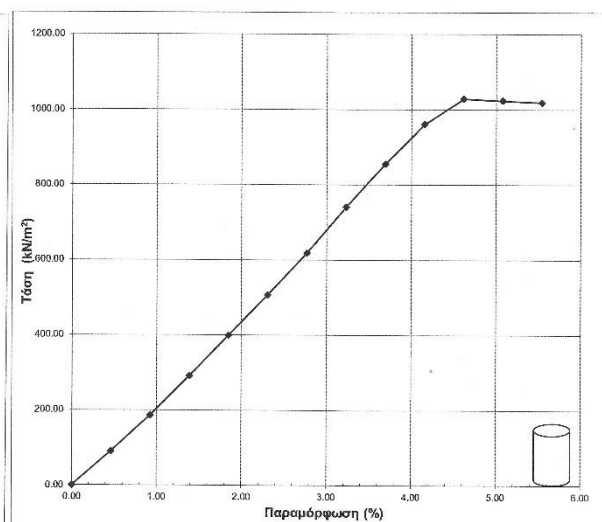


**ST-I\_9**

**1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.**

Ημερομηνία εκτέλεσης :	22/06/2023	Φυσική υγρασία :	9.3 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	22.17 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.70 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	20.29 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	13.00 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.326
Μέγιστη αξονική τάση :	1028.86 kN/m <sup>2</sup>		
Αντίστοιχη παραμόρφωση :	4.62 %		
Φορτίο θραύσης :	380.10 Kg		

**2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.**



**ST-I\_10**

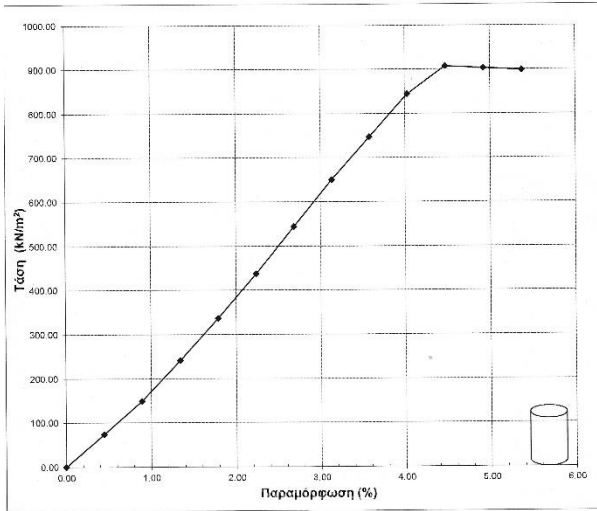


# ΔΥΟ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΟΣ – ST-II

## 1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ημερομηνία εκτέλεσης :	12/06/2023	Φυσική υγρασία :	9.4 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	21.64 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.80 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	19.77 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	13.40 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.360
Μέγιστη αξονική τάση :	906.81 kN/m <sup>2</sup>		
Αντίστοιχη παραμόρφωση :	4.48 %		
Φορτίο θραύσης :	344.62 Kg		

## 2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

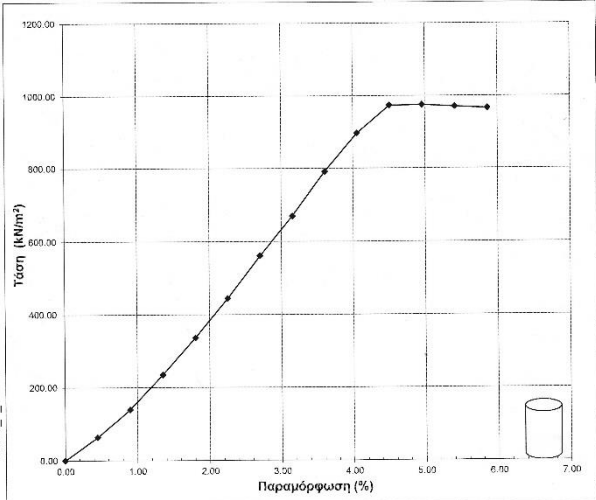


ST-II\_5

## 1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ημερομηνία εκτέλεσης :	12/06/2023	Φυσική υγρασία :	9.3 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	21.36 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.80 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	19.54 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	13.30 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.377
Μέγιστη αξονική τάση :	976.29 kN/m <sup>2</sup>		
Αντίστοιχη παραμόρφωση :	4.96 %		
Φορτίο θραύσης :	372.50 Kg		

## 2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

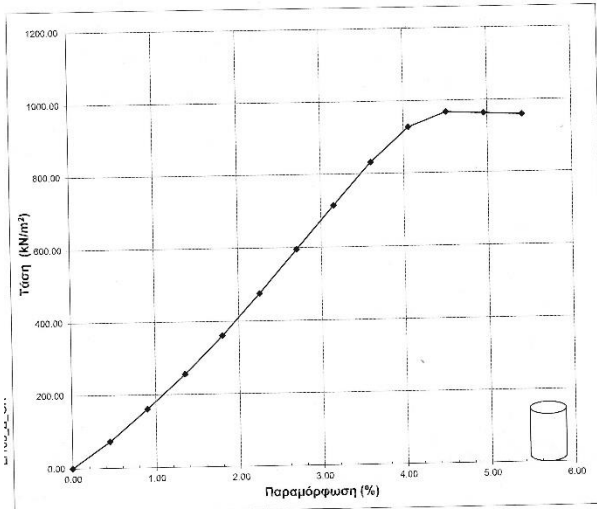


ST-II\_6

## 1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ημερομηνία εκτέλεσης :	12/06/2023	Φυσική υγρασία :	9.0 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	22.44 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.70 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	20.59 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	13.30 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.307
Μέγιστη αξονική τάση :	968.19 kN/m <sup>2</sup>		
Αντίστοιχη παραμόρφωση :	4.51 %		
Φορτίο θραύσης :	357.29 Kg		

## 2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.

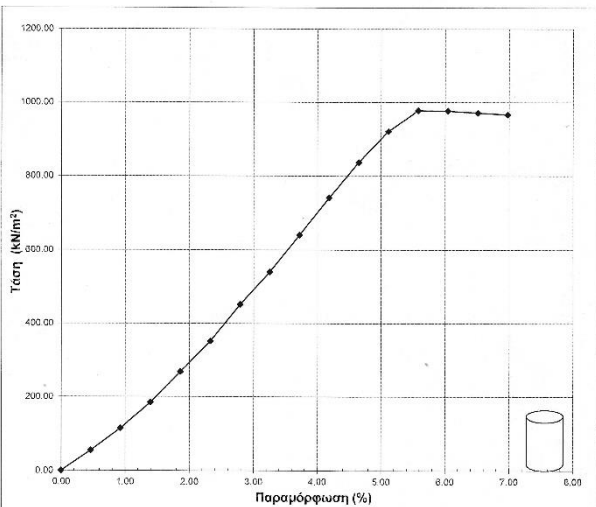


ST-II\_7

## 1. Χαρακτηριστικά δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ημερομηνία εκτέλεσης :	13/06/2023	Φυσική υγρασία :	9.7 %
Ταχύτητα παραμόρφωσης :	1.2 mm/min	Υγρό φαινόμενο βάρος :	23.09 kN/m <sup>3</sup>
Διάμετρος δοκιμίου :	6.70 cm	Ξηρό φαινόμενο βάρος :	21.06 kN/m <sup>3</sup>
Ύψος δοκιμίου :	12.90 cm	Ειδικό βάρος :	2.69
Είδος δείγματος :	B	Δείκτης πόρων :	0.278
Μέγιστη αξονική τάση :	977.70 kN/m <sup>2</sup>		
Αντίστοιχη παραμόρφωση :	5.68 %		
Φορτίο θραύσης :	366.16 Kg		

## 2. Διάγραμμα τάσης - παραμόρφωσης.



ST-II\_8

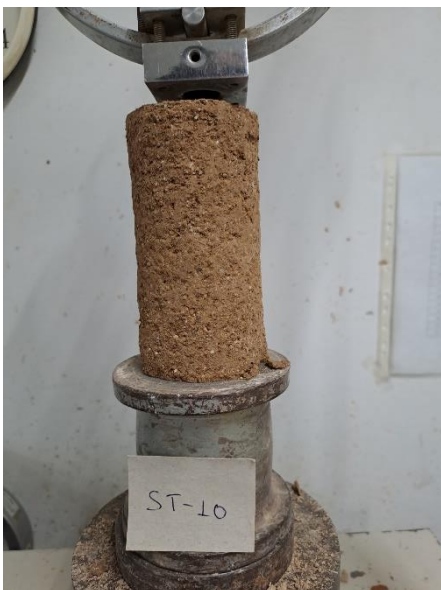
## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ**

### **ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΡΓΙΛΩΔΩΝ ΑΜΜΩΝ**

Σε κάθε ένα από τα δοκίμια ST και ST-I παρατίθενται δυο φωτογραφίες, μια πριν και μια μετά την θραύση. Στα δοκίμια ST-II, υπάρχουν διαθέσιμες τρεις φωτογραφίες, μια πριν και δυο μετά την αστοχία, με σκοπό να παρουσιαστούν τα στάδια της πλαστικής θραύσης.

**ΧΩΡΙΣ ΓΕΩΦΑΣΜΑ – ΣΤ**





# ΜΙΑ ΣΤΡΩΣΗ ΓΕΩΦΑΣΜΑΤΟΣ – ST-I







## ΔΥΟ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΓΕΩΦΑΣΜΑΤΟΣ – ΣΤ-II







## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ**

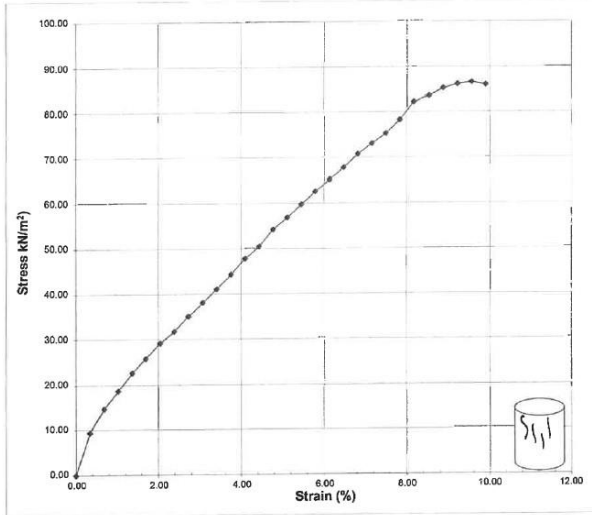
### **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ ΣΕ ΑΜΜΩΔΕΙΣ ΙΣΧΝΕΣ ΑΡΓΙΛΟΥΣ**

# ΧΩΡΙΣ ΓΕΩΥΦΑΣΜΑ - 3

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 08/07/2019	Strain rate	: 1.14 mm/min	Nat. moisture content	: 12.6 %
Sample diameter	: 6.80 cm	Wet bulk density	: 21.23 kN/m <sup>3</sup>	Dry bulk density	: 18.86 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 16.70 cm	Specific gravity	: 2.70	Void ratio	: 0.432
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>				
Maximum axial stress	: 86.63 kN/m <sup>2</sup>				
Maximum axial strain	: 9.56 %				

## 2. Stress vs Strain diagram.

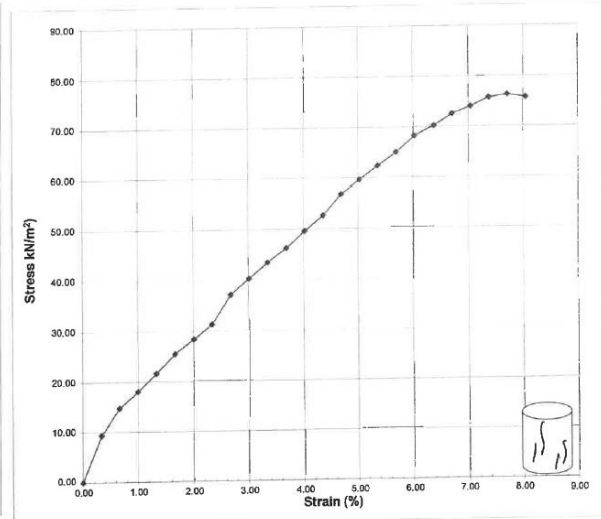


3\_1

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 08/07/2019	Strain rate	: 1.14 mm/min	Nat. moisture content	: 12.4 %
Sample diameter	: 6.40 cm	Wet bulk density	: 21.03 kN/m <sup>3</sup>	Dry bulk density	: 18.72 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 17.00 cm	Specific gravity	: 2.70	Void ratio	: 0.442
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>				
Maximum axial stress	: 76.30 kN/m <sup>2</sup>				
Maximum axial strain	: 7.71 %				

## 2. Stress vs Strain diagram.

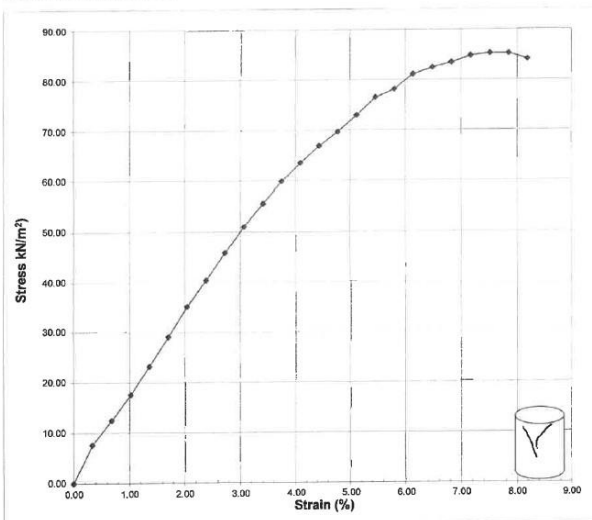


3\_2

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 08/07/2019	Strain rate	: 1.14 mm/min	Nat. moisture content	: 11.6 %
Sample diameter	: 6.60 cm	Wet bulk density	: 21.49 kN/m <sup>3</sup>	Dry bulk density	: 19.26 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 16.70 cm	Specific gravity	: 2.70	Void ratio	: 0.402
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>				
Maximum axial stress	: 85.24 kN/m <sup>2</sup>				
Maximum axial strain	: 7.51 %				

## 2. Stress vs Strain diagram.



3\_3

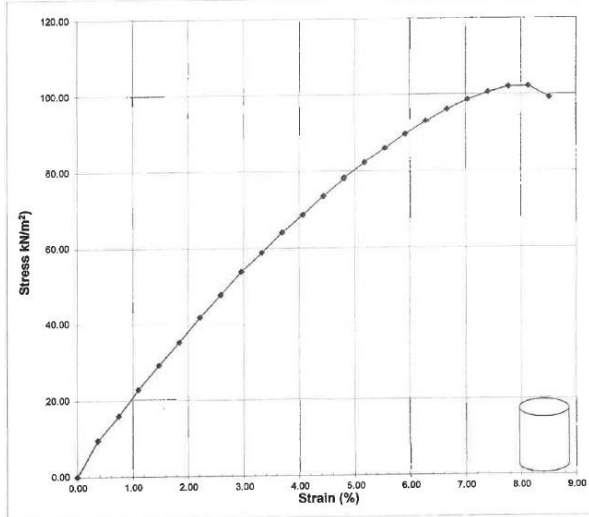
# ΜΙΑ ΣΤΡΩΣΗ ΓΕΩΦΑΣΜΑΤΟΣ – A\_1

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 08/07/2019	Nat. moisture content	: 11.6 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 21.76 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 6.65 cm	Dry bulk density	: 19.51 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 16.40 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.384

Maximum axial stress : 102.17 kN/m<sup>2</sup>  
Maximum axial strain : 8.14 %

## 2. Stress vs Strain diagram.



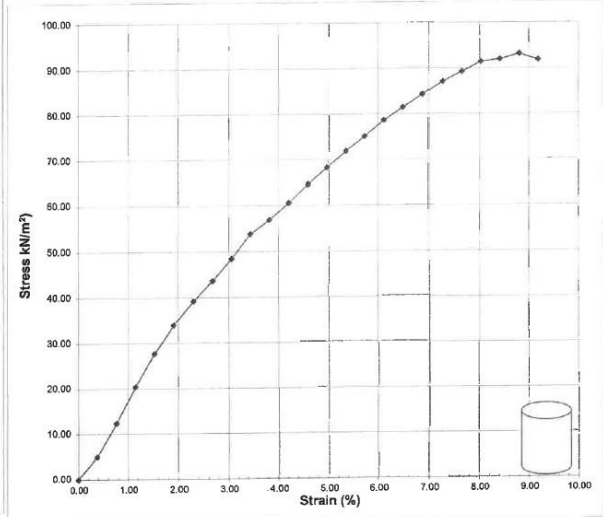
A\_1\_1

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 08/07/2019	Nat. moisture content	: 8.6 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 21.88 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 6.07 cm	Dry bulk density	: 20.14 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 14.90 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.340

Maximum axial stress : 93.15 kN/m<sup>2</sup>  
Maximum axial strain : 8.80 %

## 2. Stress vs Strain diagram.



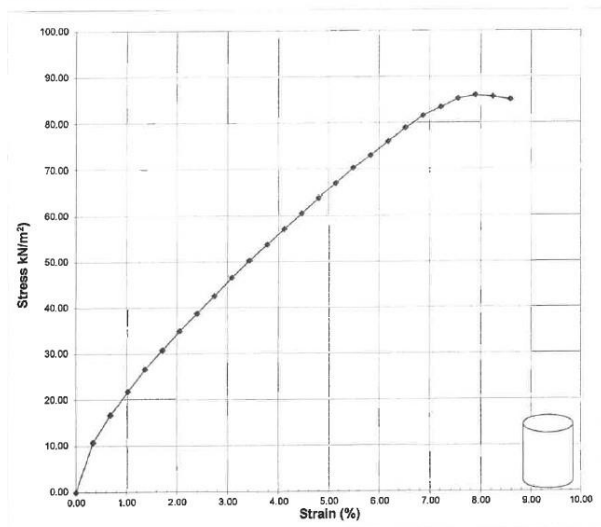
A\_1\_2

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 08/07/2019	Nat. moisture content	: 12.3 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 21.21 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 6.60 cm	Dry bulk density	: 18.89 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 16.60 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.430

Maximum axial stress : 86.84 kN/m<sup>2</sup>  
Maximum axial strain : 7.90 %

## 2. Stress vs Strain diagram.



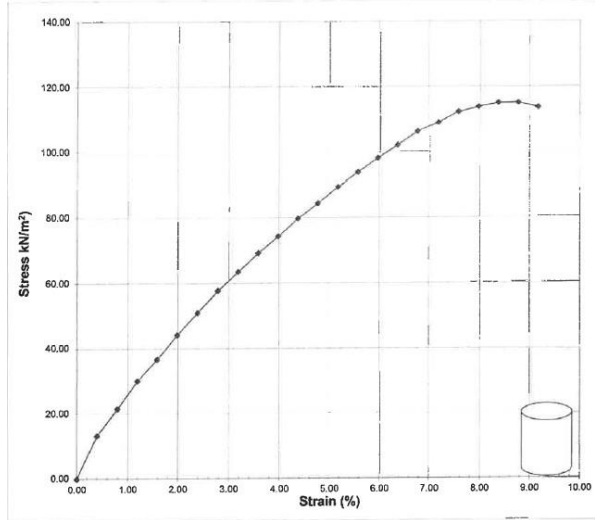
A\_1\_3

# ΔΥΟ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΓΕΩΦΑΣΜΑΤΟΣ – Α\_2

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 06/07/2019	Nat. moisture content	: 11.6 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 21.45 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 6.35 cm	Dry bulk density	: 19.23 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 14.30 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.404
Maximum axial stress	: 114.98 kN/m <sup>2</sup>		
Maximum axial strain	: 8.77 %		

## 2. Stress vs Strain diagram.

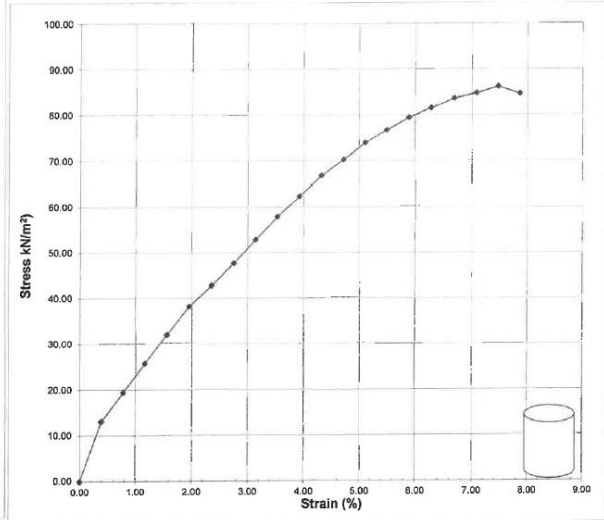


A\_2\_1

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 06/07/2019	Nat. moisture content	: 11.4 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 21.93 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 6.23 cm	Dry bulk density	: 19.70 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 14.50 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.371
Maximum axial stress	: 86.12 kN/m <sup>2</sup>		
Maximum axial strain	: 7.47 %		

## 2. Stress vs Strain diagram.

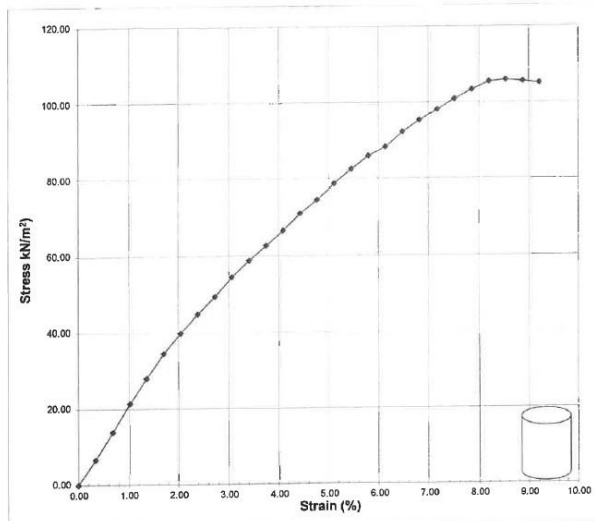


A\_2\_2

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 06/07/2019	Nat. moisture content	: 11.6 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 22.25 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 6.40 cm	Dry bulk density	: 19.95 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 16.70 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.353
Maximum axial stress	: 105.91 kN/m <sup>2</sup>		
Maximum axial strain	: 8.53 %		

## 2. Stress vs Strain diagram.

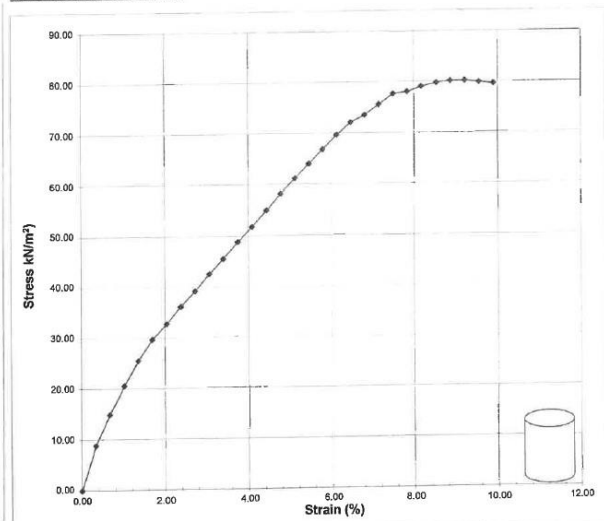


A\_2\_3

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 06/07/2019	Nat. moisture content	: 12.3 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 21.37 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 5.90 cm	Dry bulk density	: 19.03 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 16.70 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.419
Maximum axial stress	: 80.13 kN/m <sup>2</sup>		
Maximum axial strain	: 9.22 %		

## 2. Stress vs Strain diagram.



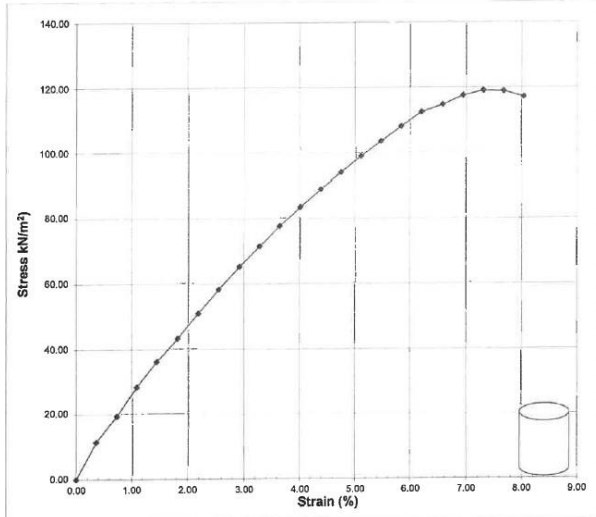
A\_2\_4

# ΤΡΕΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΓΕΩΦΑΣΜΑΤΟΣ – A\_3

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 08/07/2019	Nat. moisture content	: 11.4 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 20.85 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 5.98 cm	Dry bulk density	: 18.71 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 15.60 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.443
Maximum axial stress	: 119.03 kN/m <sup>2</sup>		
Maximum axial strain	: 7.31 %		

## 2. Stress vs Strain diagram.

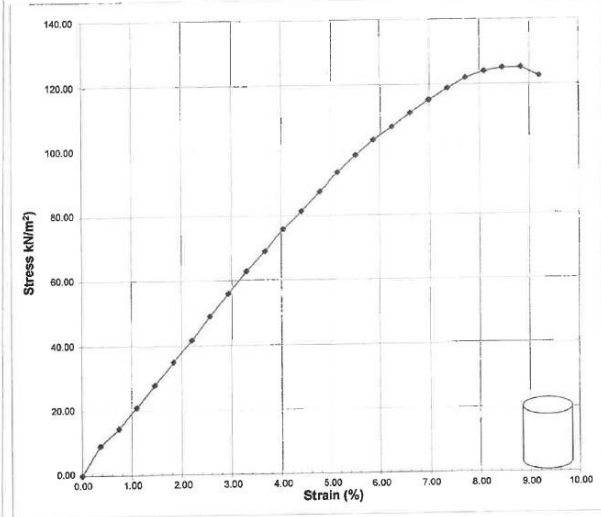


A\_3\_1

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 08/07/2019	Nat. moisture content	: 11.3 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 20.77 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 6.13 cm	Dry bulk density	: 18.66 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 15.50 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.447
Maximum axial stress	: 125.14 kN/m <sup>2</sup>		
Maximum axial strain	: 8.83 %		

## 2. Stress vs Strain diagram.

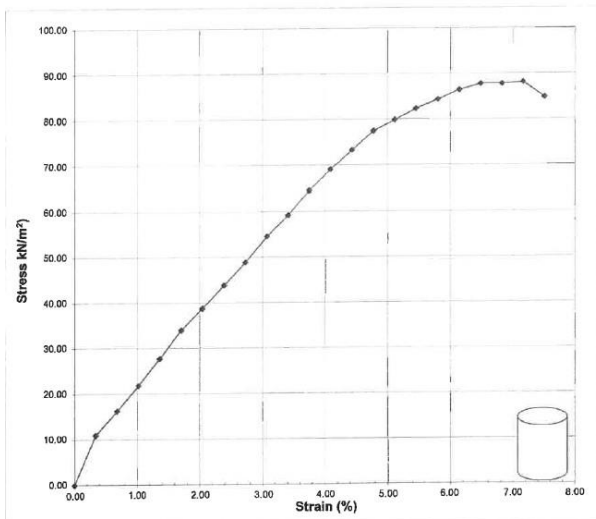


A\_3\_2

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 08/07/2019	Nat. moisture content	: 11.8 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 21.02 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 5.93 cm	Dry bulk density	: 18.81 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 16.70 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.436
Maximum axial stress	: 88.07 kN/m <sup>2</sup>		
Maximum axial strain	: 7.17 %		

## 2. Stress vs Strain diagram.

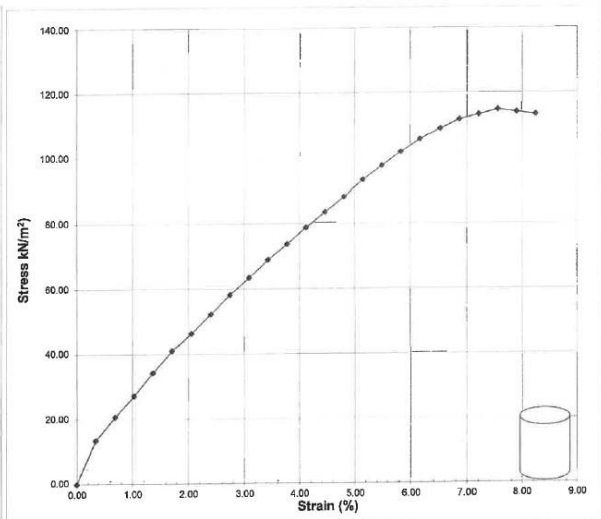


A\_3\_3

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 08/07/2019	Nat. moisture content	: 11.8 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 23.13 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 6.00 cm	Dry bulk density	: 20.58 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 16.80 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.305
Maximum axial stress	: 114.70 kN/m <sup>2</sup>		
Maximum axial strain	: 7.55 %		

## 2. Stress vs Strain diagram.



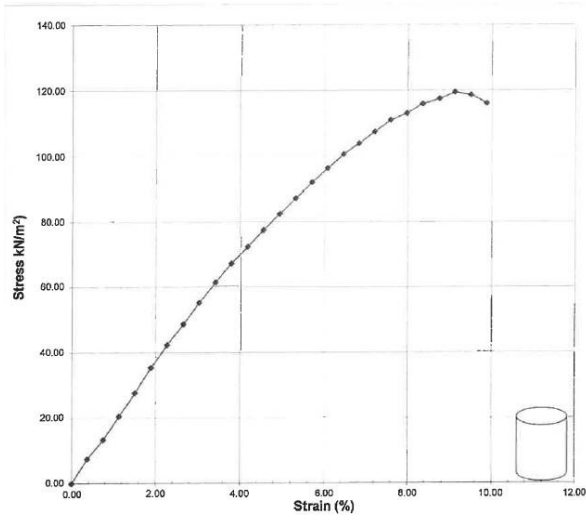
A\_3\_4

# ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΓΕΩΥΦΑΣΜΑΤΟΣ – Α\_4

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 08/07/2019	Nat. moisture content	: 11.3 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 20.55 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 6.15 cm	Dry bulk density	: 18.47 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 15.00 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.984 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.482
Maximum axial stress	: 119.40 kN/m <sup>2</sup>		
Maximum axial strain	: 9.12 %		

## 2. Stress vs Strain diagram.

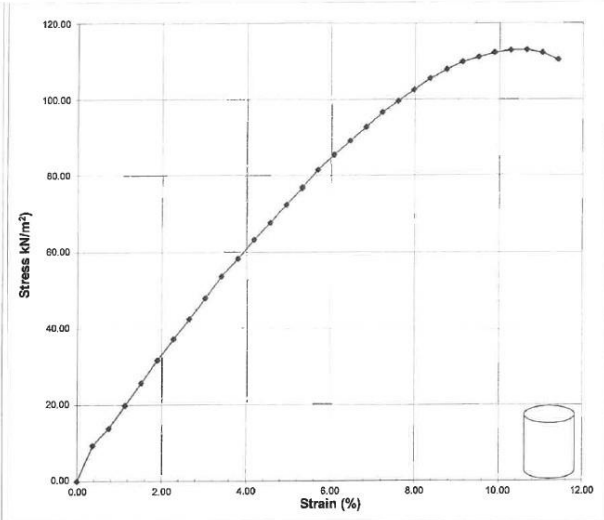


A\_4\_1

## 1. Unconfined Compression Test Data

Test date	: 08/07/2019	Nat. moisture content	: 11.6 %
Strain rate	: 1.14 mm/min	Wet bulk density	: 20.78 kN/m <sup>3</sup>
Sample diameter	: 6.40 cm	Dry bulk density	: 18.62 kN/m <sup>3</sup>
Sample height	: 15.00 cm	Specific gravity	: 2.70
Y <sub>dmax</sub>	: 1.964 gr/cm <sup>3</sup>	Void ratio	: 0.450
Maximum axial stress	: 113.06 kN/m <sup>2</sup>		
Maximum axial strain	: 10.64 %		

## 2. Stress vs Strain diagram.



A\_4\_2

