



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΥΡΕΥΝΗΣΗ
ΦΥΣΙΚΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ
ΚΑΙ ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ
ΤΟΥ ΑΤΤΑΠΟΥΛΓΙΤΗ**

Μεταπτυχιακή εργασία

του

Νικολάου Σ. Μποζίκη

Επιβλέπων: Ιωάννης Φ. Δαφαλιάς, Καθηγητής Μηχανικής Ε.Μ.Π

*Ιούνιος 2017
Αθήνα*

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....σελ. 2
Πρόλογος.....σελ. 4
Περίληψη.....σελ. 6
Κεφάλαιο 1 ^ο Περιγραφή Ατταπουλγίτη.....σελ. 7
1.1 Εισαγωγή.....σελ. 7
1.2 Ορυκτολογική δομή και σύσταση τουσελ. 8
1.3 Φυσικοχημικές ιδιότητες και χρήση στην βιομηχανία.....σελ. 9
1.4 Σχήμα και τύποι προέλευσηςσελ.11
Κεφάλαιο 2 ^ο Φυσικές Ιδιότητες και ορυκτολογική Ανάλυση του Ατταπουλγίτη....σελ.14
2.1 Περιγραφή φυσικών ιδιοτήτων και ορυκτολογική ανάλυση.....σελ.14
2.2 Φυσική υγρασίασελ.16
2.3 Κοκκομετρική Ανάλυση.....σελ.19
2.4 Όρια Atterberg.....σελ.24
2.4.1 Όριο υδαρότητας.....σελ.27
2.4.2 Όριο πλαστικότητας-πλαστιμότητας.....σελ.28
2.4.3 Όριο συρίκνωσης.....σελ.29
2.5 Ειδική βαρύτητα στερεών.....σελ.34
2.6 Προσδιορισμός βέλτιστης υγρασίας –μέγιστης πυκνότητας μέθοδος Proctor.....σελ.41

Κεφάλαιο 3 ^ο Μηχανικές ιδιότητες και εσωτερική δομή του Ατταπουλγίτη	σελ. 50
3.1 Εισαγωγή	σελ. 50
3.2 Μέθοδοι παρασκευής και διαμόρφωσης δοκιμίων	σελ. 50
3.3 Δοκιμές απευθείας διάτμησης	σελ. 54
3.3.1 Γενική διερεύνηση και μεθοδολογία εκτέλεσης δοκιμών...σελ..	54
3.3.2 Επίδραση γωνίας στοίβαξης.....σελ..	68
3.4 Δοκιμές μονοαξονικής-ανεμπόδιστης θλίψης.....σελ.	73
3.5 Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης	σελ. 79
3.6 Δοκιμές τριαξονικής φόρτισης	σελ. 86
Κεφάλαιο 4 ^ο Αποτίμηση πειραματικών δεδομένων για την φύση και την μηχανική συμπεριφορά του Ατταπουλγίτη.	σελ. 95
4.1 Εισαγωγή	σελ. 95
4.2 Σύνοψη πειραματικών δεδομένων.....σελ.	95
4.2.1 Φυσικές ιδιότητες	σελ..95
4.2.2 Μηχανικές ιδιότητες.....σελ..	96
4.3 Συμπεριφορά μικροδομής.....σελ.	102
4.4 Οπτική μικροανάλυση.....σελ.	105
4.5 Υπόθεση μικρομηχανικού μοντέλου.....σελ.	108
Κεφάλαιο 5 ^ο Συμπεράσματα	σελ.113
Βιβλιογραφία.....	σελ.115

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης «Εφαρμοσμένη Μηχανική» κατεύθυνση «Αντοχή των Υλικών», στο Τομέα Μηχακικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, του Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του **Καθηγητή Μηχανικής κ. Ιωάννη Φ. Δαφαλιά**. Η εν λόγω πειραματική εργασία και διερεύνηση υποστηρίχθηκε και χρηματοδοτήθηκε μέσω του ερευνητικού προγράμματος «**Critical State Soil Mechanics Revisited: Fabric Effect (SOMEF)**» της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Ερευνών- **ERC**, που οφείλω τις ευχαριστίες μου. Το θέμα της παρούσας εργασίας ουσιαστικά αποσκοπεί στην κατανόηση και την εξαγωγή των ιδιοτήτων του Ατταπουλγίτη κυρίως από μηχανικής πλευράς, καθώς και την συσχέτιση τους με τις υπόλοιπες ιδιότητες του, για την σφαιρική αποτύπωση της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου Υλικού. Σε αυτό συνεισέφερε με την προμήθεια του υλικού για τις δοκιμές η Εταιρεία **GeoHellas A.E**, που εκφράζω τις ευχαριστίες μου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους στο Εργαστήριο Γεωϋλικών (την Χαρά, τον Κώστα, τον Αλέξανδρο) ιδιαίτερα την εργαστηριακή ομάδα (τον Παναγιώτη και τον Ιωάννη Ορέστη) που χωρίς την ηθική αλλά και την συναδελφική υποστήριξη τους δεν θα ολοκλήρωνα αυτό το στάδιο σπουδών. Ειδικά χωρίς την συμβολή του Δρ Ι.-Ο. Γεωργόπουλου ίσως δεν θα ξεκινούσε καν και τον ευχαριστώ ξεχωριστά για αυτό.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής Επιτροπής, την Καθηγήτρια Μηχανικής & Πολυμερών κ. Ευαγγελία Κοντού που καθ όλη την διάρκεια των σπουδών μου στο τομέα, υπήρξε σημαντικός συμπαράστατης, στον Επίκουρο Καθηγητή Εδαφομηχανικής κ. Παπαδημητρίου Αχιλλέα που χωρίς την ουσιαστική ηθική και «υλική»αυμπάρσταση (ως προς την καθοδήγηση και τον

προσανατολισμό της έρευνας για την παρούσα εργασία), δεν θα είχε ολοκληρωθεί το παρόν πόνημα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που σε δύσκολες ώρες ήταν δίπλα μου, όπως και τον επιβλέποντα μου καθηγητή Ιωάννη Δαφαλιά που πέραν τούτου, επιπλέον μου χάραξε εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς δρόμους και ταυτόχρονα με στήριξε ηθικά και υλικά (δίνοντας μου την ευκαιρία μέσω της συμμετοχής μου στο ερευνητικό πρόγραμμα) να εξελιχθώ ως επιστήμονα και Άνθρωπο προσπερνώντας οποιοδήποτε εμπόδιο.

Μποζίκης Νικόλαος

Αθήνα, Ιούνιος 2017

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τον προσδιορισμό των φυσικοχημικών ιδιοτήτων και την μηχανική συμπεριφορά του αργιλικού ορυκτού και υλικού Ατταπουλγίτη, μέσω εργαστηριακών δοκιμών εδαφομηχανικής.

Ο Ατταπουλγίτης αποτελεί υλικό το οποίο δεν είναι ευρέως διαδεδομένο, και παρότι δεν έχει ανακαλυφθεί σχετικά πρόσφατα, άργησε να μελετηθεί διεξοδικά, εξού και ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες υπάρχει ελάχιστη βιβλιογραφία. Οι όποιες πληροφορίες αφορούν στις χημικές και ορυκτολογικές ιδιότητες, λόγω της χρήσης του στην χημική βιομηχανία ως πρόσθετο (σε βαφές, φάρμακα, ζωοτροφές) και στην αντιρρυπαντική τεχνολογία ως κύριο υλικό. Επειδή οι μηχανικές ιδιότητες καθώς και η συμπεριφορά της εσωτερικής δομής που σχηματίζει το υλικό εξαρτώνται άμεσα από τις φυσικοχημικές παραμέτρους, εκτελέστηκαν διάφορες δοκιμές που ουσιαστικά χαρακτηρίζουν, ταυτοποιούν και κατατάσσουν την μηχανική του συμπεριφορά ως προς τις εν λόγω φυσικοχημικές ιδιότητες. Το μέρος της παρούσας εργασίας απαρτίζεται από ένα κύκλο δοκιμών που αφορούν στις φυσικές ιδιότητες και παρουσιάζεται κυρίως στο 2^ο Κεφάλαιο. Το 3^ο κεφάλαιο που αφορά αμιγώς την κύρια εξέταση του υλικού ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες, ενώ στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται η αποτίμηση των πειραματικών και οπτικών δεδομένων για την μελέτη επιρροής της εσωτερικής δομής. Τέλος στο 5^ο κεφάλαιο παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα και οι προτάσεις για περαιτέρω ερευνητική εργασία επί του υλικού. Η διερεύνηση του αργιλικού υλικού και της συμπεριφοράς του, σε συσχέτιση με την μικροδομή ακολουθεί τη λογική της εργασίας των της Z.Tong et al (2013), όπου παρουσιάζεται μια μέθοδος παρασκευής δοκιμών διαφορετικής γωνίας στοίβαξης κόκκων άμμου, και πως η στοίβαξη αυτή επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες και παραμέτρους.

Ακόμα σε αυτό το Κεφάλαιο της εργασίας, δίνονται πολλές λεπτομέρειες για την διαμόρφωση και την κατασκευή των δοκιμών για την εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων.

Ως κύριο συμπέρασμα της εργασίας προκύπτει ότι η γωνία της στοίβαξης σε σχέση με την φόρτιση επηρεάζει την αντοχή του υλικού, αλλά σχετικώς λιγότερο από το ρυθμό επιβολής της παραμόρφωσης. Αυτή η επίδραση οφείλεται στην ιξώδη απόκριση του υλικού, σε συμφωνία με την ορυκτολογική δομή και τις φυσικές ιδιότητες που δείχνουν ένα υλικό με διπλή συμπεριφορά (κάτι μεταξύ ρευστού και στερεού).

Κεφάλαιο 1 Περιγραφή Ατταπουλγίτη

1.1. Εισαγωγή

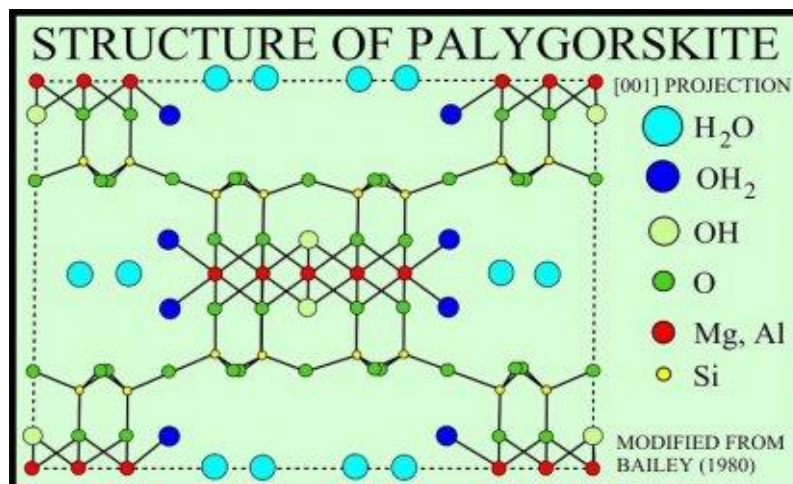
Συνήθως όταν μας απασχολεί η ερμηνεία και ο προσδιορισμός της μηχανικής συμπεριφοράς ενός υλικού μας ενδιαφέρει αρχικά η φύση του υλικού, πως δημιουργείται και φυσικά πως συμπεριφέρεται, οπότε αποτελεί και την επιστημονική περιοχή που χρησιμοποιείται και μελετάται (πχ πολυμερή, γεωϋλικά, μέταλλα κλπ) . Ο Ατταπουλγίτης είναι ένα γεωϋλικό , αργιλικής σύστασης και αργιλικού μεγέθους. Πολύ συχνά αυτά τα δύο συγχέονται με αποτέλεσμα όταν γίνεται αναφορά στα αργιλικά υλικά να συγχέονται καταστάσεις, συμπεριφορές- ιδιότητες, συνθήκες και κατ' επέκταση προέλευση. Για παράδειγμα ένα ανθρακικής προέλευσης γεωϋλικό το οποίο το συναντάμε σε αργιλικό μέγεθος κόκκων έχει σχεδόν μηδενική πλαστιμότητα και συνοχή. Αντίστοιχα, ένα γεωϋλικό αργιλικής σύστασης αλλά μεγέθους ιλύος εμφανίζει συγκριτικά πολύ μεγαλύτερες τιμές πλαστιμότητας και συνοχής. Επομένως για αναφορά σε αργιλικό υλικό θα πρέπει να είναι διασφαλισμένη και η αργιλική προέλευση και σύσταση (ότι προέρχεται από την ομάδα των αργιλοπυριτικών Ορυκτών) αλλά και ότι η δομή, η συμπεριφορά και το μέγεθος κόκκων αναφέρεται στο αργιλικό κλάσμα, ή καλύτερα στο λεπτομερές κλάσμα, δηλαδή ότι το στοιχειώδες ελεύθερο αυτοτελές σώμα του υλικού έχει μέγεθος μερικά μm ή Angstrom (δομική κυψελίδα). Επομένως οι φυσικές ιδιότητες είναι αυτές που χαρακτηρίζουν το μέγεθος κόκκων καθώς και άλλες ιδιότητες του υλικού και οι γεωχημικές-ορυκτολογικές την φύση-ταυτότητα του υλικού. Μόνο όταν έχουμε και τις δυο περιπτώσεις μπορούμε ουσιαστικά να μιλάμε για Αργιλικό υλικό. Εδώ θα αναφερθούν τα πιο σημαντικά πράγματα ως προς την προέλευση , την φύση και ταυτότητα του υλικού, καθώς και τις κύριες χρήσεις του Ατταπουλγίτη, ενώ όσα αφορούν την συσχέτιση και εμπλοκή των γεωχημικών διεργασιών με τις φυσικές ιδιότητες θα αναφερθούν στο αντίστοιχο σημείο στο Κεφάλαιο των φυσικών Ιδιοτήτων.

1.2. Ορυκτολογική δομή και σύσταση

Ο Ατταπουλγίτης πήρε αυτή την ονομασία το 1935 από τον J. De Lapparent κατά τη διάρκεια μελέτης αργίλων για την κατεργασία στην υφαντουργία (fillers earth clays) στις περιοχές Attapulgis της Γεωργίας των Η.Π.Α και Mormoiron της Γαλλίας, από όπου και ελήφθησαν τα πρώτα δείγματα που μελετήθηκαν από τον ίδιο τον De Lapparent (Bradley, 1940). Άργιλοι παρόμοιας δομής είχαν ήδη βρεθεί στην περιοχή Palygorsk των Ουραλίων της Ρωσίας το 1861 και έλαβαν το όνομα Παλιγορσκήτης από το όνομα της περιοχής εκείνης. Στα επόμενα χρόνια επιβεβαιώθηκε ότι οι δύο άργιλοι Ατταπουλγίτης και Παλιγορσκήτης είναι ταυτόσημες ως προς τη δομή τους. (Haden & Schwint, 1967)

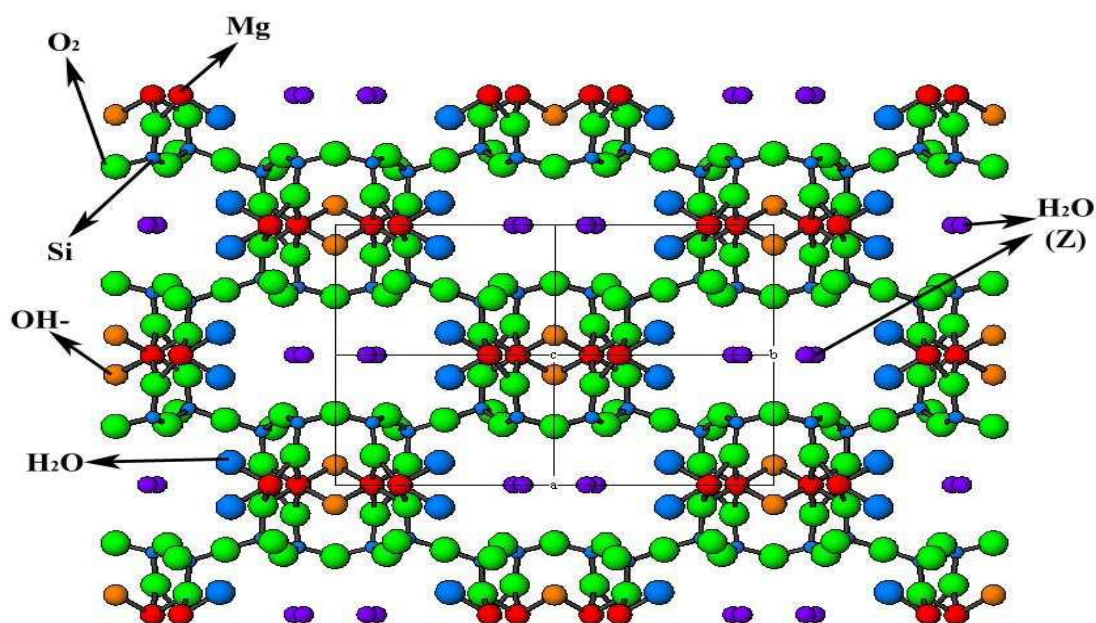
Ο Ατταπουλγίτης είναι κατά την κατηγοριοποίηση του ένα βιομηχανικό ορυκτό (χαρακτηρίζεται έτσι λόγω των ποικίλων εφαρμογών που χρησιμοποιείται), το οποίο από ορυκτολογικής πλευράς ανήκει στην κατηγορία των φυλλοπυριτικών της ομάδας των ένυδρων αργιλοπυριτικών ορυκτών ή της ομάδας των αργίλων με συνήθη χημικό τύπο $(Mg,Al)_2Si_4O_{10}(OH)\cdot 4(H_2O)$. Ο Ατταπουλγίτης είναι λευκού έως τεφρού χρώματος, και σχηματίζει ανοιχτής δομής σανιδοειδείς έως ινώδεις κρυστάλλους, με γεώδη έως σιφρή λάμψη.

Συγκεκριμένα, η συνήθης ακριβής δομής είναι βελονοειδής, δηλαδή μεγάλου μήκους (τύπου αλυσίδας) επιμήκεις κρύσταλλοι με ακμές στην τρίτη διάσταση (περίπου 1μm μήκος και 0,01μm πλάτος), που είναι αδρανείς και δεν διογκώνονται, αλλά σχηματίζουν ένα τυχαίας διάταξης δικτυωτό πλέγμα υψηλής ευαισθησίας σε ηλεκτροχημικές μεταβολές (κυψελοειδές) παγιδευόντας υγρά και παρέχοντας πυκνωτικές, ανασταλτικές και θιξοτροπικές (κολλοειδείς) ιδιότητες.



Σχήμα 1.1 Στοιχειομετρική δομή του Παλιγορσκήτη (Αλεξάκης 2010)

Ο Ατταπουλγίτης ανήκει στην ομάδα των αργιλοπυριτικών ορυκτών (Si_4O_{10}), με δομή 2:1, δηλαδή δύο φύλλα τετραέδρων πυριτίου (SiO_4) εμπεριέχουν ένα φύλλο οκταέδρων αργιλίου (Al_2O_6), όπου το αργίλιο έχει μερικώς αντικατασταθεί από μαγνήσιο (έχει απούλωθεί από μέρος του μαγνησίου) ή και από σίδηρο. Είναι πλούσιος σε πυριτικά άλατα μαγνησίου και αργιλίου και συνήθως εμφανίζεται στη φύση σε πετρώματα της ομάδας των χρωμιτών μαζί με τον Σεπιόλιθο ή τον τάλκη.

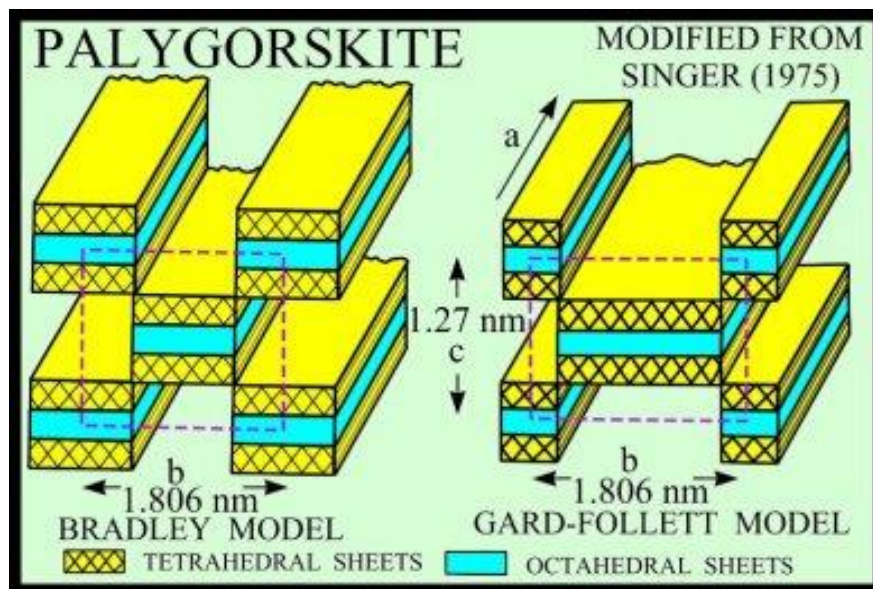


Σχήμα 1.2 Ορθορομβικό μοντέλο κρυσταλλικής δομής Ατταπουλγίτη, με διάταξη δεσμών (Βλαμίδης, 2009).

1.3. Φυσικοχημικές ιδιότητες και χρήσεις στην βιομηχανία

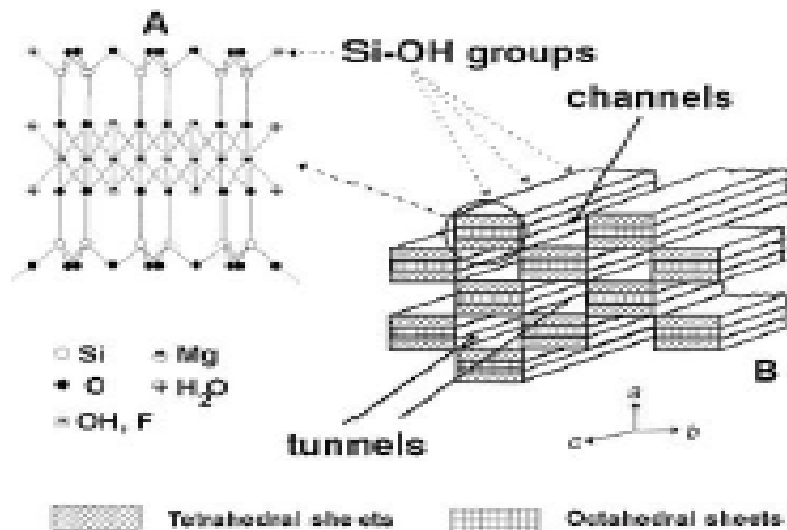
Η μοναδικότητα του Ατταπουλγίτη ως βιομηχανικό ορυκτό οφείλεται στην πολύ μεγάλη ειδική του επιφάνεια (250 έως και πάνω από 300 m^2/g) και το μεγάλο πορώδες του (0,6 έως 0,7 ml/g). Είναι μαγνησιούχο αργιλοπυριτικό υλικό, του οποίου η δομή μοιάζει με έναν τοίχο από τούβλα όπου κάθε δεύτερο στη σειρά τούβλο λείπει. Αυτό αφήνει επιμήκη πορώδη κανάλια που το κάνουν πολύ απορροφητικό και ικανό να σχηματίζει γέλη/gel όταν έχει επεξεργαστεί σε ψιλή κονιώδη μορφή. Επίσης, ο Ατταπουλγίτης είναι σταθερός σε υψηλές θερμοκρασίες και δεν κροκιδώνεται από ηλεκτρολύτες, ενώ το χαλαρά συγκροτημένο νερό του

μπορεί να απομακρυνθεί διαμέσου θέρμανσης (Christidis G 2010), με συνέπεια να αυξάνονται οι ήδη αυξημένες προσροφητικές ιδιότητες του, ενώ ένα επιπλέον χαρακτηριστικό είναι οι υψηλές τιμές του δυναμικού ιξώδους, κατά την διάλυση, επαφή, ή κορεσμό του σε υγρά (κυρίως νερό), η οποία είναι της τάξης των 40.000[cp] η 40Pa*s (Haden & Schwint, 1967)



Σχήμα 1.3 Τετραεδρική και οκταεδρική δομή του Ατταπουλγίτη (Αλεξάκης 2010)

Αυτή η ειδική συμπεριφορά των επιμηκών καναλιών του δίνει ισχυρή ικανότητα ώστε να απορροφά τουλάχιστον τέσσερις έως πέντε φορές το βάρος του σε νερό, και να συγκρατεί κάτω από καθεστώς τάσεων τουλάχιστον τρεις φορές το βάρος του σε νερό. Η ποσότητα νερού που συγκρατείται εξαρτάται και από την καθαρότητα σε άλατα του νερού, καθώς όσο πιο κορεσμένο σε άλατα, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό συγκράτησης, εμφανίζει. Σε αντίθεση με τις γέλες που γίνονται με μπεντονίτη, οι γέλες από Ατταπουλγίτη παραμένουν σταθερές υπό την παρουσία αλάτων και άλλων προσθέτων. Όσον αφορά στις προσροφητικές ιδιότητες, ο Ατταπουλγίτης υπερέχει έναντι όλων των άλλων αργίλων ως μέσο διήθησης στη βιομηχανία των βρώσιμων ελαίων. Η ικανότητα του Ατταπουλγίτη στη διήθηση, ενισχύεται με θερμική κατεργασία σε θερμοκρασίες πάνω από 200°C, όπου αναπτύσσει την κατάλληλη οξύτητα στην επιφάνειά του, για ήπια αλλά και αποτελεσματική απομάκρυνση των προσμείξεων του ελαίου (Ζωτιάδης et al 2010).

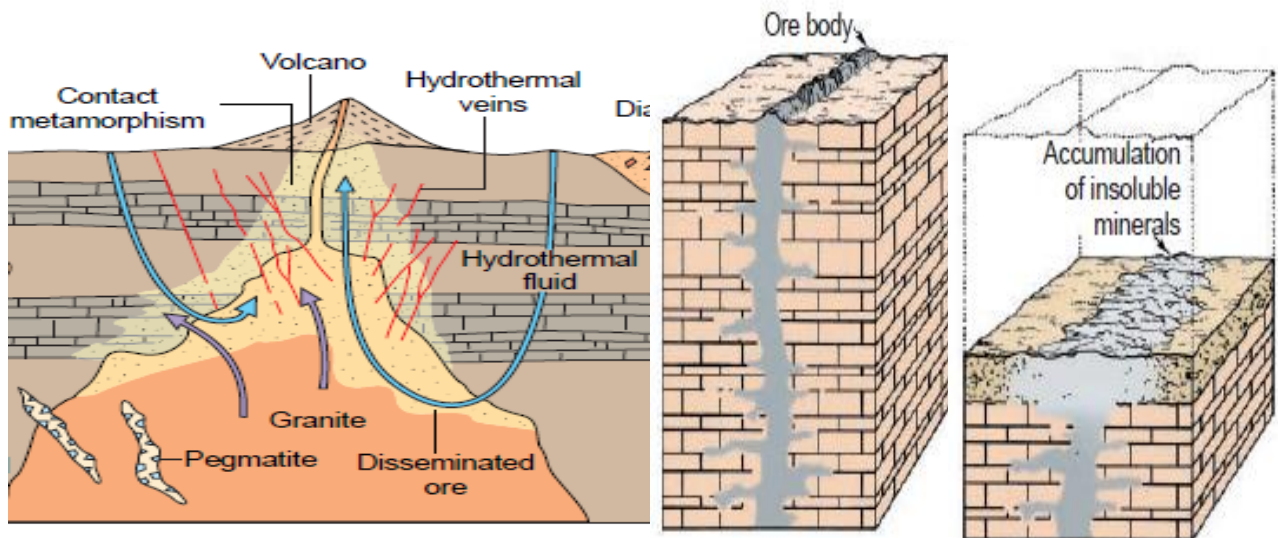


Σχήμα 1.4 Κυψελωτή δομή-κανάλια
Ατταπουλγίτη (Μαletzky 2015)

Εξαιτίας αυτών των ιδιοτήτων μερικές από τις χρήσεις του Ατταπουλγίτη είναι σε γεωτρήσεις και ειδικότερα σε γεωτρήσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου, σε διαδικασίες απορρύπανσης υδάτων (λιμνών, ελών και θαλασσών). Επίσης βρίσκει χρήσεις σε δομικά υλικά (ελαφρότουβλα, ηχομονωτικές πλάκες, αφυγραντικά πετάσματα κλπ), κτηνοτροφία, υφάσματα, λεύκανση, επεξεργασία ύδατος, απορρυπαντικά, καλλυντικά, για μοριακό διαχωρισμό, ως υγροσκοπικό μέσο, και άλλες εφαρμογές σε πλαστικά και ελαστικά (Handen et al 1966).

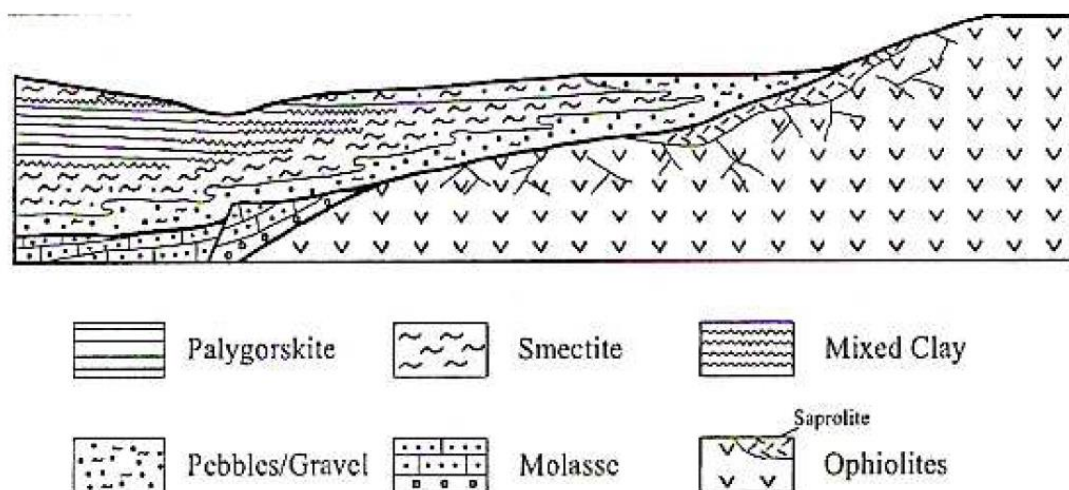
1.4. Σχηματισμός και τύποι προέλευσης

Ο Ατταπουλγίτης σχηματίζεται κάτω από ειδικές συνθήκες, με παρουσία διαλυμάτων πλούσιων σε Mg όπως είναι οι πυθμένες των αλμυρών λιμνών ή από την αποσάθρωση σερπεντινικών πετρωμάτων. Σε μικρές ποσότητες όμως βρίσκονται και σε σύγχρονους θαλάσσιους πηλόλιθους που συνδέονται με ηφαιστειακή δραστηριότητα, ως προϊόντα υδροθερμικής εξαλλοίωσης. Υπάρχουν ουσιαστικά τρεις (3) τύποι σχηματισμού ο διαγενετικός οποίος οφείλεται στην παρουσία διατόμων, ο διαγενετικός σε έντονο περιβάλλον αποσάθρωσης και απόθεσης του Mg από πυριτιούχο υπόβαθρο πλούσιο σε Mg ή σμεκτίτη, και υδροθερμική εξαλλοίωση των ηφαιστειακών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων που σχετίζονται με καθεστώτα ωκεάνιας διάνοιξης ή επωθήσεις τεκτονικών σολών κατά το στάδιο της συγκόλλησης περιθωρίων (Bish & Guthrie, 1993)



Σχήμα 1.5 Σχηματικά μοντέλα γέννησης ορυκτών όπως ο Ατταπουλγίτης αριστερά λόγω υδροθερμικής εξαλίωσης, δεξιά λόγω αποσάθρωσης από (Hablin and Christiansen 2003)

Υπάρχουν πλούσια κοιτάσματα κυρίως στην Αμερική το Μεξικό την Αυστραλία την Κίνα το Ιράν την Ισπανία την Ρωσία και την Ελλάδα τα οποία αντιπροσωπεύουν το 4^ο μεγαλύτερο εξορύξιμο κοίτασμα Παγκοσμίως. Πρόκειται για αποθέματα υψηλής ποιότητας Ατταπουλγίτη που υπάρχουν ΝΑ των Γρεβενών, στη λεκάνη του Βεντζίου. Ο Ατταπουλγίτης συνοδεύεται από σαπωνίτη (Mg-Fe-σμεκτίτης). Τα δύο ορυκτά παρουσιάζουν εξαιρετικές απορροφητικές και θιξοτροπικές ιδιότητες. Τα ενδεικτικά αποθέματα του Ατταπουλγίτη είναι 6 εκατ. τόνοι, του σαπωνίτη 4 εκατ. τόνοι και της ενδοστρωματωμένης φάσης τους 3 εκατ. τόνοι (Kastridis et al 2003).



Σχήμα 1.6 Σχηματική τομή λεκάνης ιζηματογένεσης της περιοχής Βεντζίων Γρεβενών με τα κύρια εκμεταλλεύσιμα ορυκτά (Christidis G. E et al 2010)

Ιδιότητα	Ατταπουλγίτης	Μπεντονίτης	Καολίνης
Κρυσταλλική δομή	Αλυσίδα	Στρώμα 3 φύλλων	Στρώμα 2 φύλλων
Χρώμα:	γκρι-ροζ	γκρι-λευκό	λευκό
Στιλπνότητα:	χαμηλή	μεταβλητή	υψηλή
Σχήμα σωματιδίου	Βελονοειδές	Φολίδα	Πλακίδιο
Έκταση επιφάνειας	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή
Απορροφητικότητα	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή
Ισχύς αποχρωματισμού	Υψηλή	Μεσαία	Χαμηλή
Ισχύς δέσμευσης	Μεσαία	Υψηλή	Χαμηλή
Ικανότητα εναλλαγής ιόντων	Μεσαία	Υψηλή	Χαμηλή
Ισχύς πύκνωσης	Υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή
Επίδραση από ηλεκτρολύτες	μικρή έως καμία	Κροκιδώνεται	Κροκιδώνεται

Πίνακας 1.1 Σύγκριση ορυκτολογικών ιδιοτήτων Ατταπουλγίτη με μπεντονίτη και καολίνη (Haden & Schwint, 1967).

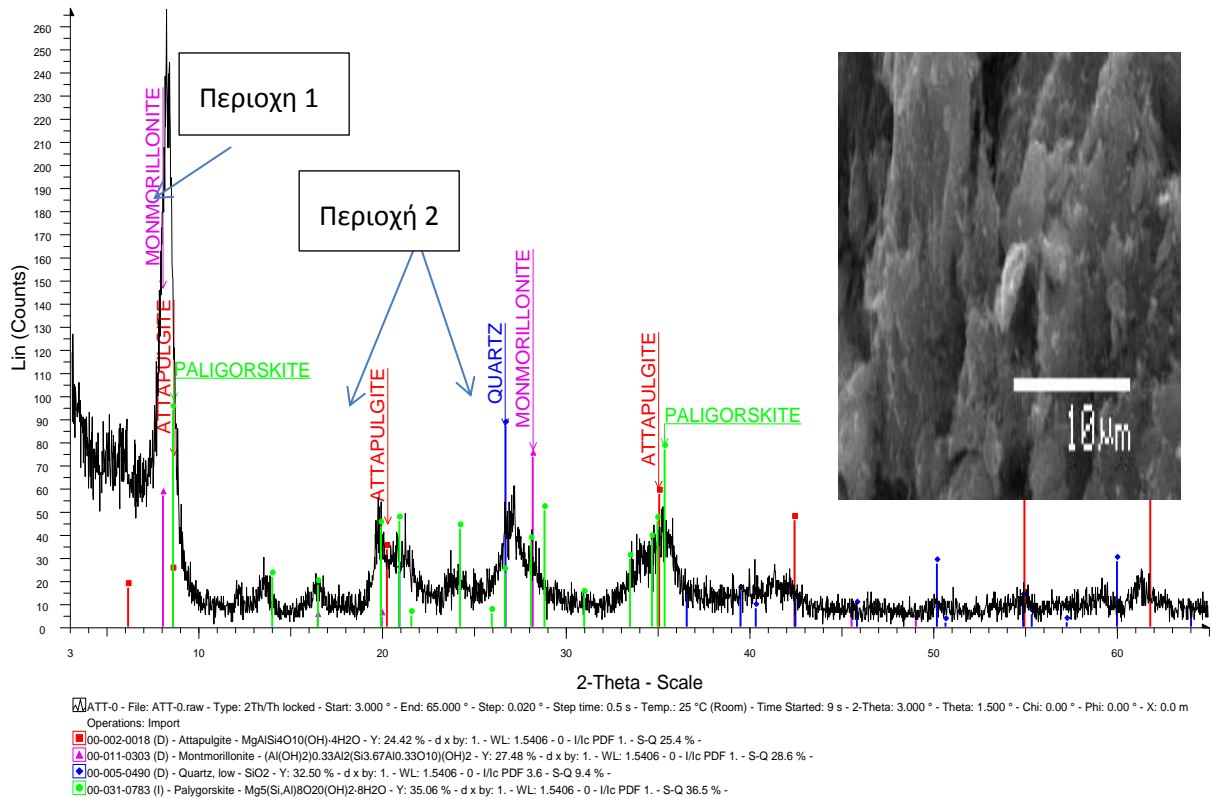
Κεφάλαιο 2

Φυσικές ιδιότητες και ορυκτολογική ανάλυση Ατταπουλγίτη

2.1. Περιγραφή φυσικών ιδιοτήτων και ορυκτολογική ανάλυση

Όπως έχει αναφερθεί οι φυσικές ιδιότητες ουσιαστικά μας ταυτοποιούν το υπό εξέταση γεωϋλικό. Δίνουν όλες αυτές τις πληροφορίες ώστε να αποκτάται εικόνα για την συμπεριφορά του, τον χαρακτηρισμό και φυσικά την κατάταξή του, ενώ δίνουν τις χαρακτηριστικές τιμές, βάσει των οποίων εκτιμώνται βασικές ιδιότητες όπως το πορώδες, η πυκνότητα κλπ. Για τους λόγους αυτούς οι δοκιμές της εδαφομηχανικής σε σχέση με τις φυσικές ιδιότητες, περιορίζονται ουσιαστικά σε μετρήσεις βάρους, όγκου και ποσοστού περιεχόμενου νερού. Έτσι σύμφωνα και με το διαθέσιμο υλικό (Ατταπουλγίτης σε σκόνη-πούδρα), εκτελέστηκαν δοκιμές φυσικής υγρασίας, ορίων Atterberg, κοκκομετρικής ανάλυσης με υδρόμετρο, και ειδικού βάρους κόκκων-ειδικής βαρύτητας. Επίσης πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές συμπίκνωσης (μέθοδος proctor) για να εξαχθούν συμπεράσματα για την μέγιστη πυκνότητα του υλικού, αλλά επίσης γιατί η μέθοδος συμπίκνωσης αυτή θα αποτελέσει την κύρια διαδικασία παρασκευής των δοκιμών για την διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων. Τέλος για να υπάρχει σαφής εικόνας της συμπεριφοράς του υλικού ως προς τις φυσικές του ιδιότητες και ταυτόχρονη συσχέτιση με βιβλιογραφικές αναφορές, πραγματοποιήθηκαν ορυκτοχημικές αναλύσεις (Σχήμα 2.1). Πράγματι από αυτές προκύπτει παρουσία δευτερογενών ορυκτών που συμμετέχουν στο δείγμα (μοντμοριλονίτης και χαλαζίας).

ATT-0



Σχήμα 2.1 Αποτελέσματα ορυκτολογικής και ορυκτοχημικής ανάλυσης Ατταπουλγίτη με αντίστοιχο στιγμιότυπο.

, που άλλοτε το δείγμα με μικρή γωνία πρόσπτωσης (πρώτες ανακλάσεις με μικρή γωνιακή απόσταση), εμφανίζει έντονη ηλεκτρική διέγερση σε συνδυασμό με την μοντμοριλονίτη περιοχή 1 (ελαφροβαρής δομή και συγκόλληση λόγω της έλξης με ορυκτό ουδέτερης διέγερσης) και άλλοτε σε μεγάλη συνδυαστική απόσταση (γωνιακή απόσταση) δίνει χαμηλή ηλεκτρική διέγερση (δημιουργία «βαριδιού» - αδρανή διέγερσης περιοχή) με χαλαζία (περιοχή 2).

Τέλος από την μικροσκοπική οπτική ανάλυση επιβεβαιώνεται η ορυκτοχημική προσέγγιση και ερμηνεία καθώς και η βιβλιογραφία , περί ακανθωτών επιμήκων κυψελωτών ινών ως μορφή του Ατταπουλγίτη.

2.2. Φυσική υγρασία

Μια από τις χαρακτηριστικές ιδιότητες ενός γεωυλικού και για την κατάσταση που βρίσκεται αλλά και για την συμπεριφορά του είναι η περιεχόμενη ποσότητα νερού. Ειδικά στα αργιλικά υλικά παίζει έναν επιπλέον ρόλο εξαιτίας της χημικής σύστασης των αργίλων και την δομή που σχηματίζουν εξαιτίας της επαφής τους με το νερό. Εδώ θα πρέπει να διασαφηνιστεί ο όρος περιεχόμενο νερό. Η αναφορά στην ποσότητα της «φυσικής υγρασίας» αφορά το νερό το οποίο ένα γεωυλικό μπορεί και συγκρατεί ανάμεσα στους κόκκους του- στους πόρους του και με απλή ξήρανση (ακόμα και στον αέρα) μπορεί να αποβληθεί. Δεν αναφερόμαστε στην κρυσταλλική φάση του νερού (ζεολιθικό νερό, νερό συνσχηματισμού κλπ), το οποίο για να αποβληθεί χρειάζεται να τυχθεί το υλικό σε θερμοκρασίες πάνω από 200° C. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι τα αργιλικά ορυκτά διέπονται από ένα μικτό καθεστώς, το οποίο εμπεριέχει νερό και κρυσταλλικής δομής (ζεολιθικό), νερό προσρόφησης (μέσα στους πόρους?) αλλά και νερό ηλεκτροχημικό- ευμετάβλητο, νερό δηλαδή που άλλοτε συμμετέχει στην στερεά φάση και προσπαθεί να γίνει κρυσταλλικό ή άλλοτε να αποτελέσει νερό προσρόφησης. Για τους λόγους αυτούς και σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D 2216-06 αλλά και σύμφωνα με τους Head (1980) και Holtz and Covacs (1981), ο έλεγχος της φυσικής υγρασίας θα πρέπει να γίνεται να γίνεται σε τρία επίπεδα, ξήρανση στο αέρα ή ξήρανση έως 60° C, ξήρανση στους 110 +/- 5o C και ξήρανση στους 180° C όπου η κάθε σχετική μεταβολή δεν πρέπει να ξεπερνά το 1% σε ποσόστωση. Επομένως πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχες δοκιμές σύμφωνα και με τα παραπάνω (πρότυπα ή επισημάνσεις) για εξαχθεί το ποσό της φυσικής υγρασίας.

Για τον προσδιορισμό χρησιμοποιήθηκαν κάψες υέλου και εργαστηριακός φούρνος ρυθμιζόμενης θερμικής δυναμικότητας και αερισμού, ενώ γενικότερα εφαρμόστηκε η εξίσωση (2.1)

$$W = \frac{M_{\kappa+\upsilon\gamma} - M_{\kappa+\xi}}{M_{\kappa+\xi} - M_{\kappa}} \times 100 = \frac{M_{\upsilon\delta}}{M_{\xi}} \times 100 \quad (2.1)$$

Όπου W = ποσοστό υγρασίας, %

$M_{\kappa+\upsilon\gamma}$ = βάρος κάψας και υγρού δείγματος

$M_{\kappa+\xi}$ = βάρος κάψας και ξηρού δείγματος

M_{κ} = βάρος κάψας

$M_{\upsilon\delta}$ = βάρος ύδατος δείγματος

M_{ξ} = βάρος ξηρού δείγματος

Ενώ προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα

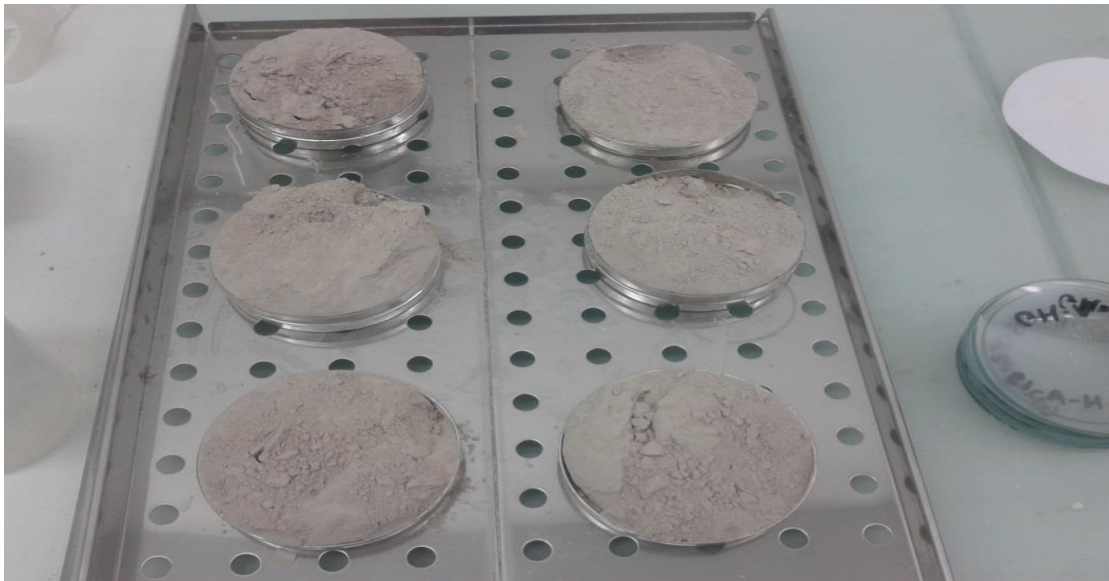
προσδιορισμός φυσικής υγρασίας								
περιγραφή δείγματος: sample4 Αταπουλιγίτης συνθήκες δοκιμής: ξήρανση στους 60° C								
Δοκίμιο	1	2	3	4	5	6	7	8
Υγρασία w %	5,42	6,24	6,07	5,48	6,07	5,76	5,28	5,87

Σχήμα 2.2 αποτελέσματα φυσικής υγρασίας στους 60ο C

προσδιορισμός φυσικής υγρασίας								
περιγραφή δείγματος: sample4 Ατταπουλγίτης συνθήκες δοκιμής: ξήρανση στους 110° C								
Δοκίμιο	1	2	3	4	5	6	7	8
Υγρασία w %	12,78	13,19	12,85	13,55	12,99	13,97		

Σχήμα 2.3 Αποτελέσματα φυσικής υγρασίας στους 110° C

Από τις παραπάνω δοκιμές προκύπτει ότι η μεταβολή από διαφορετικές συνθήκες ξήρανσης δεν υπακούει στο γενικό κανόνα που προαναφέρθηκε πιο πάνω , δηλαδή της διαφοράς του 1% , μιας και στους 60° C (σχήμα 2.2) φαίνεται να έχει κατά μέσο όρο ένα ποσοστό $w=5,77\%$ ενώ αντίστοιχα στους 110° C (σχήμα 2.3) να έχει σχεδόν το τριπλάσιο $w=13,22\%$. Η εξήγηση για αυτή την συμπεριφορά δίνεται στο ότι επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία το ευμετάβλητο νερό που βρίσκεται εγκλωβισμένο ανάμεσα στα φυλλάκια της δομής του Ατταπουλγίτη (κάτι που κάνει το γεωύλικό αυτό ιδιαίτερα υδρόφιλο). Για λόγους πάντα ακρίβειας οι δοκιμές έγιναν και σε καθαρό καολινίτη που επιβεβαίωσαν τον κανόνα που αναφέρθηκε ανωτέρω και ο οποίος δεν ισχύει για τον Ατταπουλγίτη. Το κρινόμενο πάντως βιβλιογραφικά ορθό είναι πως το τελικό ποσοστό υγρασίας είναι αυτό που προσδιορίζεται στους 110° C και αυτό όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι της τάξης του $w=13,22\%$. Οι αντίστοιχες τιμές που δίδονται από τον Haden (1967) είναι για την κολλοειδής μορφή πούδρας Ατταπουλγίτη 10-17% κ.β. νερό ενώ στην φυσική διάσταση τεμαχίων (συσσωματώματα) 3-7% κ.β. νερό.



Σχήμα 2.4 Προετοιμασία δειγμάτων για ξήρανση στο αέρα

2.3. Κοκκομετρική Ανάλυση

Συνήθως στα γεωυλικά ενδιαφέρει για πολλούς λόγους (κατάταξη κυρίως) το μέγεθος των στερεών κόκκων και κατ' επέκταση η ειδική επιφάνεια τους. Η μέτρηση αυτή κυρίως γίνεται μέσω των κοσκίνων και την μέτρηση του κατά βάρους διερχόμενου κλάσματος. Στα αργιλικά υλικά ή γενικότερα τα λεπτόκοκκα υλικά για τον λόγο ότι μας απασχολούν και άλλα στοιχεία, όπως η ενεργότητα δηλαδή το πόσο εύκολα σχηματίζουν στερεές μάζες ικανής ομοιογενούς συμπεριφοράς, προτείνεται κυρίως από τους Bardet (1997) να αποφεύγεται η χρήση κοσκίνων πολύ μικρής οπής (πχ 10 μm) για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής καμπύλης. Αντί αυτού προτείνεται η μέθοδος της πιπέτας (pipette analysis) ή της μεθόδου Stokes – υδρομέτρησης (Hydrometer analysis), η οποία έχει σχεδόν αντικαταστήσει την πρώτη εξαιτίας της της λιγοστής παρέμβασης που εφαρμόζεται στο εξεταζόμενο υλικό. Σε αυτή την μέθοδο γίνεται η απλουστευμένη παραδοχή ότι ο κόκκος αποτελεί σφαιρικό σωματίδιο (που στην πραγματικότητα δεν είναι), έτσι ώστε να εφαρμοστούν κινηματικά κριτήρια και μέσω της ταχύτητας και της μέτρησης της

πυκνότητας του υγρού με κόκκους αναμεμιγμένο, να υιοθετήσει τα λεγόμενα «χρονικά» κόσκινα και να υπολογιστεί η ενεργή διάμετρος των κόκκων (όχι των συσσωματωμάτων αυτός είναι και ο λόγος που προτείνεται από τον Bardet 1997). Γενικότερα ακολουθεί τους νόμους της ταχύτητας των ρευστών και για την συγκεκριμένη μέθοδο απλοποιημένα μέσω της εξίσωσης (2.2)

$$U = \lambda * D^2 \quad (2.2)$$

όπου

[U] η ταχύτητα του σωματιδίου

[D] η μέση ενεργός διάμετρος του μεγέθους των κόκκων

[λ] ένας συντελεστής

ο συντελεστής [λ] προκύπτει από μια πολύπλοκη εξίσωση από όλες τις μεταβλητές που συμμετέχουν στο πείραμα, (πχ ειδικό βάρος, χρόνος, ιξώδες, θερμοκρασία μήκος σωλήνα και πολλά άλλα)

Στην πράξη η σχέση εκτίμησης της διαμέτρου των κόκκων προκύπτει από την εξίσωση (2.3)

$$D = \sqrt{\frac{30nL}{980(Gs-1)t}} \quad (2.3)$$

όπου

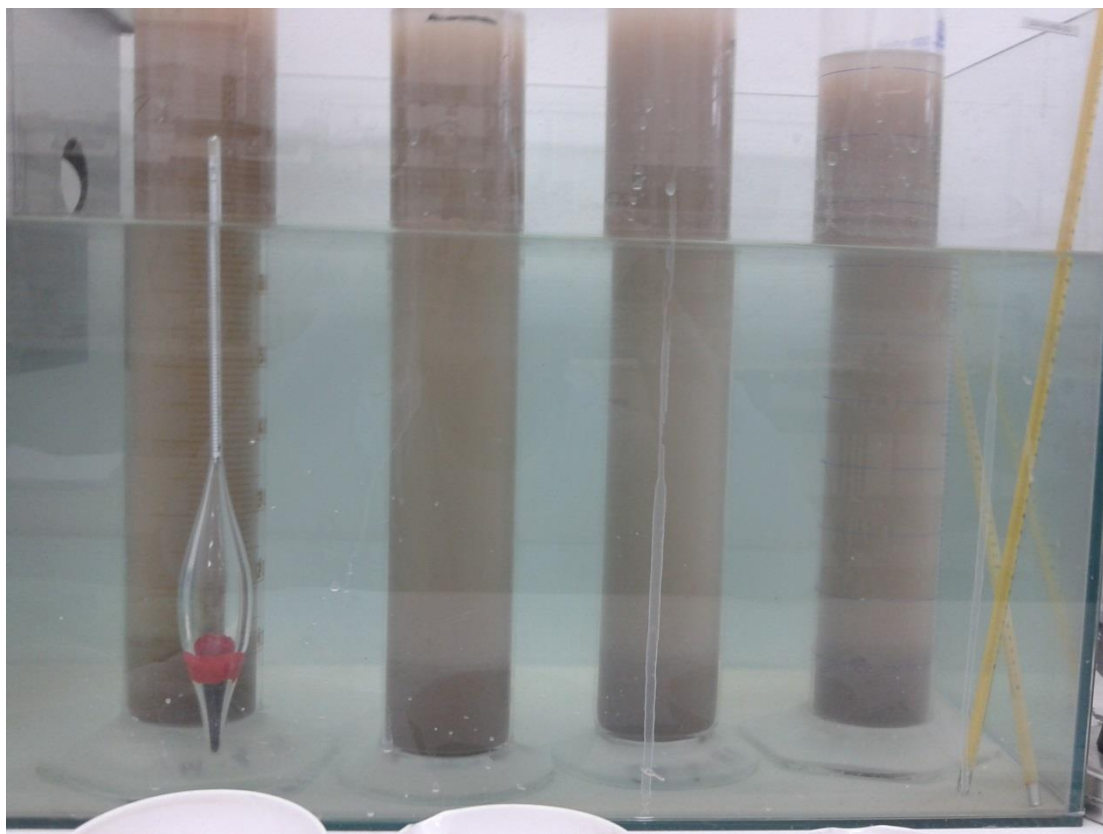
[n] το κινηματικό ιξώδες

[L] το μήκος διαδρομής των κόκκων μέσα στον δοκιμαστικό σωλήνα

[Gs] το ειδικό βάρος στερεών συστατικών υπό άνωση

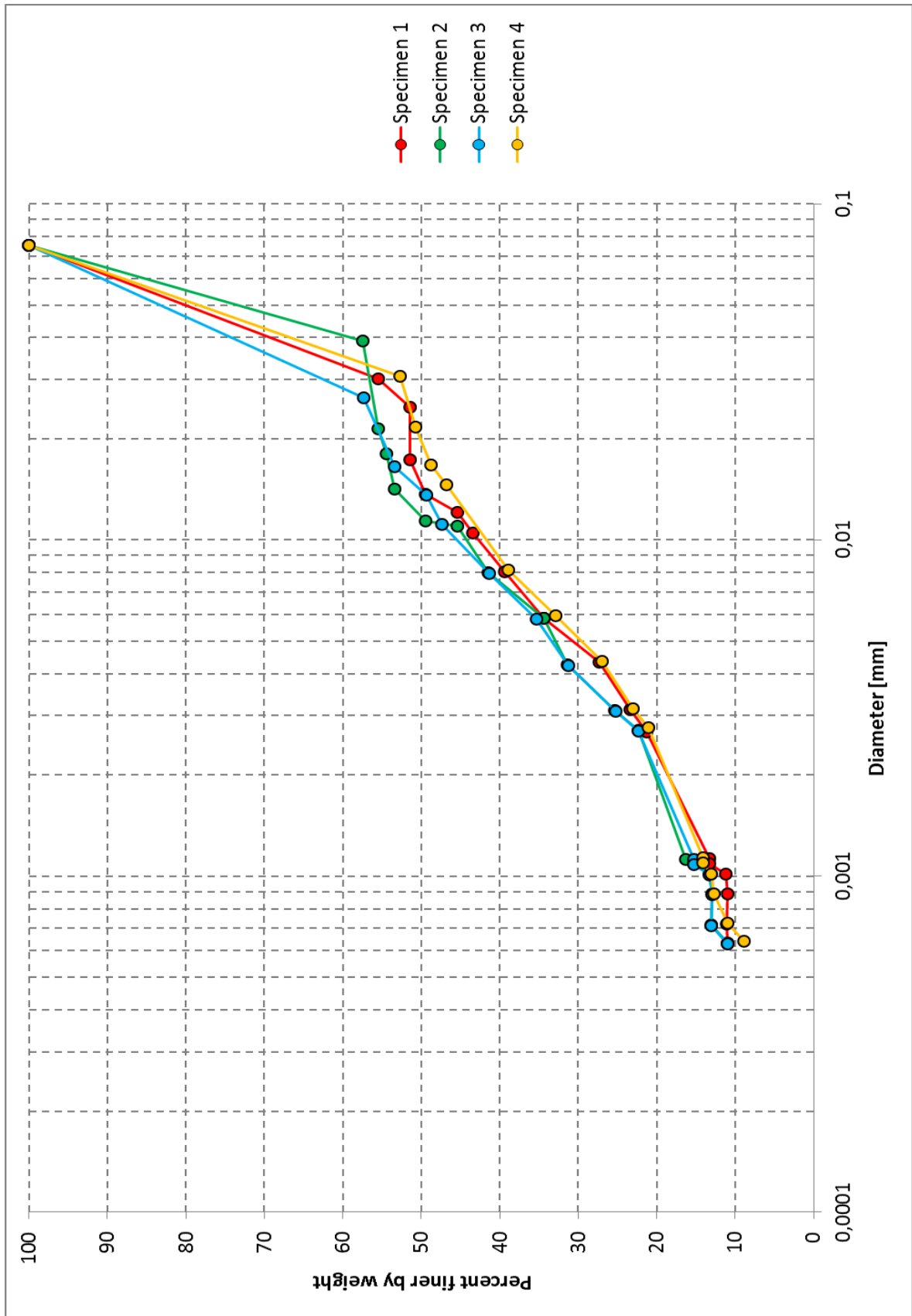
[t] ο απόλυτος χρόνος δοκιμής

Ο εργαστηριακός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν λουτρό θερμικής ισορροπίας, στο οποίο τοποθετούνταν οι ογκομετρικές στήλες (ογκομετρικοί σωλήνες), και περιείχαν το υπό εξέταση υλικό. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν θερμόμετρα και πικνόμετρα για την καταγραφή των απαραίτητων στοιχείων διόρθωσης και προσδιορισμού της ενεργής διαμέτρου, βοηθητικά εργαλεία (αναδευτήρας, δοχεία ζέσεως) καθώς και διάλυμα διασποράς εξαμεταφωσφωρικού Νατρίου ($\text{Na}_2\text{PO}_3\chi$) 30% κατά βάρος.



Σχήμα 2.5 Εκτέλεση και εξέλιξη πειραμάτων υδρομέτρησης σε Ατταπουλιγίτη

Από την εκτέλεση των δοκιμών (σχήμα 2.5) και την καταγραφή των μετρήσεων, οι οποίες έγιναν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM-422-72R2002 προέκυψαν οι κοκκομετρικές καμπύλες του σχήματος 2.6



Σχήμα 2.6 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κοκκομετρικών αναλύσεων δειγμάτων Ατταπουλίτη

Από τα αποτελέσματα των κοκκομετρικών καμπυλών προκύπτει μικρή διασπορά στις κοκκομετρίες του υλικού η οποία επιτρέπει τον ορισμό μιας μέσης κοκκομετρικής καμπύλης του Ατταπουλγίτη όπως προκύπτει στον παρακάτω πίνακα (σχήμα 2.7). Η εικόνα αυτή από άποψη μεγέθους μας δίνει την εικόνα μιας μικτής κατάστασης, δηλαδή μιας αργιλικής Ιλύος – ιλυώδους Αργίλου, η οποία οφείλεται κυρίως στα συσσωματώματα των αργιλικών ορυκτών τα οποία έχουν σχηματίσει «κυψελωτούς σφαιρικούς κόκκους» (σύμφωνα και με την παραδοχή της μεθόδου υδρομέτρησης) μεγέθους Ιλύος. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα θα επιβεβαιωθεί και από άλλες προσεγγίσεις, παρακάτω.

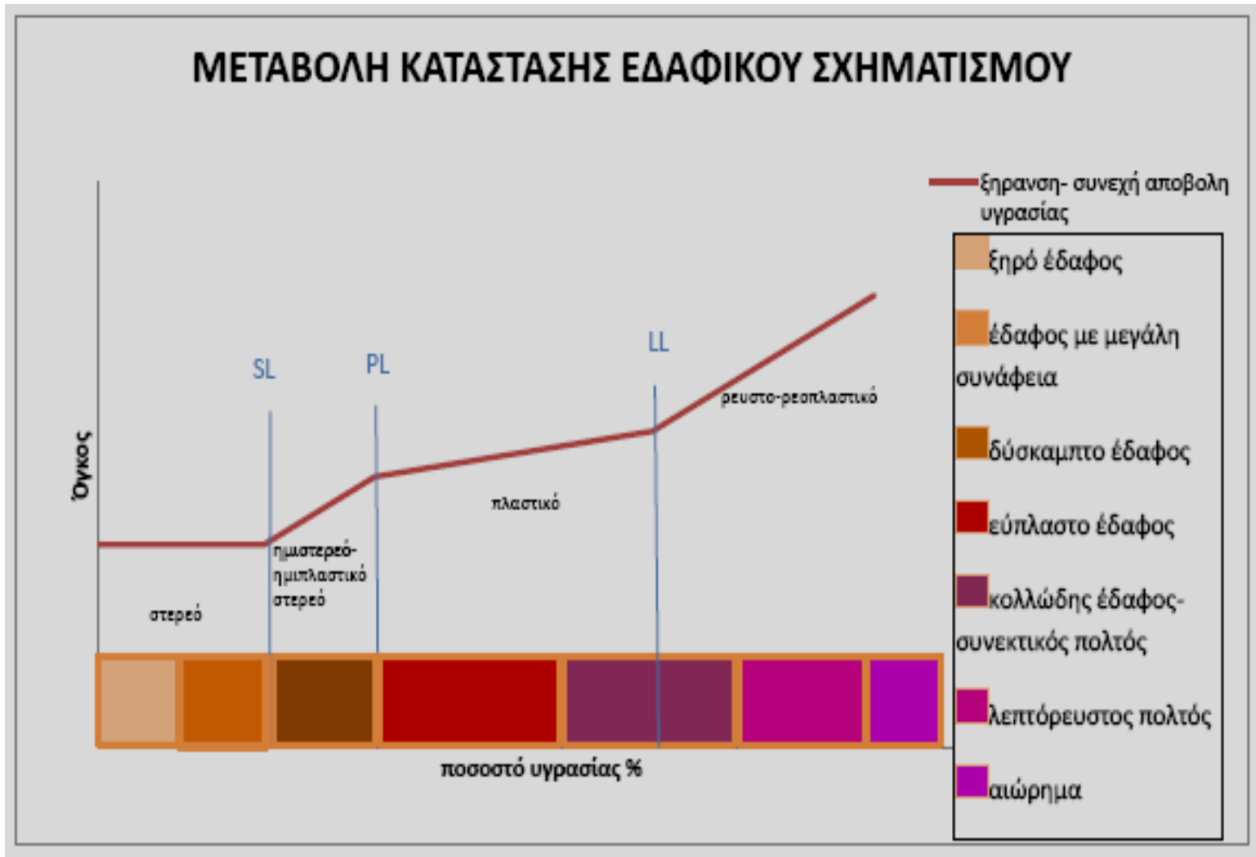
μέγεθος κόκκων	ποσοστό
[mm]	[%]
>0,075	100
0,03	44,1
0,02	4,1
0,01	4,1
0,005	16,2
0,003	12,2
0,0015	10,2
0,001>	9

Σχήμα 2. 7

Μέση κοκκομετρική
καμπύλη δειγμάτων
Ατταπουλγίτη

2.4. Όρια Atterberg

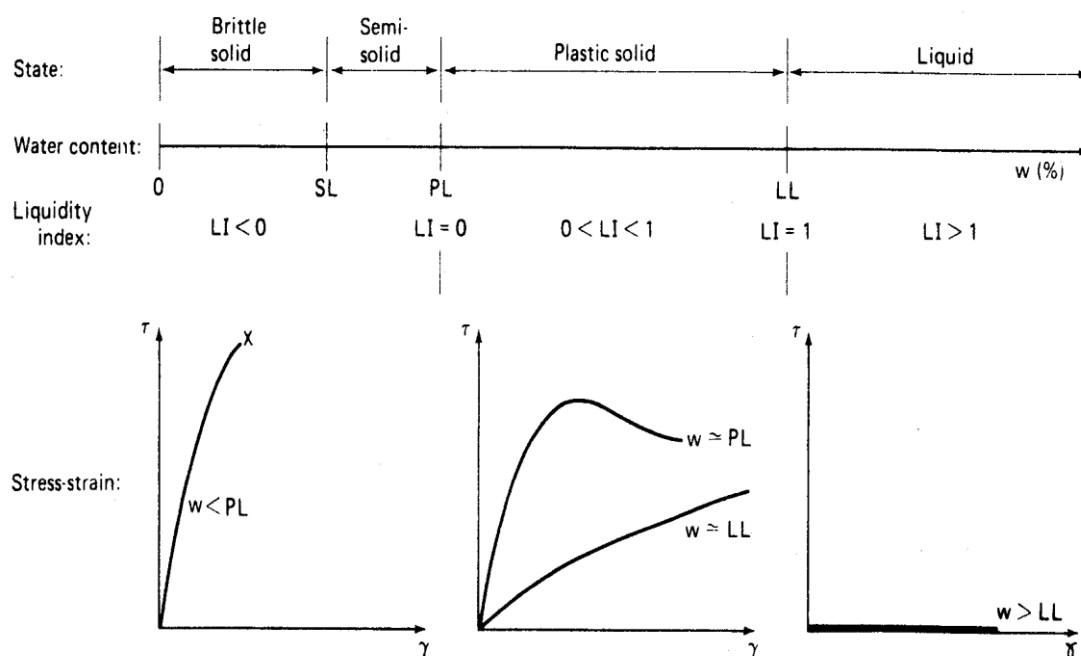
Βασικό στοιχείο για την ταυτοποίηση των γεωυλικών , αποτελεί ο προσδιορισμός των ορίων Atterberg. Αυτά αποτελούνται από τα αντίστοιχα όρια υδαρότητας (w_L ή LL), πλαστιμότητας-πλαστικότητας (w_P ή PL) και συρρίκνωσης (w_S ή SL). Επίσης μέσω αυτών των ορίων προκύπτουν οι αντίστοιχοι δείκτες όπως είναι δείκτης πλαστιμότητας (PI ή I_P), ο δείκτης υδαρότητας (LI ή I_L) και ο δείκτης συρρίκνωσης (SI ή I_S), οι οποίοι χαρακτηρίζουν και κατηγοριοποιούν ένα υλικό. Τα όρια Atterberg προσδιορίζουν επίσης και την εν γένει συμπεριφορά του όπως για παράδειγμα την ενεργότητα του (A), δηλαδή την ιδιότητα του να σχηματίζει μεγάλες μάζες με ομοιογενή συμπεριφορά (δηλαδή το πόσο εύκολα σχηματίζει πρακτικά μεγάλους κόκκους που να εμφανίζουν ενιαία συμπεριφορά παρότι αποτελείται από συνονθύλευμα μικρότερων κόκκων). Ουσιαστικά με τον προσδιορισμό των συγκεκριμένων ορίων , αποκτάται μια πρώτη εκτίμηση για τα μηχανικά του χαρακτηριστικά και τις σχετικές αντοχές του. Αυτό οφείλεται στο ότι ένα γεωυλικό και μάλιστα λεπτόκοκκο, αν είναι και αργιλικό (λόγω σύστασης) συμπεριφέρεται διαφορετικά κάτω από διαφορετικές ποσότητες νερού. Έτσι ένα γεωυλικό μπορεί να συμπεριφέρεται άλλοτε σαν ένα παχύρρευστο νευτώνειο υγρό και άλλοτε σαν στερεό σώμα, και αυτή η ευμετάβλητη συμπεριφορά που αποδίδεται στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 2.8) προσδιορίζονται με βάση τα όρια Atterberg.



Σχήμα 2. 8 Μεταβολή κατάστασης λεπτόκοκκου εδαφικού σχηματισμού

Συγκεκριμένα, το όριο υδαρότητας βοηθά στον εντοπισμό, της υγρασίας που μπορεί να έχει ένα έδαφος, ώστε να συνεχίζει να διατηρεί τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες (τριβή, ρεοπλαστικότητα κλπ) πριν μεταπέσει ουσιαστικά σε κατάσταση ρευστού. Από εκεί προκύπτει και ο δείκτης υδαρότητας που στην συνέχεια μας βοηθά στον προσδιορισμό του δείκτη πλαστικότητας. Το όριο υδαρότητας προσδιορίζεται με την μέθοδο των τριών ή του ενός σημείου. Η μέθοδος του ενός σημείου δεν συνιστάται για τον προσδιορισμό των ορίων Atterberg σε οργανικά εδάφη ή θαλάσσια εδαφικά δείγματα (ASTM D 4318-83/2002). Αντίστοιχα το όριο πλαστικότητας δίνει το όριο της υγρασίας που συνεχίζει να έχει αυτές τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες πριν μεταπέσει σε τελείως ή σχεδόν στερεά κατάσταση. Η διαφορά των δυο αυτών ορίων μας δίνει τον δείκτη πλαστικότητας, που εν γένει χαρακτηρίζει και κατατάσσει το υλικό. Τέλος, το όριο συρρίκνωσης είναι αυτό που διαχωρίζει το γεωυλικό από την ευμετάβλητη συμπεριφορά σε μια πιο στιβαρή

(stiffness) μορφή. Στο παρακάτω σχήμα (2.9) δίνεται μια συσχέτιση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός αργιλικού γεωυλικού σε σχέση με τις μεταβολές της περιεχόμενης ποσότητας νερού και των αντίστοιχων ορίων.



Σχήμα 2.9 Συσχέτιση ορίων Atterberg και αντοχής (Holtz and Covacs1981)

Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι στην πλαστική περιοχή ($w=PL$) το υλικό συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά, αντίστοιχα ως μια πυκνή(dense) διάταξη κόκκων άμμου, ενώ στην υδαρή ($w=LL$) σαν μια χαλαρή (loose) διάταξη κόκκων άμμου.

Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημανθεί ότι τα όρια αυτά εκτιμώνται με εμπειρικές μεθόδους που μπορούν να έχουν αποκλίσεις (λόγω χρήστη, εργαστηριακών συνθηκών κλπ), ως προς το τελικό αποτέλεσμα του προσδιοριζόμενου ποσοστού υγρασίας λόγω της εκτέλεσης τους. Παρόλα αυτά χρησιμοποιώντας τυποποιημένα πρότυπα και μεθόδους ώστε οι αποκλίσεις αυτές γίνονται ανεκτές.

2.4.1. Όριο υδαρότητας

Για το προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Casagrande, όπως φαίνεται στην φωτογραφία (σχήμα 2.10). Σε αυτή την συσκευή τοποθετείται το υλικό με επάλειψη και συμπίεση, κατόπιν ανοίγεται αυλάκι με ειδικό εργαλείο χάραξης που συνοδεύει την συσκευή, και στην συνέχεια με το μοχλό εφαρμόζονται και μετρώνται κρούσεις-χτύποι που έχουν ως αποτέλεσμα να κλείσει το χάσμα σε επαφή τουλάχιστον 12,7 mm. Όταν συμβεί αυτό αφαιρείτε το υλικό και με τις διαδικασίες που ακολουθήθηκαν στον προσδιορισμό της υγρασίας προσδιορίζεται το ποσοστό της υγρασίας. Γνωρίζοντας το ποσοστό της υγρασίας και τους χτύπους υπολογίζεται το όριο υδαρότητας από την σχέση (2.4):

$$LL^N = W^N \cdot \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121} \quad (2.4)$$

Όπου

LL^N = όριο υδαρότητας, %

W^N = υγρασία δείγματος, %

N = αριθμός χτύπων, ακέραιος αριθμός

Επίσης η δοκιμή μπορεί και πρέπει να επαναληφθεί για διαφορετικές υγρασίες που οδηγούν σε διαφορετικό αριθμό χτύπων κλεισίματος του χάσματος. Στην συνέχεια οι τιμές αυτές προβάλλονται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα, οπότε προκύπτει μια συσχέτιση υγρασίας και αριθμών χτύπων. Από την προβολή της ευθείας στους 25 χτύπους με την αντίστοιχη τετμημένη προσδιορίζεται η υγρασία

που αντιστοιχεί στο όριο υδαρότητας. Πρακτικά είτε με την σχέση (2.4) είτε με την χρήση πολλαπλών δοκιμών η απόκλιση δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 0,5-1% (ASTM D 4318-83/2002).



Σχήμα 2. 10 Διαδικασία εκτίμησης ορίου υδαρότητας με χρήση συσκευής Casagrande

2.4.2. Όριο πλαστικότητας-πλαστιμότητας.

Για τον προσδιορισμό του ορίου πλαστικότητας-πλαστιμότητας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που περιγράφει το πρότυπο ASTM D 4318-83/2002 (όπως και το όριο υδαρότητας που αναφέρθηκε πιο πάνω), στηρίζεται στο πόσο εύκολα πλάθεται το υλικό σε κυλίνδρους 10 cm μήκους και διαμέτρου 0,2- 0,3 mm χωρίς να σπάσει ή να εμφανίζει μικρορωγμές.

Έτσι, ως όριο πλασιμότητας ορίζεται το ποσοστό υγρασίας του κυλίνδρου υλικού των προαναφερθέντων διαστάσεων. Για τον προσδιορισμό του ορίου χρησιμοποιήθηκε ειδική πλάκα στιλβωμένης υέλου (σχήμα 2.11), ενώ το ποσοστό υγρασίας του κυλίνδρου όπου θα εξαχθεί το όριο πλαστικότητας-πλασιμότητας ακολουθεί την διαδικασία προσδιορισμού του ποσοστού υγρασίας που προαναφέρθηκε πιο πριν.



Σχήμα 2. 11 Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας-πλασιμότητας

2.4.3. Όριο συρρίκνωσης

Για την εκτίμηση του ορίου συρρίκνωσης γίνεται η παραδοχή ότι ουσιαστικά η τιμή μιας αξονικής συρρίκνωσης αντιπροσωπεύει και την πραγματική εξ και ονομάζεται και ως γραμμική συρρίκνωση. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού με ειδικές συσκευές (πχ μεταβολής του όγκου υδραργύρου) ή έμμεσης εκτίμησης μέσω της διόγκωσης που προκύπτει από τη συμπιεστότητα του υλικού στην συσκευή οιδημέτρου. Όμως επειδή η συσκευή οιδημέτρου δεν διατηρεί το υλικό σε

ελεύθερη κατάσταση, δηλαδή επιβάλλονται δυνάμεις σε αυτό ή οι συνοριακές συνθήκες που αναπτύσσονται δεν απόλυτα προσδιορίσιμες, για το λόγω αυτό έχει γίνει αποδεκτό το όριο της γραμμικής συρρίκνωσης. Αυτό προσδιορίζεται μέσω μιας πρότυπης ημικυλινδρικής επιμήκους μήτρας στην οποία διαστρώνεται το υλικό και εν συνεχεία μετρώντας σε τρεις διαδοχικές φάσεις ξήρανσης (αέρας, 60° C, 110° C) την μεταβολή του μήκους προκύπτει το αντίστοιχο όριο. Ουσιαστικά εκτιμάται από την ακόλουθη εξίσωση (2.5):

$$SL = \left(1 - \frac{L_{av}}{L_o}\right) * 100\% \quad (2.5)$$

όπου

SL = όριο συρρίκνωσης

L_{av} = μέσος όρος μηκών των τριών σταδίων συρρίκνωσης ή ξήρανσης

L_o = αρχικό μήκος

Το όριο συρρίκνωσης προκύπτει ουσιαστικά ως ο μέσος όρος της υγρασίας που έχει μετρήθηκε η μεταβολή του μήκους του δοκιμίου τις αντίστοιχες φάσεις ξήρανσης. Για την δοκιμή χρησιμοποιήθηκε η πρότυπη μήτρα, ενώ η εκτέλεση της πειραματικής εργασίας έγινε σύμφωνα το πρότυπο BS 1377 και τις βιβλιογραφικές αναφορές των Bardet (1997), Κούκης και Σαμπατακάκης (2002).

Από την εκτέλεση των πιο πάνω περιγραφόμενων διαδικασιών προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα σχετικά με τα όρια Atterberg, που συνοψίζονται στον πίνακα (σχήμα 2.12) .

	PL[%]	LL[%]		SL[%]
A/A		solution	3 step	
1	110,73	145,14	166,60	14,60
2	108,35	156,51	155,06	14,13
3	113,40	165,52	143,79	13,37
4	110,83	154,97	161,26	14,97
5	111,79	159,67	149,53	14,44
6	111,73	156,49	157,27	14,94
7	110,73	150,30	159,88	14,41
8	110,73	157,73	151,97	14
9	110,08	158,18	152,40	14,4
10	114,29	158,18	150,37	14,3
11	109,38	154,26	150,15	
12	116,25	149,74	160,77	
13	110,15	151,94	158,26	
14	112,51	156,65	156,65	
15	111,67	160	137,16	
16	109,37	149,03	149,03	
17	110,15	142,70	149,63	
18	109,76	153,38	144,19	
19	110,25			
average		153,36	153,81	
average	110,166	153,50		14,36

Σχήμα 2.12 Σύνοψη μετρήσεων ορίων Atterberg σε δοκίμια Ατταπουλίτη

Με βάση λοιπόν τις επεξεργασμένες στατιστικά τιμές καταλήγουμε ότι το όριο πλαστιμότητας είναι στο **PL=110,17%**, όριο υδαρότητας είναι **LL= 153,50%** και το όριο συρρίκνωσης είναι **SL=14,36%**. Από αυτές τις τιμές προκύπτει ο δείκτης

πλαστιμότητας $I_p = LL - PL = 45,93\%$. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο δείκτης υδαρότητας I_L που προκύπτει από την **σχέση** $I_L = (w - PL) / (LL - PL)$, που βγαίνει αρνητικός αν χρησιμοποιηθεί η σχέση για φυσική υγρασία **13,22%** όπως εκτιμήθηκε προηγουμένως. Κάτι τέτοιο είναι **αποδεκτό** [Κούκης και Σαμπατακάκης (2002)], και οφείλεται στην κυψελοειδή δομή του αργιλικού υλικού όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή. Έτσι θα χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη υγρασία w_e η οποία υπολογίζεται από την σχέση **$W_e = (W_n / P) * 100$** . Όπου **W_e** η ισοδύναμη υγρασία, W_n τα τυπικά ποσοστά υγρασίας γεωϋλικών που προκύπτει μέσω πίνακα τυπικών τιμών υγρασίας (επιλέχθηκε η τιμή $w_n = 50\%$), και **P** το **διερχόμενο ποσοστό των 425 μm** που προκύπτει από την κοκκομετρική ανάλυση (**ίσο με 26%**) (Barnes 2000). Επομένως η ισοδύναμη υγρασία με τους συντηρητικούς υπολογισμούς που έγιναν προσδιορίζεται στο **$w_e = 192, 30\%$** , γεγονός που εξηγεί και το γιατί ότι ο Ατταπουλγίτης μπορεί και συγκρατεί **4-5 φορές** τουλάχιστον το βάρος του σε νερό, όπως αναφέρθηκε στο 1^ο Κεφάλαιο. Με βάση λοιπόν την ισοδύναμη υγρασία και τις τιμές των ορίων ο δείκτης υδαρότητας είναι **$I_L = 1,79$** , αντίστοιχα ο δείκτης συνεκτικότητας **$I_c = (LL - w) / (LL - PL) = 3,39$** , ενώ η ενεργότητα του **$A_r = I_p / \Sigma_{(<0,002)}$** , όπου Σ (το άθροισμα του αργιλικού κλάσματος κάτω από 0,002 mm) προκύπτει ότι είναι **$A_r = 2,36$** .

Από τις μετρήσεις που έγιναν και όλη την εν γένει διερεύνηση των ορίων Atterberg μας δίνεται η εικόνα για ένα αργιλικό υλικό πολύ ευμετάβλητης συμπεριφοράς, που προσιδιάζει συμπεριφορά υγρού (παρεμπιπτόντως οι ίδιες προσροφητικές και ευμετάβλητες καταστάσεις εμφανίζονται και με κοινό μηχανικό λάδι). Στην συνέχεια δίνεται ένας πίνακας (σχήμα 2.13) βάσει της βιβλιογραφίας (Mitchell, 1976, Holtz & Kovacs 1981, Ola 1982) και τις αντίστοιχες τιμές που προσδιορίστηκαν εδώ.

Όρια	βιβλιογραφία	πειράματα
PL [%]	110-120	110,17
LL [%]	160-230	153,5
SL [%]	18-24	14,36

Σχήμα 2.13 Σύγκριση ορίων Atterberg από τα πειράματα σε Ατταπουλγίτη με την βιβλιογραφία

Αντίστοιχα με βάση το προσδιορισμό που γίνεται από τους αντίστοιχους δείκτες προέκυψε ο επόμενος πίνακας (σχήμα 2.14) σύμφωνα και με τους αντίστοιχους πίνακες κατάταξης των γεωυλικών.

δείκτες	τιμή	χαρακτηρισμός
I _p	45,93	εξαιρετικά υψηλής πλαστικότητας
I _L	1,79	συμπεριφορά παχύρευστου υγρού
I _c	3,39	αρκετά σκληρό
A _r	2,37	ενεργό γεωυλικό

Σχήμα 2.14 Χαρακτηρισμός Ατταπουλγίτη με βάση μετρηθέντες δείκτες χαρακτηρισμού γεωυλικών

Με βάση αυτό τον πίνακα (σχήμα 2.14) δικαιολογείται ακόμη παραπάνω η προσδιορισθείσα ευμετάβλητη συμπεριφορά του γεωυλικού (συμπεριφορά παχύρρευστου υγρού έως στερεό). Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ότι ενώ τα όρια πλαστιμότητας και υδαρότητας δεν απέχουν κατά πολύ από τις τυπικές τιμές της βιβλιογραφίας, εντύπωση δημιουργεί το όριο συρρίκνωσης καθώς και η ενεργότητα του, όπου έχουν τιμές σημαντικά διαφορετικές (κατά δυο φορές περίπου), γεγονός που ισχυροποιεί το ευμετάβλητο της γενικότερης συμπεριφοράς του Απαπουλγίτη.

2.5. Ειδική βαρύτητα στερεών-Gs

Εδώ εκτιμάται η ειδική βαρύτητα στερεών (Gs), η οποία πέρα από την συμμετοχή στην εκτίμηση του φαινόμενου ειδικού βάρους, αποτελεί και χαρακτηριστική τιμή που στοχεύει στην ταυτοποίηση του υλικού. Ως μέγεθος είναι άμεσα εξαρτημένο και από την ορυκτολογική σύσταση. Πρόκειται για το λόγο της πυκνότητας του κόκκου προς την πυκνότητα του υγρού. Για να προσδιοριστεί λοιπόν αυτό το μέγεθος, προσδιορίζεται το βάρος συγκεκριμένου όγκου του κόκκου προς στο αντίστοιχο βάρος του όγκου του νερού. Συγκεκριμένα αναζητείται το βάρος εκείνο, το οποίο είναι απαλλαγμένο από οποιοδήποτε διαφορετικό στοιχείο, πλην των δομικών στοιχείων που συντελεί την ορυκτολογική μάζα του κόκκου και πάντα μέσα σε υγρό. Επομένως δεν πρέπει κατά την μέτρηση του βάρους αυτού του κόκκου να υπάρχει ούτε ατμοσφαιρικός αέρας. Για να συμβεί αυτό, πέρα του ότι ο κόκκος μπαίνει σε ειδικό δοχείο συγκεκριμένου όγκου (αλλιώς δεν θα μιλάγαμε και για ειδική πυκνότητα), ουσιαστικά ζητούμενο είναι η αποβολή του αέρα και πιθανόν η σχετική συγκόλληση των συσσωματωμάτων των κόκκων που έχουμε κυρίως στα αργιλικά πλακίδια. Η λογική λοιπόν είναι ότι για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να θερμανθεί ο

κόκκος. Ταυτόχρονα όμως η θέρμανση δεν επιφέρει πάντα απαερισμό, για αυτό η δοκιμή γίνεται με την παρουσία ενός ρευστού που συνήθως, όταν θερμανθεί σε ένα κλειστό σχετικά σύστημα όπως ο πόρος των κόκκων μπορεί να εισχωρήσει και να το αντικαταστήσει με ταυτόχρονη αποβολή του αέρα. Το ρευστό αυτό είναι ο υδράργυρος ή συνηθέστερα λόγω ευκολίας και ασφάλειας το απαερωμένο και αποσταγμένο νερό. Τοποθετώντας το δείγμα μέσα στο συγκεκριμένου όγκου δοχείο (λήκυθο) προστίθεται νερό έως ότου το δοκίμιο μας, έρθει στην φάση του κορεσμού. Αυτό όμως δεν συμβαίνει απόλυτα μιας και οι ατμοσφαιρικοί παράγοντες (πίεση 1Atm) δεν επιτρέπουν την 100% πλήρωση των κενών και την αποβολή του αέρα από τον κόκκο. Εκεί έρχεται η θέρμανση όπου το νερό, με την μορφή ατμού βρίσκεται σε τάση, το αποσταγμένο νερό σε μορφή ατμών έλκει τον αέρα των κενών, και όλα μαζί αποβάλλονται από τον πόρο του κόκκου και ταυτόχρονα λόγω αυτής της πίεσης και της θερμοκρασίας που παρέχονται, διασπώνται από την συγκόλληση και τα πιθανά συσσωματώματα. Τελικώς λοιπόν θα προκύπτουν βάρη (βάρος απαερωμένου νερού, ορυκτών κόκκων, και ληκύθου) χωρίς καμία αλληλεξάρτηση και σε συγκεκριμένο όγκο. Κάνοντας τις απαραίτητες επί μέρους μετρήσεις (βάρος νερού+ ληκύθου, βάρος ληκύθου κλπ) προκύπτουν οι καθαρές μάζες του συγκεκριμένου όγκου. Πρέπει να τονιστεί ότι η περίπτωση της αποβολής του αέρα δεν ενδιαφέρει μόνο για να μπορεί να μετρηθούν συγκεκριμένες πυκνότητες, αλλά γιατί όταν ο κόκκος βρίσκεται μέσα σε κορεσμό με την συμμετοχή αέρα βρίσκεται δηλαδή σε υπό άνωση καταστάσεις. Τέλος, καθώς η ειδική βαρύτητα (Gs) προσδιορίζεται ως λόγος πυκνοτήτων, εξ ου και αδιάστατο μέγεθος, αποτελεί τιμή αναφοράς για κάθε γεωυλικό.

Η συγκεκριμένη λοιπόν μεθοδολογία, για να εφαρμοστεί ακολουθεί διάφορες τεχνικές πέρα της θέρμανσης, όπως η εφαρμογή κενού, σύμφωνα με την βιβλιογραφία από τους Bardet (1997) και Head (1984) , οι οποίοι προσανατολίζονται στα Βρετανικά Πρότυπα BS, ή την τμηματική θέρμανση με χρήση ανάδευσης όπως

στα πρότυπα που είναι γενικότερα αποδεκτά όπως το ASTM D 854-83/2004 ή D 5550 που εφαρμόστηκε εδώ. Στην παρούσα εργασία για λόγους που προβληματίσαν σε διάφορα στάδια κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, εφαρμόστηκαν όλες οι τεχνικές που περιγράφονται καθώς και συνδυασμός τους, αλλά σε κάθε περίπτωση οι υπολογισμοί γίνονται βάσει των παρακάτω σχέσεων:

$$M_{pw,t} = M_p + (V_p \cdot \rho_{w,t}) \quad (2.6)$$

όπου

$M_{pw,t}$ = μάζα πυκνόμετρου και ύδατος στην θερμοκρασία της δοκιμής

M_p = βαθμονομημένη μάζα του πυκνόμετρου, g

V_p = βαθμονομημένος όγκος πυκνόμετρου, ml

$\rho_{w,t}$ = πυκνότητα νερού στην θερμοκρασία της δοκιμής, g/ml

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{M_{\rho w,t} - (M_{\rho w,t} - M_s)} \quad (2.7)$$

όπου

ρ_s = πυκνότητα στερεού δείγματος g/cm³

$\rho_{w,t}$ = πυκνότητα ύδατος στην θερμοκρασία δοκιμής, g/ml ή g/cm³

M_s = μάζα ξηρού δείγματος, gr

$M_{\rho w,t}$ = μάζα πυκνόμετρου, ύδατος και δείγματος στην θερμοκρασία δοκιμής, gr

Το ειδικό βάρος του δείγματος στους 20 °C δίνεται από την σχέση:

$$G_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = K \cdot G_t \quad (2.8\alpha)$$

όπου ο συντελεστής K είναι ίσος με

$$K = \frac{\text{πυκνότητα νερού σε θερμοκρασία } T}{\text{πυκνότητα νερού στους } 20\text{ }^{\circ}\text{C}}. \quad (2.8\beta)$$

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η δοκιμή απαιτεί βαθμονομημένα πυκνόμετρα, ληκύθους, θερμόμετρα και κλίβανο, καθώς και συνεχή παρατήρηση των συνθηκών του χώρου εκτέλεσης των δοκιμών.

Με βάσει τα παραπάνω εκτελέστηκαν δοκιμές με διάφορες τεχνικές και συνδυασμούς τους αλλά και με πυκνόμετρα από μικρής ευαισθησίας 25ml έως μεγάλης όπως 100, 200, 250, 500, ml που συνήθως χρησιμοποιούνται.

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται οι τελικές τιμές G_s, όπου αναφέρεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε: 1 με αερισμό (σχήμα 2.15) , 2 με βρασμό (σχήμα 2.16) και ανάδευση, 3 συνδυασμός (σχήμα 2.17) , ενώ τα a,b, c κ.ο.κ αναφέρεται σε διαφορετικά εβδομαδιαία σετ εκτέλεσης δοκιμών.

	method 1					
	Flask	Flask	Flask	Flask	Flask	Flask
a	2,630	2,560	2,570	2,430	2,320	
b				2,851	2,487	2,545
c	2,628	2,549	2,559	2,426	2,313	
d		2,560	2,570			
e		2,549	2,559			

Σχήμα 2.15 Πίνακας μετρήσεων Gs Ατταπουλγίτη με απαέρωση

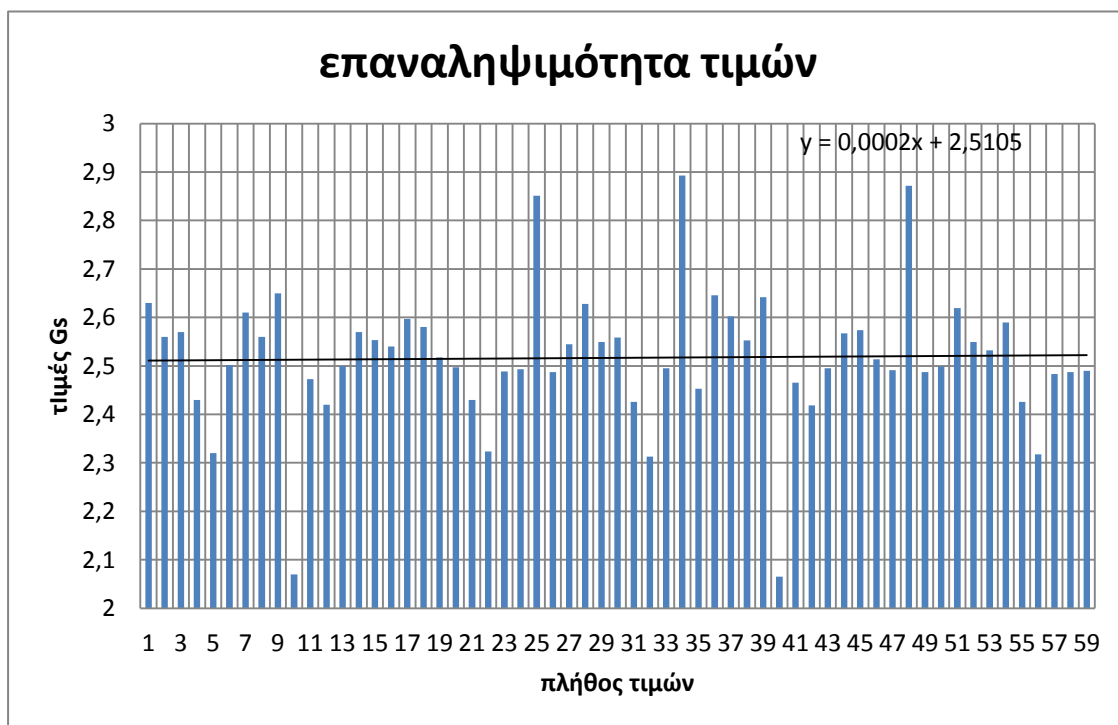
	method 2					
	Flask	Flask	Flask	Flask	Flask	Flask
a	2,610	2,560	2,650		2,070	
b				2,893		2,453
c	2,602	2,553	2,642		2,065	
d		2,560				
e		2,553				

Σχήμα 2.16 Πίνακας μετρήσεων Gs Ατταπουλγίτη με βρασμό και ανάδευση

	method 3					
	Flask	Flask	Flask	Flask	Flask	Flask
a	2,420	2,500	2,570		2,580	
b	2,419	2,495	2,567		2,574	
c						
d		2,500	2,570			
e			2,567		2,574	

Σχήμα 2.17 Πίνακας μετρήσεων Gs Ατταπουλγίτη με απαέρωση βρασμό και ανάδευση

Από τα αποτελέσματα προκύπτει μεγάλη ανομοιομορφία των τιμών (ήταν η αιτία να αποφασισθεί ο συνδυασμός των μεθόδων). Σε κάθε περίπτωση η στατιστική εξεργασία του πλήθους τιμών μας έδινε μια τιμή Gs= 2,510 όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα (σχήμα 2.18)



Σχήμα 2.18 Εύρος τιμών και μέσης τιμής Gs Ατταπουλγίτη

Η διασπορά αυτή οδηγεί σε προβληματισμό, κυρίως και λόγω σύγκρισης με την βιβλιογραφία καθώς οι Bardet (1997), Holtz&Konacs (1981) δίνουν τιμή στο 2,3 τιμή που σε ελάχιστα δείγματα εντοπίστηκε στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.

Για τους λόγους αυτούς πραγματοποιήθηκαν ορυκτολογικές αναλύσεις των δειγμάτων μέσω φάσματος ακτίνων Χ (XRD-analysis) και τελικά μέσω επιπλέον στατιστικής ανάλυσης δηλαδή μόνων των τιμών από 2,419 έως 2,518 και της χημικής και της ορυκτολογικής ανάλυσης προκύπτει το συμπέρασμα ότι η τιμή του G_s είναι μεταξύ των 2,419 έως και 2,449 με ασφαλέστερη τιμή το 2,444 λόγω της ποιότητας του δείγματος. Το κάτω όριο της τιμής επιβεβαιώνεται και από τον Ola (1982) επισημαίνει ότι η διακύμανση εξαρτάται από την συμμετοχή των δευτερογενών ορυκτών που συμμετέχουν στο δείγμα μας.



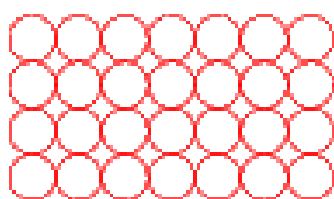
Σχήμα 2.19 Φωτογραφία διαδικασίας προσδιορισμού ειδικής βαρύτητας Ατταπουλίτη

2.6. Προσδιορισμός βέλτιστης υγρασίας-μέγιστης πυκνότητας

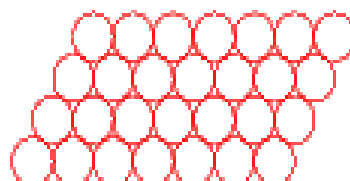
Μέθοδος Proctor

Ανεξαρτήτως της ποιας φάσης βρίσκεται ο εδαφικός σχηματισμός, έχει αναλόγως της ορυκτολογικής του σύστασης, και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των κόκκων, μια διάταξη, καταλαμβάνει δηλαδή έναν όγκο με συγκεκριμένη δομή. Η δομή αυτή εκφράζεται απλουστευτικά από την πυκνότητα του υλικού. Η πυκνότητα αυτή αντικατοπτρίζει την μάζα των εδαφικών κόκκων και το πως καταλαμβάνει συγκεκριμένο χώρο, πρόκειται δηλαδή για την διάταξη στοιβάξης. Όπως λοιπόν γίνεται αντιληπτό η διάταξη αυτή των κόκκων όσο πυκνά και να είναι κατανεμημένοι, σχηματίζει κενά και χαρακτηρίζει το κάθε υλικό με τα αντίστοιχα e (δείκτη πόρων) n (πορώδες). Αυτή η δημιουργία κενών εξαρτάται από την διάταξη των κόκκων που συνθέτουν την δομή ακόμα και την εσωτερική δομή και διάταξη, και εξαρτάται από τον αριθμό N_c (coordination number) και αντιστοιχεί στο πλήθος επιφανειών που έρχεται σε επαφή ένας κόκκος με τους γειτονικούς του. Αναλόγως λοιπόν της διάταξης ορίζεται και η δομή του γεωυλικού, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (σχήμα 2.20).

Είδος διάταξης	$N_c = \%$	N_c μέγιστος αριθμός επαφής	n
Χαλαρή-Κυβική	48	6	0,48
Ορθορομβική	40	8	0,40
Τετραγωνική-σφηνοειδής	30	10	0,30
Πυκνή-ρομβοεδρική	26	12	0,26
Χαλαρή τυχαία	40-50	Μεταβλητός	0,40-0,50



χαλαρή κυβική



πυκνή ρομβοεδρική

Σχήμα 2.20 Αριθμός διεπαφών, δομή και πορώδες γεωυλικών

Καθοριστικός παράγοντας πέρα των ορυκτολογικών συστατικών, είναι το νερό και συγκεκριμένα η ποσότητα του νερού σε % αναλογία σε σχέση με το βάρος των κόκκων, ώστε να επιτευχθεί αυτή η διάταξη (συγκράτηση-συγκόληση κόκκων) και οφείλεται είτε στην ηλεκτροστατικές τάσεις (νερό-κόκκος) η και στην ενέργεια που απαιτείται ώστε να έρθουν σε επαφή οι κόκκοι (ελκτικές δυνάμεις συνάφειας).

Αυτά παρατήρησε ο Αμερικανογερμανός μηχανικός Ralph R. Proctor κατά την κατασκευή του Φράγματος Bouquet-Cannyon το 1933 προσπαθώντας να λύσει το πρόβλημα της συμπίεστικότητας των υλικών του φράγματος υπό την επίδραση του φορτίου του νερού. Επομένως αυτό που απασχολεί είναι να μειωθούν τα κενά, και ποιο το ποσοστό υγρασίας που θα πρέπει να υπάρχει στο υλικό έτσι ώστε κάτω από συγκεκριμένη ενέργεια, να αναδιαταχθούν οι κόκκοι ώστε να ξεπεραστεί το ποσοστό της φυσικής διάταξης (**Nc**). Όπως ειπώθηκε προηγουμένως αυτό εξαρτάται και από την φύση του υλικού (πως συμπεριφέρεται από την επαφή του με το νερό), από την ανομοιομορφία του υλικού (μεγέθη κόκκων), αλλά πολύ περισσότερο από την ενέργεια που θα εφαρμόσουμε. Έτσι αποδείχτηκε ότι ο εδαφικός σχηματισμός οποιαδήποτε κοκκομετρίας και ορυκτολογικής σύστασης κάτω από συγκεκριμένο ποσοστό ενέργειας που διασπά την αρχική του διάταξη, μπορεί να αποκτήσει μια μέγιστη πυκνότητα (ρ_{max}) υπό την επίδραση μιας βέλτιστης υγρασίας η οποία αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο εδαφικό σχηματισμό (w_{opt}). Η ενέργεια για να γίνει αυτό υπολογίζεται από την σχέση (2.9)

$$E = whnN/v \quad (2.9)$$

όπου

w το βάρος της σφύρας που διαμορφώνει το δοκίμιο ,

h το ύψος ρήψης της σφύρας ,

n ο αριθμός των κτυπημάτων με την σφύρα ανά στρώση ,

N ο αριθμός των στρώσεων,

V ο όγκος του δοκιμίου

Για κάθε τιμή ενέργειας, προκύπτει μια μέγιστη πυκνότητα του υλικού και σε κάθε διάταξη υπάρχουν κενά λόγω της φύσης του υλικού και της ιδιομορφίας του. Αυτά τα κενά διάταξης ουσιαστικά προσδιορίζονται με την καμπύλη **ίσου κορεσμού**, αφού πρώτα προσδιορισθεί η καμπύλη πλήρους κορεσμού. Αυτή είναι που το υλικό θα αποκτούσε θεωρητικά κάτω από συνθήκες πλήρους κορεσμού την ίδια μέγιστη πυκνότητα, χωρίς να δημιουργούνταν κενά. Η καμπύλη αυτή είναι πάντοτε ασύμπτωτη στην προσδιοριζόμενη καμπύλη συμπίκνωσης, και αποτελεί εργαλείο επαλήθευσης για την ορθότητα της μέγιστης πυκνότητας (ρ_{max}). Η καμπύλη λοιπόν ίσου κορεσμού η οποία είναι παράλληλη της καμπύλης κορεσμού, στο σημείο που τέμνει την καμπύλη συμπίκνωσης στο (ρ_{max}) προσδιορίζει στο σημείο αυτό, το ποσοστό των κενών και ουσιαστικά την διάταξη με τα λιγότερα κενά καθώς αντιστοιχεί στο (ρ_{max}). Τόσο η καμπύλη κορεσμού όσο και η καμπύλη ίσου κορεσμού, προσδιορίζονται από την σχέση (2.10)

$$\rho_d = \rho_w S / (w + S/G_s) \quad (2.10)$$

όπου

ρ_d = η ξηρή πυκνότητα του υλικού σε gr/cm^3

ρ_w = η πυκνότητα του νερού σε gr/cm^3

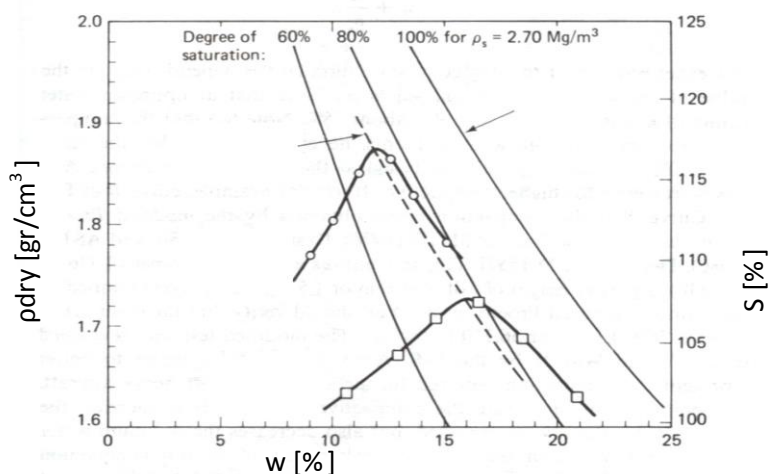
S = ο βαθμός κορεσμού (αδιάστατο)

w = υγρασία του δοκιμίου (αδιάστατο)

G_s = ειδική βαρύτητα κόκκων (αδιάστατο)

Λύνοντας ως προς $w = S(\rho_w - \rho_d/G_s)/\rho_d$ για την θεωρητική καμπύλη κορεσμού, θέτοντας για βαθμό κορεσμού $S = 100\%$ δηλαδή $= 1$, υπολογίζεται το w στις συνθήκες κορεσμού, ενώ για την προσδιοριζόμενη καμπύλη ίσου κορεσμού εφαρμόζεται η ίδια επιλυμένη σχέση με διαφορετικές τιμές S (0.98 , 0.95 κ.ο.κ), ώστε να είναι παράλληλη στην θεωρητική καμπύλη κορεσμού και να τέμνει την καμπύλη συμπίκνωσης στο (ρ_{max}) , έτσι προσδιορίζεται η βέλτιστη υγρασία (w_{opt}) για να συμβεί η μέγιστη συμπίκνωση του υλικού.

Καθώς η συμπίκνωση εξαρτάται από τρεις παράγοντες υλικό-νερό-ενέργεια ο Proctor πέρα της πρότυπης μεθόδου, δημιούργησε και την τροποποιημένη μέθοδο η οποία ελέγχει σε σχέση με την πρότυπη μέθοδο, την συμπεριφορά του συστήματος νερό-γεωυλικό, σε διάφορα ποσοστά μεταβολής της ενέργειας, με μοναδικό όριο την ακεραιότητα ως προς την φύση του, του ίδιου του υλικού (αμεταβλητότητα των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του κόκκου). Ο έλεγχος και η συσχέτιση των δυο καμπυλών (σχήμα 2.21) ελέγχεται μέσω της καμπύλης ίσου κορεσμού, αυτή θα τέμνει το (ρ_{max}) και των δυο καμπυλών (standard and modified curves), ενώ η καμπύλη ίσου κορεσμού αποτελεί **μοναδική** για κάθε υλικό.



Σχήμα 2.21 Τυπικές καμπύλες κορεσμού και ίσου κορεσμού (διακεκομμένη) από (holtz& Covacs1981)

Να σημειωθεί εδώ ότι η ενέργεια που εφαρμόζεται για να διαμορφωθεί το εξεταζόμενο υλικό εξαρτάται και από τις στρώσεις δηλαδή το πάχος και τον αριθμό, ενώ δε σε σχέση με τις δυο μορφές δοκιμής Proctor (standard , modified) η διαφορά είναι στο φορτίο πτώσης για την συμπύκνωση και ο αριθμός των στρώσεων, όπως συνοψίζονται στο πίνακα (σχήμα 2.22)

Summary of compaction procedures (ASTM D698 and D1557)

Type of test	W _i Rammer weight (N)	H Hammer drop (mm)	N _L Number of layers	N _B Number of blows per Layer	D Diameter of mold (cm)	L Height of mold (cm)	E Work done per unit volume of soil (kJ/m ³)
Standard compaction ASTM D 698	24.4	305	3	25	10.2	11.6	592
Modified compaction ASTM D 1557	44.5	457	5	25	10.2	11.6	2695
	24.4	305	3	56	15.2	11.6	589
	44.5	457	5	56	15.2	11.6	2683

Σχήμα 2.22 Σύγκριση μεθόδων Proctor (Bardet 1997)

Στις παρούσες δοκιμές η διάμετρος της μήτρας που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή των 10,2 cm για τους λόγους που αναφέρουν οι Head (1984) Bardet (1997), καθώς και τα πρότυπα Astm D 698 και 1557, για την περίπτωση εξεταζόμενου υλικού πολύ μικρής διαμέτρου μέγιστου κόκκου, όπως ο Ατταπουλγίτης (σύμφωνα με την κοκκομετρική ανάλυση, και αργλικής ορυκτολογικής σύστασης, σύμφωνα με τις αναλύσεις XRD). Πρέπει να αναφερθεί ότι επειδή η δοκιμή προαπαιτεί ομογενοποίηση του δείγματος σε υγρασία στην οποία θα υποστεί την συμπύκνωση σύμφωνα με τις πιο πάνω βιβλιογραφικές αναφορές και πρότυπα, επιλέχθηκε η ανάμιξη υλικού με νερό και στην συνέχεια η προκύπτουσα μάζα πέρασε ένα χρονικό διάστημα ωρίμανσης ίσο περίπου με τις 16 ώρες.

Για όλη αυτήν λοιπόν την διαδικασία χρησιμοποιήθηκε εξοπλισμός όπως μήτρες, επιπεδωτές των στρώσεων , βοηθητικά εργαλεία (μαχαίρια, μεγάλοι υποδοχείς ανάμιξης κλπ) ζυγός και φούρνος. Σύμφωνα με την διαδικασία διαμορφώθηκαν

μάζες γεωϋλικού σε συγκεκριμένη υγρασία , τοποθετήθηκε από αυτή την ομογενοποιημένη μάζα υλικό μέσα στην μήτρα, συμπυκνώθηκε με το κόπανο συγκεκριμένου βάρους σύμφωνα με την μέθοδο, με αντίστοιχα χτυπήματα ανά στρώση, και σύμφωνα πάντα με την μέθοδο συμπληρώνεται υλικό, με επανάληψη της διαδικασίας της στρώσης, την μήτρα με αντίστοιχο αριθμό στρώσεων. Στην συνέχεια μετράται το βάρος της μήτρας (ώστε να μπορεί να εξαχθεί η υγρή φαινόμενη πυκνότητα), και στην συνέχεια από το υγρό δείγμα προσδιορίζεται με ακρίβεια (βλέπε διαδικασία φυσικής υγρασίας) το ποσοστό της υγρασίας ώστε στην συνέχεια να εκτιμηθεί η ξηρή φαινόμενη πυκνότητα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μεταβάλλοντας το ποσοστό της αρχικής υγρασίας, μέχρι όπου εντοπιστεί η μέγιστη πυκνότητα μέσω του προσδιορισμού του βάρους του δείγματος (όσο μεταβάλλεται η υγρασία αυξάνεται το βάρος μέχρι του σημείου ρ_{max} , όταν ξεπεραστεί το όριο όσο και να μεταβληθεί η υγρασία το βάρος θα μειώνεται). Για την όλη διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν οι κατωτέρω σχέσεις για το δημιουργία των καμπυλών κορεσμού το υπολογισμό της υγρής και ξηρής πυκνότητας του συμπυκνωμένου δοκιμίου. Συγκεκριμένα για τον υπολογισμό της υγρής πυκνότητας ρ_s , εφαρμόζεται η σχέση (2.11) , της ξηρής πυκνότητας η σχέση (2.12)

$$\rho_s = (Mt - Mmd)/V \quad (2.11)$$

όπου:

Mt = μάζα υποδοχέα και υγρού δοκιμίου, σε kg

Mmd = μάζα υποδοχέα, σε kg

V = Όγκος μήτρας, σε m^3

ρ_s = Υγρή πυκνότητα των συμπυκνωμένων δοκιμίων, σε kg/m^3

$$\rho_d = \rho_s / (1 + w/100) \quad (2.12)$$

όπου

ρ_d = Ξηρή πυκνότητα σε kg/m^3 των συμπυκνωμένων δοκιμίων, και

ρ_s = Υγρή πυκνότητα σε kg/m^3 των συμπυκνωμένων δοκιμίων.

w= το ακριβή τελικό ποσοστό υγρασίας που είχε η εξεταζόμενη μάζα

Από την συνολική διαδικασία προέκυψαν τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στους παρακάτω πίνακες για την τυποποιημένη πρότυπη διαδικασία (standard proctor) (σχήμα 2.23) και την τροποποιημένη (modified) (σχήμα 2.24), και προέκυψε το συνολικό γράφημα της μεθόδου συμπίκνωσης κατά Proctor .

Αριθμός δοκιμίου			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Υγρή φαινόμενη πυκνότητα	ρ_m	g/cm^3	1,004	1,203	1,338	1,402	1,385	1,365	1,349	1,313	1,300	0,643	1,103
Υγρασία	w	%	72,989	81,021	91,647	101,766	107,844	116,007	123,569	131,597	146,280	55,593	75,602
Ξηρή φαινόμενη πυκνότητα	ρ_d	g/cm^3	0,580	0,664	0,698	0,695	0,666	0,632	0,603	0,567	0,528	0,413	0,628

Σχήμα 2.23 Αποτελέσματα μετρήσεων πρότυπης δοκιμής Proctor σε Ατταπουλγίτη

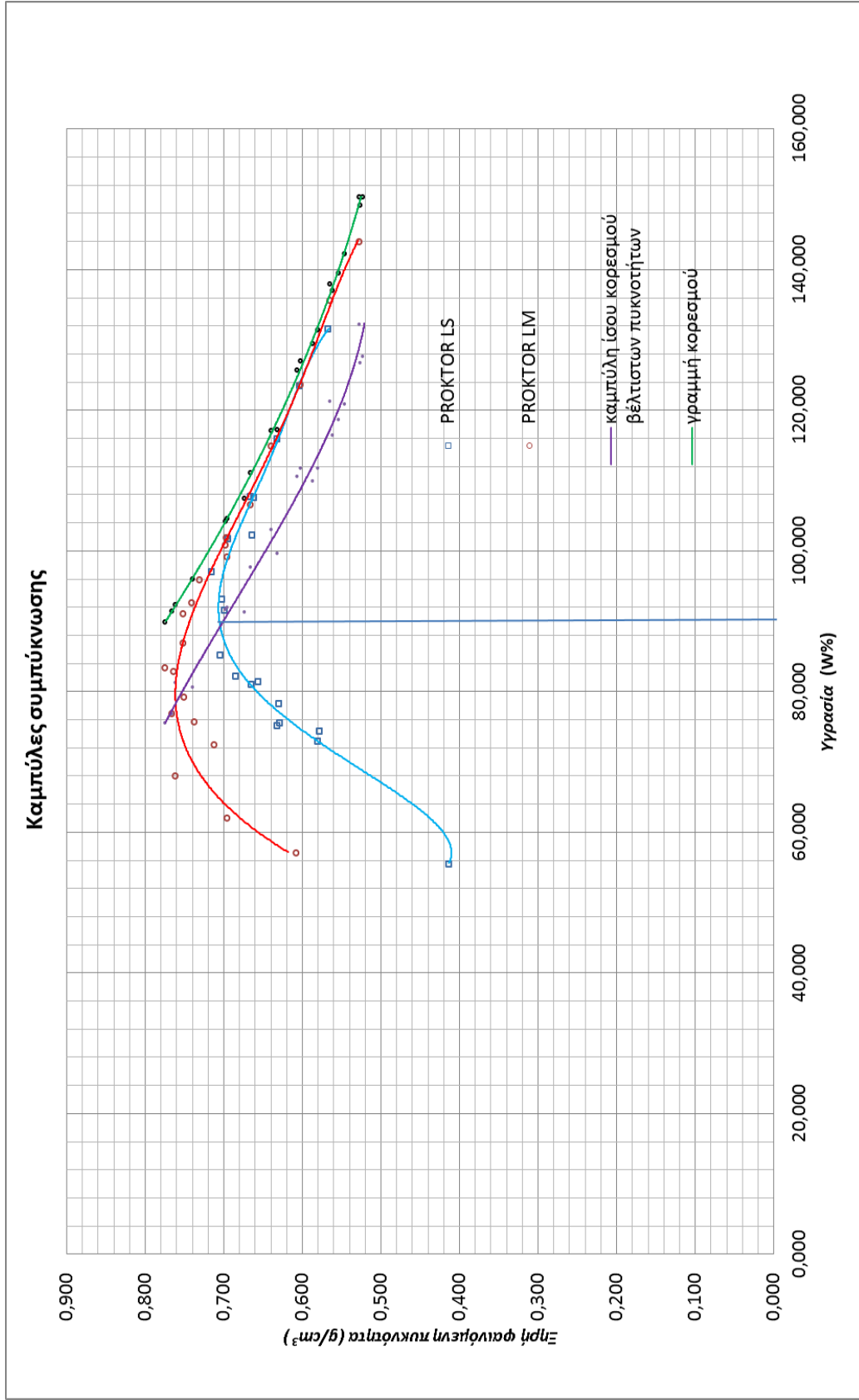
Αριθμός δοκιμίου			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Υγρή φαινόμενη πυκνότητα	ρ_m	g/cm^3	0,954	1,128	1,279	1,354	1,421	1,426	1,402	1,375	1,376	1,347	1,332	1,289
Υγρασία	w	%	57,168	62,032	68,091	76,903	83,419	92,644	100,894	106,606	114,978	123,689	135,714	144,064
Ξηρή φαινόμενη πυκνότητα	ρ_d	g/cm^3	0,607	0,696	0,761	0,766	0,775	0,740	0,698	0,666	0,640	0,602	0,565	0,528

Σχήμα 2.24 Αποτελέσματα μετρήσεων τροποποιημένης δοκιμής Proctor σε Ατταπουλγίτη

Από την επεξεργασία των μετρήσεων που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.25 προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- α) Η βέλτιστη υγρασία για την πρότυπη δοκιμή proctor είναι στο 91.73%, όπου δίνει μια μέγιστη ξηρή πυκνότητα 0.702 gr/cm^3 , ενώ ο βαθμός κορεσμού σε αυτή την διάταξη κόκκων και πυκνότητα μπορεί να φτάσει το 99%, το οποίο συμβαίνει για ποσότητα νερού 120% κ.β. όπου αρχίζει και παραλληλίζεται με το γραμμικό μέρος της καμπύλης πλήρους κορεσμού.
- β) Αντίστοιχα η βέλτιστη υγρασία για την τροποποιημένη δοκιμή proctor είναι στο 84.89%, όπου δίνει μια μέγιστη ξηρή πυκνότητα 0.778 gr/cm^3 , ενώ ο βαθμός κορεσμού σε αυτή την διάταξη κόκκων και πυκνότητα μπορεί να φτάσει το 99,5%, το οποίο συμβαίνει για ποσότητα νερού 128 % κ.β. όπου αρχίζει και παραλληλίζεται με το γραμμικό μέρος της καμπύλης πλήρους κορεσμού.
- γ) Τα κενά που δημιουργούνται στην κατάσταση μέγιστης πυκνότητας από την στοίβαξη των αργιλικών πλακιδίων φτάνουν στο 20% κ.β. του δείγματος.
- δ) Οι ανωτέρω τιμές δείχνουν ότι στις μέγιστες ξηρές πυκνότητες το υλικό μας μπορεί να συμπεριφερθεί ως μια ελαφροβαρής στερεά μάζα με πυκνότητα μικρότερη και αυτή του νερού.
- ε) Η μέγιστη πυκνότητα του υλικού (ρ_{max}) επιτυγχάνεται για υγρασία πολύ λίγο μεγαλύτερη από εκείνη του ορίου πλασιμότητας.

Η τελευταία επισήμανση (ε) θα αποτελέσει κριτήριο επιλογής για την εξέταση δοκιμών σε συγκεκριμένες υγρασίες διαμόρφωσης δοκιμών για την διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων, στην συνέχεια του παρόντος. Τέλος οι καμπύλες της πρότυπης και τροποποιημένης δοκιμής Proctor παρουσιάζουν μια φυσιολογική κανονικότητα.



Σχήμα 2.25 Σύνοψη μετρήσεων, συμπίκνωση κατά Proctor LS και LM, σχετικές καμπύλες συμπίκνωσης, καμπύλη ίσου και πλήρους κορεσμού

Κεφάλαιο 3

Μηχανικές ιδιότητες και εσωτερική δομή Ατταπουλγίτη

3.1. Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί βασικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων του Ατταπουλγίτη, και το πως επηρεάζονται λόγω της μικροδομής του υλικού. Όπως έχει αναφερθεί η προσέγγιση θα ακολουθήσει την λογική της αντίστοιχης εργασίας σε άμμους των Tong et al (2013).

Έτσι εδώ θα προσδιοριστούν διάφορες μηχανικές παράμετροι, με εργαστηριακές δοκιμές από δοκίμια που θα έχουν παρασκευαστεί με συγκεκριμένη φιλοσοφία και πρακτική ακολουθώντας κατά κύριο λόγο την μέθοδο συμπύκνωσης Proctor.

Έμφαση θα δοθεί στην εσωτερική δομή του υλικού και ειδικά στο τρόπο στοίβαξης-τοποθέτησης των πλακιδίων καθώς και τον προσανατολισμό τους, σε σχέση και με την αρχική διαμόρφωση αλλά και σε σχέση με το είδος της φόρτισης που θα επιβληθεί στο δοκίμιο.

3.2. Μέθοδος παρασκευής, διαμόρφωση και κατασκευή δοκιμίων

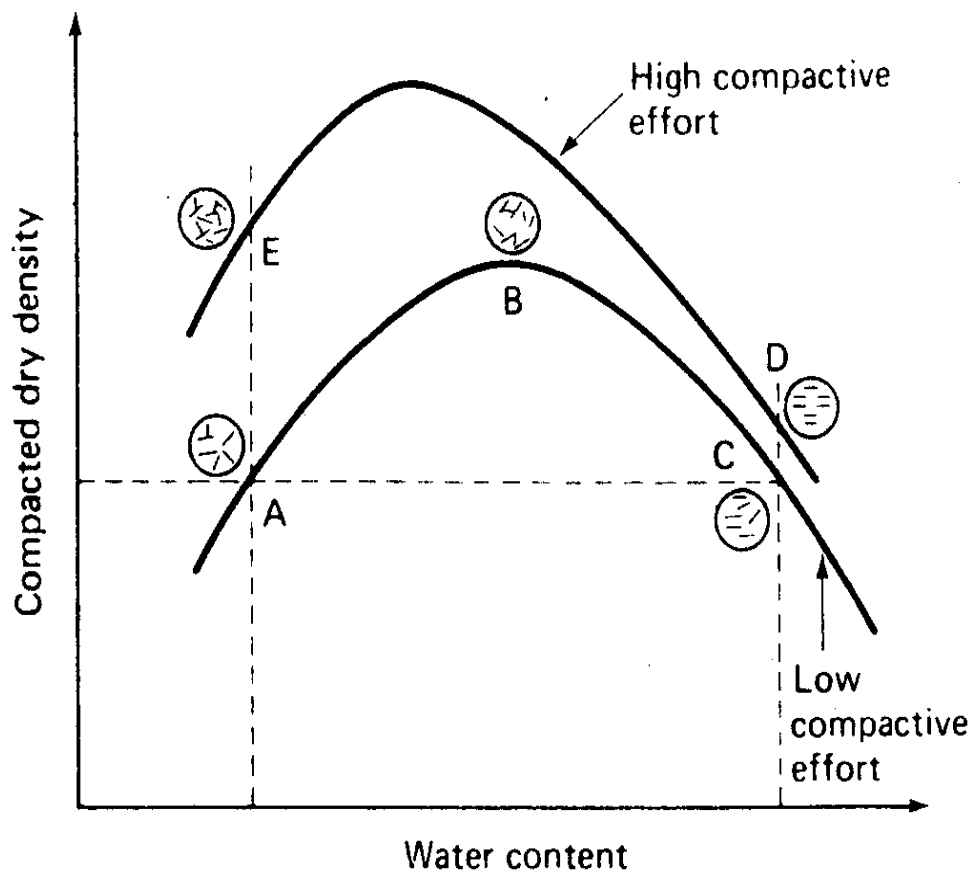
Με βάση τα όσα έχουν ήδη αναφερθεί στο 1^ο κεφάλαιο, ο Ατταπουλγίτης λόγω της ορυκτολογικής δομής του, έχει την ιδιότητα να δημιουργεί κυψελωτές ακανθώδεις επιμήκεις ίνες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ομοιογενής συνολική δομή που παρουσιάζει από την ανάμιξη του με νερό στην περιοχή του Δείκτη πλαστιμότητας (PI).

Σύμφωνα με τις καμπύλες συμπίκνωσης Proctor και τον αντίστοιχο βαθμό κορεσμού που προσδιορίζονται από την αντίστοιχη μέθοδο συμπίκνωσης, επιλέχθηκε η διαμόρφωση συμπίκνωσης της πούδρας του Ατταπουλγίτη με την τροποποιημένη μέθοδο Proctor σε ποσοστά υγρασίας κοντά στα όρια πλαστιμότητας και υδαρότητας καθώς διαφαίνεται ότι η συγκεκριμένη συμπυκνωμένη δομή είναι κορεσμένη.

Επομένως ετοιμάστηκαν δυο σειρές δοκιμών μια με 96-113% κ.β περιεχόμενο νερό δηλαδή υγρασία μικρότερη ή λίγο μεγαλύτερη από το όριο πλαστιμότητας, και μια δεύτερη σειρά η οποία διαμορφώθηκε μεν σε αυτά τα ποσοστά υγρασίας, αλλά επιβλήθηκε υδροποντισμός (βύθιση την μήτρας proctor με το περιεχόμενο συμπυκνωμένο υλικό κατά στρώσεις μέσα σε νερό έτσι ώστε να περιβάλλεται από παντού με αυτό, για 24 ώρες). Η δεύτερη διαδικασία έδειξε ότι αυξήθηκε το ποσοστό νερού στο δοκίμιο περίπου στο 133-136% κ.β σε νερό, έτσι ώστε να θεωρηθεί ότι βρίσκεται στο μέσο περίπου μεταξύ του ορίου πλαστιμότητας και υδαρότητας. Η απορρόφηση αυτή αιτιολογείται από τα δεδομένα που έχουν εξαχθεί στο 2^ο κεφάλαιο, όπου η μέθοδος συμπίκνωσης Proctor, μπορεί να δώσει δοκίμια που να θεωρούνται κορεσμένα (99-99,5% αναλόγως την μέθοδο συμπίκνωσης), άλλα μέχρι τον πλήρη κορεσμό (100%), έχει περιθώριο το υλικό να απορροφήσει επιπλέον ποσότητα νερού. Η επιπλέον αυτή ποσότητα είναι αξιοσημείωτη για την ποσότητα της και οφείλεται στα ορυκτολογικά και δομικά χαρακτηριστικά του Ατταπουλγίτη (έχει περιγραφεί στο 1^ο κεφάλαιο η προσροφητική του ικανότητα). Στην συνέχεια είτε της 1^{ης} σειράς είτε της 2^{ης} σειράς ο διαμορφωμένος μητρικός κύλινδρος του υλικού εξάγεται, και διαμορφωμένος πλέον μπορεί να τεμαχιστεί ώστε να διαμορφωθούν και να κατασκευαστούν ανάλογα με την δοκιμή κατάλληλα δοκίμια, είτε πρισματικά είτε κυλινδρικά.

Όπως προαναφέρθηκε, κρίσιμη είναι η μορφή της τοποθέτησης των υλικών (deposition) και ο προσανατολισμός τους. Έτσι σύμφωνα με τους Holtz and Covacs (1981) και Lambe (1958) σε μια καμπύλη Proctor ισχυρής συμπίκνωσης, τα

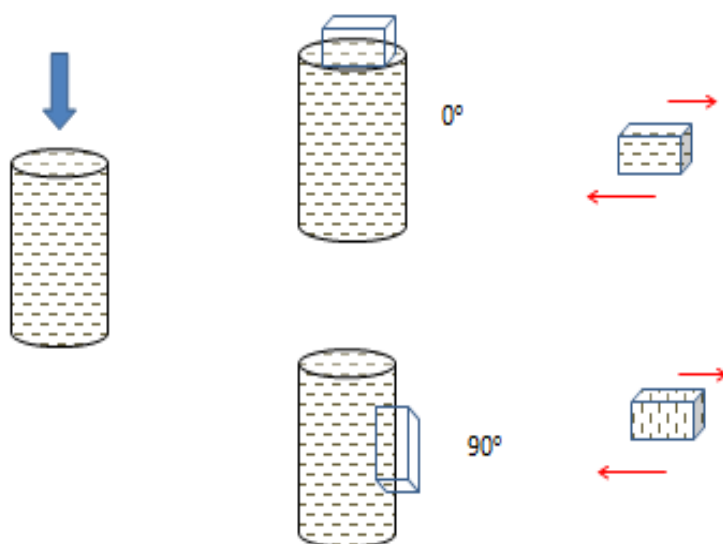
πλακίδια ή οι ίνες προσανατολίζονται κυρίως οριζόντια επί μιας τομής σε διεύθυνση κάθετη με την διεύθυνση συμπύκνωσης του υλικού όπως φαίνεται στο σχήμα (3.1)



Σχήμα 3.1 Δομή συμπυκνωμένων εδαφών ελαφριάς και βαριάς συμπύκνωσης (Holtz and Covacs 1981)

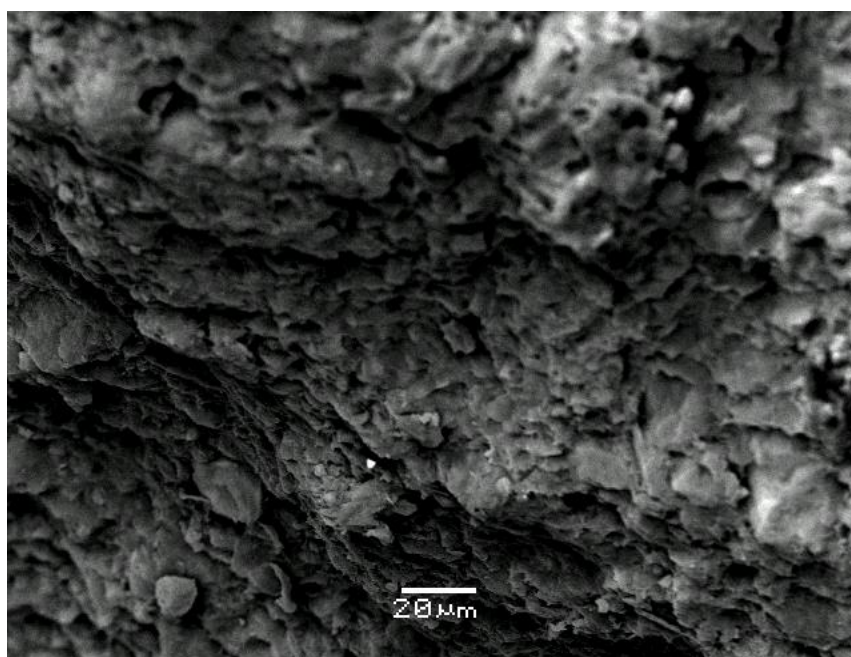
Δεδομένων των ποσοστών υγρασίας σε σχέση με τα όρια Atterberg και του αναμενόμενου προσανατολισμού των ινών, η διαμόρφωση των δοκιμών θα γίνει σε διάφορες μοίρες εκτροπής από τον άξονα διαμόρφωσης περίπου ανά 25° σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα (3. 2).

Διαμόρφωση και κατασκευή δοκιμίων



Σχήμα 3.2
Τρόπος
κατασκευής και
διαμόρφωσης
δοκιμίων

Για όλη την προαναφερθείσα εργασία ελέγχθηκε η μέθοδος που ακολουθήθηκε με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης και πράγματι προέκυψαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Στην παρακάτω φωτογραφία (σχήμα 3.3) φαίνεται η οριζόντια διάστρωση (bedding plane) σε τομή του κυλίνδρου κάθετα στον άξονα διαμόρφωσης και την ινώδη ακανθώδη κυψελωτή δομή.



Σχήμα 3.3
Εσωτερική δομή
κατασκευασμένου
δοκιμίου (εικόνα
από σάρωση
sem)

3.3. Δοκιμές απευθείας διάτμησης (direct shear)

3.3.1. Γενική διερεύνηση και μεθοδολογία εκτέλεσης δοκιμών

Οι δοκιμές αυτές χρησιμοποιήθηκαν στην δημοσίευση των **Z.Tong et al (2013)**, για την μελέτη της ανισοτροπίας άμμων, και αποτελεί την βασική ιδέα του παρόντος πονήματος καθώς και της πειραματικής εργασίας.

Συγκεκριμένα στην ως άνω δημοσίευση χρησιμοποιείται ένα κελί κατάλληλα σχεδιασμένο ώστε όταν τοποθετείται μέσα στο δοχείο διαμόρφωσης των δοκιμών, να μπορεί να κατασκευάζεται διαφορετική γωνία στοίβαξης της άμμου και να εξετάζεται η επίδρασή της στην διατμητική αντοχή και στην συμπεριφορά σε απευθείας διάτμηση.

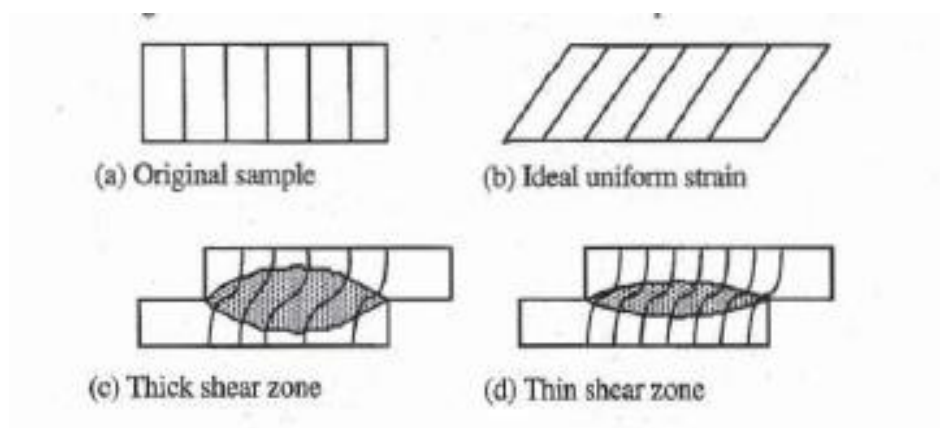
Η βασική διαφοροποίηση πέραν του υλικού μας (αργιλικού και ινώδες), σε σχέση με την πιο πάνω διαδικασία και εξέταση είναι ότι το γεωυλικό μας, έχει και συνοχή [C]. Εξαιτίας αυτής της συνοχής επιλέχθηκε μια διαδικασία κατασκευής και διαμόρφωσης δοκιμών που μπορεί να υλοποιήσει διάφορες γωνίες στοίβαξης (Ψ_b).

Η δοκιμή απευθείας διάτμησης έχει μια βασική διαφοροποίηση σε σχέση με τις υπόλοιπες δοκιμές αντοχής γεωυλικών: η διατμητική τάση όχι μόνο μετράται αλλά επιβάλλεται κιάλας ορίζοντας το επίπεδο αστοχίας. Η δοκιμή αυτή πλέον εφαρμόζεται ελάχιστα ειδικά για αργιλικά υλικά, εξαιτίας της αβεβαιότητας που έχει λόγω της μη μέτρησης της πίεσης πόρων, παρόλο που σύγχρονες έρευνες έχουν ξεκινήσει με αντίστοιχη τροποποίηση της συσκευής (Nicotera 2010) ώστε να επαλειφθεί και αυτή η ασάφεια. Πέραν τούτου, στη κλασική συσκευή και δοκιμή όπως χρησιμοποιήθηκε, εντοπίζονται αβεβαιότητες ως προς τις συνοριακές συνθήκες και την στροφή που συνήθως παρατηρείται, λόγω της αντίδρασης στην επιβολή διάτμησης, τόσο στο οριζόντιο επίπεδο(σχετική στροφή του πάνω μέρους

του κελιού ως προς το κάτω), καθώς και της στροφής στον κατακόρυφο άξονα λόγω της κίνησης του φορείου.

Το κύριο σκεπτικό που αναπτύχθηκε από το Casagrande, για την δημιουργία της συσκευής και της συγκεκριμένης δοκιμής, είναι ότι ένα δοκίμιο εγκιβωτίζεται σε ένα κελί, μπορεί (ή και όχι) να δεχτεί στερεοποίηση (λειτουργεί και ως οιδήμετρο), και στην συνέχεια να του επιβάλλεται διατμητική φόρτιση, μέσω της σχετικής κίνησης του φορείου που τοποθετείται το κελί. Να σημειωθεί ότι το κελί μπορεί να διαιρείται κατά την κίνηση, έτσι ώστε το πάνω τμήμα που είναι πακτωμένο στην μέτρηση του φορτίου να μετράει την αντίδραση της φόρτισης, λόγω της μετατόπισης του φορείου, ενώ η διαίρεση του κελιού και η επιβολή της φόρτισης εφαρμόζεται με τέτοιο τρόπο (μέσω του φορείου) ώστε να ορίζει το επίπεδο αστοχίας, το οποίο είναι παράλληλο με το επίπεδο κίνησης του φορείου.

Ουσιαστικά πρόκειται για ένα συνδυαστικό ζεύγος φόρτισης, επιβάλλοντας μια ορθή (σ_N) και μια διατμητική τάση (τ), που μάλιστα επιβάλλει και οριοθετεί και το επίπεδο αστοχίας. Οι αβεβαιότητες που υπάρχουν αφορούν στην εντατική κατάσταση εκτός του επιπέδου αστοχίας, αλλά και στο πάχος των πραγματικά δημιουργούμενων γωνιών διάτμησης όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (3.4).



Σχήμα 3.4 Θέμα μορφής παραμόρφωσης και πάχους ζωνών διάτμησης (Bardet 1997)

Παρόλα αυτά με την συγκεκριμένη δοκιμή, γίνεται απευθείας μέτρηση των παραμέτρων (C, φ) για την εφαρμογή απευθείας του κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb, και συνεπώς παραμένει σημαντική δοκιμή. Μπορεί να προσομοιώσει καταστάσεις διάτμησης (πχ από ερπυσμό εδαφών) και γενικά να προσομοιώσει είτε από πλευράς ταχύτητας αλλά και πλευράς εντατικής κατάστασης, τα διάφορα σημεία-εντατικές καταστάσεις μιας εδαφικής κατολίσθησης. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της φοράς κίνησης του φορείου όπου μπορεί να επιβάλει την διάτμηση, είτε με κίνηση του φορείου προς τον μετρητή φορτίου [θετική φορά σύμβασης], είτε με κίνηση του φορείου απομακρυνόμενο από τον μετρητή [αρνητική φορά σύμβασης].

Η διαμόρφωση των δοκιμών γίνεται με προσαρμογή του (τετραγωνικής διατομής 62X62 mm) διακορευτή (extruder) επί του κυλίνδρου παρασκευής εξάγοντας δοκίμια 60X60mm που προσαρμόστηκαν κατάλληλα στο κελί διάτμησης, ενώ η δοκιμή ακολουθεί την γενικότερη μεθοδολογία που περιγράφεται από το πρότυπο ASTM D 3080/ m-11, ASTM D 6528/ m-07 και την γενικότερη βιβλιογραφία με τα αντίστοιχα σημεία για την προσαρμογή και την διαδικασία από τους Head (1984), J.P.Bardet (1997), Lade (2013).

Επίσης για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\tau_{\max} = c + \sigma \tan \varphi \quad (3.1)$$

$$\tau = T / A_c \quad (3.2\alpha),$$

$$\sigma = N / A_c \quad (3.2\beta)$$

$$A_c = a(a - \delta) \quad (3.3)$$

όπου

[σ] η ορθή τάση σε (kPa)

$[\tau]$ η διατμητική τάση (kPa)

$[N]$ η ορθή δύναμη η οποία επιβάλλεται με αναρτώμενα βάρη σε (kN)

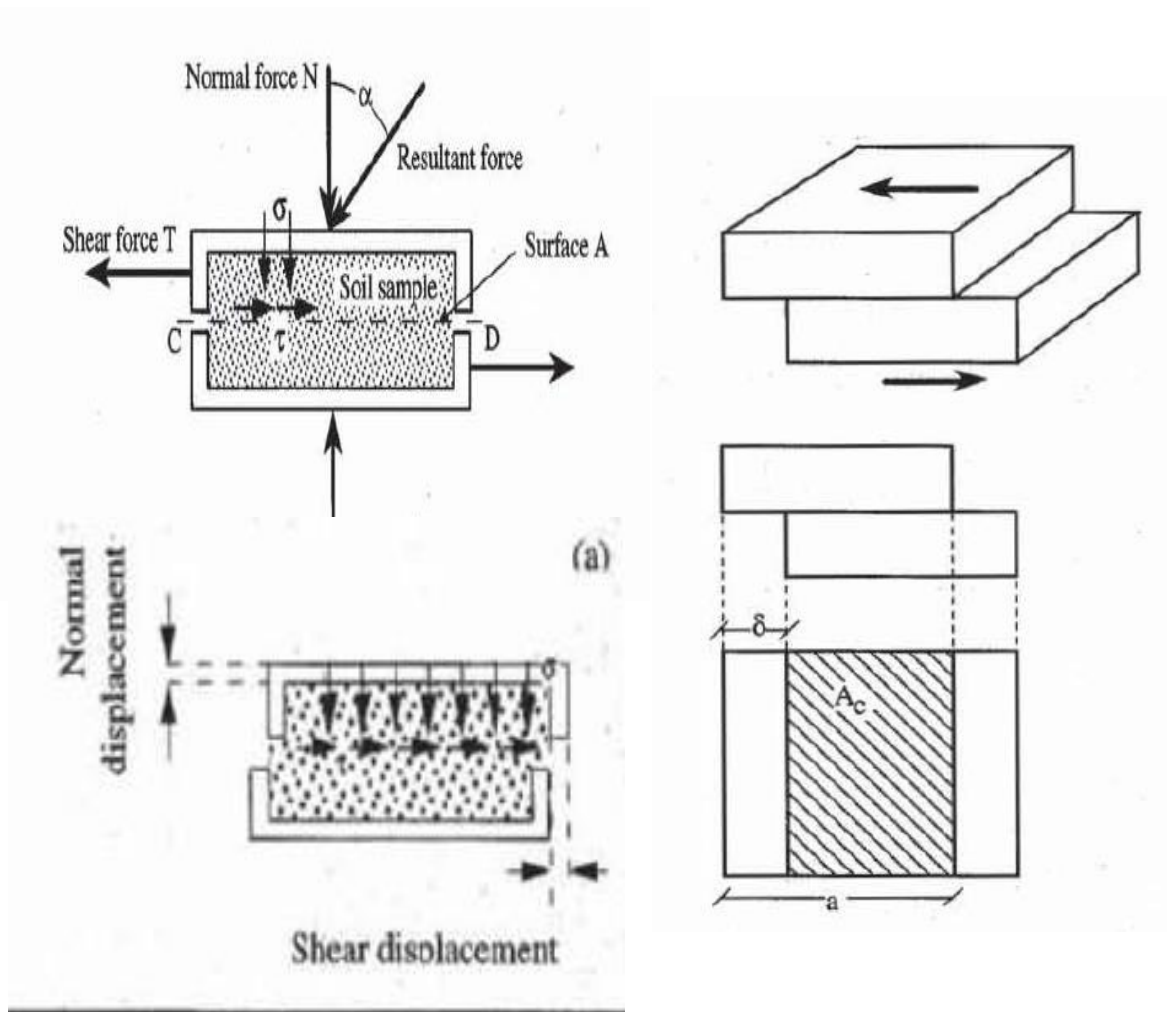
$[T]$ η διατμητική φόρτιση μετρούμενη από τον μετρητή αντίδρασης (kN)

$[A_c]$ η επιφάνεια που διαρκώς ασκείται η διάτμηση (mm^2)

$[\alpha]$ οι αρχικές διαστάσεις του δοκιμίου (mm)

$[\delta]$ η διατμητική μετατόπιση μετρούμενη από μηκυνσιόμετρα (mm)

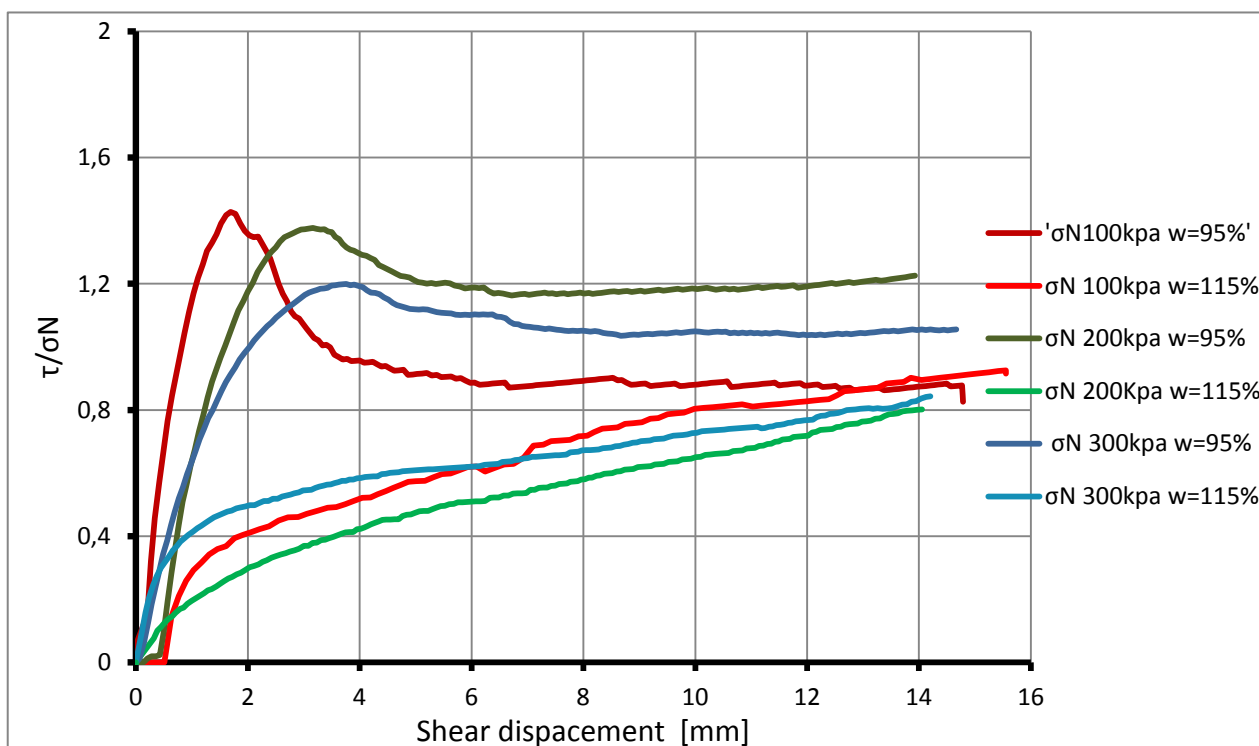
στο παρακάτω σχήμα (σχήμα 3.5) απεικονίζονται οι τιμές των παραπάνω μεγεθών.



Σχήμα 3.5 φόρτιση και μετρήσεις δοκιμίου απευθείας διάτμησης (Bardet 1997)

Με στόχο την εξέταση της συμπεριφοράς σε διάτμηση και την επίδραση της ανισοτροπίας παρασκευάστηκαν δοκίμια με γωνίες στοίβαξης ψ_b ίσες με:

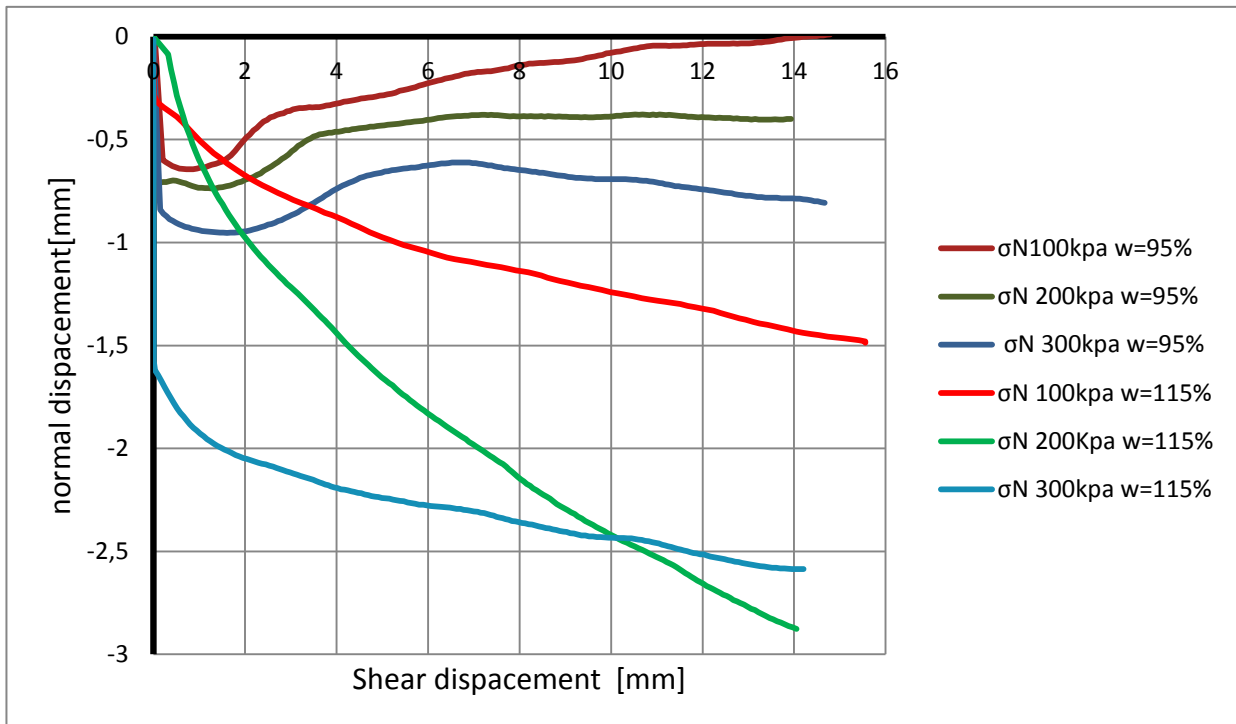
0° , 25° , 45° , 70° , 90° , 115° , 135° , 160° , 180° . Σημειώνεται ότι η εξέταση ειδικά των 0° και 180° έγινε σε καθεστώς διάτμησης τόσο θετικό όσο και αρνητικό. Επισημαίνεται ότι η δοκιμή των 180° στο θετικό καθεστώς έγινε με ανεστραμμένο δοκίμιο. Επίσης σε αυτές τις γωνίες εκτελέστηκαν δοκιμές σε διάφορες τιμές επιβαλλόμενης ορθής τάσης σ_N , καθώς και σε διάφορες υγρασίες μικρότερες του δείκτη πλαστικότητας PL κοντά στο 95%, μεγαλύτερες του PL στο 115% και τέλος, σε υγρασίες στην μέση περίπτωση μεταξύ LL και PL (στο 135%). Τέλος εκτελέστηκαν και δοκιμές σε όλες τις επιμέρους στρώσεις (σε όλο το ύψος του κατασκευασμένου κυλίνδρου έχοντας εξαχθεί δοκίμια πρακτικά απ όλες τις στρώσεις σύμφωνα με την μέθοδο συμπύκνωσης- παραγωγής του αρχικού κυλίνδρου)



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα λόγου διατμητικής προς ορθής τάσης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση για φορτίσεις 100 , 200, 300 kPa και σε υγρασίες 95% και 115%

έτσι ώστε να εξεταστεί η ομοιομορφία του κυλίνδρου(Homogeneous).

Αρχικά λοιπόν εξετάστηκαν δοκίμια με υγρασίες μικρότερες του PL και υγρασίες ανάμεσα στο PL με LL, για τιμές $\sigma_N = 100, 200$ και 300 kPa και σε οριζόντια στοίβαξη $\psi_b = 0^\circ$, που συνοψίζονται στα σχήματα (3.6 και 3.7)

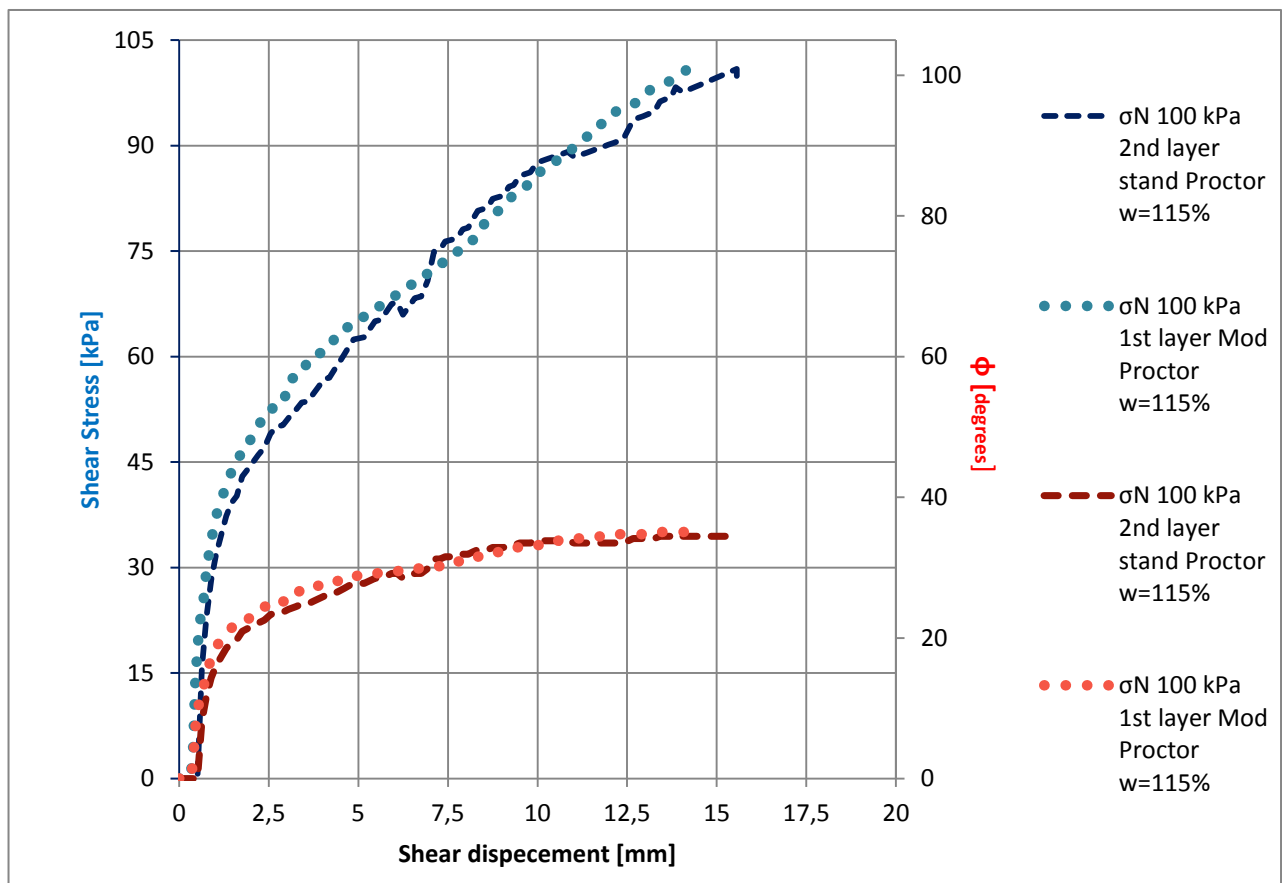


Σχήμα 3. 7 Διάγραμμα ορθής μετατόπισης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση για φορτίσεις 100 , 200, 300 kPa και σε υγρασίες 95% και 115%

Σύμφωνα με το σχήμα (3.6) προκύπτει μια φυσιολογική συμπεριφορά σε σχέση με τις δυο διαφορετικές υπό εξέταση υγρασίες ως προς την μορφή των καμπυλών, αλλά και της κατακόρυφης ως προς την οριζόντια μετατόπιση (σχήμα 3.7). Συγκεκριμένα για μικρές υγρασίες (<PL) προκύπτει μια συμπεριφορά πυκνής δομής(dense), ενώ για υγρασίες πιο κοντά στο LL μιας πιο χαλαρής δομής (loose), με τις πρώτες να οδηγούν σε υψηλότερους λόγους τ/σ_N από ότι οι δεύτερες. Το αξιοπερίεργο εδώ είναι η υψηλή γωνία τριβής τόσο στην μέγιστη αντοχή (peak) όσο και στην παραμένουσα (residual) που φτάνουν την τιμή των 55° και 35° , τιμές

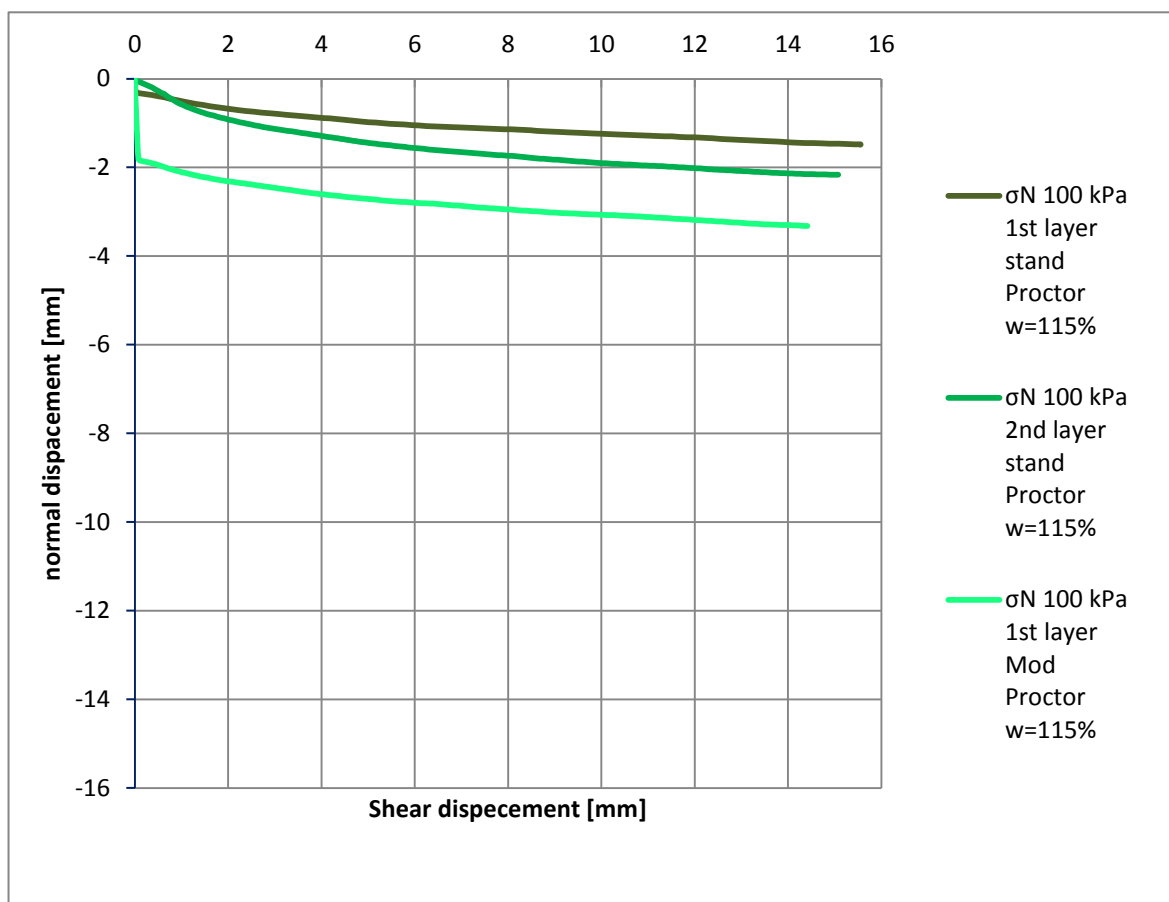
εξωπραγματικές για αργίλους αντιστοιχούν σε τιμές βραχυδών δοκιμίων ή ασύνδετων τροχαλών (μεγάλα ασύνδετα χαλίκια). Το συγκεκριμένο φαινόμενο θα εξηγηθεί παρακάτω και σχετίζεται με την συμπεριφορά της μικροδομής. Επισημαίνεται εδώ πως τα συμπεράσματα αυτά προκύπτουν από δοκιμές που στο σύνολο τους έγιναν τόσο με γρήγορο ρυθμό μετατόπισης (2%/min) ώστε να εξασφαλίζονται οι αστράγγιστες συνθήκες, όσο και με δοκιμές με μείωση του ρυθμού στο 1%, χάριν σύγκρισης.

Στην συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση της ομοιομορφίας των στρώσεων του κυλίνδρου κοπής καθώς και η περίπτωση της διαφορετικής ενέργειας συμπύκνωσης του κυλίνδρου και το πλήθος των στρώσεων αυτής.



Σχήμα 3. 8 Διάγραμμα διατμητικής τάσης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση (μπλέ αποχρώσεις) και γωνίες κινητοποίησης (κόκκινες αποχρώσεις) σε σχέση με την διατμητική μετατόπιση για διάφορες στρώσεις δοκιμίου και ενέργειες συμπύκνωσης σε υγρασία =115%

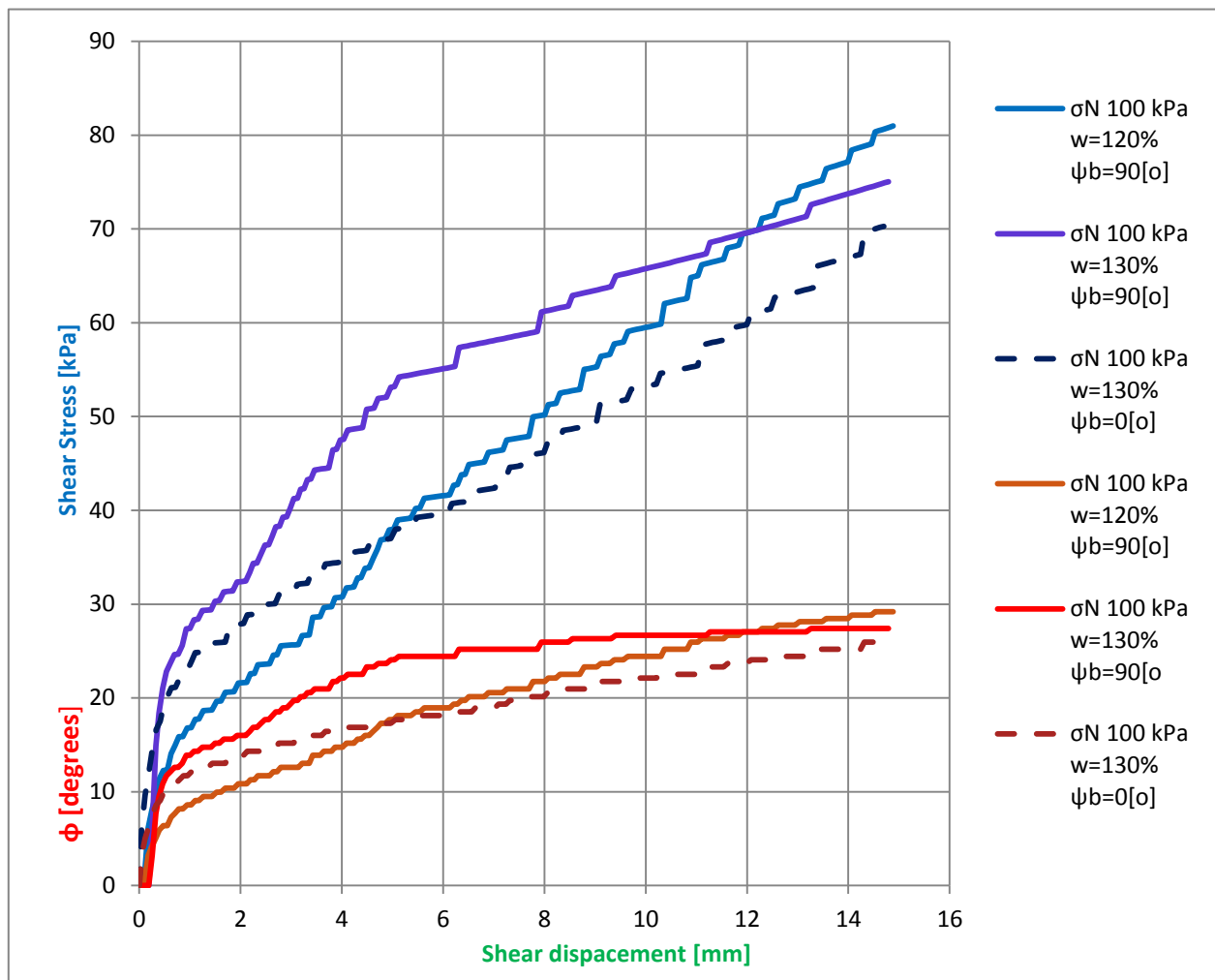
Όπως προκύπτει από το σχήμα (3.8) τόσο η τελική διατμητική αντοχή, όσο και ο λόγος τ/σ_N με προβολή ως προς την κινητοποιούμενη (mobilized) γωνία τριβής, αλλά και η σχέση των ορθών με των διατμητικών μετατοπίσεων, είναι σχεδόν όμοιες (σχήμα 3.9). Επομένως, η μέθοδος παρασκευής, ή κοπής, ή θέση επιλογής των δοκιμίων, δεν επηρεάζει την συμπεριφορά, καθώς τα δοκίμια έχουν παρόμοια συμπεριφορά.



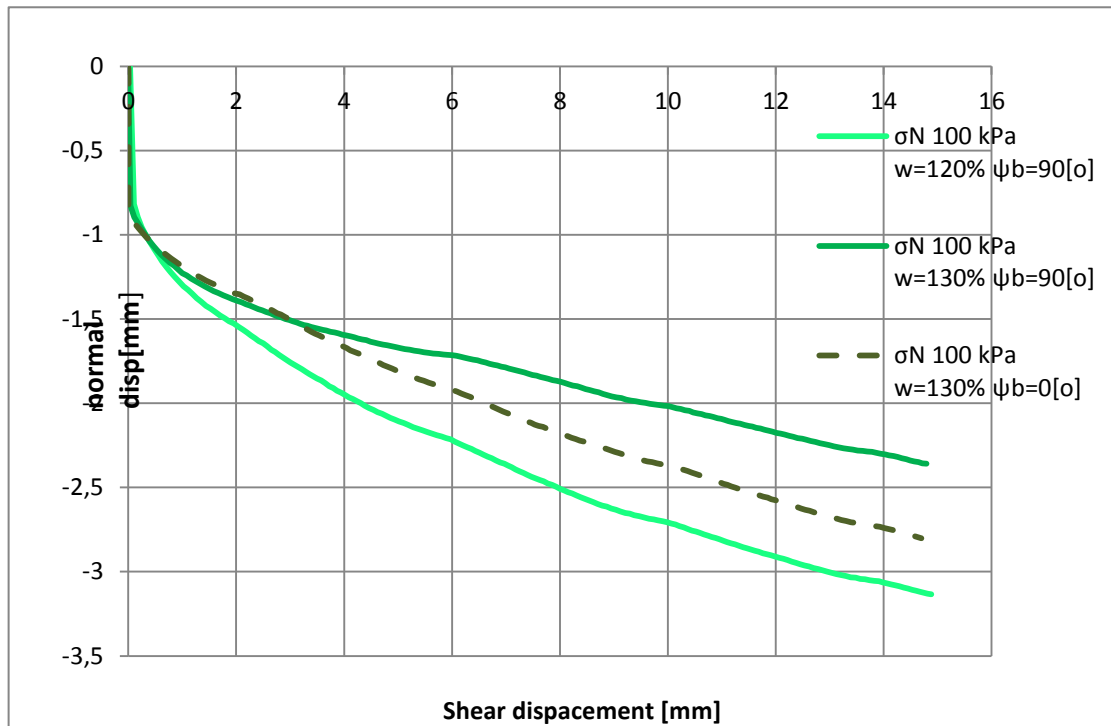
Σχήμα 3. 9 Διάγραμμα ορθής μετατόπισης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση για διάφορες στρώσεις δοκιμίου και ενέργειες συμπίκνωσης σε υγρασία =115%

Στην συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση της υγρασίας και η κατασκευή δοκιμίων από διαφορετική διαστρωμάτωση, ως προς τον τρόπο στοίβαξης. Πράγματι όπως διαπιστώνεται στο αντίστοιχο διάγραμμα (σχήμα 3.10), προκύπτει ότι ακόμα και

κατά 10% μεταβολή σε υγρασία 110%, μπορεί να μας δώσει εσφαλμένες ενδείξεις, που να είναι συγκρίσιμες με διαφορές λόγω άλλων παραμέτρων. Αυτό διερευνάται στα σχήματα (3.10 και 3.11), όπου αντίστοιχες διαφορές στην μηχανική συμπεριφορά, εμφανίζονται σε δοκίμια με ίδια στοίβαξη αλλά διαφορετική υγρασία, όπως και διαφορές στην μηχανική συμπεριφορά δοκιμίων στην ίδια υγρασία αλλά σε διαφορετική στοίβαξη.

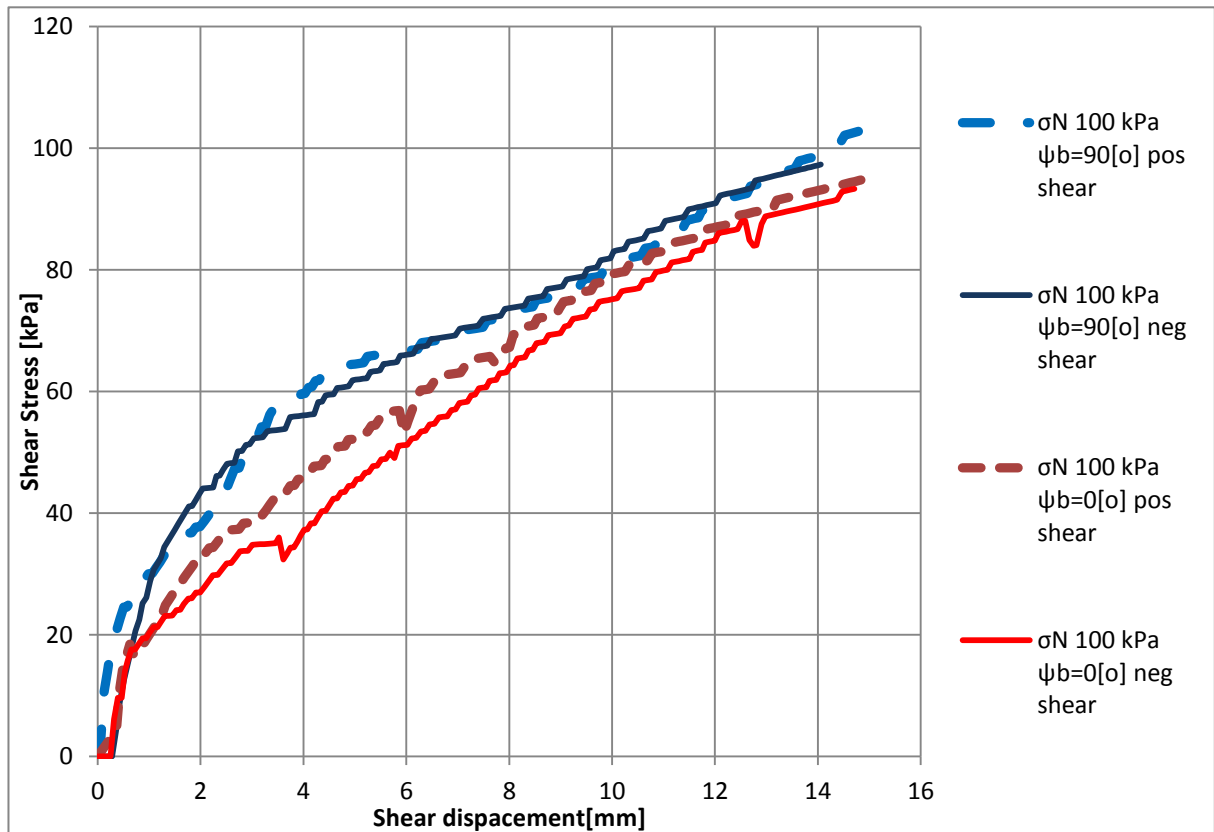


Σχήμα 3. 10 Διάγραμμα διατμητικής τάσης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση (μπλέ αποχρώσεις) και γωνίες κινητοποίησης (κόκκινες αποχρώσεις) σε σχέση με την διατμητική μετατόπιση για γωνίες στοίβαξης 0 και 90 μοιρών και σε υγρασίες =120, 130%



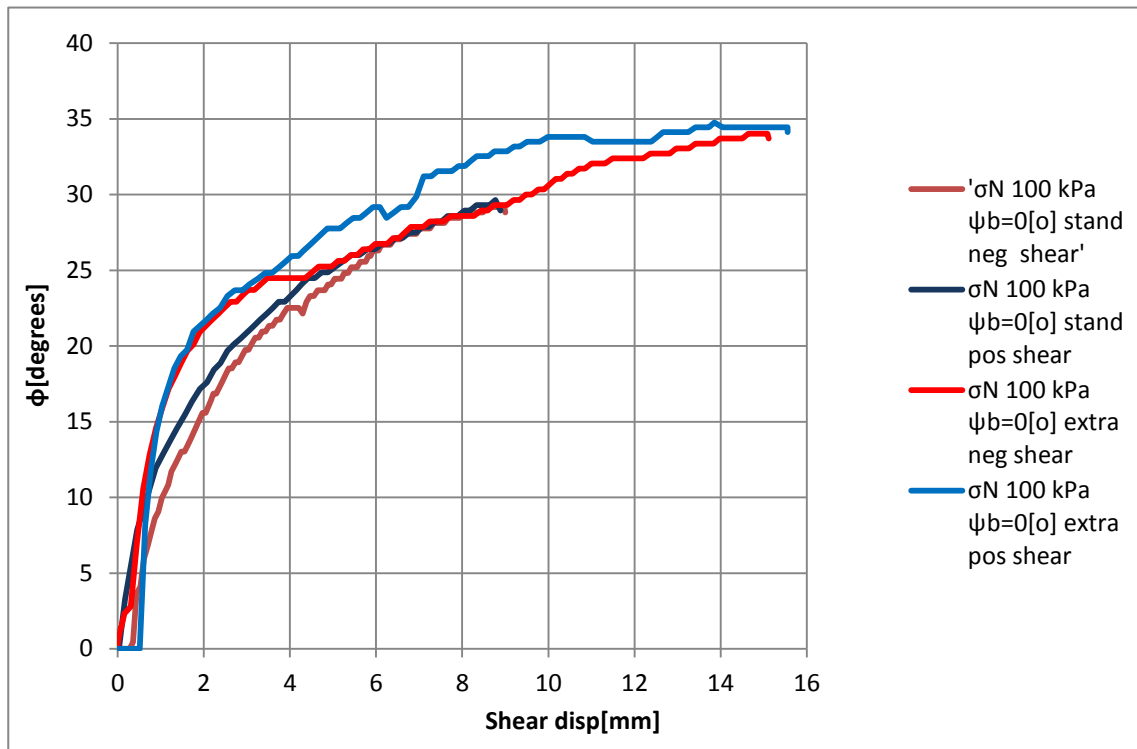
Σχήμα 3. 11 Διάγραμμα ορθής μετατόπισης σε σχέση με την διατμητική μετατόπιση για γωνίες στοίβαξης 0 και 90 μοιρών και σε υγρασίες =120, 130%

Στην συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση της κατεύθυνσης της διάτμησης (αν δηλαδή αυτό που περιγράφηκε ως θετική ή αρνητική φορά διάτμησης επηρεάζει τις μετρήσεις). Πράγματι εξετάστηκαν δοκίμια και σε θετική και αρνητική φορά διάτμησης (σύμφωνα με την σύμβαση που έχει υιοθετηθεί), στους δυο βασικούς τρόπους στοίβαξης 0° και 90° αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα (σχήμα 3.12). Από αυτό προκύπτει ότι όπως και να διατμηθεί το δοκίμιο (θετική ή αρνητική φορά) η συμπεριφορά δεν αλλάζει, ειδικά για στις 90° που έχει απόλυτα ταυτόσημη συμπεριφορά. Επομένως η επίδραση του τρόπου στοίβαξης είναι ανεξάρτητη από την φορά διάτμησης (με την παραπάνω υπόθεση, ότι αν διατμηθούν δοκίμια σε όλο το εύρος 0° έως 180° είτε με θετική είτε αρνητική φορά διάτμησης, θα παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά στις αντίστοιχες γωνίες σε σχέση με την αντιστοίχιση της φοράς διάτμησης). Στην συνέχεια επιλέχθηκε οι δοκιμές να γίνονται μόνο κατά την θετική φορά διάτμησης για λόγους ομοιότητας των πειραμάτων.

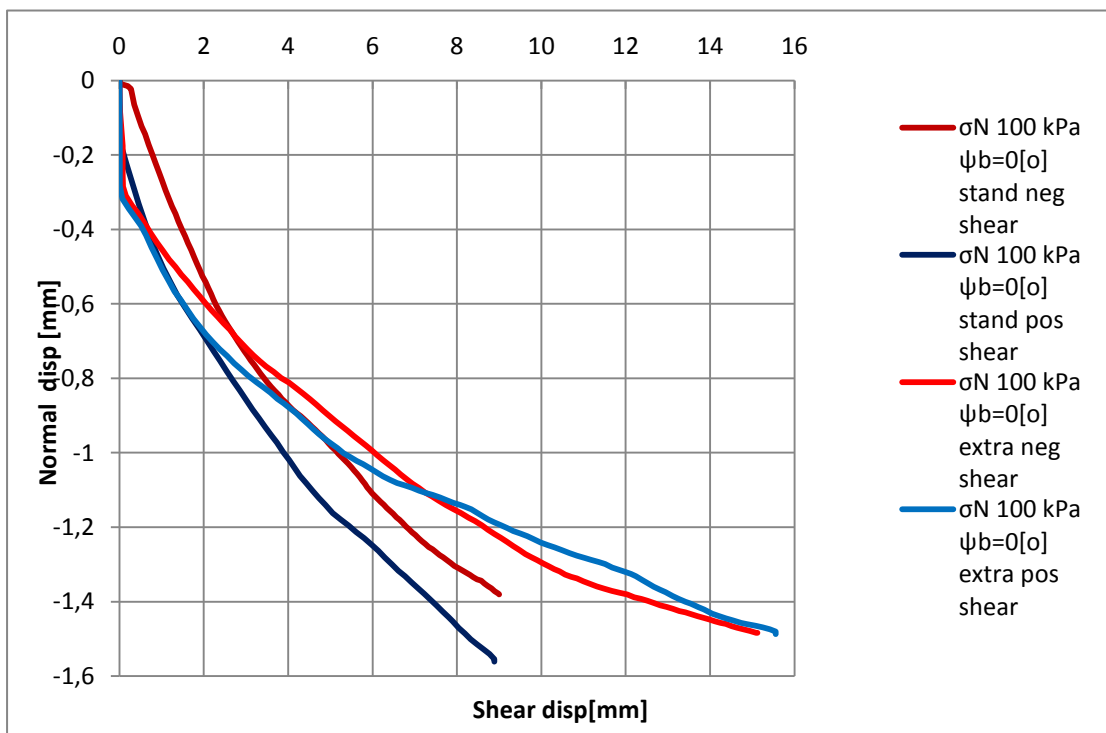


Σχήμα 3. 12 Διάγραμμα διατμητικής τάσης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση σε 90° στοίβαξη (μπλε αποχρώσεις) και 0° (κόκκινες αποχρώσεις) σε θετική (διακεκομμένες) και αρνητική (συνεχής) φορά διάτμησης

Μια ακόμη διερεύνηση αφορούσε το μέγιστο μέγεθος οριζόντιας μετατόπισης που πρέπει να επιβάλλεται στο δοκίμιο. Ακολουθώντας το προαναφερόμενο πρότυπο ASTM D 3080/ m-11, ASTM D 6528/ m-07, η διάτμηση συνεχίζεται μέχρι περίπου η οριζόντια μετατόπιση να φτάσει στο 15-20% της αρχικής διάστασης του δοκιμίου. Εναλλακτικά εξετάστηκε η συνέχιση της διάτμησης έως ότου σταθεροποιηθεί ο λόγος τ/σ_N .



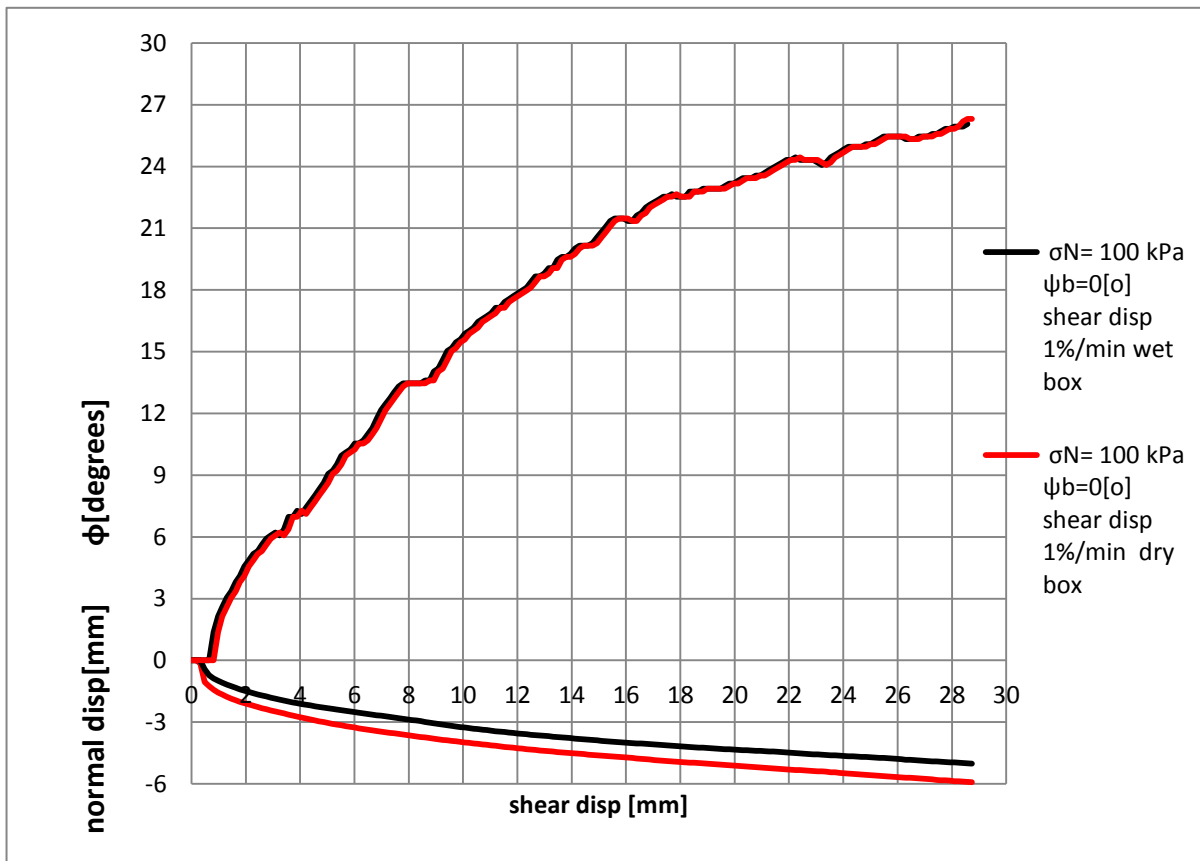
Σχήμα 3. 13 Διάγραμμα διατμητικής τάσης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση στην πρότυπη ενέργεια συμπύκνωσης, για πλήρη και επιπλέον διατμητική μετατόπιση



Σχήμα 3. 14 Διάγραμμα ορθής μετατόπισης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση στην πρότυπη ενέργεια συμπύκνωσης, για πλήρη και επιπλέον διατμητική μετατόπιση

Από το σχήμα 3.13 αλλά και το σχήμα 3.14 προκύπτει ότι η μέγιστη μετατόπιση σύμφωνα με το πρότυπο δεν επαρκεί να σταθεροποιηθεί η τιμή t/σ_N , είτε στην θετική φορά διάτμησης είτε στην αρνητική, καθώς χρειάζεται έως και διπλάσια τιμή μετατόπισης. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα επιλέχθηκε όπως όλες οι διατμήσεις να γίνεται με θετική φορά διάτμησης με αυξημένη οριζόντια μετατόπιση.

Παρόλα αυτά, η αβεβαιότητα λόγω της παρουσιαζόμενης υψηλής γωνίας τριβής προβλημάτιζε για την ορθότητα των πειραμάτων. Η τελευταία παρατήρηση ότι ο λόγος t/σ_N σταθεροποιείται σε διπλάσια από την συνήθη οριζόντια μετατόπιση (συγκριτικά με το πρότυπο ASTM) οδηγεί στην αναγκαιότητα διερεύνησης της επίδρασης του ρυθμού επιβολής της μετατόπισης, η οποία εδώ υποδιπλασιάστηκε από 2%/min του αρχικού μήκους, σε 1%/min. Όπως παρατίθεται και στο σχήμα 3.15 οι τιμές της μέγιστης γωνίας τριβής από τις 35° περίπου για υγρασία στο 115% (βλέπε προηγούμενα διαγράμματα), μειώνονται σε 27° περίπου οι οποίες είναι συμβατές με την όποια μικρή βιβλιογραφία επί του υλικού. Για παράδειγμα ο Ola (1982 a&b) στην εξέταση της αργίλου του Sokoto της Βόρειο- Ανατολικής Νιγηρίας, μιας αργίλου φυσικής απόθεσης και κατά 90% σε περιεχόμενο Ατταπουλγίτη, διαπίστωσε έντονες διακυμάνσεις της γωνίας τριβής της τάξης του 50%, μειώνοντας την επιβολή του ρυθμού μετατόπισης σε τριαξονικές δοκιμές, κατά μια τάξη μεγέθους προς τα κάτω, δηλαδή από το 2% στο 0,2% ανά λεπτό (strain rate effect). Επομένως, με την μείωση του ρυθμού επιβολής παραμόρφωσης κατά 50% (επιβολή ρυθμού μετατόπισης 1%/min) που οδηγεί σε μείωση κατά 10° σχεδόν της μέγιστης γωνίας τριβής προκύπτει συμβατότητα αδρή με την βιβλιογραφία, δεδομένης και της εσωτερικής δομής που αποτελείται από ασυνήθη ινώδη επιμήκη ορυκτά υλικά.



Σχήμα 3. 15 Διάγραμμα διατμητικής τάσης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση με ρυθμό μετατόπισης 1%/min και την αντίστοιχη συσχέτιση της ορθής ως προς την διατμητική μετατόπιση για γωνία στοίβαξης $\psi_b=0^\circ$

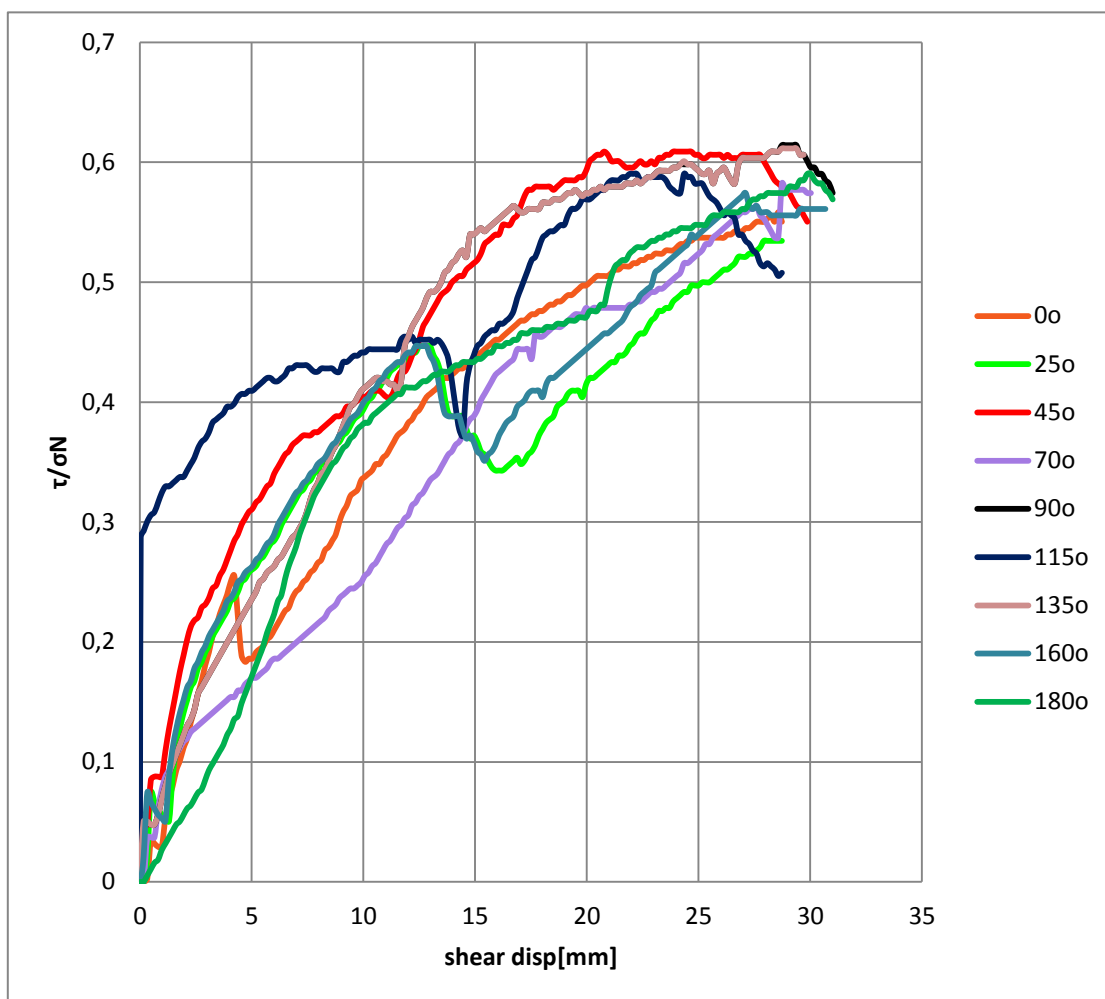
Τέλος διερευνήθηκε η επίδραση, του αν το δοκίμιο βρίσκεται εμποτισμένο σε νερό ή όχι μέσα στο κιβώτιο διάτμησης. Από ότι φαίνεται (σχήμα 3.15) , σε δοκιμές με νερό και χωρίς νερό, (υγρή και ξηρή διάτμηση) δεν επηρεάζεται η γωνία τριβής. Αυτό οφείλεται στις γρήγορες συνθήκες της δοκιμής που δεν επιτρέπουν την παρέμβαση του εξωτερικού νερού επί της δομής, άρα και στην επιφάνεια διάτμησης. Με βάση τα ανωτέρω, αποφασίστηκε η τελική εξέταση δοκιμίων, σε υγρασίες κάτω και πάνω από το PL κατά 10% τουλάχιστον δηλαδή στα 95% και 115% κβ περιεχόμενης υγρασίας περίπου, σε θετικής φοράς φόρτισης, με ρυθμό μετατόπισης 1%/min. Επισημαίνεται ότι ο ρυθμός δεν μειώθηκε πιο χαμηλά (πχ όπως στον Oia 1982 a&b),

καθώς τα δοκίμια προκύπτουν από συμπύκνωση και ήταν αναγκαία η συμβατότητα και με τις τριαξονικές δοκιμές που εκτελέστηκαν επιπλέον.

3.3.2. Επίδραση γωνίας στοίβαξης

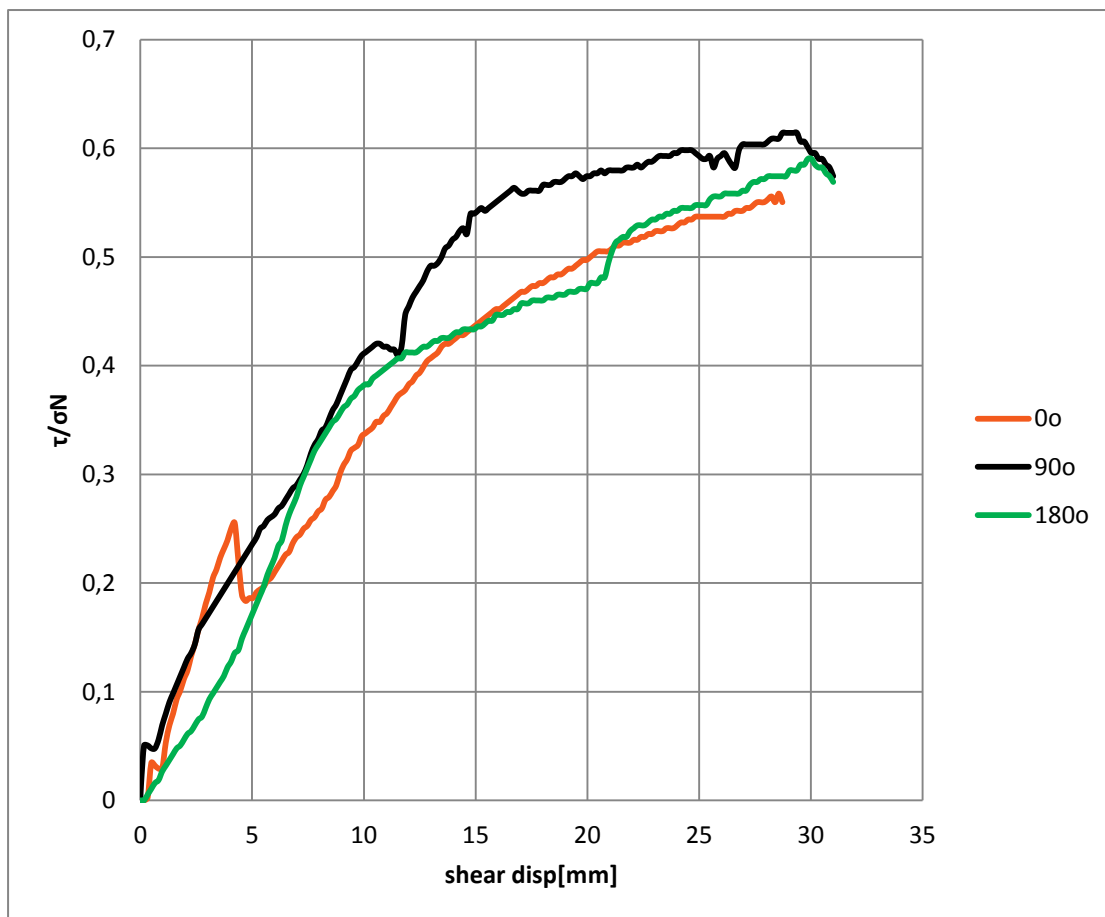
Με βάση την μεθοδολογία εκτέλεσης δοκιμών απευθείας διάτμησης που αποφασίστηκε, εδώ έγινε μια σειρά από ταυτόσημες δοκιμές με μόνη διαφορά την γωνία στοίβαξης που κυμάνθηκε από 0° έως και 180°.

Η συνολική εικόνα των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο σχήμα (3.16) απ' όπου προκύπτει σχετικά σημαντική επίδραση της γωνίας στοίβαξης.



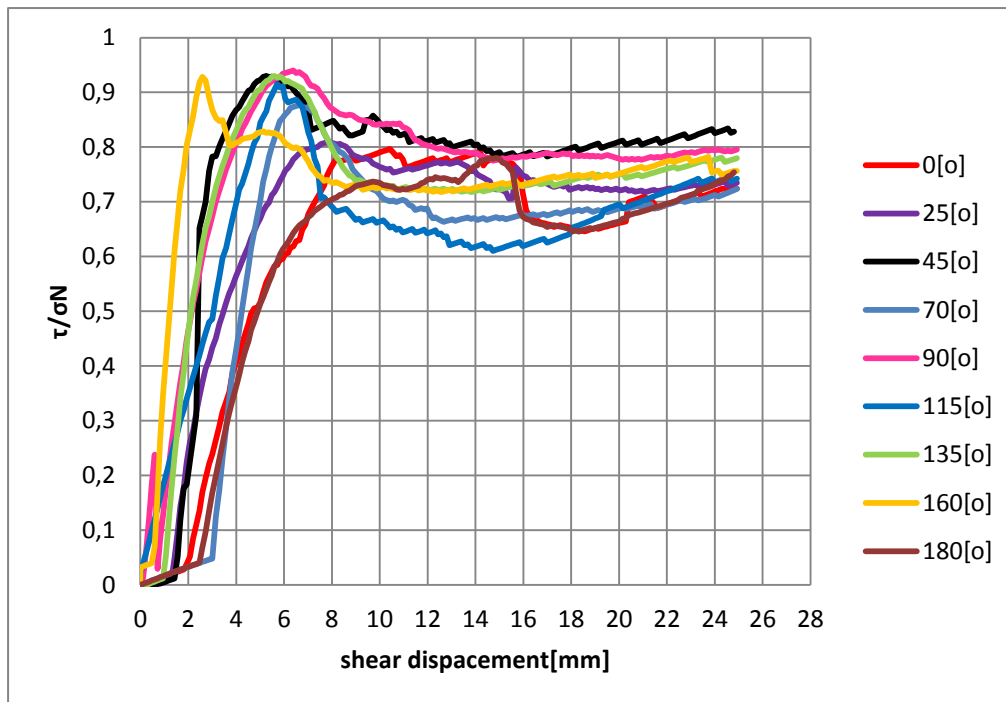
Σχήμα 3. 16 Διάγραμμα διατμητικής τάσης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση για διάφορες γωνίες στοίβαξης σε υγρασία w=115%

Πιο αναλυτικά, στο σχήμα (3.17) συγκρίνονται τα αποτελέσματα μεταξύ 0° , 90° και 180° . Η ισχυρότερη δομή προκύπτει για 90° , ενώ οι 0° και 180° δείχνουν συμβατές, με την 180° να δίνουν λίγο μεγαλύτερη αντοχή, ως αποτέλεσμα της χρήσης ανεστραμμένου δοκιμίου.



Σχήμα 3. 17 Διάγραμμα διατμητικής τάσης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση για γωνίες στοίβαξης 0, 90, 180 μοιρών σε υγρασία $w=115\%$

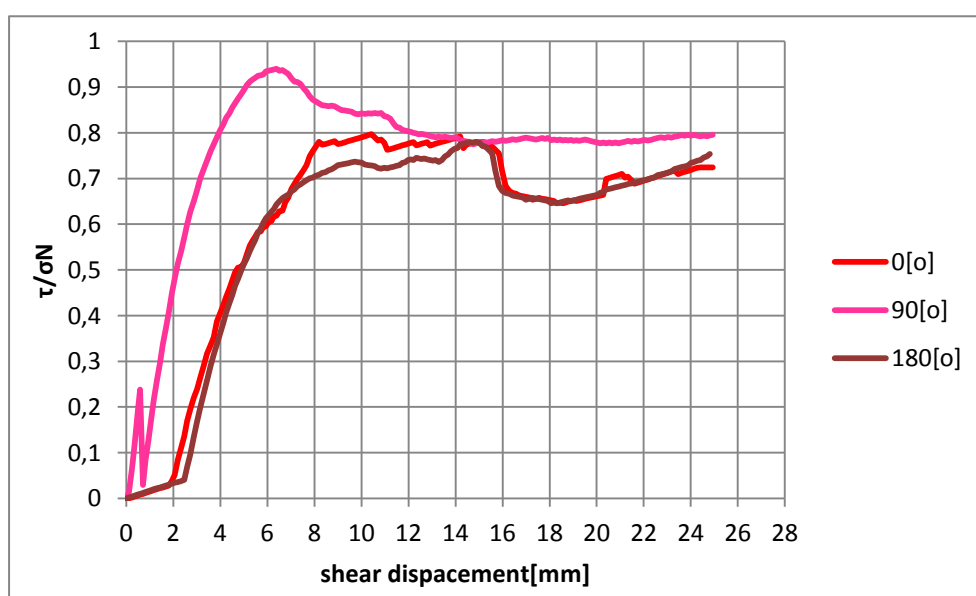
Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στις δοκιμές με υγρασία $w=95\%$ όπως αποτυπώνεται στα σχήματα (3.18, 3.19, 3.20), τόσο ως προς την συνολική συμπεριφορά που περιγράφηκε όσο και αν εστιαστεί στην συμμετρία των 0° , 90° και 180° .



Σχήμα 3. 18 Διάγραμμα διατμητικής τάσης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση για διάφορες γωνίες στοίβαξης σε υγρασία $w=95\%$

Σε πολλές εκ των δοκιμών παρουσιάζεται μια πτώση της τάσης και επαναφορά της με τη συνέχιση της παραμόρφωσης. Μια τέτοια συμπεριφορά δε ως προς την πτώση της τάσης και την επαναφορά δε συνηθίζεται σε αργιλικά εδάφη εκτός σύμφωνα με NAVFAC (1982) αν πρόκειται για κόκκους ιδιαίτερα πεπλατυσμένους ώστε να ολισθαίνουν μεταξύ τους. Εδώ κατά αντιστοιχία μπορούμε να πούμε ότι εξαιτίας της ινώδους ακανθώδους μορφολογίας των κόκκων και της κυψελωτικής (δίκτυο καναλιών) δομής του, συμβαίνει κάτι αντίστοιχο και μάλιστα με «τηλεσκοπική» κίνηση (καταχρηστικός όρος που υπονοεί τον τρόπο της σχετικής κίνησης του ενός κόκκου μέσα στον άλλο), πράγμα που επιβεβαιώνεται από την σχετική παρατήρηση κατά την μικροσκοπική εξέταση δοκιμών από αστοχία. Επίσης ως προς την πτώση της τάσης σε παραλληλισμό με πυροκλαστικά εδάφη αυτή την φορά, αυτή αιτιολογείται από τους Para & Nicotera 2010, που αποδίδουν την πτώση τάσης με την εκτόνωση του νερού των πόρων που συμμετέχει στην διάτμηση, όταν το νερό μεταφέρεται (διοχετεύεται) λόγω αυτής μέσω των καναλιών που έχει ο σκελετός (δομή) των πυροκλαστικών εδαφών (τα πυροκλαστικά εδάφη έχουν παρόμοια εσωτερική δομή με την δομή που σχηματίζει ο Ατταπουλγίτης, εξαιτίας ότι

δημιουργούνται, υπό καθεστώς βίαιης τσιμέντωσης, με διαφορά θερμοκρασίας του περιβάλλοντος που βρίσκονται, με την στιγμή που εκτονώνονται οι ατμίδες και τα αμιδικά προϊόντα έκρηξης των ηφαιστειών και έρχονται σε επαφή μαζί τους, αυτό δημιουργεί έντονο επίμηκες και επικοινωνών πορώδες). Ενώ για την ίδια περίπτωση της παρούσας διερεύνησης (υγρασία) η πτώση τάσης εξαρτάται και από την μεταβολή της υγρασίας σε σχέση με την βαθμίδα φόρτισης, στην συγκεκριμένη βέβαια περίπτωση ο Nicotera (2000) συσχετίζει την περιεχόμενη υγρασία, με την υγρασία των δοκιμίων σε σχέση με τον αντίστοιχο βαθμό κορεσμού και το επηρεασμό τους από την βαθμίδα φόρτισης

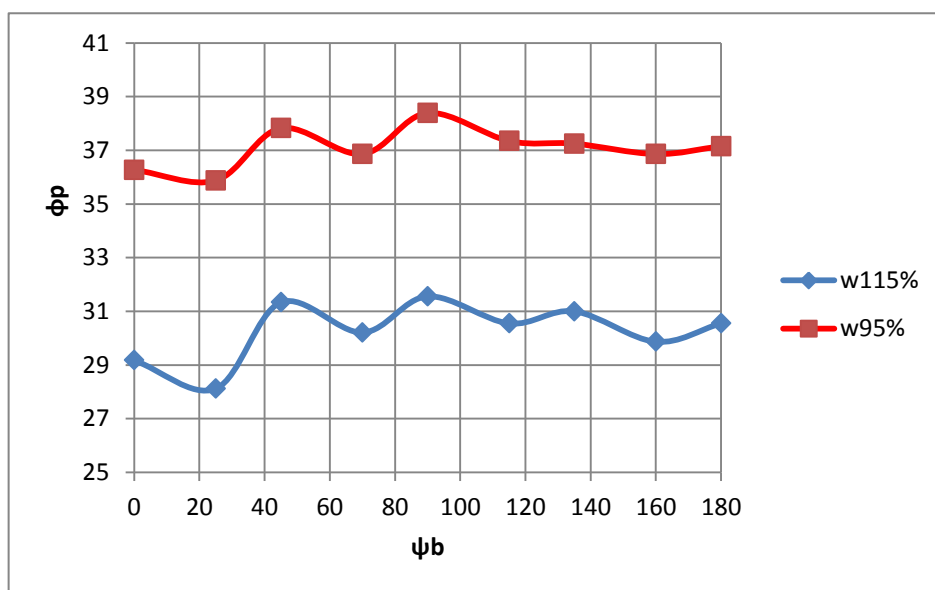


Σχήμα 3. 19 Διάγραμμα διατμητικής τάσης σε συσχέτιση με την διατμητική μετατόπιση για γωνίες στοίβαξης 0, 90, 180 μοιρών σε υγρασία $w=95\%$

. Κλείνοντας εδώ προσωρινά τα περί διάτμησης και των συμπερασμάτων της (μιας και η εκτεταμένη αναφορά περί συμμετρίας θα γίνει στο 4^ο κεφάλαιο) να ειπωθεί ότι η συμπεριφορά που περιγράφηκε πιο πάνω ισχύει γενικά και στις δυο υγρασίες που εξετάστηκαν (95% και 115%), με κάποιες μικροδιαφορές πάντα και απεικονίζονται στο σχήμα (3.19). Μπορεί λοιπόν να τονιστεί ότι όσο πιο κορεσμένο είναι το δοκίμιο τόσο πιο εμφανής και πιο έντονες είναι και οι όποιες διαφοροποιήσεις, που αφορούν

την στοιβαξη σε σχέση με την διάτμηση και τις αντίστοιχες γωνίες. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι από τις αρχικές υψηλές τιμές τόσο της μέγιστης όσο και της παραμένουσας γωνία τριβής, η μείωση του ρυθμού μετατόπισης οδήγησε σε τιμές γωνιών τριβής (37 και 31 μοιρών στις μέγιστες γωνίες για τις αντίστοιχες υγρασίες και 36 και 30 στις παραμένουσες γωνίες), που ταυτίζονται με εκείνες του αρχικού ρυθμού μετατόπισης που επέβαλε ο Oia (1982b , στα αντίστοιχα τριαξονικά πειράματα (30°).

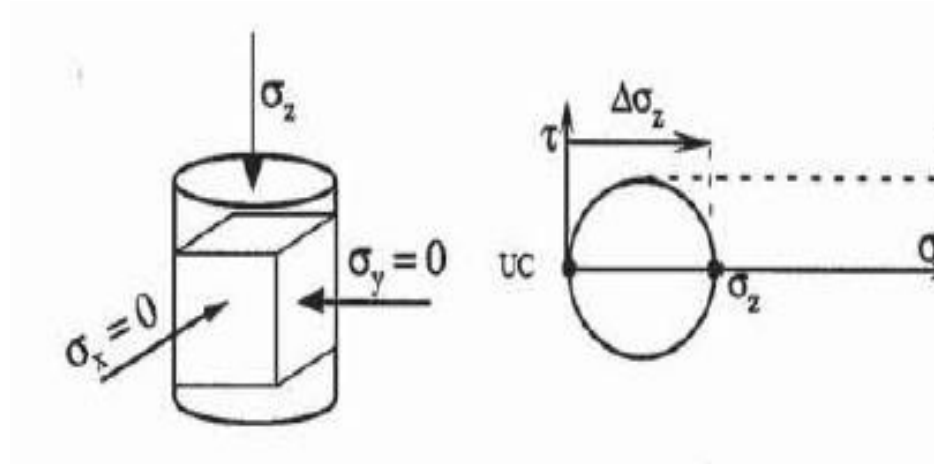
Επίσης όπως αποτυπώνεται (σχήμα 3.20) μπορεί να υποτεθεί πως ότι συμβαίνει μεταξύ των 0-90 σχεδόν το ίδιο συμβαίνει και μεταξύ 90-180 μοιρών, επομένως μπορεί να γίνει αποδεκτό, ότι σε όποιο από τα δύο εύρη γωνιών στοιβαξης δοθεί βάρος θα προκύψει παρόμοια συμπεριφορά. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα είναι έντονα προσεγγιστικό και ισχύει κυρίως για συγκεκριμένες γωνίες, ανά 90° και κυρίως δε στο τόξο μεταξύ 0°-90° όπως και αναμένετο. Αλλά αυτό το συμπέρασμα δεν ισχύει αναγκαστικά για άλλες γωνίες, όπως π.χ. έδειξε η Tong et al (2013) σε αντίστοιχα πειράματα άμμου, και κυρίως μετά τις 90° έως τις 180° , όπως ελάχιστα διαφαίνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα (σχήμα 3.18) .



Σχήμα 3. 20 Διάγραμμα σύγκρισης της μέγιστης γωνίας(peak) αντοχής σε αντιστοίχιση με διάφορες γωνίες στοιβαξης ψ_b και για υγρασίες 95% και 115% αντίστοιχα

3.4. Δοκιμές μονοαξονικής-ανεμπόδιστης θλίψης

Κύρια παραδοχή της συγκεκριμένης δοκιμής αποτελεί ότι, η μέγιστη αξονική αντοχή q_u , ισοδυναμεί με την διπλάσια διατμητική αντοχή στο σημείο αυτό έτσι ώστε να ισχύει $q_u / 2 = S_u$, όπου S_u η αστράγγιστη διατμητική αντοχή, αυτό ισχύει γιατί η συγκεκριμένη δοκιμή (για αυτό και ανεμπόδιστη) σε ανάλυση κυρίων τάσεων λόγω της αξονοσυμμετρίας της δοκιμής ασκείται μόνο η σ_1 κύρια τάση, ενώ οι υπόλοιπες δυο σ_2, σ_3 που μεταξύ τους είναι ίσες λόγω της κυλινδρικής του δοκιμίου, επειδή κατά την διάρκεια της δοκιμής δεν ασκείται καμιά φόρτιση, είναι μηδέν. Επομένως λόγω συμμετρίας, στο τανυστικό μητρώο ασκούνται μόνο δυο διατμητικές συνιστώσες που και μεταξύ τους είναι ίσες. Επομένως έτσι προκύπτει ότι αν η q_u πάρει την θέση της μόνης κύριας τάσης σ_1 που ασκείται, το άθροισμα των δυο διατμητικών ισοδυναμεί με την σ_1 , έτσι αν αντιστοιχηθεί στην S_u η κάθε διατμητική συνιστώσα προκύπτει ότι $q_u = 2 \cdot S_u$ ή $q_u / 2 = S_u$. Στο παρακάτω σχήμα (3.21) φαίνονται οι ασκούμενες κύριες τάσεις σε κυλινδρικό δοκίμιο.



Σχήμα 3. 21 καθεστώς εντατικής κατάστασης μονοαξονικής θλίψης (Bardet 1997)

Με βάση αυτό και με την παρατήρηση ότι το επίπεδο αστοχίας στην συγκεκριμένη δοκιμή είναι $\theta=45^\circ$, εφαρμόζοντας την εξίσωση που ισχύει στην κατάσταση αστοχίας για το επίπεδο αστοχίας,

$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta$, με τα πιο πάνω δεδομένα πάλι προκύπτει ότι $\sigma_1/2 = \tau$.

Για την συγκεκριμένη δοκιμή επίσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 2166-13 , αλλά και σύμφωνα με τους Head (1984), Bardet (1997), Lade (2013), τα κυλινδρικά δοκίμια θα πρέπει να έχουν αναλογία ύψους με διάμετρο 2 έως 2,5 φορές έτσι ώστε $H=(2-2,5)*D$, όπου H το ύψος και D η διάμετρος, στις δοκιμές που έγιναν τα δοκίμια είχαν διάμετρο 36mm και ύψους 72-75 mm. Επίσης ενδεικτικά δοκιμάστηκαν και τρεις κύλινδροι όπως διαμορφώθηκαν κατευθείαν από την συμπύκνωση που δεν ικανοποιούσαν το κριτήριο ύψους διαμέτρου(διαστάσεις $H=140$ mm , $D=101,91$ mm, κοντά δοκίμια) τα οποία έδωσαν διπλάσια αντοχή σε αξονική τάση σ_u , αλλά έδωσαν το ίδια αποτελέσματα θραύσης με το δείγμα των 0° ως προς το επίπεδο στοίβαξης (βλέπε παρακάτω στα συμπεράσματα).

Τα δοκίμια διαμορφώθηκαν με μεταλλικό διακορευτή (extruder), σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί περί διαστάσεων (κυρίως και για την σύγκριση με τις αντίστοιχες τριαξονικές δοκιμές), με προσθήκη λίπανσης για την αποφυγή της έντονης διατάραξης, ενώ χρησιμοποιήθηκαν τα ανάλογα πλαίσια, μετρητές φορτίου και παραμόρφωσης που διαθέτει το εργαστήριο γεωυλικών. Τέλος το ποσοστό υγρασίας των δοκιμών ήταν στην περιοχή πιο πάνω από το όριο πλαστιμότητας και συγκεκριμένα σε ποσοστό 115%κ.β .

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις εκτίμησης των σημαντικών μεγεθών σύμφωνα με την βιβλιογραφία, και συγκεκριμένα:

για την αξονική παραμόρφωση $[\epsilon_1]$ (αδιάστατο)

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (3.4)$$

όπου

$[L_o]$ είναι το αρχικό ύψος σε [mm], και

$[\Delta L]$ η αξονική μετατόπιση μετρούμενη με μηκυσιόμετρο [mm].

για την επιφάνεια φόρτισης $[A]$ [mm²]

$$A = \frac{A_o}{1 - \varepsilon_1} \quad (3.5)$$

όπου

$[A_o]$ είναι η αρχική επιφάνεια φόρτισης σε [mm²] και

$[A]$ η επιφάνεια φόρτισης για το κάθε φορτίο στην συγκεκριμένη στιγμή της παραμόρφωσης σε [mm²].

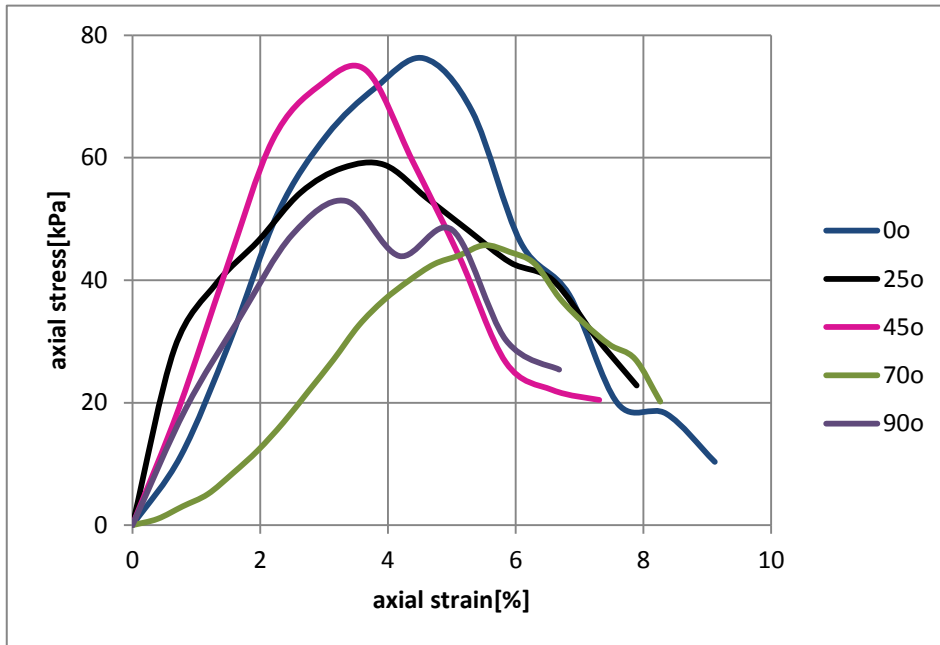
ενώ για την αντοχή σε θλίψη $[q_u]$ σε [kPa]

$$q_u = \sigma_{c,\max} = \frac{P_{\max}}{A} \quad (3.6)$$

όπου

$[P]$ η μέτρηση του φορτίου σε [kN]

Σύμφωνα με το σκεπτικό αυτό για την εξέταση της ανισοτροπίας και της συμπεριφοράς της δομής παρασκευάστηκαν δοκίμια στις 0, 25, 45, 70 και 90 μοίρες γωνίας στοίβαξης και χρησιμοποιώντας τις ανωτέρω σχέσεις προέκυψαν τα αποτελέσματα στο παρακάτω σχήμα (3.22). Λόγω συμμετρίας της δοκιμής και των αποτελεσμάτων από τις δοκιμές απευθείας διάτμησης, δεν ήταν αναγκαίος ο έλεγχος για γωνίες στοίβαξης μεγαλύτερες από 90ο.



Σχήμα 3. 22 Διάγραμμα αξονικής τάσης αξονικής παραμόρφωσης σε διάφορες γωνίες στοιβαξης ψ_b

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά διακρίνονται τρεις περιοχές αντοχής, μια των 0 και των 45 μοιρών, μια περιοχή στις 90 και 25 μοιρών, και μια μόνη των 70 μοιρών γωνίας στοιβαξης. Στην 1^η περιοχή μια εντοπίζεται αντοχή περίπου τις τάξης των 80 kPa, στην 2^η περιοχή μια αντοχή της τάξης των 55 kPa, ενώ στην 3^η περίπου τα 45 kPa. Αν στατιστικά και MONO (προτιμάται να παίρνονται όρια των ακραίων τιμών) χρησιμοποιηθούν οι ακραίες περιοχές μας δίνει μια τάξη των 62,5 kPa που σχεδόν ταυτίζεται με το όριο αντοχής (Peak) του δοκιμίου των 25° (58,8 kPa). Με το σκεπτικό αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί ως χαρακτηριστική τιμή αντοχής. Επίσης διαπιστώνεται ότι το δοκίμιο των 70° έχει μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά στον κλάδο της γραμμικής ελαστικότητας της καμπύλης τάσης- παραμόρφωσης σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια. Τέλος αξίζει όπως αποτυπώνεται στο σχήμα (3.24) η μεταβολή του τρόπου στοιβαξης μας δίνει μια συγκεκριμένη ακολουθία ανισοτροπίας και αντίστοιχα, τρόπο θραύσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι το δοκίμιο στις 0° μας έδωσε ένα τελείως χαρακτηριστικό εφελκυστικό τύπο θραύσης (σχεδόν απόλυτα

παράλληλο με τον άξονα επιβολής της φόρτισης και σχεδόν κάθετα στο επίπεδο στοίβαξης), ενώ αντίστοιχα στις 90° εμφανίζεται ένας χιαστή συμμετρικός τύπος θραύσης. Κλείνοντας να τονιστεί ότι το ίδιο φαινόμενο του εφελκυστικού τύπου θραύσης δεν παρατηρείται μόνο στα δοκίμια των 0° διαμέτρου 36 mm, αλλά και σε δοκίμες σε αυτούσιους κυλίνδρους (που ούτος ή άλλως αναμενόταν 0° στοίβαξη των ινών) διαμέτρου 101,92 mm(σχήμα 3.23), ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι η εφελκυστική θραύση-ρωγμή αναπτύχθηκε συμμετρικά, ακτινικά και περιμετρικά της διαμέτρου των δοκιμίων. Από τα αποτελέσματα που καταγράφονται και σε συσχέτιση με την βιβλιογραφία (Bardet 1997) οι τιμές είναι παρόμοιες με εκείνες που παρατηρούνται σε φυσικής απόθεσης αργίλους, υψηλής πλαστιμότητας και ευαισθησίας.



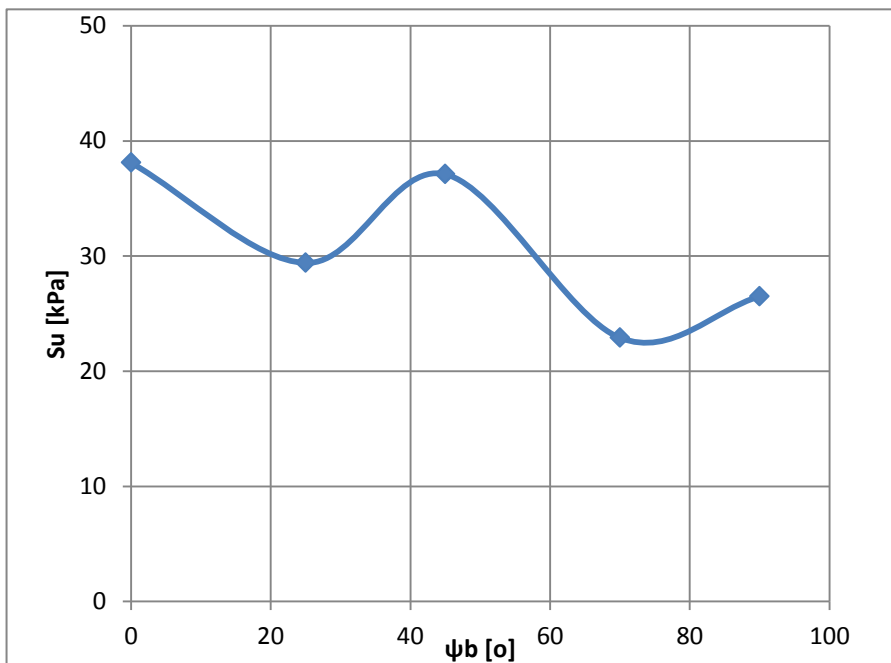
Σχήμα 3. 23 δοκίμιο Ατταπουλγίτη με εφελκυστική θραύση σε δοκίμιο διαμέτρου 101.92 mm

W=115%



Ψ_b	[o]	0	25	45	70	90
Su MAX	kPa	38,1	29,4	37,1	22,9	26,5

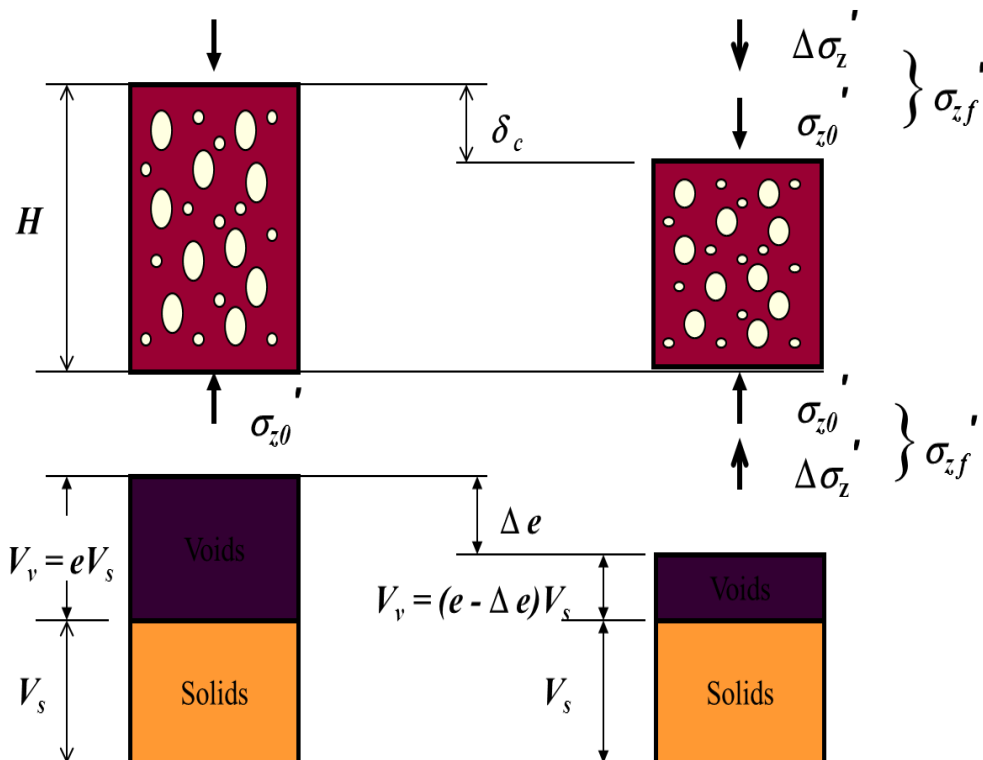
Σχήμα 3. 24
αποτελέσματα
θραύσης με
διαφορετικό
τρόπο στοίβαξης



3.5. Δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης

Οι δοκιμές οιδημέτρου αποτελούν κλασσικές δοκιμές που δίνουν εικόνα για την συμπιεστότητα ενός γεωυλικού και κατ' επέκταση του μέτρου ελαστικότητας του αργίλων, ενώ ταυτόχρονα δίνουν την πληροφορίες για την ιστορία της φόρτισης του. Επίσης ένα άλλο πολύ σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης της στερεοποίησης. Εδώ όλα αυτά θα διερευνηθούν και ως προς την επίδραση της γωνίας στοίβαξης.

Βασική παράμετρος που μετράται στην εν λόγω δοκιμή είναι ο λόγος κενών (voids ratio) $[e]$ και ουσιαστικά η μεταβολή που δέχεται η εσωτερική δομή του γεωυλικού, λόγω μονοδιάστατης συμπίεσης, από ορθή τάση σ_v (συμπιεστότητα), και φυσικά πάντα εξαρτώμενο από το χρόνο ολοκλήρωσης που συμβαίνει αυτό το φαινόμενο (στερεοποίηση), όπου παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα (3.25).



Σχήμα 3. 25 Ορισμοί σημαντικών μεγεθών και βασικές αρχές μονοδιάστατης στερεοποίησης εδαφών (Geotechnical Engineering Laboratory Civil Engineering - Texas Tech University 2012)

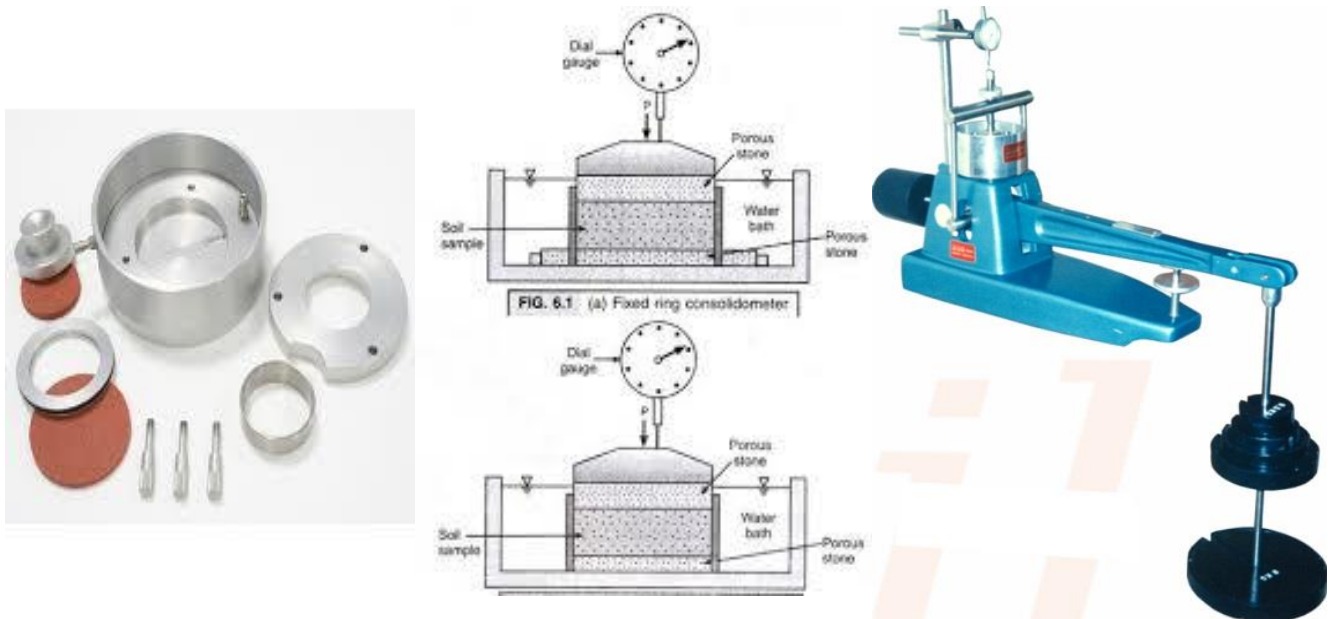
Βασικές παραδοχές της θεωρίας στερεοποίησης του Terzaghi (1943) που επεξηγούν τις μετρήσεις σε οιδήμετρο είναι οι κάτωθι

- Το έδαφος είναι κορεσμένο , ισότροπο και ομογενές
- Η στράγγιση είναι διπλή (άνω και κάτω)
- Ισχύει ο Νόμος Darcy
- Η ροή είναι μονοδιάστατη (προς τα άνω και κάτω)
- Το έδαφος και το νερό είναι ασυμπίεστα
- Υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της μεταβολής του όγκου και των ενεργών τάσεων, έτσι ώστε ο συντελεστής διαπερατότητας και η συμπίεστότητα του όγκου να παραμένουν σταθεροί καθ' όλη την φόρτιση
- Υπάρχει μια μοναδική σχέση μεταξύ του λόγου κενών και της ενεργού τάσης

Στην συγκεκριμένη δοκιμή οι ανωτέρω παραδοχές ισχύουν καθ' ολοκληρία, ανά βαθμίδα φόρτισης (έστω πχ ο συντελεστής στερεοποίησης μπορεί να αλλάξει τιμή για μικρές και μεγάλες τάσεις).

Η δοκιμή πραγματοποιείται φορτίζοντας ένα κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο επιφάνειας περίπου 4.500 mm^2 , με διάμετρο περίπου 75 mm , και ύψους 20 mm , αναλογία δηλαδή ύψους διαμέτρου περίπου 1 προς 3,75-4, στο οποίο είναι προσαρμοσμένο μεταλλικός συμπαγής δακτύλιος πάχους περίπου 20 mm έτσι ώστε, από την κάθετη στην επιφάνεια του δοκιμίου επιβαλλόμενη τάση (ορθή), οι πλευρικές παραμορφώσεις του δοκιμίου να είναι μηδέν, ώστε να εξασφαλίζεται η μονοδιάστατη συμπίεση του δείγματος, και να ισχύουν οι παραδοχές του Terzaghi.

Ο μεταλλικός δακτύλιος προσαρμόζεται σε κατάλληλο κελί που εμπεριέχει νερό, έτσι ώστε πάντα το δοκίμιο μας να 'ναι κορεσμένο, ενώ στις ελεύθερες επιφάνειες που φορτίζονται, προσαρμόζονται πορόλιθοι, για να επιτυγχάνεται η ομαλή ροή και η στράγγιση λόγω της εκτόνωσης του νερού που προκύπτει από την μεταβολή όγκου. Τέλος η επιβολή της ορθής τάσης συντελείται με την ακμή φόρτισης (έμβολο) επί του κελιού (κατανομή ομοιόμορφη προς την επιφάνεια του δοκιμίου), ενώ η προσθήκη κατάλληλης δύναμης επί της ακμής γίνεται μέσω βαρών και κατάλληλου πλαισίου με μοχλοβραχίονα, με ρυθμισμένα βάρη που αναρτώνται επάνω στον εν λόγω σύστημα πλαισίου-ακμής. Μέρη του εξοπλισμού και της συσκευής παρατίθενται στο σχήμα (3.26)



Σχήμα 3. 26 κελί συμπιεσόμετρο διάταξη φόρτισης και αρχής λειτουργίας του κελιού και του οιδημέτρου συνολικά

Η διαμόρφωση των δοκιμίων με την προσαρμογή του δακτυλίου, ακολουθεί την μεθοδολογία, που περιγράφεται από το πρότυπο ASTM D 2435/ m-11 και την γενικότερη βιβλιογραφία από τους Head (1984), Bardet (1997), Lade (2013).

Επίσης για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις εκτίμησης:

Για την αρχική ξηρή πυκνότητα δείγματος,

$$\rho_d = \frac{M_d}{V_o} \quad (\text{g/cm}^3 \text{ ή } \text{kg/m}^3) \quad (3.7)$$

όπου

[V_o] ο αρχικός όγκος δείγματος, (cm^3 ή m^3)

που προκύπτει από την γεωμετρία $V_o = [(\pi \cdot D^2)/4] \cdot H_o$ (εξίσωση 3.8)

Για το όγκο στερεών,

$$V_s = \frac{M_d}{G\rho_w} \quad (\text{cm}^3 \text{ ή } \text{m}^3) \quad (3.9)$$

όπου

[G] το ειδικό βάρος κόκκων και

[ρ_w] η πυκνότητα του νερού ($1,0 \text{ g/cm}^3$ ή Mg/m^3).

Για το ισοδύναμο ύψος δοκιμίου,

$$H_s = \frac{V_s}{A} = \Delta\chi, \quad (\text{cm}) \quad (3.10)$$

όπου

[$\Delta\chi$] η μετρούμενη μετατόπιση λόγω της κατακόρυφης παραμόρφωση του δοκιμίου

Για το λόγο κενών

$$e_o = \frac{H_o - H_s}{H_s} \quad (3.11)$$

όπου

[H_o] το αρχικό ύψος δοκιμίου (cm)

[H_s] το ισοδύναμο ύψος δοκιμίου λόγω παραμόρφωσης (cm)

Για το βαθμό κορεσμού,

$$S_o = \frac{M_{T_o} - M_d}{A\rho_w(H_o - H_s)} \times 100 \quad (3.12)$$

Όπου ,

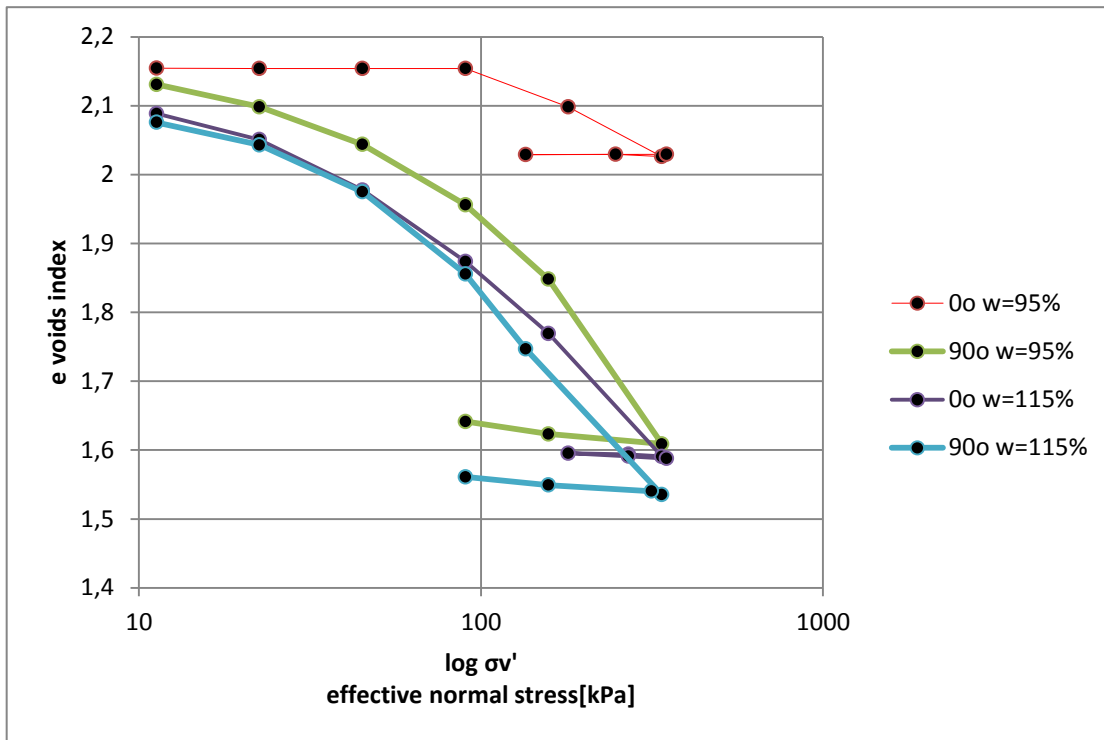
[M_d] η ξηρή μάζα του δείγματος (g ή kg)

[M_{rs}] η υγρή μάζα του δείγματος πριν την δοκιμή (g ή kg)

[A] η επιφάνεια του δοκιμίου

[ρ_w] η πυκνότητα του νερού

Σύμφωνα με το σκεπτικό για την εξέταση της ανισοτροπίας και την επίδραση της δομής παρασκευάστηκαν δοκίμια για γωνίες στοίβαξης 0° , 90°. Άλλες γωνίες στοίβαξης δεν μπορούσαν να παρασκευαστούν με υψηλή ποιότητα δείγματος. Έτσι σε αυτές τις γωνίες στοίβαξης , διαμορφώθηκαν και εξετάστηκαν δοκίμια, σε δυο διαφορετικές υγρασίες, μια υγρασία χαμηλότερα από το δείκτη πλαστικότητας με περιεχόμενη υγρασία 95% κ.β. νερό και με μια υγρασία περίπου στα 115% κ.β νερού. Σε αυτά τα τέσσερα (4) δοκίμια εκτελέστηκαν δοκιμές συμπίεσομέτρου με τα αποτελέσματα να συνοψίζονται στο σχήμα (3.27)



Σχήμα 3. 27 Δοκιμές συμπίεσομέτρου για υγρασίες $w=95\%$ και $w=115\%$ για γωνίες στοίβαξης $\psi_b 0^\circ$ και 90°

Από όλες τις δοκιμές προέκυψαν οι παρακάτω τιμές (σχήμα 3.28) σχετικά με τον δείκτη συμπίεστούτητας C_c , και τον δείκτη στερεοποίησης C_v .

δείκτης συμπίεστούτητας

συντελεστής στερεοποίησης

C_c		
$w(\%)$	0°	90°
95	0,222	0,723
115	0,540	0,618

$C_v(\text{mm}^2/\text{min})$		
$w(\%)$	0°	90°
95	0,352	1,11
115	2,080	2,954

Σχήμα 3. 28 Συγκεντρωτικός πίνακας για τον δείκτη συμπίεστούτητας και στερεοποίησης για διαφορετικές υγρασίες 95% και 115% και γωνίες στοίβαξης 0° και 90°

Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα και τα γραφήματα των συγκεκριμένων δοκιμών, διαπιστώνεται ότι η ανισοτροπία του υλικού είναι πιο έντονη στις δυο διαφορετικές στοιβάξεις σε χαμηλή υγρασία(95%), από ότι σε υψηλές υγρασίες. Επίσης από ότι φαίνεται στο σχήμα (3.27), η δοκιμή της στοιβάξης στις 0° έχει μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά από τις υπόλοιπες. Όμως η συγκεκριμένη ταυτίζεται , ακόμα και σαν αποτέλεσμα ως προς τον δείκτη συμπίεστότητας, με αντίστοιχη δοκιμή που η στοιβάξη (άγνωστη) έχει προκύψει από την ίδια την φύση(όχι από την εργαστηριακή συμπύκνωση όπως εδώ), με βάση τις δοκιμές που παραθέτει ο Ola (1982b) για τον Ατταπουλγίτη του Sokoto. Επίσης ένα άλλο σημαντικό είναι πως μεταπίπτει η δομή από την μια κατάσταση υγρασίας στην άλλη λόγω στοιβάξης. Για παράδειγμα από την υγρασία στα 95% στις 0° καταλήγουν στον ίδιο λόγο κενών για υγρασία με 115% και με διαφορετικό προσανατολισμό (90°), και παρότι ξεκινούν με λίγο διαφορετικό αρχικό λόγο κενών. Η πιο χαρακτηριστική εικόνα της ανισοτροπίας, παρουσιάζεται στις δοκιμές για τις δυο διαφορετικές γωνίες στοιβάξης, για την υγρασία των 115% κ.β. νερού. Τέλος οι τιμές του δείκτη C_v , δεν διαφέρουν σαν επίπεδο τάξης από αυτές του Ola (1982b) που είναι 10^{-4} cm²/sec, αλλά είναι διαφορετικές ανάλογα με τη γωνία στοιβάξης και την υγρασία και κυμαίνονται από $0,5-4 * 10^{-4}$ cm²/sec, βλέπε σχήμα (3.28). Η διαφοροποίηση αυτή αν συγκριθεί με τον τρόπο στοιβάξης , τότε παρατηρείται ότι πιο γρήγορα και πιο εύκολα θα στερεοποιηθεί μια δομή που ο προσανατολισμός της είναι παράλληλος με την ροή στράγγισης από ότι η εγκάρσια. Εγκάρσια έχουμε στις 0° (οριζόντια στοιβάξη) παράλληλη στις 90° (κατακόρυφη στοιβάξη).

3.6. Δοκιμές τριαξονικής φόρτισης

Οι τριαξονικές δοκιμές πλέον έχουν πάρει την θέση ως της κλασσικής δοκιμής ελέγχου και διερεύνησης των γεωυλικών. Αυτό συμβαίνει διότι με την συγκεκριμένη δοκιμή μπορεί να συνδυαστούν δοκιμές, φορτίσεις και διαδικασίες, όπως της στερεοποίησης (και μάλιστα ισοτροπικά ή και ανισοτροπικά σε τρεις διαστάσεις), της διάτμησης από εφελκυσμό και συμπίεση (ουσιαστικά πάλι ανισοτροπική φόρτιση), ενώ μπορούν να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονες μετρήσεις όγκου και πίεσης πόρων (σημαντικό στοιχείο για την αναγωγή σε ενεργές τάσεις) κ.α.

Η δοκιμή που πρωτοαναπτύχθηκε στην δεκαετία του 1960 από τους Bishop & Henkel (υπάρχει και συγκεκριμένη τύπου συσκευή με το όνομα αυτών) στην συνέχεια εξελίχθηκε, τελειοποιήθηκε αλλά και επεκτάθηκε σε καινούργιων τύπων δοκιμές και συσκευές.

Η όλη δοκιμή στηρίζεται σε δυο παράγοντες οι οποίοι είναι και οι πιο σημαντικοί για τις μετρούμενες παραμέτρους, όπως επίσης και τα εξαγόμενα μεγέθη που στη συνέχεια μπορούν να υπολογιστούν (φυσικά ή μηχανικά, όπως ο λόγος κενών $[e]$, οι ενεργές τάσεις, η υδροπερατότητα κλπ). Ο πρώτος έγκειται στην εφαρμογή των επιπλέον φορτίσεων στους υπόλοιπους δυο άξονες (στο έναν υπήρχε ήδη με την μονοαξονική-ανεμπόδιση), η οποία εφαρμόζεται μέσω ειδικού κελιού στο οποίο τοποθετείται το δοκίμιο, και περιβάλλεται με νερό. Μάλιστα αυτή η πίεση η οποία είναι και ολόπλευρη, εξασφαλίζει την ισοτροπική στερεοποίηση του δοκιμίου, ενώ, αν εφαρμοστεί επιπλέον αξονική τάση επιτυγχάνεται φόρτιση και στους τρεις κύριους άξονες (κύριες τάσεις), μια σ_1 αξονική και την $\sigma_2 = \sigma_3$ λόγω της ολόπλευρης πίεσης (μιας και το δοκίμιο είναι κυλινδρικό-συμμετρία). Ο δεύτερος παράγοντας είναι η μέτρηση της πίεσης πόρων και η μόνωση που προσφέρει η μεμβράνη που περικλείει το δοκίμιο όταν τοποθετείται μέσα στο κελί. Αυτό απ την μια βοηθά να ελέγχονται οι όποιες καταστάσεις συντελούνται στο ίδιο το δοκίμιο από την επίδραση των

εξωτερικών φορτίσεων (κελιού και αξονικής τάσης) μετρώντας την πίεση πόρων και τις ογκομετρικές παραμορφώσεις, ενώ από την άλλη μπορούν να προσαρμοστούν και να επιβληθούν διάφορα επίπεδα ενεργών τάσεων.

Επομένως η τριαξονική δοκιμή αποτελεί τόσο ένα είδος συνδυαστικής δοκιμής η οποία περιλαμβάνει τις βασικές αρχές της στερεοποίησης όπως περιγράφηκαν αλλά και της μονοαξονικής, όσο και ως ένα είδος πολυδιάστατων φορτίσεων (εξ ου και όρος τριαξονική). Υπογραμμίζεται εδώ ότι ο όρος είναι καταχρηστικός κατά μία έννοια γιατί στην πραγματικότητα λόγω της αξονοσυμμετρίας του κυλινδρικού δοκιμίου υπάρχει η παραδοχή ότι $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma(\text{κελιού})$.

Υπάρχουν πολλοί τύποι δοκιμών που μπορούν να εφαρμοστούν με την συγκεκριμένη διαδικασία, όπου η πλούσια βιβλιογραφία μπορεί να τις απαριθμήσει και να δώσει συγκεκριμένες οδηγίες, ανάλογα το με είδος του υλικού (λεπτόκοκκα ή αμμώδη), ανάλογα με το είδος της στερεοποίησης (ισοτροπική ή ανισοτροπική) και το αν είναι επιθυμητή ή όχι η στερεοποίηση πριν την διάτμηση, και ανάλογα με το είδος της διάτμησης (στραγγιζόμενες ή αστράγγιστες συνθήκες).

Έτσι επιλέχθηκε η δοκιμή ισότροπης στερεοποίησης και αστράγγιστης διάτμησης. Τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν κατάλληλα για αυτό τον τύπο δοκιμών είναι διαμορφωμένα κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 36mm και ύψους 72mm, με εξαγωγή από τον αρχικό κύλινδρο παρασκευής μέσω κυλινδρικού διακορευτή (extruder). Η αναλογία των διαστάσεων ικανοποιεί την συνθήκη σύμφωνα με τα πρότυπα και την βιβλιογραφία της δοκιμής (ASTM D 4767-95, Bardet 1997, Head 1998 κ.α.). Στο δοκίμιο προσαρμόζεται κατάλληλα η μεμβράνη και τοποθετείται στην βάση του κελιού όπου υπάρχει πορόλιθος για την ομαλή ροή της στράγγισης, ενώ στο δοκίμιο, αφού τοποθετηθεί στην επάνω πλευρά του πορόλιθος και η κεφαλή φόρτισης (top cap), σφραγίζεται και μονώνεται με ελαστικούς δακτυλίους (o-ring), όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (3.29). Ταυτόχρονα κλείνεται το κελί, συμπληρώνεται το

νερό και αφού όλες οι παροχές είναι συνδεδεμένες, απαιρωμένες και κορεσμένες ξεκινάει η διαδικασία (κορεσμός, έλεγχος παραμέτρου B, στερεοποίηση, διάτμηση). Η στερεοποίηση επιτυγχάνεται κυρίως με την χρήση της ισόπλευρης πίεσης, ενώ η διάτμηση με την επιπλέον αξονική [q] φόρτιση. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το τέλος της στερεοποίησης ελέγχεται όχι μόνο με την σταθεροποίηση της φόρτισης του κελιού μέσω της μέτρησης της πίεσης πόρων, αλλά και με την σταθεροποίηση της μεταβολής του όγκου (πρέπει να ισορροπήσουν και τα δυο για να θεωρηθεί ότι έχει επιτευχθεί η στερεοποίηση, λόγω της υστέρησης της εκτόνωσης της πίεσης πόρων σε σχέση με την ογκομετρική τροπή στον χρόνο εξέλιξης της δοκιμής).

Για την επεξεργασία των μετρήσεων της τριαξονικής φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω σχέσεις:

οι ογκομετρικές τροπές-παραμορφώσεις $[\varepsilon_v]$ υπολογίζονται από:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_o} \quad (3.13)$$

όπου

$[\Delta V]$ η μεταβολή του όγκου του δοκιμίου μετρούμενη σε $[\text{mm}^3 \text{ ή cc}]$,

$[V_o]$ ο αρχικός όγκος που προκύπτει από τις διαστάσεις και την γεωμετρία του δοκιμίου $[\text{mm}^3]$

Η αξονική παραμόρφωση, $[\varepsilon_1]$ δίνεται από την σχέση:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{H_c} \quad (3.14)$$

όπου

[ΔH] η μεταβολή του ύψους (μετριέται ουσιαστικά πάνω στην μετατόπιση της κυψέλης ,

[Hc] το αρχικό ύψος (μετά την στερεοποίηση)

Η επιφάνεια του δοκιμίου [A] ανά αξονικό φορτίο , δίνεται από την σχέση:

$$A = \frac{A_c}{(1 - \varepsilon_1)} \quad (3.15)$$

όπου

[Ac] είναι η μέση επιφάνεια του δοκιμίου μετά την στερεοποίηση (mm²).

Η ογκομετρική παραμόρφωση [ε_v] προκύπτει από την γραμμική μεταβολή του όγκου προς τον αρχικό όγκο

$$\Delta V/V_0 = \varepsilon_1 + 2 \varepsilon_3 \quad (3.16)$$

όπου ε₃ η μέση διαμετρική παραμόρφωση

Η ορθή τάση δίνεται από τον τύπο σ = P/A όπου

[P] σε (kN) η δύναμη πιστονιού μετρούμενη στον δυναμοδακτύλιο και [A] η μέση επιφάνεια του δοκιμίου

Η μέγιστη κύρια τάση σ₁ = ορθή τάση + τάση κυψέλης δηλαδή

$$\sigma_1 = P/A + \sigma_3 \text{ σε (kPa)} \quad (3.17)$$

Η ελάχιστη κύρια τάση σ₃ = πίεση κυψέλης εκφρασμένη σε (kPa)

Η διαφορά κυρίων τάσεων (deviatoric stress),

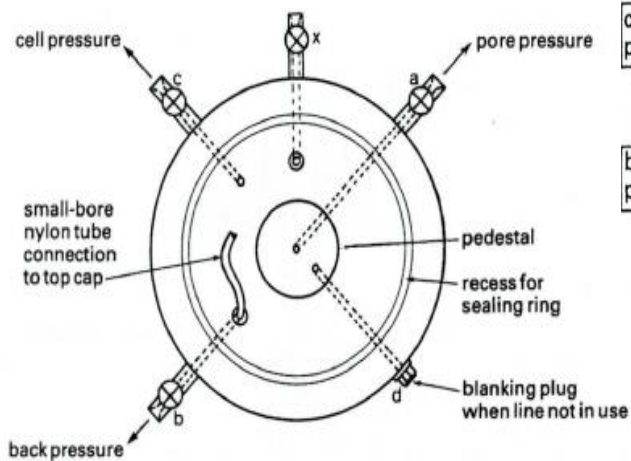
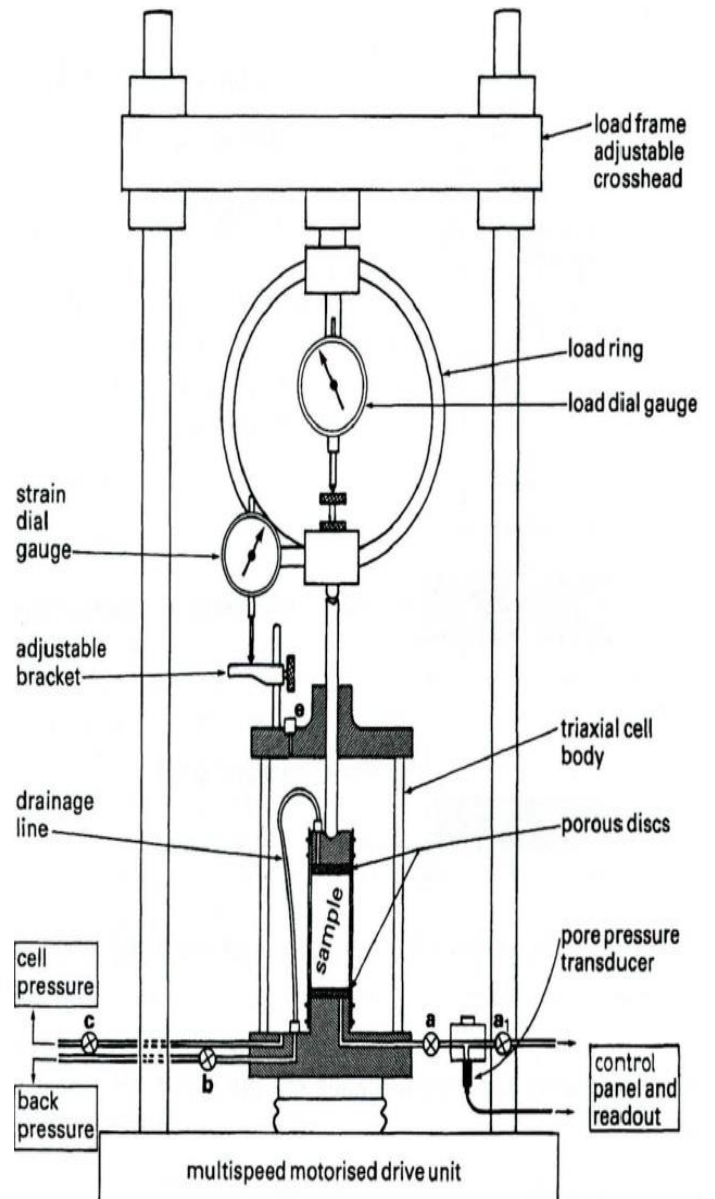
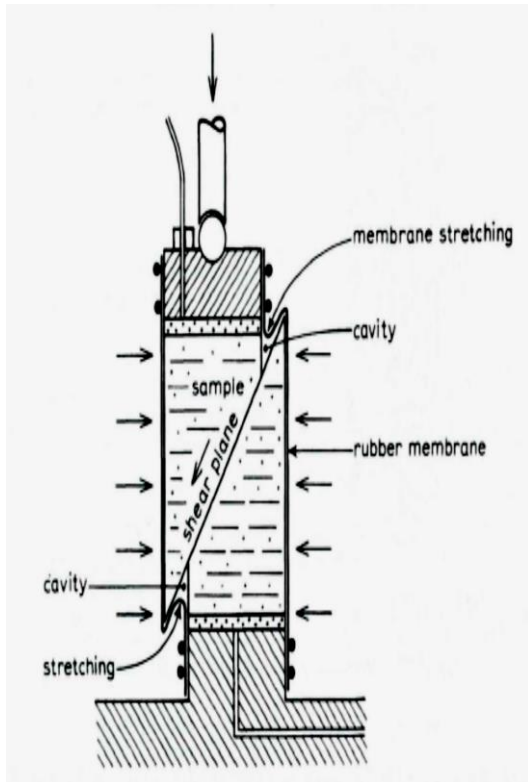
$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \text{ σε (kPa)} \quad (3.18)$$

Η ενεργή τάση είναι

$$\sigma_1' = \sigma_1 - \rho_w \sigma_e \text{ (kPa)}$$

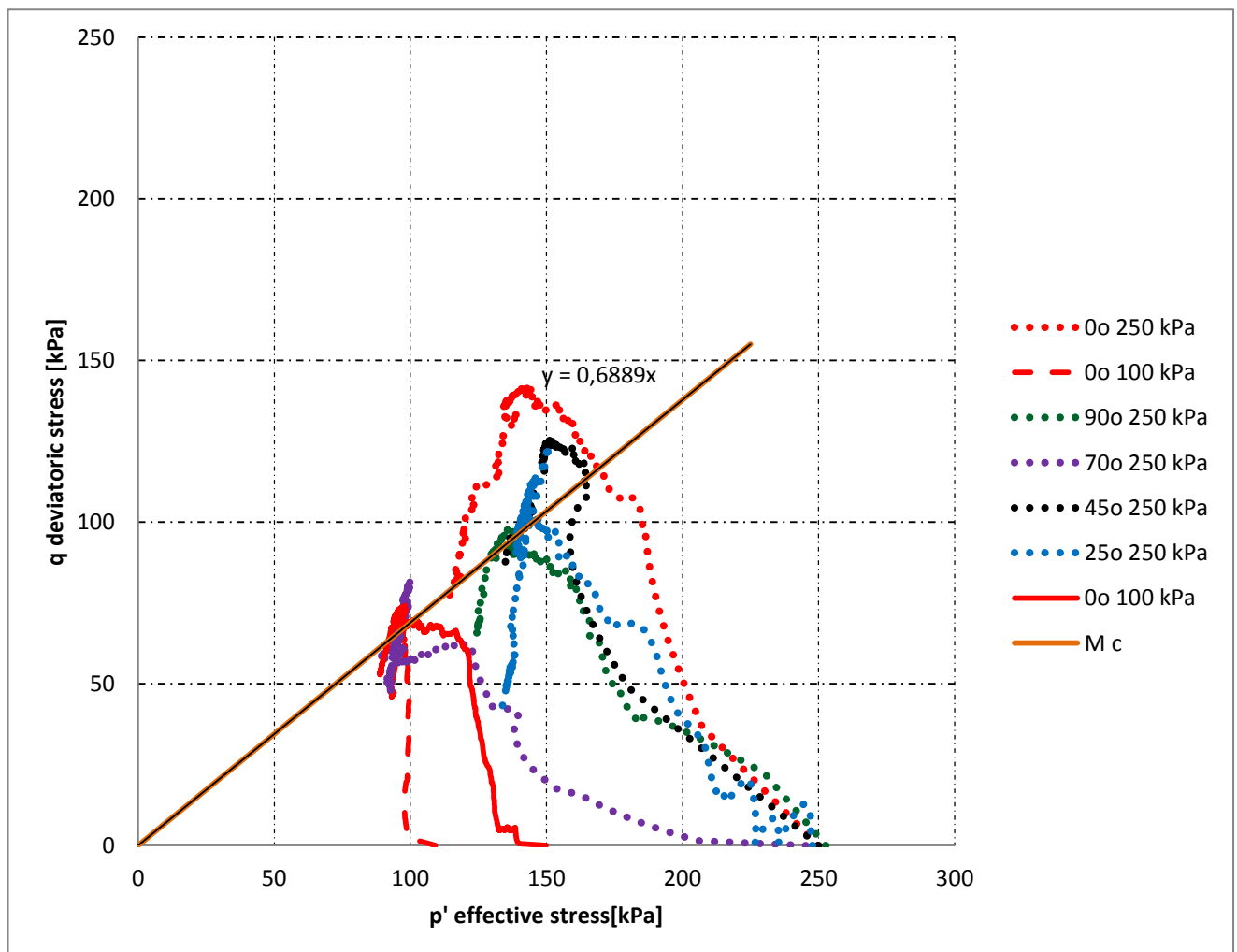
(3.19)

(τάση φορτίου +πίεση κυψέλης –πίεση πόρων)



Σχήμα 3. 29 διάταξη τριαξονικής συσκευής δεξιά, διάταξη κελιού κάτω αριστερά, λεπτομέρειες δοκιμής πάνω αριστερά(Head 1998)

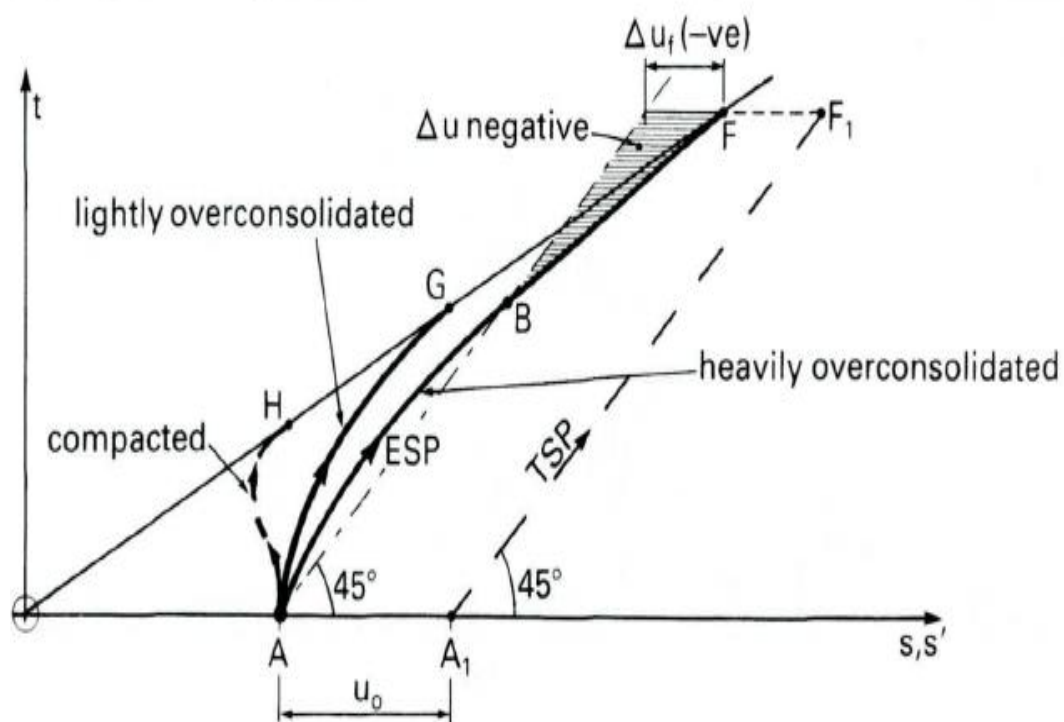
Σύμφωνα με το σκεπτικό για την εξέταση της ανισοτροπίας και της συμπεριφοράς της δομής παρασκευάστηκαν δοκίμια με γωνίες στοίβαξης από 0° έως 90° αντίστοιχα, μιας και από ότι διαπιστώθηκε υπάρχει συμμετρία ανά 90° . Έτσι σε αυτές τις γωνίες στοίβαξης, διαμορφώθηκαν και εξετάστηκαν δοκίμια σε υγρασία περίπου στα 115% κ.β νερού(βλέπε παρασκευή δοκιμών πιο πάνω), μιας και έχει εξεταστεί και διαπιστωθεί ότι επίδραση της γωνίας στοίβαξης είναι παρόμοια σε διαφορετικές υγρασίες, επιλέχθηκε δε η εξέταση να γίνει στην πιο κορεσμένη κατάσταση και σε ρυθμό παραμόρφωσης κοντά σε αυτές του Oia (1982b) και συγκεκριμένα όπως υπολογίστηκε από τις δοκιμές στο 0,07%/min .



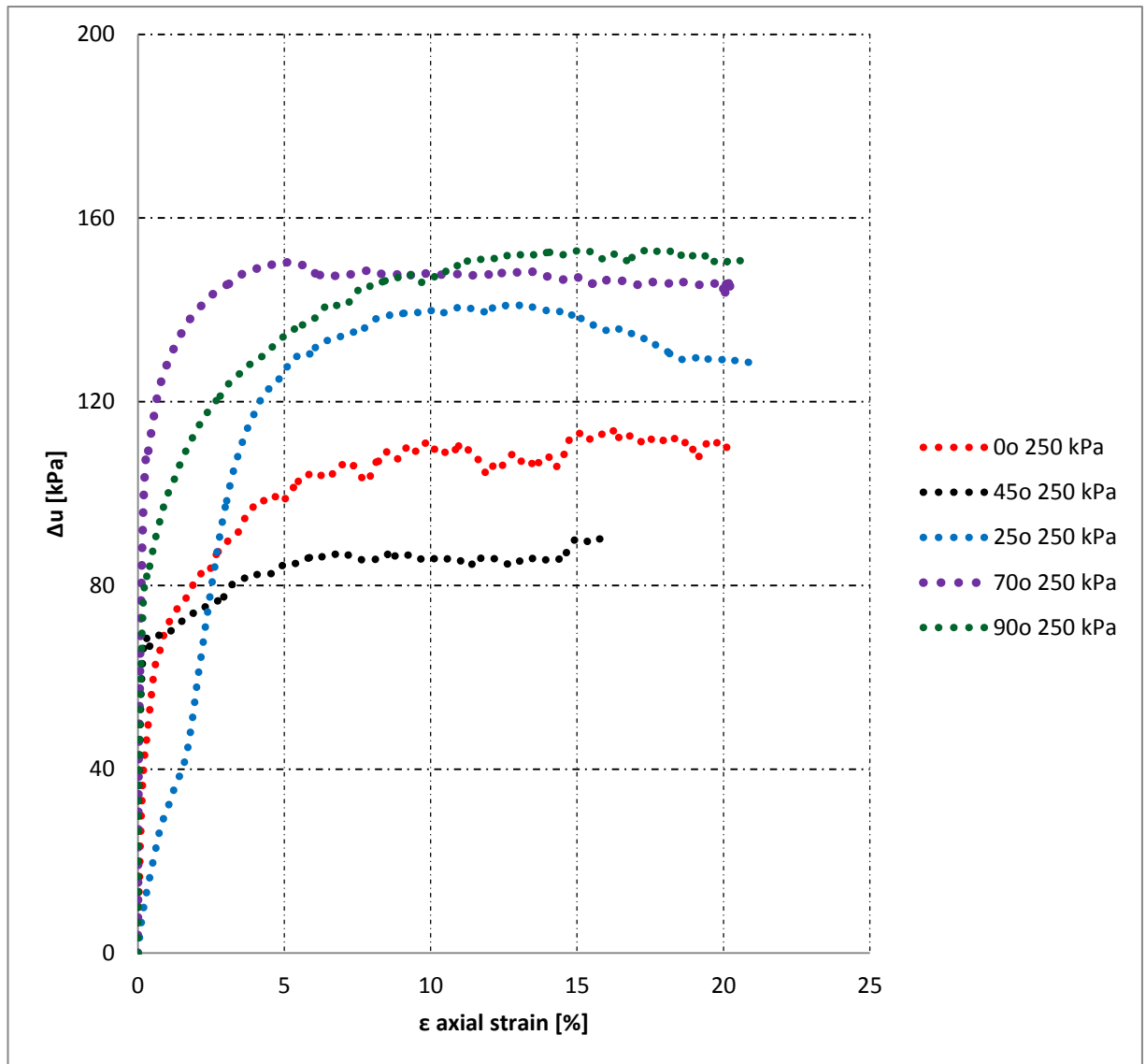
Σχήμα 3. 30 Ενεργές τασικές οδεύσεις για διάφορες γωνίες στοίβαξης ψ_b , με κόκκινο σημειώνονται οι τασικές οδεύσεις σε βαθμίδες φόρτισης $P' = 100, 150, 250$ kPa για $\psi_b = 0^\circ$

Από αυτές τις δοκιμές προέκυψαν τα αποτελέσματα που συνοψίζονται στο παραπάνω γράφημα (σχήμα 3.30).

Σε αυτές διαπιστώνεται αρχικά ότι η παραμένουσα γωνία τριβής είναι στις 18° περίπου ίση με την γωνία που δίνει Oia (1982b) για $0,2\%/min$, από τις 16° που δίνει για $0,05\%/min$ δηλαδή περίπου τον ρυθμό των εκτελεσθέντων δοκιμών ($0,07\%/min$), αλλά οι διαδρομές τάσεων(stress paths), έχουν μια ασυνήθιστη εικόνα. Δηλαδή ενώ αρχικώς έχουν θετικές υπερπιέσεις πόρων όπως αναμένεται για συμπυκνωμένες αργίλους (βλ. σχήμα 3.31), στην συνέχεια παρουσιάζουν, μια απόκριση τυπική για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους, και όχι την συμπεριφορά που προσομειώνει ελαφρώς[quasi] υπερστεροποιημένες αργίλους, όπως αναμένεται από την βιβλιογραφία[Head (1998)].

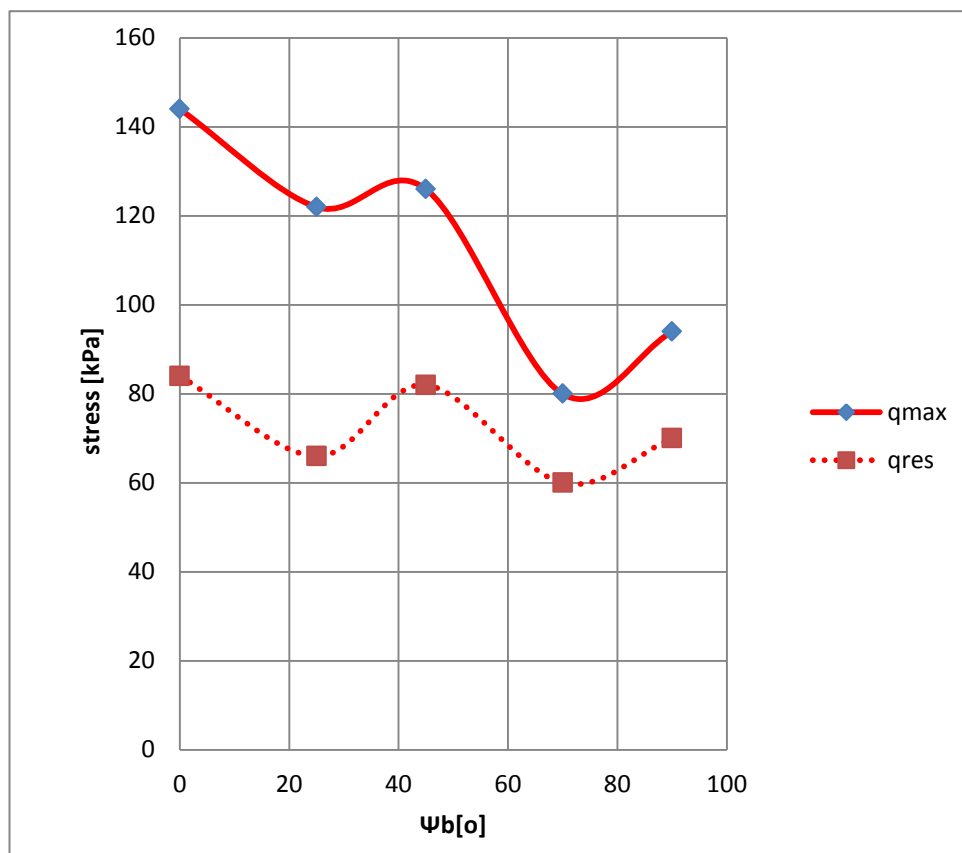


Σχήμα 3. 31 Τυπικές τασικές οδεύσεις για συμπυκνωμένα δοκίμια και σύγκριση με εκείνες των υπερστεροποιημένων δοκιμίων Head(1998)



Σχήμα 3. 32 Ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων σε σύγκριση με την αξονική παραμόρφωση (δοκιμές του σχήματος 3.30)

Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι οι διαδρομές τάσεων, που παρουσιάζονται δείχνουν μια συγκεκριμένη συμπεριφορά ως προς τον τρόπο στοίβαξης. Συγκεκριμένα δείχνουν να ακολουθούν μια αντίστοιχη συμπεριφορά όπως της μονοαξονικής θλίψης (αναμενόμενο), όπου στις 0° στοίβαξη παρουσιάζει το υλικό την μέγιστη αντοχή και την ελάχιστη στις 70° μοίρες, Αυτό παρουσιάζεται στο γράφημα της τάσης ως προς τον τρόπο στοίβαξης (σχήμα 3.33).



Σχήμα 3. 33 Γράφημα μεταβολής της μέγιστης και παραμένουσας αντοχής σε μονοαξονική θλίψη [q] σε διάφορες γωνίες στοίβαξης ψ^b

Κεφάλαιο 4 Αποτίμηση πειραματικών αποτελεσμάτων για την φύση και την μηχανική συμπεριφορά του Ατταπουλγίτη

4.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια σύνοψη των πειραματικών αποτελεσμάτων από όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την διασαφήνιση της μηχανικής συμπεριφοράς του Ατταπουλγίτη. Επιθυμητή είναι η κατ επέκταση προσέγγιση με μια υπόθεση ως προς το μικρομηχανικό μοντέλο παραμόρφωσης, έτσι ώστε να μπορεί να συνδεθεί, με τις παρατηρήσεις από την χρήση οπτικής μικροανάλυσης και των προαναφερθέντων πειραματικών αποτελεσμάτων .

4.2. Σύνοψη πειραματικών αποτελεσμάτων

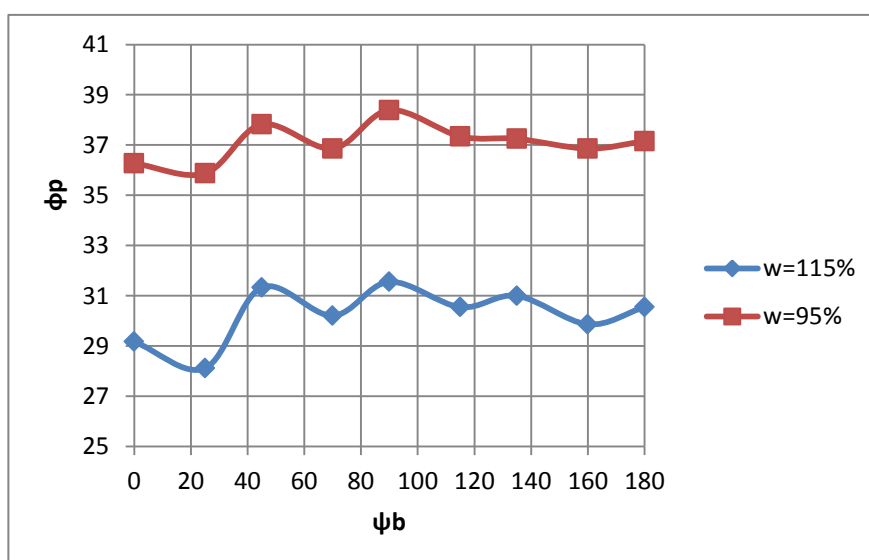
4.2.1. Φυσικές ιδιότητες

Αρχικά ξεκινώντας από τις φυσικές ιδιότητες συμπερασματικά προκύπτει ότι ο Ατταπουλγίτης είναι μια ενεργή άργιλος και αρκετά μεγάλης ευαισθησίας, που σύμφωνα με τον πίνακα κατάταξης των εδαφικών υλικών θεωρείται μια άργιλος **CH**. Η κοκκομετρική διαβάθμιση της είναι αρκετά ανομοιόμορφη και καλής διαβάθμισης, που προκύπτει από την προσκόλληση μεταξύ των ορυκτών ινών που αποτελούν τον Ατταπουλγίτη μεταξύ των εξογκωμάτων των καναλιών του ορυκτού. Αυτή η προσκόλληση μπορεί να εγκλωβίσει είτε νερό, ή αέρα. Ο εγκλωβισμός του αέρα είναι που το κάνει, όταν στεγνώσει από το υπόλοιπο περιβάλλον νερό να έχει ξηρή πυκνότητα μικρότερη του 1gr/cm^3 (πυκνότητας του νερού). Επίσης αυτός ο εγκλωβισμός και η ελαφροβαρής ιδιότητα είναι που δίνει και την μεγάλη διακύμανση στην ειδική βαρύτητα του υλικού G_s . Επίσης ένα χαρακτηριστικό αυτής της

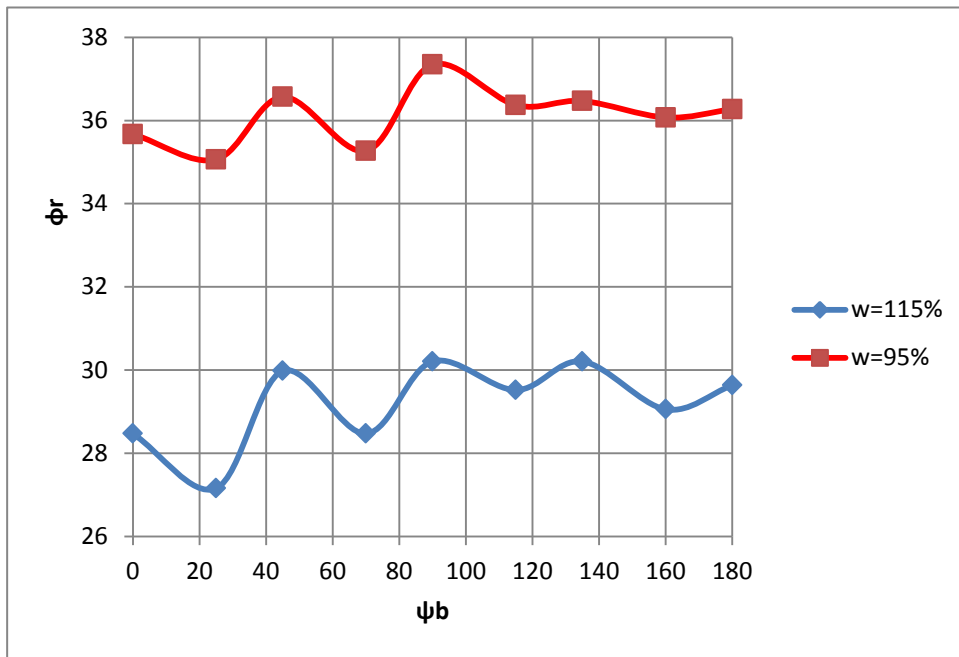
προσκόλλησης-«αγκίστρωσης» είναι η έντονη μεταβολή και απόκλιση από τα όρια συρρίκνωσης, που σε συνδυασμό με την ιδιαίτερη απορροφητικότητα, σε συνθήκες πλήρους κορεσμού να συμπεριφέρεται ως ένα παχύρευστο ρευστό, αρκετά σκληρό και με εμφάνιση ιδιάζουσας αντοχής (για παχύρευστο υγρό). Αυτό οφείλεται στην παρουσία δευτερογενών ορυκτών, όπως αυτό εντοπίζεται από τις ορυκτολογικές αναλύσεις,

4.2.2. Μηχανικές ιδιότητες

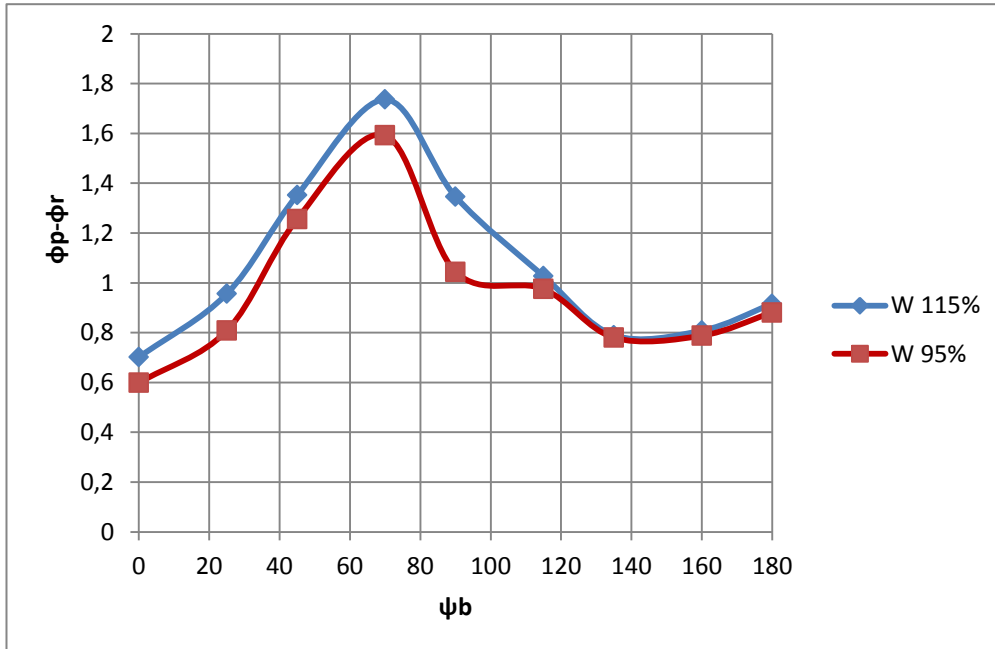
Με βάσει τα όσα έχουν παρουσιαστεί, η κύρια διερεύνηση της συμπεριφοράς του υλικού, έγινε μέσω δοκιμών απευθείας διάτμησης οι οποίες υπέδειξαν σημαντική επίδραση του ρυθμού επιβολής της παραμόρφωσης, που αυξάνει τόσο τη εξαγόμενη γωνία τριβής, όσο και την πραγματική τιμή της αντοχής σε διάτμηση. Έτσι στα σχήματα (4.1 και 4.2) αποτυπώνεται η επίδραση της γωνίας στοίβαξης στην μέγιστη ϕ_p και την παραμένουσα ϕ_r γωνία τριβής του Ατταπουλγίτη αντίστοιχα, στα σχήματα αυτά παρουσιάζονται αποτελέσματα για δυο (2) διαφορετικές τιμές υγρασίας. Αντίστοιχα στο σχήμα (4.3) παρουσιάζεται η διαφορά ($\phi_p - \phi_r$), ως συνάρτηση της γωνίας στοίβαξης ψ_b , για τις δυο διαφορετικές υγρασίες. Από αυτά προκύπτει:



Σχήμα 4. 1 Γράφημα μέγιστης γωνίας τριβής ως προς τον τρόπο στοίβαξης ψ_b για υγρασίες 95% και 115% αντίστοιχα



Σχήμα 4. 2 Γράφημα παραμένουσας γωνίας τριβής ως προς τον τρόπο στοιβαξης ψ_b για υγρασίες 95% και 115% αντίστοιχα



Σχήμα 4. 3 Γράφημα διαφοράς παραμένουσας γωνίας τριβής ως προς τον τρόπο στοιβαξης ψ_b για υγρασίες 95% και 115% αντίστοιχα

α) Ποιοτικώς όμοια επίδραση της γωνίας στοίβαξης τόσο στην μέγιστη τιμή ϕ_p της γωνίας τριβής όσο και στην παραμένουσα ϕ_r , ανεξαρτήτως υγρασίας.

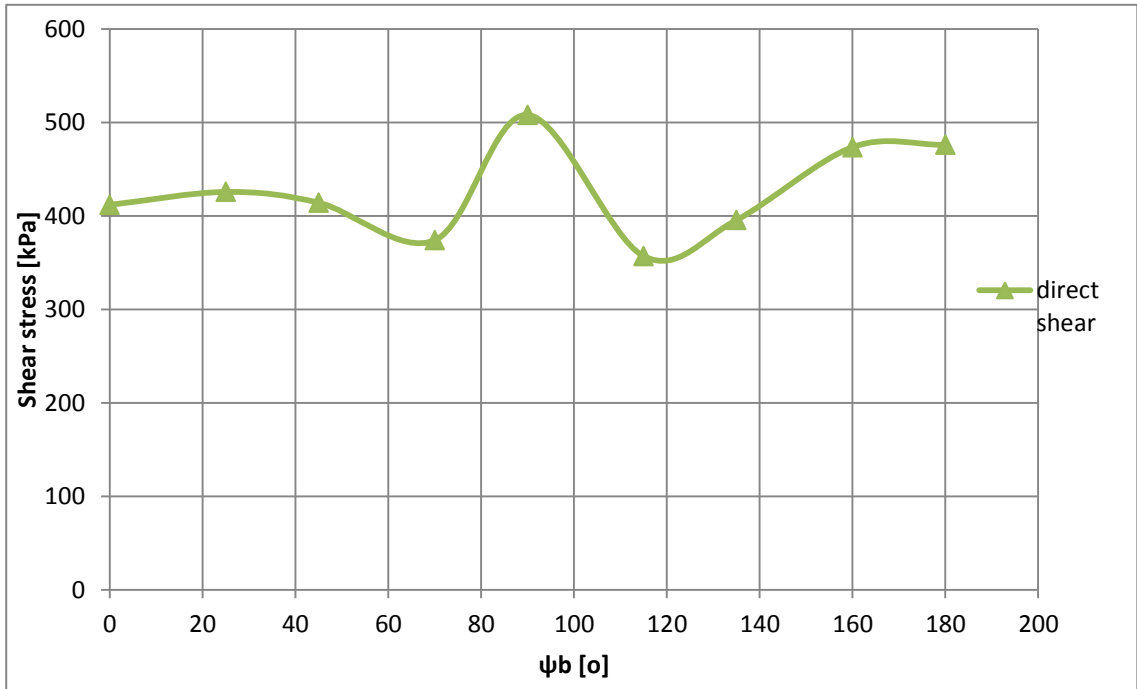
β) Μεγαλύτερες αντοχές σε όρους γωνιών τριβής, για μικρότερη υγρασία δείγματος.

γ) Μικρή διαφορά μεταξύ ϕ_p και ϕ_r που κυμαίνεται από 0,6 έως 1,8 μοίρες με την ελάχιστη τιμή να προκύπτει για $\psi_b = 0^\circ$ και την μέγιστη για $\psi_b = 70^\circ$

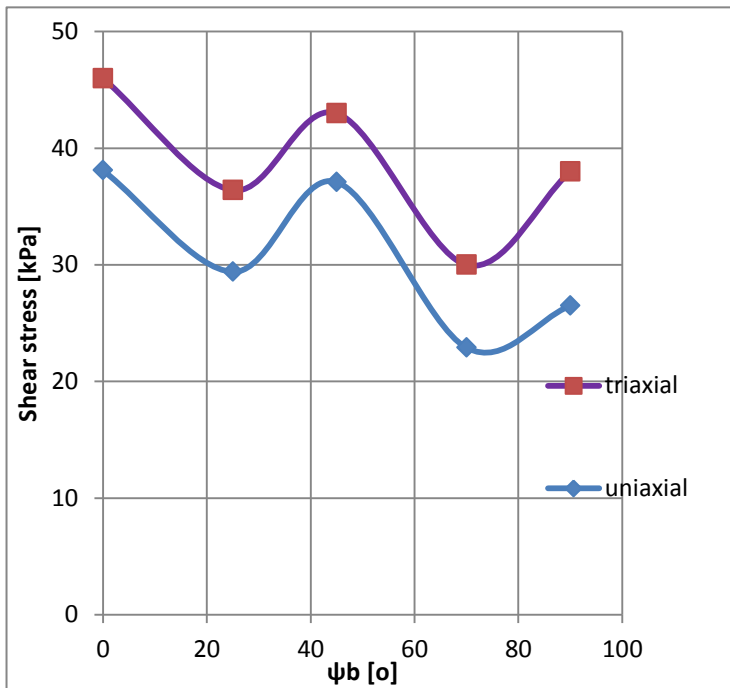
δ) Μέγιστη αντοχή για $\psi_b = 90^\circ$ ανεξαρτήτως υγρασίας αλλά με μικρή διαφορά για άλλες γωνίες στοίβαξης τιμή έως 3° μικρότερη (ελάχιστη).

Τα ανωτέρω σχήματα και συμπεράσματα αφορούν την πρότυπη τιμή επιβολής της παραμόρφωσης του 1%/min. Μεγαλύτεροι ρυθμοί δίνουν μεγαλύτερες τιμές αντοχών, υποδηλώνοντας ευαισθησία στο ρυθμό επιβολής της παραμόρφωσης. Αυτή η ευαισθησία συνάδει με τα φυσικά χαρακτηριστικά του υλικού γιατί είναι ένα υλικό που αναπτύσσει μεγάλη επιφανειακή τάση, δηλαδή είναι ένα υλικό που παρόλη την διφασική του κατάσταση με στερεή μορφή, έχει χαρακτηριστικά συμπεριφοράς που παραπέμπουν σε ιξώδες ρευστό.

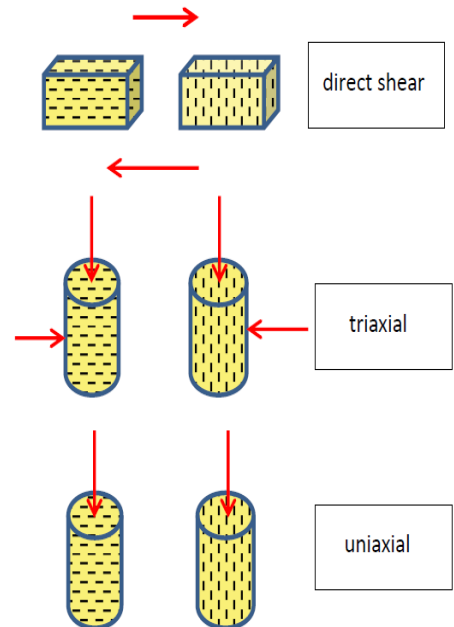
Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ακόμη μια φορά, ότι η υπόθεση παρόμοιας συμπεριφοράς στην απόκριση του υλικού στις ενδιάμεσες γωνίες των τόξων 0° - 90° και 90° - 180° είναι, έντονα και ιδιαίτερα προσεγγιστικό. Και αυτό γιατί όπως φαίνεται στα γραφήματα (σχήματα 4.1 & 4.2), οι διαφοροποιήσεις είναι ελάχιστες και όχι έντονες, λόγω του ίδιου του υλικού, που μας κατευθύνει να εξαχθεί ένα τέτοιο συμπέρασμα. Αυτό όμως μπορεί και να αναιρεθεί λόγω του σχήματος 4.3 που εμφανίζεται σαφέστατα η ανισοτροπία της γωνίας στοίβαξης σε σχέση με την διαφορά των μέγιστων και παραμενουσών γωνιών που συνάδει με τα συμπεράσματα της Z.Tong et al (2013). Εξού λοιπόν και αυτή η ιδιαίτερα έντονη προσέγγιση.



Σχήμα 4. 4 Τιμές διατμητικής αντοχής σε διάφορες γωνίες στοιβαξης και για ρυθμό μετατόπισης 1%/min κατακόρυφης τάσης $\sigma_v = 300$ kPa



Σχήμα 4. 6 Τιμές διατμητικής αντοχής σε διάφορες γωνίες στοιβαξης και για ρυθμό μετατόπισης 0.07%/min



Σχήμα 4. 5 Απεικόνιση φορτίσεων σε σχέση με τον τρόπο στοιβαξης

Επίσης ένα ακόμα συνδυαστικό συμπέρασμα που προκύπτει, είναι από την μια η υψηλή τιμή της αντοχής στην δοκιμή απευθείας διάτμηση και από την άλλη η εκτόνωση της πίεσης πόρων στις τριαξονικές δοκιμές. Συγκεκριμένα παρότι και στις δυο περιπτώσεις έχουμε αστράγγιστες συνθήκες, επιτυγχάνονται όμως με διαφορετικό ρυθμό παραμόρφωσης, υποδεικνύοντας ιξώδη συμπεριφορά του υλικού. Μάλιστα όπως σχολιάστηκε και σε σχέση με την βιβλιογραφία (Nicotera 2000), πιθανόν υπάρχει διάχυση της πίεσης πόρων εντός της κυψελωτής δομής του Ατταπουλγίτη όπως και στα πυροκλαστικά εδάφη.

Αυτό το φαινόμενο συνάμα και με τα προηγούμενα περί εκτόνωσης πόρων αλλά με την εξέταση ως προς την συμπιεστότητα και την στράγγιση (αργεί να στραγγίξει γενικότερα) , επιβεβαιώνει την δυσκαμψία γενικότερα της συγκεκριμένης αργίλου, ειδικά στις 0° μοίρες στοίβαξη. Η δυσκαμψία αλλά και η στιφρότητα της φαίνεται και από τις αντίστοιχες δοκιμές της συμπιεστότητας (τιμές του δείκτη Cc). Η στιφρότητα αλλά γενικότερα η πυκνή δομή των δοκιμών δεν οφείλεται τόσο στον τρόπο παρασκευής, αλλά κυρίως στην υγρασία των δοκιμών, φαίνεται άλλωστε αυτό και στις αντίστοιχες τιμές και παραμέτρους τόσο του οιδημέτρου όπως και της απευθείας διάτμησης.

Κλείνοντας εδώ τα συμπεράσματα και την αποτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς, αλλά και των συνδυαστικών συμπερασμάτων η έμφαση θα δοθεί στο κομμάτι της γωνίας τριβής και της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής που αποτελούν και τα βασικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς και της ταυτότητας του υλικού. Έτσι όπως αναφέρθηκε η μεν γωνία τριβής του Υλικού είναι $\varphi=18^\circ$, η συνοχή C εμφανίζεται με μια τάξη μεγέθους περίπου στα 15 kPa, η δε αστράγγιστη διατμητική αντοχή Su κυμαίνεται μεταξύ 23-38 kPa ανάλογα τον τρόπο στοίβαξης, με μέση τιμή την τιμή των 30,8 kPa. Η σύγκριση των τιμών βιβλιογραφικά αυστηρά με το ίδιο το υλικό μπορεί να γίνει μέσω του Ola (1982) η οποία μας βγάζει μια απόκλιση περίπου των 2 μοιρών στην γωνία τριβής, η δε συνοχή εμφανίζει μια διαφορετική τιμή όπως

παρατηρείται, σε σχέση με τον Oia (1982) που της δίνει την τιμή $C=0$, που αυτό όμως δεν συνάδει με την γενικότερη, φιλοσοφία των αργιλικών υλικών αλλά και την ευρεθείσα τιμή. Η περαιτέρω διερεύνηση προσανατολίστηκε στην USCS(Unified soil classification system) το οποίο, σύμφωνα με την κατάταξη του υλικού (όπως έχει καταταγεί από τις φυσικές ιδιότητες), είναι CH (inorganic clay high plasticity). Αυτό σύμφωνα με το σύστημα κατάταξης δίνει γωνία τριβής μεταξύ 17-31 μοιρών με πιο αναμενόμενη την γωνία των 22° και τιμή συνοχής 25 kPa. Με βάση τα παραπάνω διαπιστώνεται ότι πέρα της διαφοράς της γωνίας τριβής, υπάρχει και απόκλιση στην τιμή της συνοχής στα 10 kPa. Από την σύγκριση με standard που χρησιμοποιούνται διεθνώς όπως (NAVFAC 1982, Minnesota transportation κ.α), βλέπουμε ότι δίνουν πάλι κάποιες διαφορές(Minnesota $C=20$ kPa $\phi=18-32$, NAVFAC (1982) $C=11$ kPa $\phi=17^\circ-31^\circ$). Στις τιμές αυτές περιορίζουν οι Carter and Bentley (1991) σε τιμές $\phi=19^\circ$ για CH αργίλους τα οποία εξεταζόμενα δοκίμια είναι συμπυκνωμένα με την μέθοδο proctor όπως εδώ. Επίσης οι οδηγίες NAVFAC (1986) έρχονται και υπερθεματίζουν στις τιμές των Carter and Bentley (1991) η οποία διερεύνηση μας δίνει για συμπυκνωμένα και πλήρως κορεσμένα δοκίμια αργίλων CH, τιμές $C=11$ kPa $\phi=19^\circ$. Επομένως οι πιο αντιπροσωπευτικές τιμές είναι οι τελευταίες, που με την σύγκριση με τις εξαγόμενες τιμές της πειραματικής εργασίας. Επομένως με ασφάλεια μπορεί να υιοθετηθούν οι τιμές που προκύπτουν από την πειραματική εργασία. Τέλος δεν βρέθηκαν τιμές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής S_u από την βιβλιογραφία που ενώ από τις παρούσες μετρήσεις προκύπτει τιμή περίπου στα 31 kPa. Να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων αφορούν ρυθμό μετατόπισης 0,05 mm/min.

4.3. Συμπεριφορά μικροδομής

Η συμπεριφορά αυτή του Ατταπουλγίτη με την μεγάλη επιφανειακή τάση (Santamarina 2012) θα μπορούσε να συγκριθεί και να παραλληλιστεί με εκείνη των συνθετικών λεπτών υμένιων που προσκολλούνται σε φύλλα- στρώσεις. Αυτή η προσέγγιση εξηγείται και από το γεγονός ότι είναι ένα υλικό με μεγάλη προσροφητική ικανότητα (υδρόφιλο), ως αποτέλεσμα της μεγάλης ειδικής επιφάνειας που δημιουργεί την μεγάλη επιφανειακή τάση . Μάλιστα η αντίστοιχη βιογραφία που συσχετίζει όλα αυτά (Haden 1967, Norton 1944, Beazley 1972 κλπ) καθώς και η σχετική τους σύγκριση δίνει ειδικές επιφάνειες για πυριτικές άμμους 0,0006 m²/ gr (και κατ' επέκταση του γυαλιού), για συνήθεις αργίλους όπως ο καολινίτης 15-80 m²/ gr, ενώ ο Ατταπουλγίτης η μέση τιμή του είναι 250 m²/ gr. Αντίστοιχα η βιβλιογραφία δίνει για δυναμικά ιξώδη για άμμο-και το γυαλί έχει 10⁴³ mPa*sec, ο καολινίτης 40 mPa*sec και ο Ατταπουλγίτης 40000mPa*sec. Επομένως και μεγάλη επιφανειακή τάση έχει και μεγάλη τιμή δυναμικού ιξώδους που δικαιολογούν την πιο πάνω συμπεριφορά , αύξηση της αντοχής με αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης.

Όπως προκύπτει από την βιβλιογραφία(NAVFAC 1982&1986), ειδικά τα επιμήκη (elongate) σωματίδια μπορεί να εμφανίζουν διολίσθηση μεταξύ τους, στην συγκεκριμένη όμως περίπτωση, μπορεί να χαρακτηριστεί (όπως το έχει προαναφερθεί πιο πάνω) τηλεσκοπική διολίσθηση. Εξαιτίας της μορφολογίας του κόκκου (κυψελωτης-με κανάλια) και εξαιτίας της ευαισθησίας του κρυσταλλικού πλέγματος στο κέντρο της ίνας, όπως και λόγω της προσρόφησης και της συμμετοχής του νερού, το κάνει από την μια ευμετάβλητης συμπεριφοράς (πότε ρευστό πότε στερεό εξού και το «ημίρρευστη») και από την άλλη επειδή θέλει το ίδιο το υλικό να αποκτήσει και να αναπτύξει μια στερεή αλλά ινώδη μορφή (επιμήκη), για να το πραγματώσει αυτό διαχέεται μέρος ενός σωματιδίου μέσα σε μέρος του άλλου, σαν σωλήνας μικρής διατομής μέσα σε σωλήνα μεγάλης διατομής [«τηλεσκοπική κίνηση»], χωρίς ουσιαστικά να αλλάζει ο συνολικός όγκος. Ο όγκος παραμένει σταθερός μιας που δεν αποβάλλεται το περισσευούμενο χώρου νερό

που συμμετέχει, εξαιτίας του ότι συγκρατείται ελκτικά , περιμετρικά πια στο εξωτερικό πλέγμα του συμπυκνωμένου κρυστάλλου (αλλαγή μεγέθους κόκκου και συσσωμάτωση, μόνο που η συσσωμάτωση δεν επέρχεται ηλεκτροχημικά αλλά μηχανικά).

Για να συμβεί αυτή η μετατροπή στην εσωτερική δομή πολλές φορές συντελείται στιγμιαία και μπορεί να προκύψει μερική εκτόνωση της πίεσης πόρων, χωρίς να επηρεάσει τις τάσεις που αναπτύσσονται συνολικά πράγμα που εντοπίστηκε σαν φαινόμενο στις τριαξονικές δοκιμές.

Αν μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι στις τριαξονικές δοκιμές μπορεί να εντοπιστεί τότε η εκτόνωση της πίεσης πόρων προκαλεί αλληλεμπλοκή των κόκκων (οπότε έχουμε αύξηση του φορτίου [q]) λόγω εγκλωβισμού της πίεσης από το εσωτερικό της κυψελωτής δομής), και τότε έχουμε εκτόνωση της πίεσης με κινηματική προσαρμογή των κόκκων (τηλεσκοπική συμπεριφορά) χωρίς να παρατηρείται πτώση φορτίου. Αυτή η πτώση φορτίου (θλιπτικού η διατμητικού) εντοπίστηκε αντίστοιχα και στα δύο ήδη δοκιμών(είτε θλίψη είτε απευθείας διάτμηση) και εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο στοίβαξης (κυρίως στα κύρια σημεία συμμετρίας 0-90-180 μοιρών) . Να σημειωθεί ότι σε αυτήν την εκτόνωση της πίεσης πόρων πιθανό να οφείλεται και η διττή μορφή των διαδρομών τάσεων στις τριαξονικές δοκιμές. Αυτό πιθανά συμβαίνει ότι λόγω της εκτόνωσης, χάνει τις «αποθηκευμένες» ενεργές τάσεις που έχουν προκύψει από την συμπύκνωση (πρώτο τμήμα με μορφή ελαφρύς υπερστερεοποίησης [quasi]) και συνεχίζει το δεύτερο τμήμα με την κανονική ιστροπική συμπίεση που έχει δεχθεί το δοκίμιο κατά την στερεοποίηση μέσα στην τριαξονική (δεύτερο τμήμα της διαδρομής τάσεων).

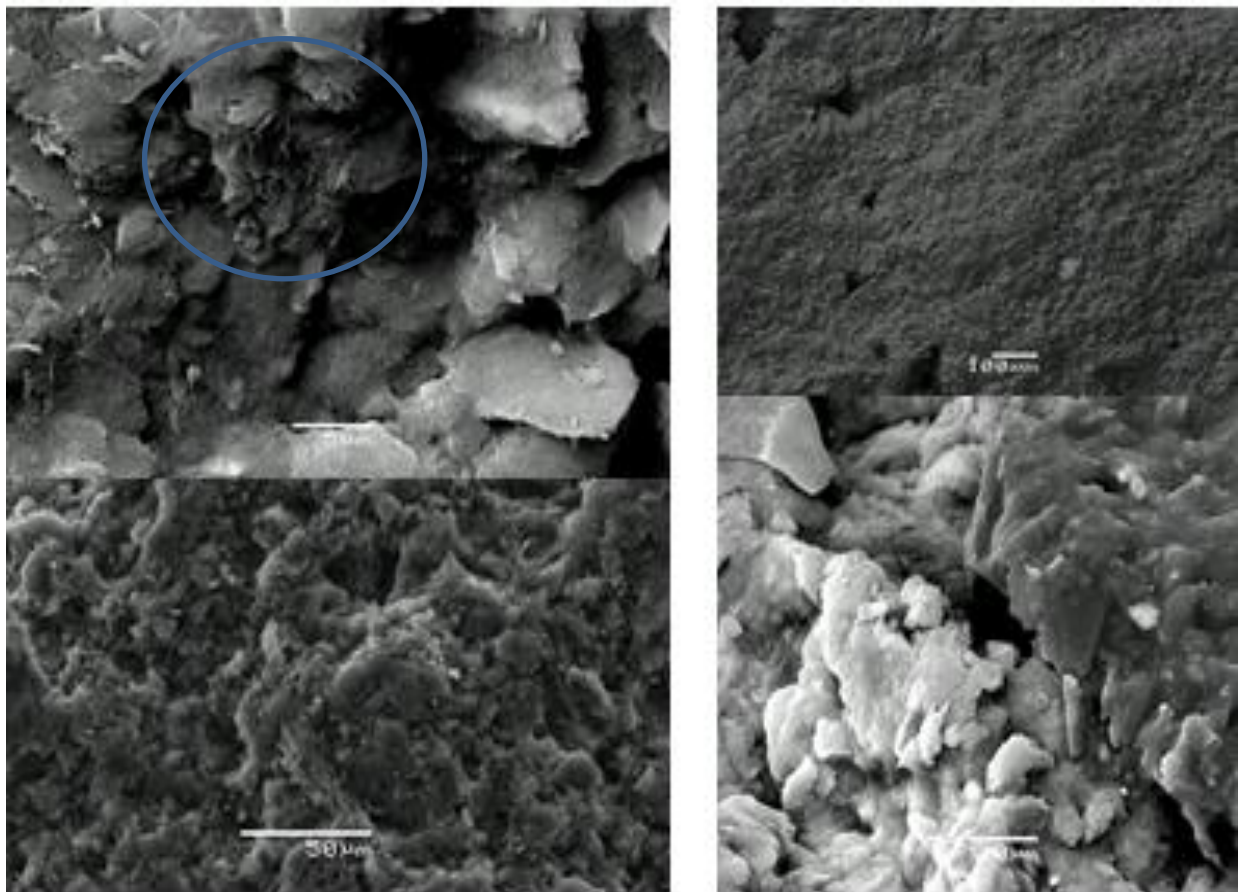
Ο λόγος που δεν αλλάζουν οι τιμές των τάσεων είναι ότι από την εκτόνωση και την μεταφορά – μετατόπιση-εκτόπιση του νερού, συμπυκνώνεται και αυξάνει μέγεθος το εσωτερικό πλέγμα του κρυστάλλου (συσσωματωμένου πια) που αποτελείται κυρίως

από κρυσταλλικό νερό(ενδοπορικό νερό). Αυτή η συμπύκνωση του κρυσταλλικού πλέγματος κάνει το υλικό εξωτερικά (μακροσκοπικά) να συμπεριφέρεται σαν να μην έχει επέλθει καμία μεταβολή (εξού και η μόνη παρατήρηση που γίνεται είναι από την μερική εκτόνωση της πίεσης πόρων, ενώ το φορτίο μένει σταθερό η αυξάνεται). Αυτό το φαινόμενο χαρακτηρίζει το υλικό ως ευμετάβλητο ή ασταθές για αυτό έχει και την τάση για συσσωμάτωση(για αυτό έχει και μεγάλη ενεργότητα). Η συσσωμάτωση φυσικά μετατοπίζει σχετικά από την κλασική θέση του κέντρου του κρυστάλλου το εσωτερικό πλέγμα, έτσι ώστε να δημιουργηθεί η συσσωμάτωση μεταξύ των δυο κρυστάλλων, με ουσιαστικά ένα κοινό εσωτερικό πλέγμα, σε μετατοπισμένη και κοινή θέση. Ουσιαστικά με αυτήν την συμπεριφορά το σύστημα προσπαθεί να ισορροπήσει στις νέες συνθήκες λόγω αυτής της υποθετικής «τηλεσκοπικής» κίνησης, και για αυτό δεν προκύπτει μείωση των τάσεων, που οδηγεί σε ένα επιπλέον συμπέρασμα την ευλυγισία του κρυστάλλου(flexibility) .

Τέλος πέραν της "τηλεσκοπικής" κίνησης έχουμε και την κλασική διολίσθηση (NAVFAC 1986) με την κινητικότητα πια μόνο επιφανειακά των σωματιδίων-κρυστάλλων η οποία μάλλον συντελείται ταυτόχρονα, μιας και δημιουργεί κενούς χώρους ώστε να συνυπάρχει και να παραμένει το ενδοπορικό νερό που εκτονώνεται, από την προηγούμενη διαδικασία στο εσωτερικό της δομής. Αυτή η συνεχής προσπάθεια του υλικού για εξισορρόπηση και μάλιστα σε καθεστώς υψηλού ρυθμού παραμόρφωσης όπως σχολιάστηκε και από τον Ola αλλά όπως σχολιάζεται γενικότερα για τις αργίλους από τους Franklin&Krizek (1972), είναι που αποδίδει τις αυξημένες-αφύσικες τιμές, ειδικά σε δοκιμές διάτμησης που δεν έχει περιθώριο η πίεση πόρων να εκτονωθεί (το κελί είναι άκαμπτο η μεμβράνη-εύκαμπτη, οι τριαξονικές δοκιμές μπορούν να φιλοξενήσουν τέτοιο φαινόμενο). Αυτή η σχετική κινητικότητα των κρυστάλλων όσο πιο αργά «ήρεμα και ομαλά» και σταδιακά πραγματοποιείται, τόσο πιο ομαλή συμπεριφορά έχει , και εξελίσσεται φυσιολογικά χωρίς ανωμαλίες στα αντίστοιχα μεγέθη των μηχανικών παραμέτρων.

4.4. Οπτική μικροανάλυση

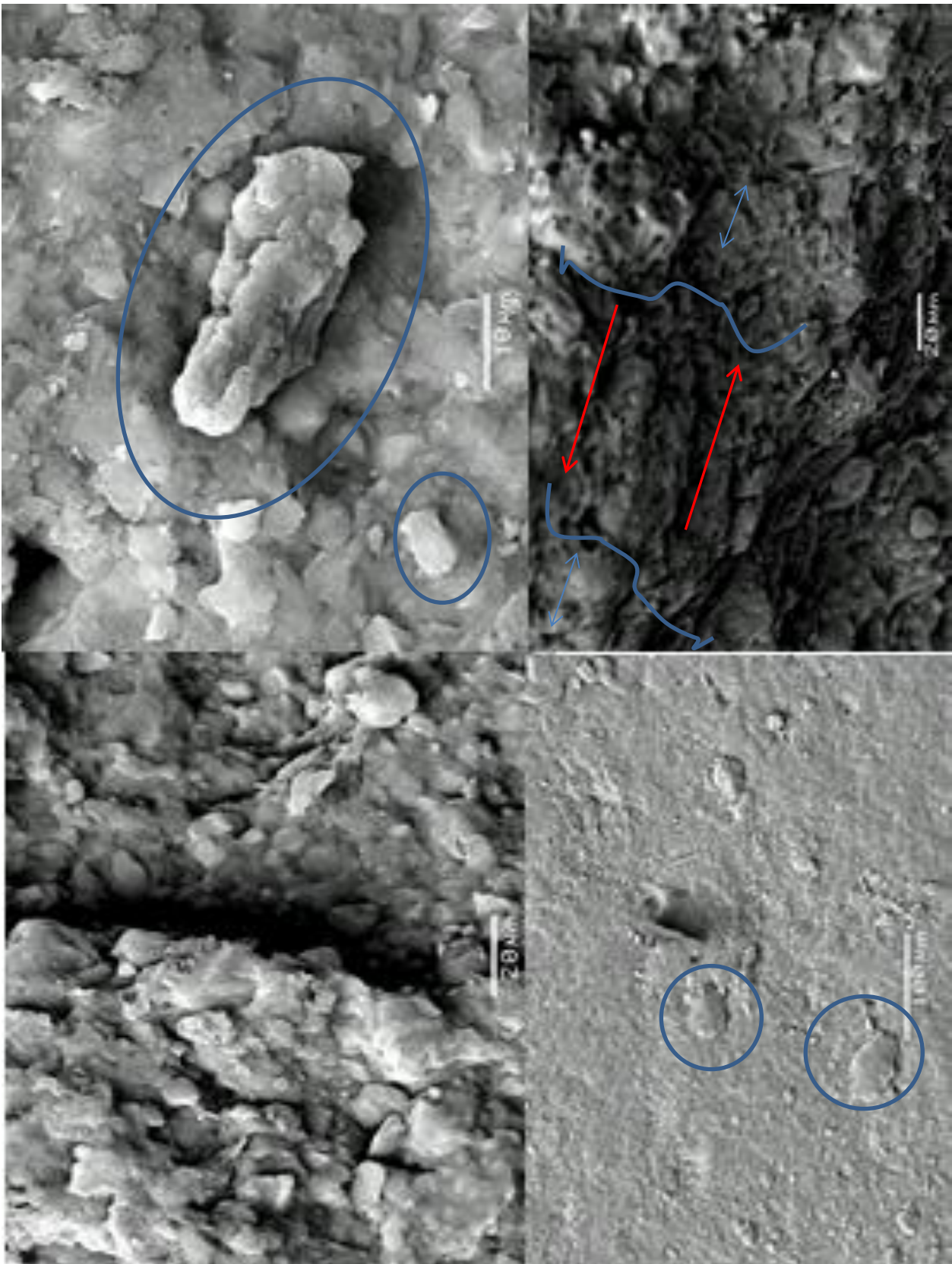
Η οπτική μικροανάλυση που πραγματοποιήθηκε έγινε σε δυο στάδια, ένα πριν να καταπονηθεί το δοκίμιο σε διάτμηση και ένα μετά την ολοκλήρωση της διάτμησης. Πιο συγκεκριμένα στο σχήμα (4.7), παρουσιάζεται, σε διάφορες κλίμακες της υπό διάτμησης επιφάνειας. Ειδικότερα φαίνεται η ακανθώδης και ομαλοποιημένη (smooth) μορφολογία, αλλά, καθώς και στοίβαξη παράλληλη και προσανατολισμένη οριζόντια όπως αναμενόταν. Επιπλέον με μπλε κύκλο σημειώνεται η ινώδης μορφή με την κυψελωτή ανατομία. Να σημειωθεί εδώ, ότι από την μορφή στοίβαξης και την



Σχήμα 4. 7 Διάφορες κλίμακες κατασκευασμένου δοκιμίου πριν την διάτμηση

Αντίστοιχα η παραπάνω οπτική ανάλυση πραγματοποιήθηκε και στην επιφάνεια διάτμησης μετά την δοκιμή (σχήμα 4.8). Σε αυτή στην μεγέθυνση των 100μm κάτω δεξιά, βλέπουμε την αποτύπωση της κίνησης της διάτμησης («σύρσιμο») και την αποξεμένη («αγριεμένη») επιφάνεια με διακριτές μετατοπισμένες ποσότητες, ενώ

επίσης διακρίνεται, και λύση της συνέχειας της ομαλής επιφάνειας (το «ξεκλείδωμα») ποσότητας ινών με όρθια θέση. Αυτό το «ξεκλείδωμα» φαίνεται καλύτερα στην κάτω αριστερά ανάλυση όπου βλέπουμε ένα δημιουργούμενο χάσμα-ασυνέχεια χωρίς ταυτόχρονα να υπάρχει αλλαγή στο τρόπο στοίβαξης. Επίσης πολύ σημαντικές είναι οι επιφάνειες που σημειώνονται με μπλε κύκλους σε μικρή και μεγάλη μεγέθυνση. Αυτό δείχνει την τηλεσκοπική κίνηση και συμπεριφορά και συσσωμάτωση πάνω αριστερά. Τέλος στην πάνω δεξιά μεγέθυνση παρατηρούνται πυκνώσεις και αραιώσεις κατά την φορά της διάτμησης που εν δυνάμει αιτιολογούν τις μερικές πτώσεις φορτίου και την συμπεριφορά του υποτιθέμενου μικρομηχανικού μοντέλου, καθώς και τα εφελκυστικού τύπου επίπεδα θραύσης που παρατηρούνται μακροσκοπικά. Να σημειωθεί ότι αυτή η απεικόνιση πραγματοποιήθηκε σε διεύθυνση κάθετη ως προς το επίπεδο της διάτμησης.



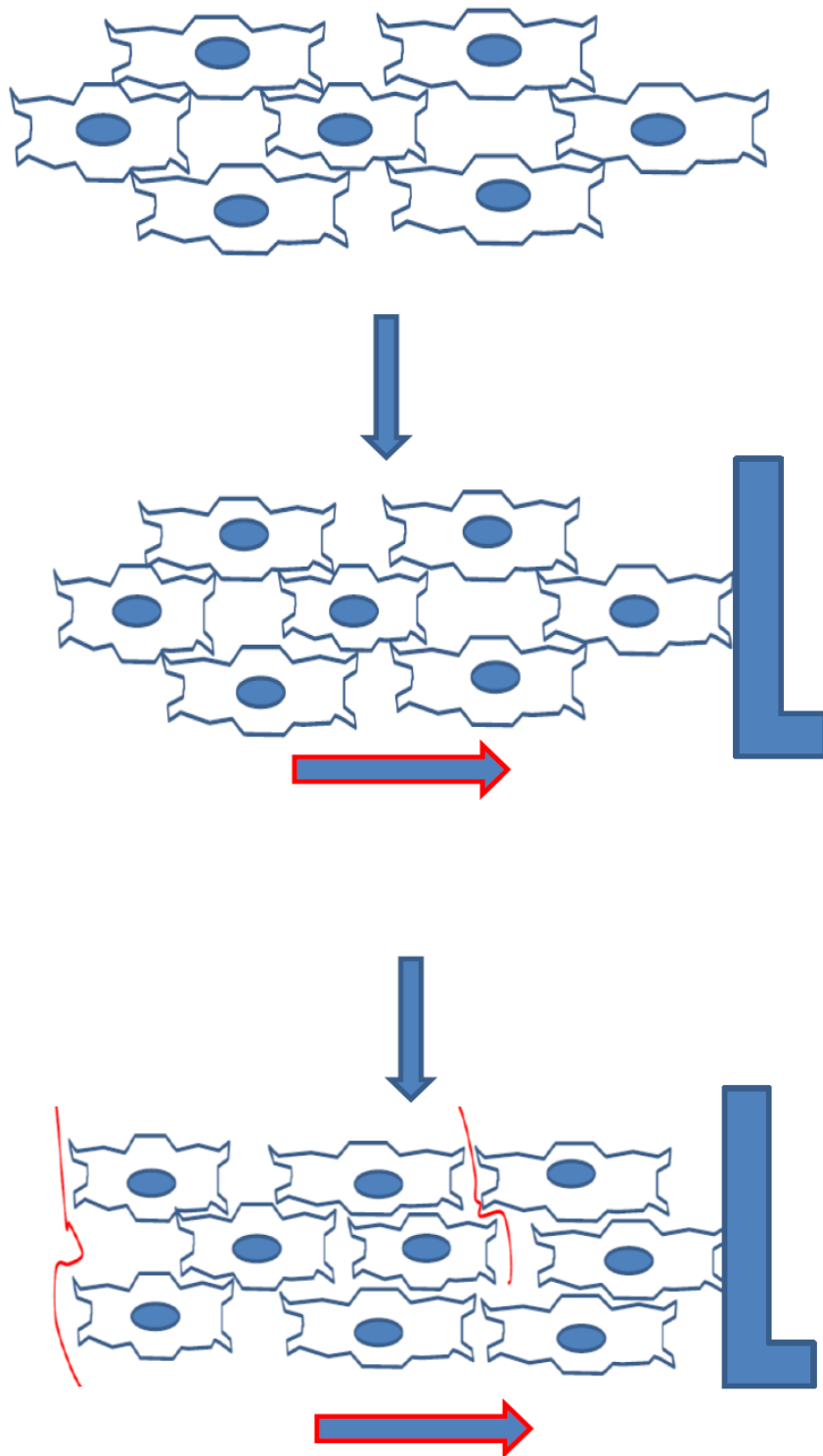
Σχήμα 4. 8 Διάφορες κλίμακες δοκιμίου επί της επιφάνειας διάτρησης όταν αυτή ολοκληρώθηκε

4.5. Υπόθεση συμπεριφοράς μικρομηχανικού μοντέλου

Σύμφωνα λοιπόν με τις πειραματικές ενδείξεις, την οπτική ανάλυση, και την βιβλιογραφική διερεύνηση, προκύπτει ένα υποθετικό μικρομηχανικό μοντέλο.

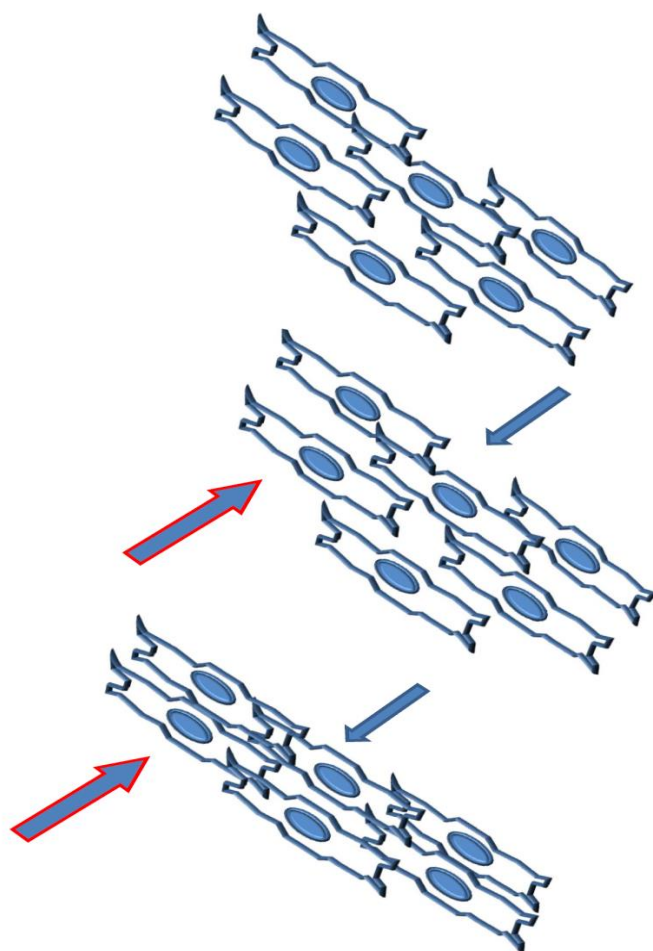
Η περιγραφή του ουσιαστικά στηρίζεται στην σχετική κίνηση και κύλιση των επιμηκών ινών. Οι ίνες στοιχειώδεις ή αναπτυγμένες αλυσίδες, παρουσιάζουν δυο μορφές σχετικής αλληλεπίδρασης ολίσθησης, η μια της αλληλεμπλοκής και η άλλη της συσσωμάτωσης που τις περισσότερες φορές γίνεται τηλεσκοπικά (κίνηση μεταξύ επιφανειών με προσάρτηση, μοιράζονται δηλαδή κοινά μέρη οι εμπλεκόμενοι κρύσταλλοι ως επιμέρους μέρη αυτών). Η κίνηση γίνεται κυρίως κατά τον μεγάλο άξονα μήκους του σωματιδίου ή της αλυσίδας, εξού μπορούμε να έχουμε είτε την μια περίπτωση είτε την άλλη είτε συνδυασμό. Σε όλες τις περιπτώσεις δημιουργούνται κενά που συμπληρώνεται με νερό που μεταφέρεται ή εκτονώνεται μερικώς όπως περιγράψαμε στην συμπεριφορά της μικροδομής. Αυτό το νερό συνήθως συγκρατείται λόγω κενού(suction) από την ανατομία των σωματιδίων (Santamarina 2012) και την σχετική δομή που δημιουργείται. Από όλες τις παρακάτω υποθέσεις πιθανά αιτιολογείται ότι η δημιουργία της ορθορομβικής δομής του Ατταπουλγίτη , οφείλεται κυρίως στην επιρροή της μηχανικής καταπόνησης που δέχονται οι κρύσταλλοι (μοναδιαίας κυψελίδας).

Η πρώτη περίπτωση που περιγράφεται παρακάτω (σχήμα 4.9) δείχνει την ολίσθηση στην περίπτωση που ο μεγάλος άξονας είναι οριζόντιος και φορά διάτμησης είναι παράλληλη με τον μεγάλο άξονα του σωματιδίου. Εκεί τα επίπεδα θραύσης δημιουργούνται από πυκνώσεις και αραιώσεις των σωματιδίων κάθετα στην φορά διάτμησης (εφελκυστικές αστοχίες).

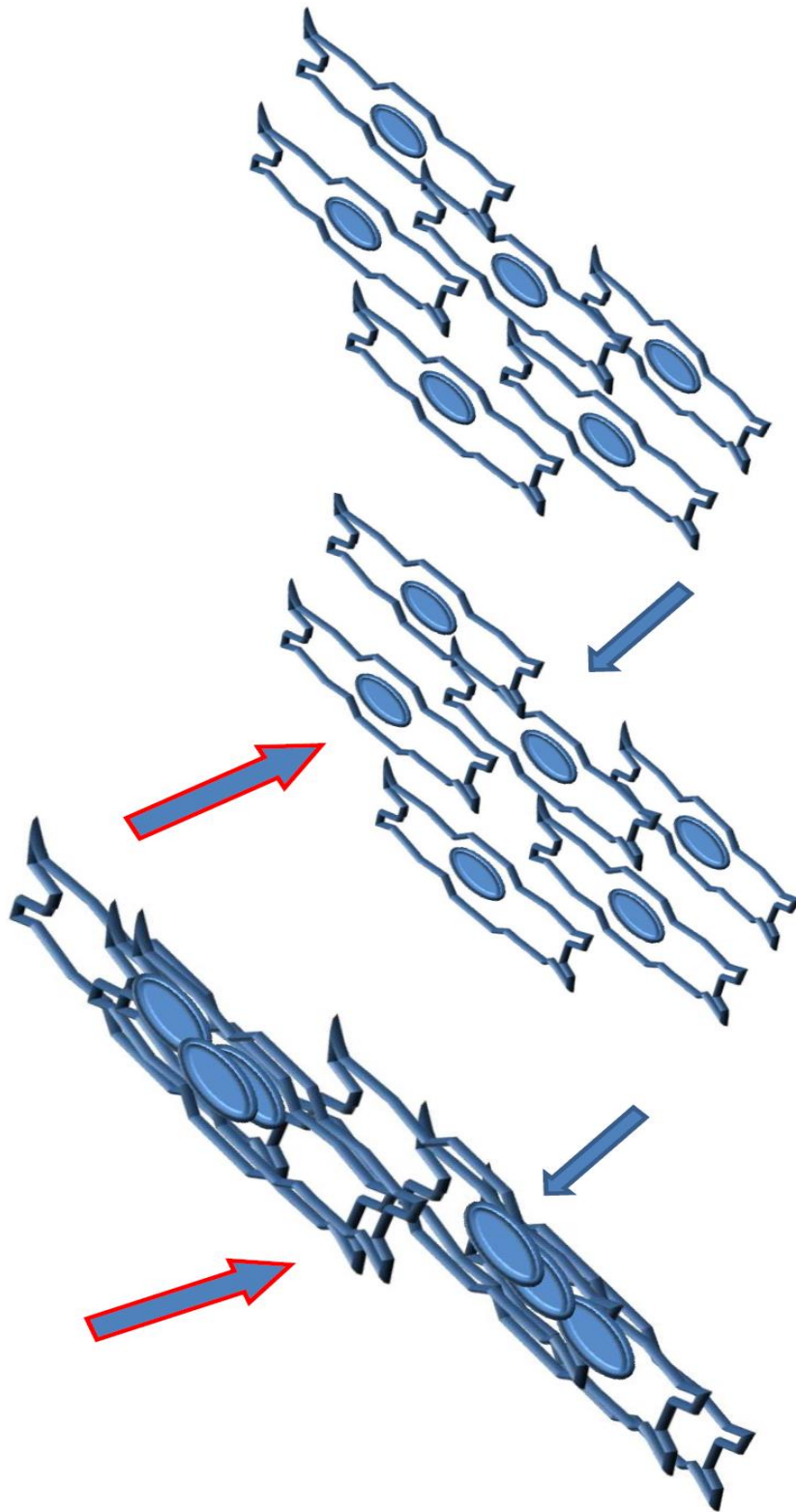


Σχήμα 4.9 οριζόντια στοίβαξη με επιμήκη άξονα ορυκτού παράλληλο σε διεύθυνση και προσανατολισμό με φορά και διεύθυνση διάτμησης στο υποθετικό μικρομηχανικό μοντέλο

Η δεύτερη περίπτωση αφορά την περίπτωση που ο οριζόντιος άξονας και η στοίβαξη είναι σε επίπεδο παράλληλο με το επίπεδο της διάτμησης. Όμως η διεύθυνση της διάτμησης είναι κάθετη στην διεύθυνση του άξονα, (η στοίβαξη παραμένει οριζόντια). Εκεί έχουμε δυο περιπτώσεις ή την τηλεσκοπική συσσωμάτωση (σχήμα 4.10) ή την τηλεσκοπική αλληλεμπλοκή (σχήμα 4.11), που στην μεν πρώτη περίπτωση δημιουργούνται κενά χώρου με μεταβίβαση νερού στο χώρο αυτό χωρίς την συνολική αλλαγή όγκου αλλά τα κενά πλήρωσης του νερού αποτελούν επίπεδα αδυναμίας ώστε να αστοχήσει (συνήθως κάθετα προς την φορά ή το επίπεδο διάτμησης), ή στην δεύτερη περίπτωση με δημιουργία από χάσματα-αστοχίας με παράλληλες ζώνες διάτμησης ως προς την φορά και το κύριο επίπεδο διάτμησης.

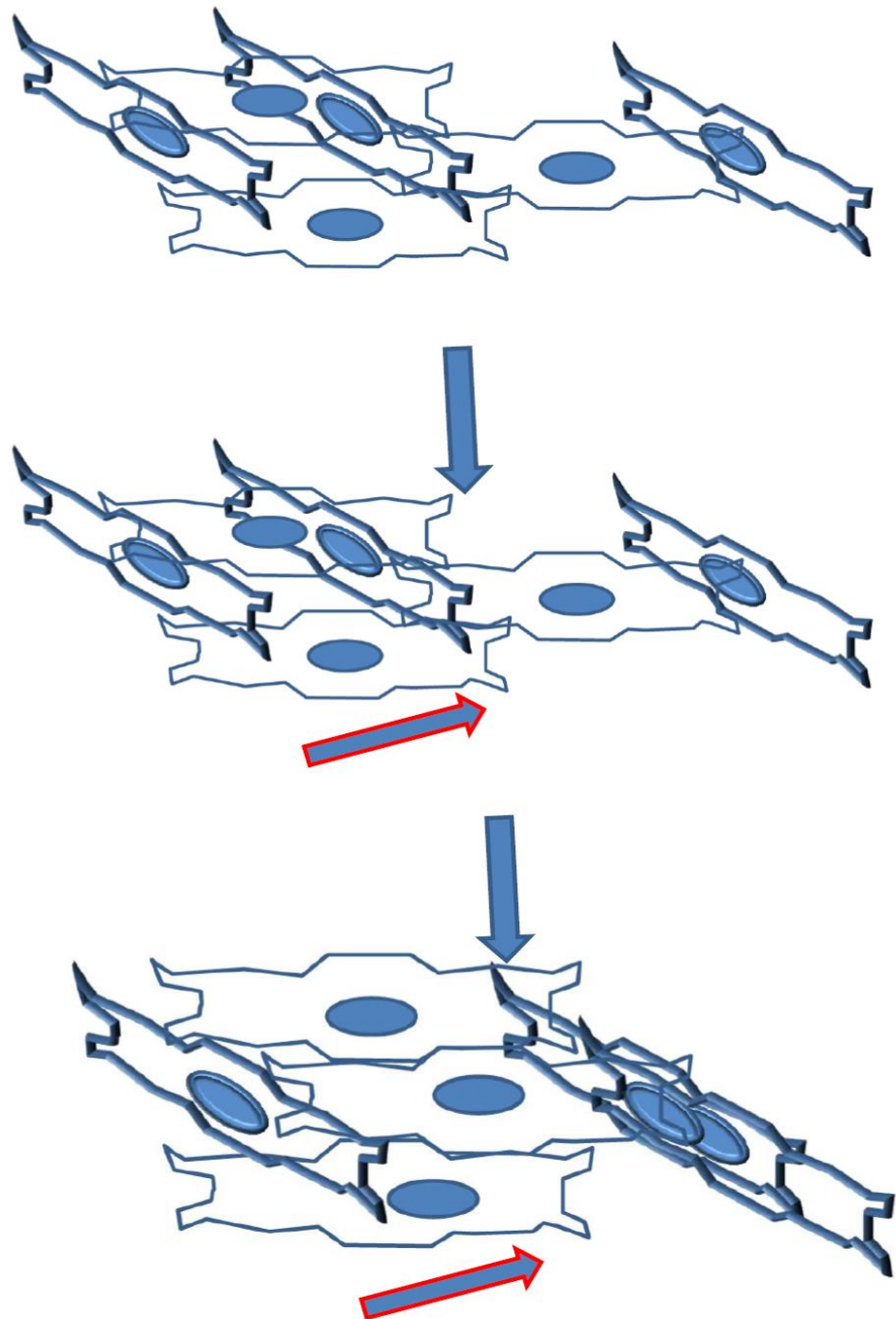


Σχήμα 4. 10 τηλεσκοπική αλληλεμπλοκή στο υποθετικό μικρομηχανικό μοντέλο



Σχήμα 4. 11 Τηλεσκοπική συσσωμάτωση στο υποθετικό μικρομηχανικό μοντέλο

Η τρίτη περίπτωση αφορά των συνδυασμών των δυο περιπτώσεων ή μέρους αυτών, όπου δημιουργούνται σύνθετη αστοχία με κάθετα οριζόντια επίπεδα αστοχίας ως προς την φορά διάτμησης και με συνεχόμενη αύξηση φορτίου (η συνηθέστερη) μιας και οι ίνες στοιβάζονται συνήθως με μορφή πεπλεγμένης ύφανσης, παρότι η κύρια στοιβάξη παραμένει πχ οριζόντια (σχήμα 4.12).



Σχήμα 4.12 Σύνθετη στοιβάξη και κίνηση κρυστάλλων στο υποθετικό μικρομηχανικό μοντέλο

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα, που προέκυψαν από την πειραματική εξέταση του Ατταπουλγίτη.

Η κατεύθυνση της στοίβαξης πέραν της αναμενόμενης ανισοτροπίας που προκαλεί (στη γωνία τριβής), μεταξύ 0° και 90° , επαναλαμβάνεται και μεταξύ 90° και 180° , με τη μέγιστη αντοχή να παρουσιάζεται για γωνία στοίβαξης 90° .

Οι ενδιάμεσες γωνίες δείχνουν κάποια ενδιάμεση έντασης ανισοτροπία η οποία όμως δεν είναι ξεκάθαρη, πιθανώς λόγω μεθόδου παρασκευής (ίσως η συμπίκνωση να αποδίδει σχετικώς ισότροπα δείγματα.

Η μηχανική συμπεριφορά του υλικού δείχνει να επηρεάζεται σημαντικά από τον επιβαλλόμενο ρυθμό παραμόρφωσης και αυτό οφείλεται, κυρίως στην ιξώδη συμπεριφορά που παρουσιάζει το ίδιο το υλικό εκ της φύσης του. Εκεί πιθανολογείται ότι η δημιουργία της ορθορομβικής δομής του Ατταπουλγίτη, οφείλεται κυρίως στην επιρροή της μηχανικής καταπόνησης, και αποτελεί κατ'επέκταση την υπόθεση του μικρομηχανικού μοντέλου.

Υπογραμμίζεται ότι η παρούσα εργασία αποτελεί την πρώτη εργαστηριακή μελέτη αναζυμωμένου ατταπουλγίτη (δεν χρησιμοποιήθηκαν αδιατάρακτα δείγματα πεδίου).

Η εργασία κατέληξε σε τιμές φυσικών ιδιοτήτων (όρια Atterberg, ειδική βαρύτητα), καθώς και τιμές παραμέτρων αντοχής (c , ϕ) και υπό αστράγγιστες συνθήκες (S_u) και παραμέτρων συμπιεστότητας (C_c , C_v), για διαφορετικές υγρασίες αναζυμωμένων δοκιμίων.

Ως μελλοντική έρευνα προτείνεται η διερεύνηση της επίδρασης του ρυθμού παραμόρφωσης (strain rate effect) για το συγκεκριμένο υλικό, καθώς και η μελέτη της δομής που δημιουργούν διαφορετικές μέθοδοι παρασκευής, επ' αφορμής του συμπεράσματος ότι η συμπύκνωση πιθανώς δημιουργεί σχετικώς ισότροπη δομή.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Alan W. Bishop and D. J. Henkel, The measurement of soil properties in the triaxial test London : Edward Arnold, 1962.

ARLEY G. FRANKLIN and RAYMOND J. KRIZEK COMPLEX VISCOSITY OF A KAOLIN CLAY Clays and Clay Minerals, 1969, Vol17,pp. IOI-IIO. PergamonPress. Printed in Great Britain

AMER A. AL-RAWAS, , YAHIA E-A. MOHAMEDZEIN, ABDULAZIZ S. AL-SHABIBI and SALEM AL-KATHEIRI Sand–Attapulgitic Clay Mixtures as a Landfill Liner Geotechnical and Geological Engineering (2006) 24: 1365–1383 Springer 2006

ASTM D422-63(2007)e2, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010

ASTM D698 - 12e2 , Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)) ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010

ASTM D1557 - 12e1 , Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010

ASTM D854 - 14 , Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010

ASTM D2166 / D2166M - 16 Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010

ASTM D2216 - 10 , Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010

ASTM D2435 / D2435M - 11 Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010

ASTM D3080/ D3080M - 11 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010

ASTM D4318 - 10e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010

ASTM D4767 – 11/95 Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010

Bardet Jean-Pierre, Experimental Soil Mechanics, University of Southern California 1997

Bish D.L. & Guthrie G.D., Jr (1993), Mineralogy of clay and zeolite dusts (exclusive of 1:1 layer silicates). In: Guthrie, G.D., Jr & Mossman, B.T., eds, *Reviews in Mineralogy*, Vol. 28, Reath Effects of Mineral Dusts, Chelsea, MI, Book Crafters, 139-184

BS 1377 (1-9) 1990, Methods of test for soil for civil engineering, London British Standard

BEAZLEY K. M. Viscosity-Concentration Relations in Deflocculated Kaolin *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 41, No. 1, October 1972

Canakci Hanifi, Celik Fatih & Tuncer B. Edil Effect of sand column on compressibility and shear strength properties of peat *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 28 Jun 2017

Carter, M. and Bentley, S. (1991). *Correlations of soil properties*. Penetech Press Publishers, London.

Casagrande, A. (1936). The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In *Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* Boston, Vol. III, Discussion D-34, 60.

Christidis G. E., Katsiki P., Pratikakis A. and Kacandes A. (2010), «Rheological properties of palygorskite-smectite suspensions from the Ventzia basin, W. Macedonia, Greece», *Bulletin of the geological Society of Greece*. Proceedings of the 12th International Congress, Patras

Goodman R.E., Karl Tergaghi, the engineer as artist, ASCE, 1999

HEAD, K. H., 1984, *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol. 1: Soil Classification and Compaction Tests, Pentech Press, London

HEAD, K. H., 1984, *Manual of Soil Laboratory Testing*, Vol. 2: permeability, shear strength and compressibility tests, Pentech Press, London

HEAD, K. H., 1998, Manual of Soil Laboratory Testing, Vol.3: Effective Stress Tests, Third Edition, Pentech Press, London

Holtz R, Covacs W 1981, an introduction to geotechnical engineering, Pentech Press, London, chapter 1-4

Kastritis I.D., Kacandes G.H. and Mposkos E. (2003), «The palygorskite and Mg-Fe-smectite clay deposits of the Venzia basin, western Macedonia, Greece», Mineral Exploration and Sustainable Development, Eliopoulos et al. (eds), Millpress, Rotterdam

Lade Poul Triaxial Testing of Soils John Wiley and Sons Ltd Chichester, United Kingdom 2013

Lambe, T. W. (1960) the engineering behavior of compacted clay: Am. Soc. Civil Engineers, 125, J soil mechanics found, paper 1655, 1-33

Lambe, T. W. (1960) Compacted clay: structure: Trans. Am. Soc. Civil Engineers, 125, Part 1, 681-705

Lynwood W , Haden, Jr I Albert 1967, attapulgite its properties and applications, industrial and engineering chemistry, Vol 59 no9

Minnesota Department of Transportation, Pavement Design, 2007

Mitchell J.k. 1976 , fundamentals of soil behavior, Jhon wiley, New York

Nalwa Signh Hari, Handbook of nanostructured Materials and nanotechnology Volume 5, academic press, Tokyo 2000

NAVFAC Design Manual 7.2 - Foundations and Earth Structures, SN 0525-LP-300-7071, REVALIDATED BY CHANGE 1 SEPTEMBER 1986

NAVFAC Design Manual 7.2 - Foundations and Earth design manual, soil mechanics, soil dynamics, deep stabilization and special geotechnical construction 1982

Nicotera MV (2000) Interpretation of the shear response upon wetting of natural unsaturated pyroclastic soil, experimental, evidence and theoretical apparatus in unsaturated soils, Taylor & Francis Group, London, 2000

NORTON F. H., A. L. JOHNSON, AND W. G. LAWRENCE FUNDAMENTAL STUDY OF CLAY: VI, FLOW PROPERTIES OF KAOLINITE- WATER SUSPENSIONS Journal of The American Ceramic Society Vol. 27, No. 5 1944

Obrzud R. & Truty, A. THE HARDENING SOIL MODEL - A PRACTICAL GUIDEBOOK Z Soil.PC 100701 report, revised 31.01.2012

OLA S., the geology and geotechnical properties of the black cotton soils in north western Nigeria, engineering geology 12 , 1978b

OLA S., geotechnical properties of an attapulgite clay shale in north western Nigeria, engineering geology 19 , 1982

Palomino A. & C. Santamarina fabric map of Kaolinite effects of Ph and ionic concentration on behavior, clay and clays minerals Vol 53 2005

Papa R. & M.V. Nicotera, Shear strength of a pyroclastic unsaturated soil from suction-controlled direct shear tests, Unsaturated Soils – Alonso & Gens (eds) Taylor & Francis Group, London, 2011

Santamarina C. Soil Properties and Behavior -Recent Developments 10th G.A. Leonards Lecture April 13, 2012 - Purdue U.

Santamarina J. Carlos Soil Behavior at the Microscale: Particle Forces ,Proc. Symp. Soil Behavior and Soft Ground Construction, in honor of Charles C. Ladd - October 2001, MIT

Shartsis Leo and Spinner Sam Viscosity and Density of Molten Optical Glasses Journal of Research of the National Bureau of Standards Vol. 46, No.3, March 1951

Swiss Standard SN 670 010b, Characteristic Coefficients of soils, Association of Swiss Road and Traffic Engineers

Terzaghi, K., Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York (1943)

Terzaghi, K., Peck, R. B. and Mesri, G., Soil Mechanics in Engineering Practice, 3rd Ed. Wiley-Interscience (1996)

Terzaghi, K., From theory to practice in soil mechanics:: Selections from the writings of Karl Terzaghi, with bibliography and contributions on his life and achievements John Wiley and Sons (1967)

Tong Zhaoxia , Fu Pengchenf, Zhou Shaopeng, Dafalias F Yannis, Experimental investigation of shear strength of sands, with inherent anisotropy, ACTA GEOTECHNIKA 2013

Ελληνόγλωσσα βιβλιογραφία

Αλεξάκης Ε. (2010), «Δομικός χαρακτηρισμός παλυγορσκιτικών αργίλων με φασματοσκοπία μέσου υπερύθρου», διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, σχολή εφαρμοσμένων μαθηματικών και φυσικών επιστημών

Βλαμίδης Α.Δ. (2009), «Γεωχημική - Ορυκτοχημική μελέτη του παλυγορσκιτικής περιοχής Βεντζίων Γρεβενών», διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, τμήμα μηχανικών ορυκτών πόρων.

Ζωτιάδης Β., Αργυράκη Α., Θεολόγου Ε. (2010), «Πιλοτική εφαρμογή ατταπουλιτικής αργίλου για τη σταθεροποίηση τοξικών μετάλλων σε ρυπασμένα εδάφη», 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Βόλος.

Κατσικάσος Γ. (1992), «Γεωλογία της Ελλάδας», Πανεπιστήμιο Πάτρας, Ο.Ε.Δ.Β., Αθήνα, σελ. 451

Γ. Κούκης Ν. Σαμπατακάκης, τεχνική Γεωλογία , 2002 εκδόσεις Παπασωτηρίου Αθήνα

Γεώργιος Χ. Μαλτέζος(2015) «Ατταπουλιτικής Βεντζίων Γρεβενών, ορυκτολογία – ιδιότητες – χρήσεις», Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών

Ηλεκτρονικές διευθύνσεις

<http://structx.com/home.html> πρόσβαση 20/3/2016

https://www.ecorisq.org/docs/USCS_soilclasses.pdf πρόσβαση 20/3/2016

<http://www.geotechdata.info/parameter/angle-of-friction.html> GEOHELLAS, Technical clays, natural solutions <http://www.geohellas.com/products> (πρόσβαση 20/3/2016)

<http://www.geohellas.com/search/node/Attapulgitite> (πρόσβαση 20/3/2016)