

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

TMHMA

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Διερεύνηση υδραυλικής αγωγιμότητας εδαφών με χρήση εύκαμπτου και άκαμπτου τύπου περατομέτρων"

Μιχάλας Μιχαήλ

<u>Εξεταστική Επιτροπή</u>

Στειακάκης Εμμανουήλ, Επίκουρος Καθηγητής (επιβλέπων)

Αγιουτάντης Ζαχαρίας, Καθηγητης

Εξαδάκτυλος Γεώργιος, Καθηγητης

Χανιά,

Ιούνιος, 2013

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	3
ПЕРІАНҰН	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Υδραυλική αγωγιμότητα	5
1.1 Νόμος Darcy	5
1.2 Εργαστηριακές συσκευές προσδιορισμού υδραυλικής αγωγιμότητας	7
1.2.1 Περατόμετρα άκαμτου τύπου (Rigid wall)	7
1.2.2 Περατόμετρα εύκαμπτου τύπου (flexible wall)	16
1.2.3 Σύγκριση συσκευών προσδιορισμού υδραυλικής αγωγιμότητας	19
1.3 Τεχνικές μέτρησης υδραυλικής αγωγιμότητας	20
1.3.1 Δοκιμή πίπτοντος υδραυλικού φορτίου	20
1.3.2 Δοκιμή σταθερού υδραυλικού φορτίου	21
1.3.3 Δοκιμή σταθερού ρυθμού ροής	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προσδιορισμός υδραυλικής αγωγιμότητας με εμπειρικούς τύπους	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Προσδιορισμός γεωτεχνικών παραμέτρων εδαφικού υλικού	28
3.1 Κοκκομετρική ανάλυση	28
3.1.1 Μηχανική μέθοδος (κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα)	28
3.1.2 Κοκκομετρική ανάλυση εδαφών με χρήση αραιομέτρου	28
3.1.3 Σχεδίαση κοκκομετρικής καμπύλης.	29
3.2 Όρια Atterberg	32
3.2.1 Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας	34
3.2.2 Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας	36
3.2.3 Αποτελέσματα ορίων Atterberg	36
3.3 Προσδιορισμός Βέλτιστης υγρασίας συμπύκνωσης	40
3.3.1 Πρότυπη Μέθοδος Proctor	40
3.3.2 Αποτελέσματα	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μετρήση υδραυλικής αγωγιμότητας	46
4.1 Εκτίμηση υδραυλικής αγωγιμότητας μέσω εμπειρικών τύπων	46
4.2 Μέτρηση Υδραυλικής Αγωγιμότητας με Περατόμετρο Πίπτοντος φορτίου	47
4.2.1 Διαμόρφωση Δοκιμίων-Μετρήσεις	47
4.2.2 Αποτελέσματα	49

4.3Μέτρηση Υδραυλικής Αγωγιμότητας με Περατόμετρο Τριαξονικής Φόρτισης	49
4.3.1 Προετοιμασία-Διαμόρφωση Δοκιμίων	49
4.3.2 Μετρήσεις-Αποτελέσματα	51
4.4 Μέτρηση Υδραυλικής Αγωγιμότητας με Περατόμετρο υψηλού φορτίου	53
4.4.1 Μετρήσεις	53
4.4.2 Αποτελέσματα	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα	59
Βιβλιογραφία	60
Παράρτημα	62

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

Εισαγωγή

Η γνώση της υδραυλικής αγωγιμότητας (υδροπερατότητας) των εδαφικών σχηματισμών είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό γεωτεχνικών έργων (π.χ.φράγματα, λιμνοδεξαμενές, επιχώματα), αλλά και για τη διαπίστωση της καταλληλότητας υλικών στεγάνωσης σε Χ.Υ.Τ.Α.

Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκαν τρεις εργαστηριακές μέθοδοι προσδιορισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας. Χρησιμοποιήθηκε περατόμετρο πίπτοντος φοτίου, περατόμετρο υψηλού φορτίου και περατόμετρο τριαξονικής φόρτισης.

Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκαν εδαφικά δείγματα με διάφορη ποσοστιαία αναλογία άμμου και καολίνη. Πιο συγκεκριμένα τα εδαφικά δείγματα είχαν σύσταση **Καολίνης-Άμμος 85-15 %, Καολίνης-Άμμος 50-50 %** και **Καολίνης-Άμμος 15-85 %** τα οποία συμπυκνώθηκαν σε υγρασία 2% πάνω από τη βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης κατά Proctor.

Η εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκε με τρεις διαφορετικές μεθόδους. Σκοπός της εργασίας είναι να διαπιστωθεί, εάν η μείωση του χρόνου δοκιμών (επιβάλλοντας υψηλές υδραυλικές βαθμίδες) επηρεάζει την ακρίβεια των μετρήσεων διότι μία αυξημένη υδραυλική βαθμίδα μπορεί να στερεοποιήσει το δείγμα και να επιφέρει κίνηση σωματιδίων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο προσδιορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας των εδαφικών σχηματισμών είναι απαραίτητος για το σχεδιασμό των γεωτεχνικών έργων (π.χ.φράγματα, λιμνοδεξαμενές, επιχώματα), αλλά και για τον έλεγχο της καταλληλότητας των εδαφών ως υλικά στεγάνωσης σε Χ.Υ.Τ.Α.

Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκαν τρεις εργαστηριακές τεχνικές προσδιορισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας: το περατόμετρο υψηλού φορτίου, το περατόμετρο τριαξονικής φόρτισης και το περατόμετρο πίπτοντος φορτίου.

Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκαν εδαφικά δείγματα με διάφορη ποσοστιαία αναλογία άμμου και καολίνη (Καολίνης-Άμμος 85-15%, Καολίνης-Άμμος 50-50% και Καολίνης-Άμμος 15-85%). Όλα τα δείγματα πριν τις μετρήσεις συμπυκνώθηκαν σε υγρασία 2% πάνω από τη βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης κατά Proctor.

Από την αξιολόγηση των μετρήσεων προέκυψε ότι η χρήση του περατομέτρου υψηλού φορτίου και η εφαρμογή υψηλής υδραυλικής βαθμίδας προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος δοκιμής δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα σε δείγματα με χαμηλό συντελεστή ομοιομορφίας. Αντίθετα στην περίπτωση δειγμάτων με υψηλό συντελεστή ομοιομορφίας μετά την υπέρβαση ενός ορίου υδραυλικής βαθμίδας προκαλείται τυρβώδη ροή και εσωτερική διάβρωση με παράσυρση εδαφικών κόκκων.

Το περατόμετρο τριαξονικής φόρτισης δίδει αξιόπιστα αποτελέσματα λόγω μη πλευρικών διαρροών αλλά και της δυνατότητας προσδιορισμού του βαθμού κορεσμού του δείγματος.

Τέλος, επιβεβαιώθηκε ότι το περατόμετρο πίπτοντος φορτίου παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα για τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας $k < 10^{-5} m/s$, παρόλο που ο κίνδυνος πλευρικών διαρροών είναι πιθανός.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Υδραυλική αγωγιμότητα

1.1 Νόμος Darcy

Ως υδραυλική αγωγιμότητα ενός γεωλογικού σχηματισμού, περιγράφεται η ιδιότητα του να επιτρέπει τη ροή υγρού μέσα από τη μάζα του. Για να υπάρξει ροή μεταξύ δύο θέσεων, σε ένα κορεσμένο εδαφικό υλικό, θα πρέπει να υπάρχει διαφορά υδραυλικού φορτίου (διαφορά δυναμικού μεταξύ των θέσεων αυτών).

Ο Darcy απέδειξε ότι, για γραμμική ροή μέσα σε κύλινδρο (μήκους L) υπάρχει αναλογία μεταξύ της ποσότητας του νερού που διέρχεται στη μονάδα του χρόνου (παροχή Q) και της απώλειας δυναμικού (ΔΗ) μεταξύ δύο σημείων της διαδρομής του νερού (Στειακάκης, 2005). Θεωρώντας ένα συντελεστή k για να αποδώσει την αναλογία αυτή, διατύπωσε τη σχέση:

$$q = k \times A \times i = k \times A \times (\frac{\Delta H}{L})$$
(Εξίσωση 1.1)

όπου,

q :ρυθμός ροής, m^3/s

k :υδραυλική αγωγιμότητα, m/s

ΔH/L=:i υδραυλική βαθμίδα

ΔΗ : απώλεια φορτίου μεταξύ δύο σημείων της διαδρομής του νερού

L :απόσταση των σημείων, m

Α :εμβαδόν διατομής δοκιμίου, m^2

Ο νόμος του Darcy ισχύει για ένα μεγάλο εύρος τύπων εδαφών και υδραυλικών βαθμίδων όταν υπάρχει στρωτή ροή μέσω των κόκκων (Olson and Daniel,1981). Δεν ισχύει όμως για πολύ μεγάλες υδραυλικές βαθμίδες σε χονδρόκοκκα εδάφη όπου η ροή από στρωτή γίνεται τυρβώδης. Ο νόμος του Darcy δεν ισχύει επίσης όταν εφαρμόζονται πάρα πολύ μικρές υδραυλικές βαθμίδες σε αργιλικά κυρίως υλικά (Σχήμα 1.1). Όπως αποδείχθηκε από τον Hansbo (1960), σε αργιλικά εδαφικά δείγματα για πολύ μικρές υδραυλικές βαθμίδες (i<i₀) υπάρχει μια μη γραμμική συσχέτιση μεταξύ της ταχύτητας εκροής (v) και της υδραυλικής βαθμίδας, ενώ για μεγάλες υδραυλικές βαθμίδες (i≥i₀) η σχέση γίνεται γραμμική.



Σχήμα 1.1 Απόκλιση από το νόμο του Darcy σε αργιλικά υλικά (Hansbo, 1960)

Η υδραυλική αγωγιμότητα των εδαφών εξαρτάται από μηχανικούς και φυσικοχημικούς παράγοντες. Οι μηχανικοί παράγοντες κύριου ενδιαφέροντος που επηρεάζουν την μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι το μέγεθος του δοκιμίου, η υγρασία του εδάφους, η μέθοδος και ο χρόνος κορεσμού του δοκιμίου, η θερμοκρασία του ρευστού και του περιβάλλοντος χώρου και το χρησιμοποιούμενο ρευστό. Οι φυσικοχημικοί παράγοντες όπως η ορυκτολογική σύσταση και το ποσοστό των αργιλικών ορυκτών επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας επειδή ελέγχουν την τάση των αργιλικών ορυκτών να διογκώνονται και να δημιουργούν συσσωματώματα (Mesri et al.,1971).

Παραδοσιακά η σταθερά k καλείται συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας αλλά στην εδαφομηχανική και υδρογεωλογία ονομάζεται υδραυλική αγωγιμότητα. Στα πειραματα που πραγματοποιήθηκαν το ρέον υγρό είναι νερό και η υδραυλική αγωγιμότητα αναφέρεται σε θερμοκρασία νερού 20° C.

Η υδραυλική αγωγιμότητα αναφέρεται σε θερμοκρασία νερού 20° C και ανάλογα με τη τιμή της, τα γεωυλικά χαρακτηρίζονται όπως φαίνεται στο (Πίνακα 1.1).

Χαρακτηρισμός	Tιμές k (m/sec)
Αδιαπέρατα	k<10 ⁻⁹
Σχεδόν αδιαπέρατα	$10^{-9} < k < 10^{-7}$
Μικρής διαπερατότητας	$10^{-7} < k < 10^{-5}$
Μέσης διαπερατότητας	$10^{-5} < k < 10^{-3}$
Καλής διαπερατότητας	10 ⁻³ <k< td=""></k<>

Πίνακας 1.1 Χαρακτηρισμός εδαφών με βάση την υδραυλική αγωγιμότητα (Αλεξόπουλος, 1996).

1.2 Εργαστηριακές συσκευές προσδιορισμού υδραυλικής αγωγιμότητας

Εργαστηριακά, η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να μετρηθεί με συσκευές περατομέτρων εύκαμπτου (flexible wall) και άκαμπτου (rigid wall) τύπου. Το είδος του περατομέτρου που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας εξαρτάται κυρίως από τη φύση του υπό εξέταση δείγματος, τις διαδικασίες προετοιμασίας (ποιότητα) των δοκιμίων και τις συνθήκες που προσομοιώνονται.

Στις συσκευές των περατομέτρων, ανάλογα με τη φύση των εδαφικών σχηματισμών, μπορούν να εκτελεστούν δοκιμές σταθερού υδραυλικού φορτίου (constant head), δοκιμές πίπτοντος υδραυλικού φορτίου και δοκιμές σταθερού ρυθμού ροής (Olson and Daniel, 1981).

1.2.1 Περατόμετρα άκαμτου τύπου (Rigid wall)

Αποτελούνται από ένα άκαμπτο, κατασκευασμένο από μέταλλο κελί το οποίο περιέχει το δοκίμιο. Το κελί μπορεί να είναι πλαστικό ή γυαλί για δοκιμές όπου το ρέον υγρό είναι κάποιο χημικό. Το υγρό ρέει αξονικά κατά μήκος του δοκιμίου με κατεύθυνση από την βάση ή την κορυφή του δοκιμίου. Η κατεύθυνση της ροής παίζει σημαντικό ρόλο. Η ροή από την βάση του δοκιμίο βοηθά στη διάλυση του εγκλωβισμένου αέρα, αλλά πρέπει να δοθεί προσοχή στο να μην προκληθεί ρευστοποίηση το δοκίμιο. Τα περατόμετρα άκαμπτου τύπου (rigid wall) ανάλογα με το είδος του κελιού-δειγματολήπτη χωρίζονται σε τέσσερεις κατηγορίες: περατόμετρο συμπυκνωμένου δείγματος (περατόμετρο πίπτοντος φορτίου που δείγματος), περατόμετρο πίπτοντος φορτίου που επιτρέπει διόγκωση του δείγματος), περατόμετρο στερεοποίησης, περατόμετρο αδιατάρακτων

δειγμάτων και περατόμετρο μεγάλου μεγέθους (Γαμβρούδης, Χ. 2010, από Olson and Daniel, 1981).

Περατόμετρο πίπτοντος φορτίου που δεν επιτρέπει διόγκωση του δείγματος

Το περατόμετρο πίπτοντος φορτίου είναι το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο περατόμετρο άκαμπτου (rigid wall) τύπου (Σχήμα 1.2). Το υπό δοκιμή δείγμα συμπυκνώνεται κατάλληλα στο κελί-δειγματολήπτη του περατομέτρου, και στη συνέχεια μετράται η υδραυλική αγωγιμότητα. Κοκκομετρικά τα εδάφη που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο συγκεκριμένο περατόμετρο ποικίλλουν από αμμοχάλικα έως αργίλους.

Οι πορόλιθοι τοποθετούνται στις άκρες του δοκιμίου για να εξασφαλιστεί μονοδιάστατη ροή μέσα στο δοκίμιο. Για να επιτευχθεί αυτό, οι πορόλιθοι πρέπει να έχουν πολύ υψηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα από το δείγμα.



Σχήμα 1.2 Περατόμετρο άκαμπτου τύπου που δεν επιτρέπει την διόγκωση του δοκιμίου (Olson and Daniel,

1981)

Όταν μετράται η υδραυλική αγωγιμότητα, με οποιοδήποτε τύπο περατομέτρου, είναι σημαντικό, να περιορίζονται οι απώλειες φορτίου στο δοκίμιο και όχι στους πορόλιθους, στους σωλήνες ή τις βαλβίδες. Προτού εκτελεστεί μια δοκιμή για τη μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας προτείνεται η εκτέλεση μιας δοκιμαστικής μέτρησης ροής μέσω του δειγματολήπτη χωρίς δείγμα (συμπεριλαμβανομένων των πορόλιθων) εφαρμόζοντας μια διαφορά υδραυλικού φορτίου ίδια με αυτή που θα εφαρμοστεί στο δείγμα. Εάν ο ρυθμός ροής μέσω του άδειου κελιού είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερος από το ρυθμό ροής χρησιμοποιώντας το υπό δοκιμή δείγμα συμπεραίνεται ότι σχεδόν όλες οι απώλειες εμφανίζονται μέσα στο δοκίμιο. Το περατόμετρο στο **Σχήμα 1.2** δεν επιτρέπει στο δοκίμιο να διογκωθεί (Γαμβρούδης, Χ. 2010, από Olson and Daniel, 1981).

Περατόμετρο πίπτοντος φορτίου που επιτρέπει διόγκωση του δείγματος

Ένα άλλου τύπου περατόμετρο πίπτοντος φορτίου που επιτρέπει στο δείγμα να διογκωθεί παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1.3**. Σ' αυτόν τον τύπο κελιού, ο πορόλιθος στην ανώτερη επιφάνεια δεν είναι απαραίτητος και η ροή πρέπει να είναι πάντα από κάτω προς τα επάνω. Όταν χρησιμοποιούνται δείγματα τα οποία διογκώνονται πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι μεταβολή στο μήκος του δοκιμίου θα προκαλέσει μεταβολή στην υδραυλική βαθμίδα. Επίσης το δοκίμιο θα έχει πιθανότατα πολύ μεγαλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα σε σχέση με ένα άλλο δοκίμιο τοποθετημένο σε ένα κελί, το οποίο δεν επιτρέπει την διόγκωση εξαιτίας της πιθανής εμφάνισης πλευρικής διαρροής μεταξύ του δοκιμίου και του δειγματολήπτη (Γαμβρούδης, Χ. 2010, από Olson and Daniel, 1981).

Το περατόμετρο πίπτοντος φορτίου χρησιμοποιείται για εδάφη μικρής έως μέσης υδραυλικής αγωγιμότητας (όριο $k \le 10^{-5}$ m/s). Αποτελείται από μια κυψέλη- δειγματολήπτη στην οποία τοποθετείται το εδαφικό δείγμα, μια δεξαμενή βύθισης της κυψέλης και ένα σύστημα παροχής νερού στο δείγμα που αποτελείται από τρείς μανομετρικούς σωλήνες διαφορετικών διαμέτρων οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με μια βοηθητική δεξαμενή τροφοδοσίας. Στα άκρα του δείγματος τοποθετείται φίλτρο ώστε να αποτρέπεται η παράσυρση των λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών. Ανάλογα με την κοκκομετρία του υπό εξέταση εδαφικού υλικού επιλέγεται ένας από τους τρείς μανομετρικούς σωλήνες. Όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το εδαφικό δείγμα τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η διάμετρος του μανομετρικού σωλήνα που θα χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση της υδραυλικής

αγωγιμότητας (**BS 1377:1990**). Η αξιοπιστία του οργάνου είναι επίσης αποδεκτή κατά **ASTM D 5856** για συμπυκνωμένα δείγματα υδραυλικής αγωγιμότητας μικρότερης ή ίσης με 1×10⁻⁵.

Για την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας μετράται ο χρόνος που χρειάζεται η στάθμη του νερού να κατέλθει από ένα σημείο γνωστού υδραυλικού ύψους σε ένα άλλο. Η ροή περιγράφεται από τον Νόμο του Darcy και η υδραυλική βαθμίδα (i) μεταβάλλεται με το χρόνο (μειώνεται).

Η κίνηση του νερού εντός του δείγματος γίνεται από κάτω προς τα πάνω. Η κοκκομετρία του υπό εξέταση εδαφικού δείγματος καθορίζει το χρόνο κορεσμού και των μετρήσεων. Ο κορεσμός του δείγματος επιτυγχάνεται βυθίζοντας τη κυψέλη που περιέχει το συμπυκνωμένο δείγμα εντός της δεξαμενής βύθισης . Θετική ένδειξη ότι το δείγμα ''τραβάει'' νερό θεωρείται όταν το επίπεδο του νερού στη δεξαμενή βύθισης κατέλθει περισσότερο από αυτό που δικαιολογείται λόγω εξάτμισης. Το δείγμα θεωρείται κορεσμένο όταν στην κορυφή του εντοπισθεί υγρασία. Το μέγεθος των δοκιμίων που χρησιμοποιούνται είναι 100 mm στη διάμετρο και 110 mm στο ύψος. Η έξοδος του νερού γίνεται ελεύθερα στην υπερχείλιση της ήδη πληρωμένης με νερό δεξαμενής βύθισης του δοκιμίου.



Σχήμα 1.3 Περατόμετρο άκαμπτου τύπου που επιτρέπει την διόγκωση του δοκιμίου (Olson and Daniel, 1981)

10

Πολλές φορές παρεμβάλλονται στα τοιχώματα της κυψέλης πιεζόμετρα (Σχήμα 1.4) για να μετρήσουν την απώλεια φορτίου σε καθορισμένη απόσταση μέσα στο δοκίμιο. Η μέτρηση της απώλειας μεταξύ δύο σημείων της κυψέλης είναι συχνά ο απλούστερος τρόπος αντιμετώπισης (διόρθωσης) του προβλήματος που προκύπτει λόγω των απωλειών στους σωλήνες, τις βαλβίδες, τις συναρμολογήσεις. Αυτές οι απώλειες μειώνουν το ποσοστό ροής μέσω του δείγματος, αλλά η μείωση αυτή δεν επηρεάζει την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας εάν προσδιορίζεται η υδραυλική βαθμίδα μέσα στο δείγμα. Για εδάφη με πολύ υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα, τα κύρια θέματα που χρήζουν περαιτέρω εξέτασης: (1) η χρησιμοποίηση ενός υδραυλικού συστήματος που θα παρέχει αυξημένη ροή και (2) ο ακριβής προσδιορισμός της υδραυλικής βαθμίδας χρησιμοποιώντας πιεζόμετρα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4 (Γαμβρούδης, Χ. 2010, από Olson and Daniel, 1981).



Σχήμα 1.4 Περατόμετρο άκαμπτου τύπου για δοκιμές σε αδρόκοκκα εδαφικά δείγματα (Olson and Daniel,

1981)

<u>Περατόμετρο στερεοποίησης</u>

Ένα περατομέτρο στερεοποίησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5. Αυτός ο τύπος περατομέτρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δύο τρόπους (Olson et al., 1981 και Olson, 1986): το δείγμα στερεοποιείται και η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται με βάση το ρυθμό στερεοποίησης του, ή η υδραυλική αγωγιμότητα μετράται άμεσα με βάση τη ροή του νερού μέσα στο δοκίμιο.

Με τον πρώτο τρόπο δεν πρέπει να υπολογίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα κατά τη δευτερεύουσα στερεοποίηση γιατί οδηγεί σε πάρα πολύ μικρή υδραυλική αγωγιμότητα. Το πρόβλημα που προκύπτει από το δεύτερο τρόπο (άμεση μέτρηση της ροής στο κελίδειγματολήπτη στερεοποίησης) είναι ότι μπορεί να εμφανιστεί πλευρική διαρροή μεταξύ κελιού και δοκιμίου. Η πλευρική διαρροή σπάνια είναι πρόβλημα για εδάφη που έχουν υποβληθεί σε τάσεις συμπίεσης τουλάχιστον 50 kPa, αλλά μπορεί να είναι σοβαρό πρόβλημα κατά τη δοκιμή σε πολύ δύσκαμπτα εδάφη ή κατά την εφαρμογή πολύ μικρών τάσεων.



Σχήμα 1.5 Περατόμετρο στερεοποίησης (Olson and Daniel, 1981)

Το περατόμετρο στερεοποίησης είναι κατάλληλο μόνο για αργιλικά εδάφη που δεν περιέχουν καθόλου αμμοχάλικα ή άμμο. Η χρήση του έχει περιορισμένη, κυρίως επειδή άλλοι τύποι περατομέτρων προσφέρουν μεγαλύτερο εύρος εφαρμογής (Γαμβρούδης, Χ. 2010, από Olson and Daniel, 1981).

Περατόμετρο αδιατάρακτων δειγμάτων

Αδιατάρακτα δείγματα εδάφους λαμβάνονται συχνά με δειγματολήπτες λεπτού τοιχώματος (Σχήμα 1.6). Οι δειγματολήπτες λεπτού τοιχώματος έχουν κατασκευαστεί ώστε το ένα τους άνοιγμα να έχει ελαφρά μικρότερη διάμετρο από την εσωτερική διάμετρο του δειγματολήπτη. Με αυτό τον τρόπο μειώνονται οι τριβές (μεταξύ δείγματος και δειγματολήπτη) και η διαταραχή του δέγματος κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. Χρησιμοποιώντας όμως τους δειγματολήπτες αυτούς ως κυψέλες περατομέτρων υπάρχει υψηλός κίνδυνος πλευρικής διαρροής μεταξύ του δείγματος και του δειγματολήπτη, ιδιαίτερα όταν εξετάζονται υλικά που περιέχουν αμμοχάλικα, ή όταν είναι πολύ δύσκαμπτα ή σκληρά υλικά (Γαμβρούδης, Χ. 2010, από Olson and Daniel, 1981).



Σχήμα 1.6 Περατόμετρο αδιατάρακτων δειγμάτων (Olson and Daniel, 1981)

Περατόμετρο μεγάλου μεγέθους

Το δείγμα τοποθετείται σε ένα μεγάλου μεγέθους περατόμετρο, με ένα δακτυλιοειδή στεγανωτικό παρέμβυσμα μεταξύ του δείγματος και του σωλήνα του περατομέτρου (Σχήμα 1.7). Το στεγανωτικό υλικό είναι συνήθως μπεντονίτης. Προβλήματα πιθανόν να προκύψουν στο στεγανωτικό παρέμβυσμα σε κάθε δοκιμή, γι' αυτό πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή

στη διαμόρφωση και τον έλεγχο του στεγανωτικού παρεμβύσματος. Λόγω των δυσκολιών που περιγράφηκαν, το περατόμετρο μεγάλου μεγέθους δεν συνιστάται για γενική χρήση (Γαμβρούδης, X. 2010, από Olson and Daniel, 1981).



Σχήμα 1.7 Περατόμετρο μεγάλου μεγέθους (Olson and Daniel, 1981)

Περατόμετρο υψηλού φορτίου

Το περατόμετρο υψηλού φορτίου (Σχήμα 1.8) είναι σχεδιασμένο ώστε να μπορεί να πραγματοποιεί δοκιμές υδραυλικής αγωγιμότητας είτε σε δείγματα μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας με την τεχνική πίπτοντος φορτίου, είτε σε δείγματα μεγάλης υδραυλικής αγωγιμότητας με την τεχνική σταθερού φορτίου.



Σχήμα 1.8 Περατόμετρο Υψηλού φορτίου (Στειακάκης et al., 2012)

Η μονάδα περιλαμβάνει μετρητές πίεσης, βαλβίδες και τις απαραίτητες συναρμολογήσεις. Η δεξαμενή που περιέχει το νερό, είναι περίπου 4"(102 mm) σε διάμετρο με 20" (508 mm) ύψος. Στην συσκευή χρησιμοποιείται ένας ευαίσθητος ρυθμιστής ελέγχου πίεσης για να διατηρείται σταθερή πίεση στο δείγμα κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων.

Το περατόμετρο υψηλής πίεσης είναι ικανό να εκτελέσει δοκιμές σταθερού αλλά και πίπτοντος φορτίου. Η δοκιμή σταθερού φορτίου χρησιμοποιείται για το προσδιορισμό υδραυλικής αγωγιμότητας για υλικά όπως χαλίκια και άμμος ενώ η δοκιμή πίπτοντος φορτίου για πιο συνεκτικά εδάφη χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας. Η μέγιστη πίεση που μπορεί να εφαρμοστεί είναι 400 kPa, γεγονός που κάνει την συσκευή κατάλληλη για δοκιμές σε δείγματα ημί-βραχου καθώς και αργιλικά δείγματα με πολύ μικρή υδραυλική αγωγιμότητα.

Ο μετρητής πίεσης, η βαλβίδα εκροής του περατομέτρου και η μεγάλης διαμέτρου δεξαμενή καθιστούν δυνατό τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας, με τρόπο παρόμοιο με αυτόν του σταθερού φορτίου, μετρώντας δηλαδή τον χρόνο που θα χρειαστεί να περάσει μέσα από τον δειγματολήπτη συγκεκριμένος όγκος νερού για καθορισμένη εφαρμοζόμενη πίεση. Το μέγεθος των δειγμάτων που χρησιμοποιούνται στο περατόμετρο υψηλής πίεσης είναι 33 mm σε διάμετρο και 77 mm σε ύψος (ELE International, 2004).

1.2.2 Περατόμετρα εύκαμπτου τύπου (flexible wall)

Ένα περατόμετρο εύκαμπτου τύπου παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.9. Το δοκίμιο περιορίζεται περιμετρικά από μια μεμβράνη. Πορόλιθοι και πώμα τοποθετούνται στην κορυφή και το κατώτατο άκρο του.



Σχήμα1.9 Περατόμετρο εύκαμπτου τύπου (Olson and Daniel, 1981)

Το κελί γεμίζει με νερό και η μεμβράνη εφάπτεται στο δοκίμιο μειώνοντας την όποια πλευρική διαρροή. Όταν το ρέον υγρό είναι χημικό τρία είναι τα πιθανά προβλήματα που μπορεί να προκύψουν: (1) μη συμβατότητα του υγρού με τα μέρη του περατομέτρου (2) μη συμβατότητα του υγρού με τη μεμβράνη και (3) διάχυση του ρευστού μέσω της μεμβράνης στο κελί-δειγματολήπτη.

Το πρώτο πρόβλημα επιλύεται χρησιμοποιώντας κελί-δειγματολήπτη που είναι κατασκευασμένος από υλικά όπως ανοξείδωτος χάλυβας και Teflon.

Το δεύτερο πρόβλημα (συμβατότητα υγρού-μεμβράνης) μπορεί να επιλυθεί με δύο τρόπους: (α) χρησιμοποίηση μιας διαφορετικού τύπου μεμβράνης εκτός από το λατέξ (π.χ. neoprene) ή (β) το δοκίμιο μπορεί πρώτα να τυλιχτεί με ένα λεπτό φιλμ από Teflon και έπειτα να τοποθετηθεί μια μεμβράνη πάνω στο Teflon. Το περιτύλιγμα με Teflon έχει καλή εφαρμογή σε εδάφη, αλλά έχουν αναφερθεί προβλήματα στεγάνωσης στην χρήση σε ασυμπίεστα υλικά (π.χ. υλικά βασισμένα στο τσιμέντο).

Το τρίτο πρόβλημα (διάχυση του ρευστού) μπορεί να λυθεί με την τοποθέτηση ενός λεπτού φιλμ Teflon ή αλουμινόχαρτου, μεταξύ της μεμβράνης και του δοκιμίου (Γαμβρούδης, X. 2010, από Olson and Daniel, 1981).

Περατόμετρο τριαξονικής φόρτισης

Το περατόμετρο τριαξονικής φόρτισης αποτελείται από ένα κελί μέσα στο οποίο τοποθετείται δοκίμιο εντός ελαστικής μεμβράνης και από τρία συστήματα ελέγχουκαταγραφής πιέσεων συνδεδεμένα με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 1.10** υπάρχουν τρία συστήματα ελέγχου πίεσης Α, Β και C. Μέσω αυτών μπορούμε να καθορίσουμε τη πίεση στη κορυφή του δοκιμίου (P₂), στη βάση του (P₁) και στο κελί (σ₃) αντίστοιχα. Επίσης καταγράφουν τον όγκου νερού που εισέρχεται και εξέρχεται από το δείγμα και τη μεταβολής του όγκου του δείγματος κατά τη διάρκεια κάθε σταδίου (Murray Ε., et al., 2001). Στον ηλεκτρονικό υπολογιστή εισάγονται οι απαραίτητες τιμές πιέσεων με σκοπό να επιτευχθεί η επιθυμητή υδραυλική κλίση εντός του δοκιμίου. Αυτή θα εξασφαλίσει την απαιτούμενη ροή εντός του δοκιμίου.

Ο κορεσμός είναι απαραίτητος προκειμένου να διαλυθεί ο εγκλωβισμένος αέρας εντός του δοκιμίου. Το κελί όπου τοποθετείται το δοκίμιο εντός ελαστικής μεμβράνης πληρώνεται με νερό . Ο κορεσμός του δοκιμίου επιτυγχάνεται μέσω ταυτόχρονης αύξησης της πίεσης κελιού και αύξησης πίεσης του νερού των πόρων. Αυξάνεται η πίεση εντός του δοκιμίου για να ξεκινήσει ο κορεσμός αλλά αυξάνεται και η εξωτερική πίεση ως αντιστάθμιση για να αποφευχθεί η παραμόρφωση του. Η αύξηση πραγματοποιείται με τον ίδιο ρυθμό και στις δύο πιέσεις εξασφαλίζοντας μια σταθερή διαφορά πίεσης της τάξεως των 10 kPa. Ο χρόνος που απαιτείται για να κορεστεί το δοκίμιο εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, την κοκκομετρική διαβάθμισή και το μέγεθος του δοκιμίου(Manual of soil laboratory testing 1986). Ο κορεσμός του δοκιμίου μπορεί να πιστοποιηθεί με τη μέτρηση της παραμέτρου Β που καθορίζεται ως εξής:

$$B = \frac{\Delta_u}{\Delta_\sigma}$$

όπου,

 Δ_u : μεταβολή της πίεσης των πόρων που μετράται στο δοκίμιο

 Δ_{σ} : μεταβολή της εφαρμοζόμενης πίεσης (kPa)



Σχήμα 1.10 Περατόμετρο Τριαξονικής Φόρτισης

Η πίεση του κελιού μεταβάλλεται (συνήθως αυξάνεται) κατά Δ_{σ} . Η μεταβολή της πίεσης των πόρων ως αποτέλεσμα της αύξησης της πίεσης στο κελί καταγράφεται και ο συντελεστής B υπολογίζεται. Εάν το δείγμα έχει κορεστεί πλήρως και δεν υπάρχει αέρας εγκλωβισμένος, η πίεση των πόρων θα μεταβληθεί ανάλογα με την πίεση του κελιού και ο συντελεστής B θα προσσεγίσει την μονάδα. Εντούτοις για σκληρά εδάφη και ημίβραχους, ο συντελεστής B θα είναι μικρότερος από την μονάδα ακόμη και αν το δείγμα έχει κορεστεί πλήρως (Skempton 1954). Γενικά, όσο περισσότερος είναι ο αέρας στο δοκίμιο, τόσο μικρότερος της μονάδας θα είναι ο συντελεστής B.

1.2.3 Σύγκριση συσκευών προσδιορισμού υδραυλικής αγωγιμότητας

Μέχρι τις αρχές του 1980 τα περατόμετρα άκαμπτου (rigid wall) τύπου ήταν που χρησιμοποιούντο περισσότερο. Τα περατόμετρα άκαμπτου τύπου χρησιμοποιούνται ευρύτατα τόσο για δοκιμές σε άμμο, χαλίκια και άλλα μεγάλης υδραυλικής αγωγιμότητας εδαφικά δείγματα (ASTM D2434) όσο και για διερεύνηση της ροής του νερού ή χημικών σε αργίλους που έχουν συμπυκνωθεί εργαστηριακά. Ήταν όμως κοινώς αποδεκτό ότι οι πλευρικές διαρροές έπαιζαν πολύ σημαντικό ρόλο σε δοκιμές αργιλικών υλικών (και συγκεκριμένα εάν χρησιμοποιούνταν οργανικά ρευστά). Το γεγονός αυτό οδήγισε στην ανάπτυξη εύκαμπτου τύπου περατομέτρων.

Πίνακας 1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα περατομέτρου άκαμπτου και εύκαμπτου τύποι	(Olson and
Daniel, 1981).	

Περατόμετρο	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	
Άκαμπτου τύπου	 Ευκολία στην κατασκευή και στην χρήση Χαμηλό κόστος αγοράς Μεγάλο μέγεθος περατομέτρου Μεγάλο εύρος χρήσης εδαφικών δειγμάτων Επιτρέπουν την κατακόρυφη διόγκωση 	 Είναι πιθανή πλευρική διαρροή Δεν μπορεί να ελεγχθεί ο κορεσμός μέσω του συντελεστή Β Μεγάλος χρόνος δοκιμής για πολύ μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας γεωϋλικά Εάν το δοκίμιο συρρικνωθεί η πλευρική διαρροή θεωρείται δεδομένη Δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντιπίεση πόρων για το κορεσμό του δοκιμίου 	
Εύκαμπτου τύπου	 Ο κορεσμός μπορεί να γίνει με την χρήση αντιπίεσης πόρων Ο κορεσμός ελέγχεται μέσω του συντελεστή Β Δεν υπάρχει πλευρική διαρροή ακόμη και σε δείγματα με τραχείες επιφάνειες Μικρότεροι χρόνοι δοκιμής για δοκίμια μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας 	 Μεγάλο κόστος Ανάγκη για 3 θέσεις εφαρμογής πίεσης (πίεση κελιού, πίεση εισόδου, πίεση εξόδου) Προβλήματα καταστροφής της μεμβράνης με συγκεκριμένα χημικά και απόβλητα Περισσότερο περίπλοκη χρήση του κελιού 	

Οι δοκιμές με περατόμετρα εύκαμπτου τύπου χρησιμοποιούνται πλέον για δοκιμές σε αργιλικά υλικά επειδή υπάρχει πρότυπο ASTM για αυτά (ASTM D5084). Επίσης ο

κορεσμός με τη χρήση μιας αντιπίεσης πόρων οδηγεί σε μικρότερους χρόνους δοκιμής σε σχέση με αυτούς στα περατόμετρα τύπου άκαμπτου.

Σύγκριση μεταξύ των περατομέτρων άκαμπτου και εύκαμπτου τύπου περιγράφεται από τους Zimmie (1981) και Daniel et al (1986) και παρουσιάζεται συνοπτικά στον Πίνακα **1.2** (Γαμβρούδης, Χ. 2010, από Olson and Daniel, 1981).

1.3 Τεχνικές μέτρησης υδραυλικής αγωγιμότητας

1.3.1 Δοκιμή πίπτοντος υδραυλικού φορτίου

Στις δοκιμές πίπτοντος φορτίου το επίπεδο της στάθμης του νερού στην είσοδο του δοκιμίου μεταβάλλεται (Σχήμα 1.11).

Το κύριο πλεονέκτημα των δοκιμών πίπτοντος φορτίου είναι ότι ο εξοπλισμός τους είναι πιο απλός σε σχέση με τον εξοπλισμό που απαιτείται στις δοκιμές σταθερού φορτίου. Ένα μικρό μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι οι εξισώσεις για τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι πολύ πιο περίπλοκες.



Σχήμα 1.11 Διάταξη μεταβλητού φορτίου (Olson and Daniel, 1981)

Εντούτοις, υπάρχουν τρείς δυνητικοί περιορισμοί στις δοκιμές πίπτοντος φορτίου οι οποίοι είναι (Γαμβρούδης, X. 2010, από Olson and Daniel, 1981):

- Καθώς το υδραυλικό φορτίο μειώνεται, η πίεση μειώνεται και κάθε πιθανή φυσαλίδα στο δοκίμιο διογκώνεται.
- Καθώς η πίεση μειώνεται, το ποσοστό του αδιάλυτου αέρα στο ρευστό μειώνεται, γεγονός το οποίο μπορεί να προκαλέσει την έκλυση αδιάλυτου αέρα από το ρευστό και την δημιουργία φυσαλίδων (εφόσον το ρευστό ήταν κορεσμένο με αδιάλυτο αέρα στην αρχική μέγιστη πίεση).
- Στα κελιά εύκαμπτου τύπου στα οποία η ολική τάση διατηρείται σταθερή, η μείωση της πίεσης των πόρων προκαλεί μια αύξηση στην ενεργή τάση η οποία με την σειρά της προκαλεί φαινόμενα στερεοποίησης και μείωση του λόγου κενών.

Η δοκιμή του πίπτοντος φορτίου χρησιμοποιείται για εδάφη μικρής έως μέσης υδραυλικής αγωγιμότητας, δηλαδή για εδάφη με υδραυλική αγωγιμότητα < 10^{-5} m/s, όπως οι άργιλοι.

Το πρόβλημα της στερεοποίησης μπορεί να είναι σημαντικό για υλικά υψηλής συμπιεστότητας. Το πρόβλημα της ανάπτυξης των φυσαλίδων με την μείωση της πίεσης, περιορίζεται εάν το δοκίμιο κορεστεί με τη τεχνική αντιπίεσης πόρων και το πρόβλημα της δημιουργίας φυσαλίδων από το ρευστό περιορίζεται με τη χρήση απαερωμένου ρευστού σε υψηλές πιέσεις. Επίσης αν υπάρχουν μικρές απώλειες φορτίου στους σωλήνες, βαλβίδες, πρέπει να ληφθούν υπόψη στις δοκιμές σταθερού φορτίου, ενώ στις δοκιμές μεταβλητού φορτίου όχι, μιας και οι απώλειες φορτίου διαφοροποιούνται με το φορτίο (Γαμβρούδης, Χ. 2010, από Olson and Daniel, 1981).

1.3.2 Δοκιμή σταθερού υδραυλικού φορτίου

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να διατηρηθεί το φορτίο σταθερό. Στο Σχήμα 1.12 διατηρείται σταθερή η στάθμη στη δεξαμενή νερού σε συνεχή ροή, παρέχοντας επαρκή ποσότητα νερού στο περατόμετρο.

Μια άλλη μέθοδος για την διατήρηση σταθερού φορτίου είναι ο σωλήνας τύπου Mariotte (Σχήμα 1.13). Ένας μικρής διαμέτρου σωλήνας τοποθετείται μέσα στη δεξαμενή και ο δακτύλιος ταπώνεται με ένα λαστιχένιο πώμα. Καθώς το νερό αρχίζει να ρέει έξω από τη δεξαμενή, ο αέρας μεταφέρεται στο σωλήνα μικρής διαμέτρου. Όταν ο σωλήνας μικρής διαμέτρου αδειάσει από νερό, ο αέρας ξεκινάει να σχηματίζει φυσαλίδες στη δεξαμενή. Το φορτίο στο σωλήνα μικρής διαμέτρου πρέπει να είναι ίσο με την εφαρμοζόμενη πίεση αέρα. Καθώς ο αέρας σχηματίζει φυσαλίδες στη δεξαμενή, η συσκευή Mariotte διατηρεί το φορτίο σταθερό. Εντούτοις υπάρχει μια μικρή διακύμανση λίγων χιλιοστών στο φορτίο κατά την διάρκεια της δημιουργίας των φυσαλίδων αέρα. Αυτή η μικρή διακύμανση στο φορτίο σπάνια είναι σημαντική σε εργαστηριακές δοκιμές μέτρησης της υδραυλικής αγωγιμότητας αλλά μπορεί να είναι σημαντική σε άλλου είδους εφαρμογές π.χ. δοκιμές διήθησης στο πεδίο.



Σχήμα 1.12 Το σταθερό φορτίο διατηρείται με συνεχή παροχή νερού στη δεξαμενή (Olson and Daniel, 1981)

Η δοκιμή είναι κατάλληλη και ενδείκνυται για εδάφη με υδραυλική αγωγιμότητα μεταξύ 10⁻² και 10⁻⁵ m/s, που συναντάται σε καθαρές άμμους και δείγματα αμμοχάλικων με λεπτόκοκκα (ιλύς ή άργιλος) λιγότερα από 10% (Γαμβρούδης, Χ. 2010, από Burnes, 2005). Τα κύρια πλεονεκτήματα τις δοκιμής σταθερού φορτίου είναι:

- Ευκολία στον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας,
- Διατήρηση μιας σταθερής πίεσης πόρων στο δοκίμιο.



Σχήμα 8 Το σταθερό φορτίο διατηρείται χρησιμοποιώντας τη συσκευή Marriotte (Olson and Daniel, 1981)

1.3.3 Δοκιμή σταθερού ρυθμού ροής

Οι δοκιμές ροής σταθερού ρυθμού πραγματοποιούνται εισπιέζοντας το ρευστό μέσα στο δοκίμιο με ελεγχόμενο ρυθμό και μετρώντας την πτώση της πίεσης στα άκρα του δοκιμίου (Σχήμα 1.14). Στην απλούστερη διάταξη, ένας διαφορικός ηλεκτρονικός ελεγκτής πίεσης μεταφέρει το σήμα σε έναν καταγραφέα. Όταν ο ρυθμός ροής και η πτώση της πίεσης σταθεροποιηθούν, η δοκιμή έχει ολοκληρωθεί (εκτός και αν χρησιμοποιείται χημικό ή απόβλητο ρευστό όπου η δοκιμή συνεχίζεται έως ότου πληρούνται άλλα κριτήρια).



Σχήμα1.14 Διάταξη δοκιμής σταθερού ρυθμού ροής (Olson and Daniel, 1981)

Πρέπει να δοθεί προσοχή στην εφαρμογή του ρυθμού ροής έτσι ώστε η πίεση του υγρού που διέρχεται μέσω του δοκίμου να είναι μικρότερη από την πίεση που εφαρμόζεται στην μεμβράνη για να εξασφαλιστεί καλή επαφή μεταξύ της μεμβράνης και του δοκιμίου. Η

επιβολή μιας ροής με σταθερό ρυθμό μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως με τον έλεγχο των πιέσεων και του ρυθμού της ροής από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ένα σχηματικό διάγραμμα ενός αυτόματα ελεγχόμενου συστήματος φαίνεται στο **Σχήμα 1.15**.



Σχήμα 1.15 Αυτοματοποιημένη διάταξη δοκιμής σταθερού ρυθμού ροής

Τα πλεονεκτήματα της δοκιμής με σταθερού ρυθμού ροή διάμεσου του δοκιμίου έναντι των άλλων δύο τεχνικών (σταθερού και πίπτοντος φορτίου) είναι (Γαμβρούδης, Χ. 2010, από Olson and Daniel, 1981):

- Μείωση του χρόνου της δοκιμής και γρήγορη επίτευξη πλήρους ισορροπίας, εφόσον το δοκίμιο είναι κορεσμένο σε νερό.
- Αυτοματοποίηση της όλης διαδικασίας και μέτρηση με μεγάλη ακρίβεια της ροής του νερού που περνάει μέσω του δοκιμίου σε όλη την διάρκεια της δοκιμής.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος του εξοπλισμού και η πιθανότητα δημιουργίας (εάν ο ρυθμός ροής που χρησιμοποιείται είναι υψηλός) πολύ μεγάλων υδραυλικών βαθμίδων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προσδιορισμός υδραυλικής αγωγιμότητας με εμπειρικούς τύπους

Έχει διαπιστωθεί ότι η υδραυλική αγωγιμότητα σχετίζεται με την κοκκομετρική διαβάθμιση σε χονδρόκοκκα εδαφικά δείγματα (Freeze and Cherry, 1979). Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι εκτίμησης της υδραυλικής αγωγιμότητας από εμπειρικούς τύπους βασισμένους στα χαρακτηριστικά κοκκομετρικής διαβάθμισης ώστε να ξεπεραστούν τα εργαστηριακά προβλήματα απόκτησης αντιπροσωπευτικών δειγμάτων και πολύ συχνά, των μεγάλων χρόνων της δοκιμής.

Υπάρχουν πολυάριθμοι τύποι που έχουν προκύψει βάσει πειραματικών μετρήσεων. Ο Kozeny (1927) πρότεινε έναν τύπο ο οποίος τροποποιήθηκε έπειτα από τον Carman (1937, 1956) για να γίνει η γνωστή εξίσωση Kozeny-Carman. Άλλες προσπάθειες έγιναν από τους Hazen (1892), Terzaghi και Peck (1964), Shepherd (1989), Alyamani και Sen (1993). Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εφαρμόζοντας τους προαναφερόμενους τύπους εξαρτάται από το εδαφικό δείγμα στο οποίο ερευνάται η υδραυλική αγωγιμότητα. Επιπλέον, κάποιοι από τους τύπους αυτούς δίνουν λιγότερο αξιόπιστα αποτελέσματα λόγω της δυσκολίας να συμπεριλάβουν όλες τις μεταβλητές που επηρεάζουν την υδραυλική αγωγιμότητα (Odong, 2007).

2.1 Εμπειρικοί τύποι

Η υδραυλική αγωγιμότητα εκτιμήθηκε μέσω μίας παραλλαγής του τύπου Kozeny-Carman. Η εξίσωση αυτή δεν είναι κατάλληλη για εδάφη με ενεργό μέγεθος (d10) πάνω από 3mm ή για αργιλώδη εδάφη (Ishaku J., et al., 2010).

$$k = \frac{g}{\nu} \times 8.3 \times 10^{-3} \times \left[\frac{n^3}{(1-n)^2}\right] \times d_{10}^2$$
(Eξίσωση 2.1)

όπου,

- k : υδραυλική αγωγιμότητα cm/s
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας, cm/s²
- ν : κινηματικό ιξώδες νερού, 0.01 cm²/s
- n : πορώδες, %

Ο **Breyer** διατύπωσε έναν άλλο τύπο για την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας, η οποία δεν λαμβάνει υπόψη το πορώδες. Θεωρείται χρήσιμος για ετερόμορφα εδαφικά δείγματα με συντελεστή ομοιομορφίας (U) μεταξύ 1 και 20, και ενεργό μέγεθος κόκκων (d₁₀) μεταξύ 0,06 mm και 0,6 mm (Ishaku J., et al., 2010).

$$k = \frac{g}{v} \times 6 \times 10^{-4} \log \frac{500}{U} d_{10}^2$$
 (Eξίσωση 2.2)

όπου,

k : υδραυλική	αγωγιμότητα, cm/s
---------------	-------------------

- d₁₀ : ενεργό μέγεθος που αντιστοιχεί στο μέγεθος του 10% κατά βάρος
 των λεπτόκοκκων κόκκων, cm
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας, cm/s^2
- ν : κινηματικό ιξώδες νερού, 0.01 cm²/s
- U : συντελεστής ομοιομορφίας

Ο τύπος εκτίμησης της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά **Slitcher** είναι περισσότερο εφαρμόσιμος για μέγεθος κόκκων μεταξύ 0,01 και 5 mm (Ishaku J., et al., 2010).

$$k = \frac{g}{v} \times 1 \times 10^{-2} n^{3.287} d_{10}^2$$
(Εξίσωση 2.3)

όπου,

- k : υδραυλική αγωγιμότητα, cm/s
- d₁₀ : ενεργό μέγεθος που αντιστοιχεί στο μέγεθος του 10% κατά βάρος
 των λεπτόκοκκων κόκκων, cm
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας, cm/s 2
- ν : κινηματικό ιξώδες νερού, 0.01 cm^2/s
- n : πορώδες, %

Ένας εναλλακτικός τύπος εκτίμησης της υδραυλικής αγωγιμότητας με βάση το d_{10} κατά **Hazen** είναι ο εξής (Ishaku J., et al., 2010):

$$k = \frac{g}{v} \times 6 \times 10^{-4} [1 + 10(n - 0.26)] d_{10}^2$$
(Εξίσωση 2.4)

όπου,

k : υδραυλική αγωγιμότητα, cm/s

d₁₀ : ενεργό μέγεθος που αντιστοιχεί στο μέγεθος του 10 % κατά βάρος
 των λεπτόκοκκων κόκκων, cm

- g : επιτάχυνση της βαρύτητας, cm/s 2
- ν : κινηματικό ιξώδες νερού, 0.01 cm²/s
- n : πορώδες, %

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Προσδιορισμός γεωτεχνικών παραμέτρων εδαφικού υλικού

3.1 Κοκκομετρική ανάλυση

Η κοκκομετρική διαβάθμιση ενός εδαφικού δείγματος αποτελεί μέθοδο ταυτοποίησης και ταυτόχρονα ταξινόμησής του. Στο Εργαστήριο γίνεται με την μηχανική μέθοδο (χρήση κοσκίνων), για εδάφη με κόκκους > 0.075 mm και με την υδρομετρική μέθοδο (καθίζηση σε υγρό περιβάλλον), για εδάφη με κόκκους που διέρχονται από το κόσκινο No 200 (< 0.075 mm) και μέχρι διαμέτρου 0.001 mm περίπου (Στειακάκης 2008).

3.1.1 Μηχανική μέθοδος (κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα)

Η μέθοδος αφορά στον προσδιορισμό της κατανομής του μεγέθους των κόκκων με τη χρησιμοποίηση κοσκίνων τετραγωνικών ή κυκλικών οπών. Ξηρό δείγμα εδάφους κοσκινίζεται μέσα από μια σειρά κοσκίνων και καταγράφεται το βάρος που συγκρατείται από κάθε κόσκινο.

3.1.2 Κοκκομετρική ανάλυση εδαφών με χρήση αραιομέτρου

Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής διαβάθμισης των λεπτόκοκκων εδαφικών υλικών (ιλύων και αργίλων) γίνεται, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, με τη μέθοδο του αραιομέτρου. Χρησιμοποιείται μικρή ποσότητα ξηρού εδαφικού δείγματος, η οποία τοποθετείται σε ογκομετρικό κύλινδρο ο οποίος πληρούται με απιονισμένο νερό μέχρι τα 1000 ml. Στο διάλυμα που προκύπτει μετά από ανάδευση, η καθίζηση των εδαφικών κόκκων είναι πιθανό να διαρκέσει πολλές ώρες ή και ημέρες. Κατά τη διάρκεια της καθίζησης καταγράφεται, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, η μάζα των εδαφικών κόκκων που βρίσκονται "εν αιωρήσει". Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο νόμο του Stokes για την κίνηση σφαιρών σε ιξώδες ρευστό με την επίδραση της βαρύτητας, σύμφωνα με τον οποίο η οριακή ταχύτητα καθίζησης εξαρτάται από τη διάμετρο και την πυκνότητα του υλικού των σφαιρών, την πυκνότητα του ρευστού και το ιξώδες του. Με βάση την ταχύτητα καταβύθισης των κόκκων. Οι μεγάλοι

κόκκοι καθιζάνουν στο πυθμένα του κυλίνδρου πρώτοι και οι μικρότερης διαμέτρου τελευταίοι.

3.1.3 Σχεδίαση κοκκομετρικής καμπύλης.

Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης είναι δυνατόν να παρασταθούν με βάση :

- τα ολικά ποσοστά (%) διερχόμενων από κάθε κόσκινο
- τα ολικά ποσοστά (%) συγκρατούμενων από κάθε κόσκινο
- τα ποσοστά (%) που συγκρατούνται μεταξύ των διαδοχικών κοσκίνων.

Οι προαναφερόμενες τιμές πρέπει να στρογγυλοποιούνται, εκτός από το ποσοστό που διέρχεται από το κόσκινο No 200 το οποίο πρέπει να δίδεται με ακρίβεια 0,1 g.

Η κοκκομετρική καμπύλη σχεδιάζεται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα όπου τα ολικά (αθροιστικά) ποσοστά (%) διερχομένων ή συγκρατουμένων απεικονίζονται στον κατακόρυφο (γραμμικό) άξονα και το μέγεθος των εδαφικών κόκκων (δεδομένου ότι ποικίλουν ευρύτατα) στον λογαριθμικό άξονα των τετμημένων.

Από την κοκκομετρική καμπύλη προκύπτει το ποσοστό κάθε κλάσματος (λίθοι, χάλικες, άμμος, ιλύς, άργιλος) που περιέχεται στο δείγμα.

Καμπύλη με ισχυρή κλίση υποδεικνύει <u>ομοιόμορφο έδαφος</u> με κόκκους περίπου του ίδιου μεγέθους. Όταν η καμπύλη έχει ήπια κλίση αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ευρεία διακύμανση μεγέθους κόκκων και το έδαφος είναι <u>καλά διαβαθμισμένο</u>. Σε περίπτωση που η καμπύλη εμφανίζει τμήματα διαφορετικής καμπυλότητας τότε το έδαφος χαρακτηρίζεται σαν <u>μίγμα δύο ή περισσοτέρων ομοιόμορφων γεωυλικών</u> (*Στειακάκης 2008*).

Προγενέστερες μελέτες στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης (Γαμβρούδης, 2010) εκτίμησαν την κοκκομετρική διαβαθμιση του καολίνη και της άμμου. Στη παρούσα εργασία έγινε αναγωγή των μετρήσεων αυτών στις αναλογίες που εξετάζονται και προέκυψαν οι κοκκομετρικές καμπύλες των μειγμάτων Καολίνη-Άμμου.

Τα αποτελέσματα των κοκκομετρικών αναλύσεων για τα εδαφικά δείγματα που μελετήθηκαν Καολίνης - Άμμος (85-15%), Καολίνης - Άμμος (50-50%) και Καολίνης - Άμμος (15-85%) παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.





Σχήμα 3.2 Κοκκομετρική ανάλυση εδαφικού δείγματος Καολίνη - Άμμου (50-50%)



Σχήμα 3.3 Κοκκομετρική ανάλυση εδαφικού δείγματος Καολίνη - Άμμου (15-85%)

Από τη κοκκομετρική ανάλυση των εδαφών προσδιορίστηκαν τα παρακάτω μεγέθη:

Η <u>ενεργή διάμετρος</u> (d₁₀), ορίζεται σαν η μέγιστη διάμετρος των μικρότερων 10% κατά βάρος εδαφικών κόκκων και το μέγεθός της συνδέεται με την διαπερατότητα του εδάφους.

Ο <u>συντελεστής ομοιομορφίας (U)</u> ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης διαμέτρου των μικρότερων 60% κατά βάρος εδαφικών κόκκων (d₆₀) προς το ενεργό μέγεθος (d₁₀) (τύπος Hazen, U=d₆₀/ d₁₀).

Ο <u>συντελεστής καμπυλότητας</u> (Cc), ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο $Cc=(d_{30})^2/(d_{10}\times d_{60})$. Ο συντελεστής αυτός υποδηλώνει το μέτρο της καμπυλότητας της καμπύλης μεταξύ των σημείων d₆₀ και d₁₀.

Τα μεγέθη αυτά εκτιμήθηκαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Καολίνης-Άμμος %	85-15	50-50	15-85
Ενεργή διάμετρος (d ₁₀)	0,000468	0,0008	0,004
Συντελεστής ομοιομορφίας (U)	10,69	175	47,5
Συντελεστής καμπυλότητας (Cc)	1,38	0,12	22,23

Πίνακας 3.1 Αποτελέσματα κοκκομετρικών αναλύσεων

Μικρή τιμή του ενεργού μεγέθους (d₁₀) υποδεικνύει ότι το έδαφος περιέχει σημαντικό ποσοστό λεπτών κόκκων. Μεγάλη τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας υποδεικνύει ότι τα μεγέθη των κόκκων είναι καλά κατανεμημένα από το μικρότερο προς το μεγαλύτερο μέγεθος και υποδεικνύει το μέγιστο μέγεθος των κόκκων. Εδάφη που έχουν τιμές U μικρότερες του 4 ή του 5 καλούνται ομοιόμορφα ενώ τα εδάφη με τιμές U μεγαλύτερες του 10 χαρακτηρίζονται σαν καλά διαβαθμισμένα (*Στειακάκης 2010*). Τα υπό εξέταση εδαφικά δείγματα χαρακτηρίζοναται ως "καλά διαβαθμισμένα" εφόσον και για τις τρεις αναλογίες U>10.

3.2 Όρια Atterberg

Ένα από τα χαρακτηριστικά διάκρισης των συνεκτικών εδαφών είναι ότι μπορούν να υποστούν πλαστική παραμόρφωση χωρίς θραύση. Φυσικά, η πλασιμότητα που επιδεικνύουν εξαρτάται μεταξύ άλλων από την περιεκτικότητά τους σε νερό.

Στην περίπτωση που ένα αργιλικό (συνεκτικό) εδαφικό υλικό αναμειχτεί ομοιόμορφα με επαρκή ποσότητα νερού, θα συμπεριφερθεί σαν υγρό, γεγονός που σημαίνει ότι δεν θα έχει διατμητική αντοχή και θα παραμορφώνεται ελεύθερα (υδαρής κατάσταση). Εάν η ποσότητα του νερού μειωθεί, ο όγκος θα ελαττωθεί και το έδαφος θα αρχίσει – μετά από ένα συγκεκριμένο ποσοστό υγρασίας – να παρουσιάζει διατμητική αντοχή (πλαστική κατάσταση) (Στειακάκης 2008).

<u>Η περιεκτικότητα σε νερό στην οποία το έδαφος αρχίζει να εμφανίζει διατμητική</u> <u>αντοχή καλείται όριο υδαρότητας LL (liquid limit)</u> και εκφράζει το όριο μεταξύ της υδαρούς και της πλαστικής κατάστασης του εδάφους.

Επειδή είναι αδύνατο να προσδιορισθεί εργαστηριακά το σημείο στο οποίο το έδαφος αρχίζει να παρουσιάζει διατμητική αντοχή, το όριο υδαρότητας θεωρείται σαν η περιεκτικότητα σε νερό στην οποία το έδαφος παρουσιάζει μια συγκεκριμένη αντοχή σε διάτμηση. Αυτή η αυθαίρετη, οριακή τιμή της διατμητικής αντοχής, χαρακτηρίζει το έδαφος το οποίο εάν τοποθετηθεί στο κύπελλο της συσκευής Gasagrande και διαιρεθεί με ένα συγκεκριμένων διαστάσεων εργαλείο αυλάκωσης, απαιτεί 25 κτυπήματα (πτώσεις του κυπέλλου της συσκευής) για να εκδηλωθεί ροή του εδάφους και να ενωθεί η αυλάκωση στη βάση της σε μήκος 12.7 mm.

Στο εργαστήριο επαναλαμβάνονται διάφορες δοκιμές σε δείγματα από το ίδιο το έδαφος αλλά με διαφορετική περιεκτικότητα σε νερό και με βάση τα αποτελέσματα, προσδιορίζεται ο αριθμός των κτυπημάτων που απαιτούνται για να ενωθεί η αυλάκωση στη βάση της σε μήκος 12.7 mm.

Από το ημιλογαριθμικό διάγραμμα της περιεχόμενης υγρασίας (τεταγμένη, σε γραμμική κλίμακα) προς τον αντίστοιχο αριθμό κτυπημάτων (τετμημένη, σε λογαριθμική κλίμακα) προκύπτει μία γραμμική σχέση που προσδιορίζει την ΄΄καμπύλη ροής΄΄. Το ποσοστό της υγρασίας που αντιστοιχεί στην τετμημένη των 25 κτυπημάτων και την καμπύλη ροής προσδιορίζει το όριο υδαρότητας.

Στην περίπτωση που η υγρασία του εδάφους μειώνεται, ο όγκος και η πλασιμότητά του μειώνονται αντίστοιχα. Σε κάποιο ποσοστό υγρασίας, το έδαφος θα σταματήσει να επιδεικνύει πλαστική συμπεριφορά και θα προκληθεί θραύση. Αυτή η περιεκτικότητα σε νερό καλείται <u>όριο πλαστικότητας PL</u> και εκφράζει το όριο μεταξύ της πλαστικής και ημιστερεής κατάστασης (*Στειακάκης 2008*).

Το όριο πλαστικότητας προσδιορίζεται αυθαίρετα στο Εργαστήριο σαν το ελάχιστο ποσοστό σε νερό στο οποίο ένα έδαφος μπορεί να πλασθεί, σχηματίζοντας ραβδίσκους με διάμετρο 3mm χωρίς να θρυμματισθεί.

Οι δοκιμές για τον προσδιορισμό των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας (όρια Atterberg) πραγματοποιούνται σε εδαφικό υλικό που διέρχεται από το κόσκινο No 40 (425 μm) και είναι εντελώς ξηρό. Ας σημειωθεί ότι για τα περισσότερα εδάφη η φυσική ξήρανση δεν επηρεάζει σημαντικά τις τιμές των ορίων Atterberg που προκύπτουν, ενώ η ξήρανση σε

φούρνο επιφέρει αλλαγές στα χαρακτηριστικά της δομής (συνοχή) των περισσοτέρων εδαφών, ιδιαίτερα εκείνων που έχουν σε μεγάλο ποσοστό κόκκους μικρού μεγέθους και επηρεάζει τα αποτελέσματα (Στειακάκης 2008).

- Αμμώδη εδάφη επιδεικνύουν όρια υδαρότητας της τάξης του 20% και δείκτη πλαστικότητας από 0 μέχρι 5.
- Ιλείς και άργιλοι είναι δυνατόν να εμφανίσουν όρια υδαρότητας 80 100 % ενώ άργιλοι με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά υλικά να παρουσιάσουν ακόμα υψηλότερες τιμές.
- Τα όρια υδαρότητας και πλαστικότητας μολονότι δεν παρέχουν τιμές οι οποίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν απευθείας σε υπολογισμούς, εν τούτοις είναι πολύ χρήσιμες.

Μερικές εφαρμογές τους αναφέρονται παρακάτω:

- a) Η επί τόπου κατάσταση ενός εδάφους μπορεί να εκτιμηθεί με το λόγο "ύδατος-ορίου πλαστικότητας" που είναι το πηλίκο της διαφοράς μεταξύ του περιεχομένου φυσικού ύδατος και του ορίου πλαστικότητας, προς τον δείκτη πλαστικότητας. Υψηλή τιμή αυτού του λόγου, υποδηλώνει ότι το περιεχόμενο φυσικό νερό είναι πολύ σε σχέση με το όριο υδαρότητας, και προδικάζει μια πολύ χαμηλή αντοχή αναζυμωθέντος εδάφους.
- b) Συχνά μπορούμε να διαμορφώσουμε ημιεμπειρικές σχέσεις μεταξύ μιας ιδιότητας (συμπιεστότητας, διαπερατότητας, συνοχής) του εδάφους και των ορίων ή των δεικτών. Από αυτές τις σχέσεις, είναι δυνατόν στη συνέχεια να γίνουν προβλέψεις των ιδιοτήτων άλλου δείγματος αν είναι γνωστές οι τιμές των ορίων Atterberg.
- c) Τέλος τα όρια Atterberg αποτελούν βάση για την ταυτοποίηση και ταξινόμηση των λεπτόκοκκων εδαφών (Στειακάκης 2008).

3.2.1 Προσδιορισμός ορίου υδαρότητας

Η διαδικασία, που ακολουθήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM D4318-83, έχει ως εξής:

Λαμβάνεται δείγμα βάρους τουλάχιστον 200 g από το γεωϋλικό, που έχει αναμιχθεί καλά και διέρχεται από το κόσκινο ανοίγματος No. 40 (425 μm). Το υλικό τοποθετείται στην κάψα, προστίθεται μικρή ποσότητα νερού και αναμειγνύεται καλά με την σπάτουλα, μέχρις ότου δημιουργηθεί μια ομοιόμορφη, παχύρρευστη μάζα (πάστα).



Εικόνα 3.1 Συσκευή Casagrande

Το δείγμα τοποθετείται στο κύπελλο της συσκευής Casagrande, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα στρώμα με ομαλή επιφάνεια. Το μέγιστο πάχος του στρώματος πρέπει να είναι περίπου 1 cm.

Το εδαφικό δείγμα χωρίζεται σε δυο ίσα μέρη σύροντας το εργαλείο αυλάκωσης κατά μήκος του άξονα συμμετρίας του κυπέλλου. Περιστρέφεται ο χειροκίνητος στρόφαλος της συσκευής με ρυθμό 2 περιστροφές ανά δευτερόλεπτο και μετρώνται οι πτώσεις, που απαιτούνται, έως ότου οι δυο πλευρές του δείγματος ενωθούν στην βάση της χαραγής και σε μήκος 12,7 mm.

Εάν ο αριθμός των περιστροφών, που απαιτούνται, είναι μεταξύ 5 και 40, λαμβάνεται με τη σπάτουλα ποσότητα δείγματος από την περιοχή της επαφής (της κλειστής πλέον αύλακας). Η ποσότητα αυτή τοποθετείται σε γυάλινο υποδοχέα, μετά τις απαραίτητες ζυγίσεις, και στο ξηραντήριο για την εκτίμηση της υγρασίας.

Στη συνέχεια, μεταβάλλεται η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, είτε προσθέτοντας νερό στο ίδιο ή σε άλλο δείγμα, το οποίο παρασκευάζεται ανάλογα. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία μέχρις ότου προσδιοριστεί ένας αριθμός τουλάχιστον
τεσσάρων τιμών περιεκτικότητας σε νερό, για τις οποίες ο αριθμός των πτώσεων του κυπέλλου, που απαιτούνται για να κλείσει η αύλακα, είναι μεταξύ 5 και 40.

Μετά από 24 ώρες οι υποδοχείς αφαιρούνται από το ξηραντήριο και καταγράφονται τα ξηρά τους βάρη. Η απώλεια βάρους αναφέρεται σαν βάρος ύδατος (υγρασία).

3.2.2 Προσδιορισμός ορίου πλαστικότητας

Η διαδικασία, που ακολουθήθηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές ASTM D4318-83, έχει ως εξής:

Ελήφθησαν περίπου 20 g εδαφικού υλικού, που έχει αναμειχθεί καλά και διέρχεται από το κόσκινο Νο. 40. Το δείγμα τοποθετείται μέσα στην κάψα και προστίθεται νερό ενώ αναμειγνύεται με τη σπάτουλα, ώστε να αποκτήσει πλαστικότητα. Η μάζα κυλινδρώνεται μεταξύ των δακτύλων και μιας γυάλινης πλάκας ή άλλης ομαλής επιφάνειας με την απαιτούμενη πίεση, ώστε να σχηματισθεί ραβδίσκος ομοιόμορφης διαμέτρου 3 mm σε όλο το μήκος του. Εάν το έδαφος είναι πολύ ξηρό και δεν είναι δυνατή η διαμόρφωση ραβδίσκου διαμέτρου 3 mm, το δείγμα αναπλάθεται προσθέτοντας περισσότερο νερό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Εάν το έδαφος διαμορφώνει ραβδίσκο με διάμετρο μικρότερη των 3 mm, αναπλάθεται σε βώλο και η διαδικασία κυλίνδρωσης επαναλαμβάνεται σε ομαλή επιφάνεια, που καλύπτεται με τραγείας υφής γαρτί. Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, προσεγγίζεται τελικά μια περιεκτικότητα σε νερό κατά την οποία ο ραβδίσκος, κυλινδρούμενος προκειμένου να μειωθεί η διάμετρός του κάτω από 3 mm, θρυμματίζεται. Τα θρύμματα τοποθετούνται σε υποδοχέα (τριβλίο Petri) και μετά τις απαραίτητες ζυγίσεις στο ξηραντήριο για την εκτίμηση της υγρασίας. Μετά από 24 ώρες οι υποδοχείς αφαιρούνται από το ξηραντήριο και καταγράφονται τα ξηρά τους βάρη. Η απώλεια βάρους αναφέρεται σαν βάρος ύδατος (υγρασία).

3.2.3 Αποτελέσματα ορίων Atterberg

Τα όρια Atterberg εκτιμήθηκαν για τα εδαφικά δείγματα Καολίνη - Άμμου (50-50%) και Καολίνη - Άμμου (15-85%). Για το δείγμα Καολίνη - Άμμου (85-15%) οι τιμές των ορίων Atterberg είχαν εκτιμηθεί ήδη στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας. Τα όρια υδαρότητας εκτιμήθηκαν για τα εδαφικά δείγματα Καολίνη - Άμμου (50-50%) και Καολίνη - Άμμου (15-85%) από τα κάτωθι ημιλογαριθμικά διαγράμματα. Το ποσοστό της υγρασίας που αντιστοιχεί στην τετμημένη των 25 κτυπημάτων στην καμπύλη ροής προσδιορίζει το όριο υδαρότητας.



Σχήμα 3.4 Καμπύλη ροής για εδαφικό δείγμα Καολίνη - Άμμου (50-50%)



Σχήμα 3.5 Καμπύλη ροής για εδαφικό δείγμα Καολίνη - Άμμου (15-85%)

Από Πίνακα 3.2 παρατηρούμαι ότι καθώς το ποσοστό της αργίλου μειώνεται, μειώνονται και τα όρια Atterberg.

Καολίνης-Άμμος %	85-15	50-50	15-85
Όριο πλαστικότητας (PL)	31,2	25,5	13,5
Όριο υδαρότητας (LL)	51,4	29	13,7

Πίνακας 3.2 Όρια Atterberg

3.3 Ταξινόμηση του εδάφους

Το Ενοποιημένο Σύστημα Κατάταξης (USCS-Unified Soil Classification System) χρησιμοποιεί τα ποσοστά του εδάφους που διέρχονται από το κόσκινο No 200 (λεπτόκοκκο κλάσμα) και το No 4 (αμμώδες κλάσμα), και τα όρια Atterberg με τη μορφή του "Χάρτη Πλαστικότητας Casagrande" (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα πλαστικότητας (ASTM D2487)

Για την ταξινόμηση του εδάφους ως σύνολο χρησιμοποιείται κυρίως το Ενιαίο Σύστημα Ταξινόμησης (USCS) Σχήμα 3.7. Με βάση το Ενοποιημένο Σύστημα Ταξινόμησης Εδαφών (ASTM D2487) και τα όρια Atterberg το δείγμα Καολίνης - Άμμος (85-15%) ταξινομείται στην ομάδα ΜΗ ως "Αμμώδης ελαστική ιλύς" ενώ τα δείγματα Καολίνης - Άμμος (50-50%) και Καολίνης - Άμμος (15-85%) ταξινομούνται στην ομάδα ΜL ως "Αμμώδης ιλύς" και " Ιλύς με άμμο " αντίστοιχα.



Σχήμα 3.7 Διάγραμμα ροής για την ταξινόμευση λεπτόκοκκου εδάφους

3.3 Προσδιορισμός Βέλτιστης υγρασίας συμπύκνωσης

3.3.1 Πρότυπη Μέθοδος Proctor

Σαν συμπύκνωση του εδάφους περιγράφεται η μείωση του όγκου του, η οποία προκαλείται τεχνητά με τη πρόσκαιρη ή στιγμιαία εφαρμογή κάποιου φορτίου. Η μέγιστη συμπύκνωση επιτυγχάνεται με προσθήκη συγκεκριμένης υγρασίας που ευνοεί τη μείωση της συνοχής και των τριβών μεταξύ των εδαφικών κόκκων. Έτσι, προκύπτει γρήγορη αναδιάταξη τους σε πυκνότερη δομή και το έδαφος αποκτά τη μέγιστη ξηρή πυκνότητα. (Στειακάκης 2008).

Ο σκοπός της συμπύκνωσης είναι να βελτιώσει την αντοχή του εδάφους μειώνοντας τη συμπιεστότητα και τη περατότητα. Η περατότητα του εδάφους μειώνεται με αύξηση του ποσοστού υγρασίας στη ξηρή πλευρά.

Με τη συμπύκνωση προκαλείται μετακίνηση των εδαφικών κόκκων με αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου των κενών. Η ελάχιστη τιμή περατότητας επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το ποσοστό βέλτιστης υγρασίας ή λίγο πιο υψηλό.

Το ποσοστό της υγρασίας ενός δείγματος επηρεάζει την αντίσταση του στη συμπίεση. Για ποσοστό υγρασίας κάτω της βέλτιστης το έδαφος προβάλει μεγαλύτερη αντίσταση στη συμπίεση σε σχέση με δείγμα υγρασίας άνω της βέλτιστης. Συνεπώς τα εδάφη στη ξηρή πλευρά **Σχήμα 3.8** παρουσιάζουν μικρότερες τιμές συμπιεστότητας (Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2003).



Σχήμα 3.8 Καμπύλη Proctor

Η βέλτιστη υγρασία, δηλαδή η ποσότητα νερού που πρέπει να προστεθεί προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη συμπύκνωση, προσδιορίζεται εργαστηριακά με τη δοκιμή Proctor.

Διαδικασία

- Εάν το δείγμα του εδάφους είναι υγρό, ξηραίνεται στον αέρα ή σε συσκευή ξήρανσης με θερμοκρασία που δεν υπερβαίνει τους 60 °C. Στη συνέχεια, τα συσσωματώματα του εδάφους θραύονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η ελάττωση του φυσικού μεγέθους των κόκκων του.
- Κοσκινίζεται επαρκής ποσότητα αντιπροσωπευτικού δείγματος με κόσκινο Νο. 4 (4,75mm). Το χονδρόκοκκο υλικό που συγκρατείται απορρίπτεται.



Σχήμα 3.9 Διάγραμμα για την εκτίμηση της βέλτιστης περιεκτικότητας σε υγρασία (OMC) ενός εδάφους χρησιμοποιώντας τα όρια Atterberg. (Bowels, 1986 από Johnson και Sallberg, 1962)

Από το έδαφος που προκύπτει, λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα, βάρος περίπου 3 kg ή και περισσότερο, το οποίο αναμιγνύεται καλά με επαρκή ποσότητα νερού, έτσι ώστε να αποκτήσει υγρασία κατά 4 περίπου ποσοστιαίες μονάδες κάτω από την εκτιμώμενη βέλτιστη υγρασία (OMC). Ο καθορισμός της κατά προσέγγισης υγρασίας αφετηρίας (OMC - 4 %), θα γίνει με βάση το Σχήμα 3.9. Το διάγραμμα αυτό υποδεικνύει τη βέλτιστη υγρασία OMC ±2 % εάν οι τιμές του ορίου υδαρότητας και πλαστικότητας είναι γνωστές.

Το έδαφος συμπυκνώνεται μέσα στη μήτρα σε τρεις ίσες στρώσεις για την παρασκευή συμπυκνωμένου υλικού συνολικού πάχους 127 mm. Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με 25 ομοιόμορφα κατανεμημένες πτώσεις του εμβόλου.



Εικόνα 3.2 Συσκευή συμπύκνωσης

Μετά τη συμπύκνωση, απομακρύνεται ο δακτύλιος από τη μήτρα, αφαιρείται προσεκτικά το συμπυκνωμένο έδαφος μέχρι τα χείλη της μήτρας, με την ακμή του χαλύβδινου κανόνα και η μήτρα μαζί με το εδαφικό υλικό, ζυγίζεται. Το υγρό μοναδιαίο βάρος του εδάφους υπολογίζεται από τη σχέση :

$\gamma_{v} = \frac{\beta \acute{\alpha} \rho o \varsigma \mu \acute{\eta} \tau \rho \alpha \varsigma \mu \varepsilon \varepsilon \delta \alpha \varphi i \kappa \acute{o} v \lambda i \kappa \acute{o} - \beta \acute{\alpha} \rho o \varsigma \mu \acute{\eta} \tau \rho \alpha \varsigma}{\acute{o} \gamma \kappa o \varsigma \mu \acute{\eta} \tau \rho \alpha \varsigma}$

Εξάγεται το δοκίμιο από τη μήτρα και διαιρείται ως προς ένα επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα του. Λαμβάνεται αντιπροσωπευτικό δείγμα του υλικού από μία από τις δύο επιφάνειες της τομής. Ζυγίζεται και ξηραίνεται σε θερμοκρασία 110 ± 5°C μέχρι σταθερού βάρους για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης υγρασίας. Το βάρος του υγρού δείγματος που λαμβάνεται δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 100 g.

- Το υπόλοιπο εδαφικό θραύεται μέχρι που να διέρχεται από το κόσκινο Νο 4. Προστίθεται νερό σε επαρκή ποσότητα ώστε η υγρασία του εδάφους να αυξηθεί κατά μία η δύο ποσοστιαίες μονάδες σε σχέση με την προηγούμενη υγρασία του και η διαδικασία της συμπύκνωσης επαναλαμβάνεται.
- Στη συνέχεια, προσθέτοντας ποσοστά υγρασίας διαδοχικά αυξανόμενα κατά 2%, προκύπτουν τα σημεία που θα καθορίσουν την καμπύλη ξηρού μοναδιαίου βάρους (ή ξηρής πυκνότητας) σε σχέση με την υγρασία. Το τελευταίο σημείο πρέπει να είναι περίπου 4 έως 5 % στην υγρή πλευρά (δεξιά της αιχμής) της καμπύλης. Το ξηρό μοναδιαίο βάρος υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_v}{1+w} \tag{EEigwon 3.1}$$

όπου,

γ_υ: υγρό μοναδιαίο βάρος του δείγματος, (kN/m^3) w: περιεχόμενη υγρασία του δείγματος, %

Η υγρασία η οποία αντιστοιχεί στο ανώτατο σημείο της καμπύλης (του διαγράμματος Ξηρής πυκνότητας - Υγρασίας) ορίζεται ως βέλτιστη υγρασία του εδάφους ενώ η αντίστοιχη πυκνότητα ονομάζεται μέγιστη ξηρή πυκνότητα.

3.3.2 Αποτελέσματα

Αρχικά, μέσω των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας εκτιμήθηκε η κατά προσέγγιση βέλτιστη υγρασία των δειγμάτων σύμφωνα με το διάγραμμα. Οι τιμές για τα εδαφικά δείγματα Καολίνης-Άμμος 85-15 %, Καολίνης-Άμμος 50-50 % και Καολίνης-Άμμος 15-85 είναι αντίστοιχα 22, 17 και 9 %.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές συμπύκνωσης και εκτιμηθήκαν οι πραγματικές τιμές βέλτιστης υγρασίας μέσω των διαγραμμάτων Ξηρής πυκνότητας-Υγρασίας Πίνακας 3.3.



Σχήμα 3.10 Ξηρή πυκνότητα - Υγρασία για εδαφικό δείγμα Καολίνη - Άμμου 85-15 %



Σχήμα 3.11 Ξηρή πυκνότητα - Υγρασία για εδαφικό δείγμα Καολίνη - Άμμου 50-50 %



Σχήμα 3.12 Ξηρή πυκνότητα - Υγρασία για εδαφικό δείγμα Καολίνη - Άμμου 15-85 %

Καολίνης-Άμμος %	85-15	50-50	15-85
Βέλτιστη υγρασία %	23,3	15,4	8,8
Ξηρή πυκνότητα (g/ cm ³)	1,6	1,8	1,9

Πίνακας 3.3 Βέλτιστη υγρασία - Ξηρή πυκνότητα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μετρήση υδραυλικής αγωγιμότητας

Η υδραυλική αγωγιμότητα εκτιμήθηκε εργαστηριακά, μία φορά για κάθε δείγμα λόγω χρονικών περιορισμών. Απαιτείται επανάληψη των δοκιμών προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία τους. Τα δείγματα εξετάσθηκαν, όσον αφορά την υδραυλική αγωγιμότητά τους, μέσω δοκιμών, με τις εξής μεθόδους :

- Περατόμετρο πίπτοντος φορτίου για τα εδαφικά δείγματα Καολίνης-Άμμος
 85-15 %, Καολίνης-Άμμος 50-50 % και Καολίνης-Άμμος 15-85 %
- Περατόμετρο τριαξονικής φόρτισης για τα εδαφικά δείγματα Καολίνης
 Άμμος 85-15 %, Καολίνης-Άμμος 50-50 %
- Περατόμετρο υψηλού φορτίου για τα εδαφικά δείγματα Καολίνης-Άμμος 85-15 %, Καολίνης-Άμμος 50-50 % και Καολίνης-Άμμος 15-85 %

Επίσης, η υδραυλική αγωγιμότητά τους εκτιμήθηκε μέσω εμπειρικών τύπων.

4.1 Εκτίμηση υδραυλικής αγωγιμότητας μέσω εμπειρικών τύπων

Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εκτίμησης της υδραυλικής αγωγιμότητας με την χρήση εμπειρικών εξισώσεων.

Εμπειρικοί τύποι	Καολίνης-Άμμος	Καολίνης-Άμμος	Καολίνης-Άμμος
	85-15%	50-50%	15-85%
Hazen	3.5 10-9	6.3 10 ⁻⁹	1.5 10-7
Slitcher	1.3 10-9	1.6 10 ⁻⁹	3.7 10 ⁻⁸
Breyer	2.1 10 ⁻⁹	1.7 10-9	9.5 10 ⁻⁸
Kozeny-Carman	4.4 10 ⁻⁹	4.1 10 ⁻⁹	9.2 10 ⁻⁸

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα εμπειρικών τύπων

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.1 παρατηρούμε ότι το εύρος των αποτελεσμάτων των εμπειρικών τύπων για κάθε αναλογία είναι αρκετά περιορισμένο (δεδομένου ότι μας ενδιαφέρει κυρίως η τάξη μεγέθους των τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας). Συγκρίνοντας τις τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας μεταξύ των δειγμάτων Καολίνης-Άμμος 50-50% και Καολίνης-Άμμος 15-85% παρατηρούμε ότι η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται καθώς το ποσοστό του καολίνη αυξάνεται ενώ οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας μεταξύ των δειγμάτων Καολίνης-Άμμος 85-15% και Καολίνης-Άμμος 50-50% προσεγγίζουν κατά πολύ η μία την άλλη.

4.2 Μέτρηση Υδραυλικής Αγωγιμότητας με Περατόμετρο Πίπτοντος φορτίου

4.2.1 Διαμόρφωση Δοκιμίων-Μετρήσεις



Εικόνα 4.1 Περατόμετρο πίπτοντος φορτίου

- Αρχικά τα εδαφικά δείγματα συμπυκνώθηκαν σε υγρασία 2% πάνω από τη βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης κατά Proctor.
- Τοποθετούνται τα φίλτρα, κλείνει αεροστεγώς η κυψέλη και πραγματοποιούνται οι απαραίτητες ενέργειες απαέρωσης με την βοήθεια βαλβίδων. Στην συνέχεια η κυψέλη τοποθετείται μέσα στη δεξαμενή, η οποία γεμίζει με νερό μέχρι το επίπεδο υπερχείλισης. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην απελευθέρωση τυχόν παγιδευμένου αέρα κάτω από την κυψέλη, κάτι που επιτυγχάνεται με ανακίνησή της. Ο κορεσμός

ανάλογα με το αργιλικό ποσοστό του δείγματος διαρκεί από μερικές ώρες (Καολίνης-Άμμος 15-85%) έως έξι εβδομάδες (Καολίνης-Άμμος 85-15%).

- Ο κορεσμός επιτυγχάνεται με την βοήθεια τριχοειδών δυνάμεων. Όταν το νερό εμφανιστεί στην κορυφή της κυψέλης θεωρείται ότι το δείγμα έχει κορεστεί.
- Στην συνέχεια ανοίγοντας την βαλβίδα εισαγωγής νερού στον δειγματολήπτη νερό αρχίζει να ρέει από το μανόμετρο προς το δείγμα. Η ροή πραγματοποιείται από το ανώτερο προς το κατώτερο άκρο και μετράται ο χρόνος που χρειάζεται να μεταβληθεί η στάθμη στο μανόμετρο μεταξύ δύο συγκεκριμένων επιπέδων.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται τουλάχιστον τρεις φορές ώστε να είναι δυνατός ο έλεγχος της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων. Καταγραφόταν επίσης η θερμοκρασία του νερού στη δεξαμενή βύθισης προκειμένου να αναχθούν οι μετρήσεις στην θερμοκρασία των 20 °C.
- Ο μέσος όρος των διορθωμένων τιμών (k) αποτελεί την ζητούμενη υδραυλική αγωγιμότητα του δείγματος.

Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται από το τύπο (Darcy) :

$$K = 0,02304 \times \frac{a \times L}{A \times t_{12}} \times \log \frac{h_1}{h_2} (m/s)$$
 (Εξίσωση 4.1)

όπου,

t₁₂: χρόνος υποβιβασμού της στάθμης μεταξύ των σημείων 1 και 2 (s)

 h_1,h_2 : υδραυλικά φορτία από το επίπεδο υπερχείλισης, (cm)

L: μήκος του δοκιμίου, (cm)

Α: εμβαδόν διατομής του δοκιμίου, (cm²)

α: εμβαδόν διατομής του μανομετρικού σωλήνα που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ροής, (cm^2)

4.2.2 Αποτελέσματα

Στο Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας που προέκυψαν από τις μετρήσεις στο περατόμετρο πίπτοντος φορτίου k στους (20° C) σε m/s.

Δείγματα	Μέση τιμή k (m/s) στους 20 °C
Καολίνης-Άμμος 85-15%	1,57×10 ⁻¹⁰
Καολίνης-Άμμος 50-50%	2,38×10 ⁻¹⁰
Καολίνης-Άμμος 15-85%	2,04×10 ⁻⁹

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα περατόμετρου πίπτοντος φορτίου

Από το Πίνακα 4.2 η υδραυλική αγωγιμότητα των εδαφικών δειγμάτων Καολίνης-Άμμος 85-15%, Καολίνης-Άμμος 50-50% είναι αντίστοιχα 1,57×10⁻¹⁰ και 2,38×10⁻¹⁰. Η τιμή της υδραυλικής του δείγματος Καολίνης-Άμμος 15-85% είναι 2,04×10⁻⁹, ελαττωμένη κατά μία τάξη μεγέθους. Η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται με την αύξηση του λεπτομερούς αργιλικού κλάσματος.

4.3Μέτρηση Υδραυλικής Αγωγιμότητας με Περατόμετρο Τριαξονικής Φόρτισης

4.3.1 Προετοιμασία-Διαμόρφωση Δοκιμίων

- Αρχικά τα εδαφικά δείγματα συμπυκνώθηκαν σε υγρασία 2% πάνω απο τη βέλτιστη υγρασία συμπύκνωσης κατά Proctor.
- Μετρήθηκαν οι διαστάσεις του δοκιμίου, τοποθετήθηκε στο περατόμετρο εντός πλαστικής μεμβράνης και στη συνέχεια το κελί πληρώθηκε με νερό.
- Στη συνέχεια ξεκίνησε η διαδικασία του κορεσμού. Το δείγμα θεωρείται κορεσμένο όταν B>0,95
- Εφόσον το δοκίμιο κορεστεί καθορίζονται οι πιέσεις που θα ασκούνται στο δοκίμιο ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή υδραυλική κλίση. Η πίεση στη βάση του δοκιμίου

θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή στην κορυφή. Έτσι εξασφαλίζουμε ροή με φορά από κάτω προς τα πάνω. Η διαφορά (p1-p2) είναι της τάξεως των 20kPa. Επίσης καθορίζεται η πίεση κελιού σ₃. Η σ₃ ασκεί πλευρική τάση στο δείγμα και ετσι εξαλείφεται η πίθανοτητα διαρροής μεταξύ δείγματος και μεμβράνης. Επίσης η p1 θα πρέπει να είναι μικρότερη της πίεσης του κελίου σ₃ προκειμένου να μη στερεοποιηθεί το δείγμα.



Εικόνα 4.2 Περατόμετρο τριαξονικής φόρτισης

- Στον υπολογιστή καταγράφονται δεδομένα ανά τακτά χρονικά διαστήματα τα οποία εμείς καθορίζουμε, στην περίπτωσή μας 60 λεπτά. Για εκείνες τις χρονικές στιγμές μας παρέχονται πληροφορίες για τις τιμές πιέσεων p1,p2,σ3, καθώς επίσης και του όγκου του νερού που διήλθε εντός του δοκιμίου στα 60 λεπτά.
- Η περατότητα εκτιμήθηκε για υδραυλική κλίση i=20 και i=70. Τα δεδομένα που χρησιμοποιηθήκαν για την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας ήταν αυτά που κατεγράφησαν μετά την διασφάλιση σταθερού ρυθμού εκροής νερού (Manual of soil laboratory testing 1986).

Η υδραυλική κλίση υπολογίζεται από τον τύπο :

$$i = {102 \over L} \times (p_1 - p_2)$$
 (Εξίσωση 4.2)

όπου,

p1: πίεση στην βάση του δοκιμίου (kPa)

p2: πίεση στην κορυφή του δοκιμίου (kPa)

L : ύψος δοκιμίου (mm)

102: διαφορά πίεσης 1 kPa ισούται με ύψος στήλης νερού 101.97(mm)

Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται με το τύπο (Darcy) :

$$K = \frac{q}{60 \times A \times i} (m/s)$$
 (Εξίσωση 4.3)

όπου,

q : παροχή (ml/min) Α: εμβαδό διατομής δοκιμίου (mm²) i :υδραυλική κλίση

4.3.2 Μετρήσεις-Αποτελέσματα

Στο Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι ασκούμενες στο δείγμα πιέσεις για τα εδαφικά δείγματα Καολίνης-Άμμος85-15% και Καολίνης-Άμμος 50-50% για κάθε υδραυλική κλίση.

Αναλογία Καολίνη-Άμμου(%)	Υδραυλική Κλίση i	Πίεση πόρων (p ₁) kPa	Αντιπίεση Πόρων (p ₂) kPa	Πίεση Κελιού (σ ₃) kPa
50.50	23	440	421	449
50-50	70	447	401	450
05.15	19	486	471	499
80-10	71	509	452	500

Πίνακας 4.3 Τιμές ασκούμενων πιέσεων

Ακολουθούν τα διαγράμματα ταχύτητας ροής συναρτήσει της υδραυλικής κλίσης που προέκυψαν από τις μετρήσεις στο περατόμετρο τριαξονικής φόρτισης. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε υδραυλική βαθμίδα(Δεν μετρήθηκε η θερμοκρασία απορροής, συνεπώς αναγωγή των τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας στους 20°C δεν πραγματοποιήθηκε).



Σχήμα 4.1 Ταχύτητα ροής συναρτήσει της υδραυλικής κλίσης για το εδαφικό δείγμα Καολίνη-Άμμου 85-15%



Σχήμα 4.2 Ταχύτητα ροής συναρτήσει της υδραυλικής κλίσης για το εδαφικό δείγμα Καολίνη-Άμμου 50-50%

Δείγμα	K50A50		K85A15	
Υδραυλική κλίση (i)	23	70	19	71
Υδραυλική αγωγιμότητα Κ(m/s)	2,58×10 ⁻⁹	2,96×10 ⁻⁸	8,59×10 ⁻¹⁰	9,76×10 ⁻¹⁰

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής

Στο Πίνακα 4.4 παρατηρούμε ότι η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται με την αύξηση του λεπτομερούς αργιλικού κλάσματος.

4.4 Μέτρηση Υδραυλικής Αγωγιμότητας με Περατόμετρο υψηλού φορτίου

4.4.1 Μετρήσεις

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές μέτρησης της υδραυλικής αγωγιμότητας σε δοκίμια εδαφικού δείγματος Καολίνη-Άμμου με ποσοστά 85-15%, 50-50% και 15-85% αντίστοιχα. Η διαδικασία είναι η εξής (ELE International, 2004):

- Προτού χρησιμοποιηθεί η συσκευή, η δεξαμενή γεμίζει με απαερομένο νερό.
 Πορόλιθος τοποθετείται στη κορυφή του δοκιμίου για να εξασφαλιστεί ομαλή ροή.
- Το δοκίμιο που διαμορφώνεται από το δείγμα το οποίο είχε συμπυκνωθεί στην κατάλληλη υγρασία (2% πάνω από τη βέλτιστη) εισπιέζεται προσεκτικά στην μήτρα. Περιμετρικά του δοκιμίου γίνεται επάλειψη σιλικόνης για την αποφυγή πλευρικών διαρροών και το δοκίμιο εισάγεται στο περατόμετρο.
- Αρχικά εφαρμόζεται μια μικρή υδραυλική βαθμίδα έως ότου το δοκίμιο κορεστεί. Για τα υπό εξέταση εδαφικά δείγματα ο κορεσμός διήρκησε από μερικά λεπτά (K15A85) έως 12 ημέρες (K85A15) ανάλογα με το αργιλικό ποσοστό του δείγματος. Ο

κορεσμός του δείγματος επιτυγχάνεται εφόσον παρατηρείται επαρκής ποσότητα νερού στην έξοδο του δειγματολήπτη.



Εικόνα 4.3 Περατόμετρο υψηλού φορτίου

- Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας αυξανόμενες τιμές πίεσης στη είσοδο του δειγματολήπτη (μέχρι και 300kPa) εξασφαλίζαμε ροή εντός του δοκιμίου.
- Συλλέγοντας το νερό εκροής και μετρώντας το χρόνο που χρειάστηκε για να εξέλθει για κάθε υδραυλική βαθμίδα (έχοντας επίπεδο αναφοράς το σημείο εξόδου του νερού) υπολογίστηκε η υδραυλική αγωγιμότητα αναγόμενη στους 20 °C.
- Στην συνέχεια το δοκίμιο ζυγιζόταν. Έπειτα επαναζυγίζοταν ξηρό για τον προσδιορισμό του ξηρού μοναδιαίου βάρους και της φυσικής υγρασίας.

Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται σύμφωνα με το τύπο Darcy (ELE International, 2004):

$$K=(Q\times L)/A\times H$$
 (Εξίσωση 4.4)

όπου,

Q:ρυθμός εκροής, cm³/s L:μήκος του δοκιμίου, cm Η:ύψος νερού, cm Α:εμβαδόν διατομής δοκιμίου, cm²(ELE International, 2004)

Η εφαρμοσμένη πίεση υπολογίζεται σύμφωνα με το τύπο :

H=[(
$$h_1+h_2$$
)/2]+(P×10,2) (Εξίσωση 4.5)

όπου,

h₁:στάθμη νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο πριν τη μέτρηση, cm
h₂:στάθμη νερού στον ογκομετρικό κύλινδρο μετά τη μέτρηση, cm
P:πίεση μανομέτρου στην είσοδο του δοκιμίου, kPa
10,2:διαφορά πίεσης 1 kPa ισούται με ύψος στήλης νερού 10,197(cm)

4.4.2 Αποτελέσματα

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι μετρούμενες ταχύτητες ροής στην έξοδο του δειγματολήπτη για τα τρία εδαφικά δείγματα εφαρμόζοντας διάφορες υδραυλικές βαθμίδες.



Σχήμα 4.3 Ταχύτητα ροής σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη υδραυλική βαθμίδα στο περατόμετρο υψηλής πίεσης για το δείγμα Καολίνης-Άμμος 15-85%



Σχήμα 4.4 Ταχύτητα ροής σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη υδραυλική βαθμίδα στο περατόμετρο υψηλής πίεσης για το δείγμα Καολίνης-Άμμος 50-50%



Σχήμα 4.5 Ταχύτητα ροής σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη υδραυλική βαθμίδα στο περατόμετρο υψηλής πίεσης για το δείγμα Καολίνης-Άμμος 85-15%

Καολίνης-Άμμος 15-85%		Καολίνης-Ά	μμος 50-50%	Καολίνης-Άμμος 85-15%	
Υδραυλική κλίση i	k m/s (20° C)	Υδραυλική κλίση i	k m/s (20° C)	Υδραυλική κλίση i	k m/s (20° C)
31,3	4,92×10 ⁻⁷	47,5	2,29×10 ⁻¹⁰	46,7	2,72×10 ⁻¹⁰
39,0	5,48×10 ⁻⁷	78,3	2,32×10 ⁻¹⁰	77,5	2,05×10 ⁻¹⁰
46,7	7,28×10 ⁻⁷	109,1	2,46×10 ⁻¹⁰	108,3	2,62×10 ⁻¹⁰
54,4	8,96×10 ⁻⁷	155,2	2,36×10 ⁻¹⁰	154,4	2,75×10 ⁻¹⁰
62,0	1,28×10 ⁻⁶	186,0	2,39×10 ⁻¹⁰	231,3	2,36×10 ⁻¹⁰
69,7	1,84×10 ⁻⁶	232,1	2,34×10 ⁻¹⁰	308,3	2,30×10 ⁻¹⁰
77,4	2,13×10 ⁻⁶	309,1	1,76×10 ⁻¹⁰		
85,0	2,51×10 ⁻⁶				
92,6	2,93×10 ⁻⁶				

Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα περατόμετρου υψηλού φορτίου

Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας που προέκυψαν με μετρήσεις στο περατόμετρο υψηλής πίεσης στα εδαφικά δείγματα Καολίνης-Άμμος 15-85%, Καολίνης-Άμμος 50-50% και Καολίνης-Άμμος 85-15% παρουσιάζονται διορθωμένες ως προς τη θερμοκρασία στον Πίνακα 4.5. Η υδραυλική αγωγιμότητα των εδαφικών δειγμάτων Καολίνης-Άμμος 85-15%, Καολίνης-Άμμος 50-50% είναι $2,47\times10^{-10}$ m/s και $2,27\times10^{-10}$ m/s αντίστοιχα, που προκύπτει υπολογίζοντας το μέσο όρο των τιμών k (Πίνακας 4.5). Στο δείγμα Καολίνης – Άμμος 15-85% μετά την υπέρβαση ενός ορίου υδραυλικής βαθμίδας προκαλείται διαφοροποίηση υδραυλικής αγωγιμότητας και απόκλιση από το νόμο του Darcy ως αποτέλεσμα διάβρωσης και παράσυρσης των εδαφικών κόκκων. Η ταχύτητα ροής αυξάνεται με πιο υψηλό ρυθμό για i>55 όπως και οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας του δείγματος Καολίνης – Άμμος 15-85% είναι $6,6\times10^{-7}$ m/s, η οποία προκύπτει υπολογίζοντας το μέσο όρο των τιμών κ για i<55(πριν τη διάβρωση του δείγματος).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Συμπεράσματα

Σε δείγματα Καολίνη-Άμμου που συμπυκνώθηκαν σε υγρασία 2% πάνω από την βέλτιστη εκτιμήθηκε το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας κάτω από διάφορες υδραυλικές βαθμίδες με χρήση των τριών τεχνικών μέτρησης. Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας για το εδαφικό δείγμα Καολίνης-Άμμος 15-85% από $2,4\times10^{-9}$ έως $2,93\times10^{-6}$ m/s, για το εδαφικό δείγμα Καολίνης-Άμμος 50-50% από $2,38\times10^{-10}$ έως $2,96\times10^{-8}$ m/s και τέλος για το εδαφικό δείγμα Καολίνης – Άμμος 85-15% από $1,57\times10^{-10}$ έως $9,76\times10^{-10}$ m/s.

Η εφαρμογή υψηλής υδραυλικής βαθμίδας στο περατόμετρο υψηλού φορτίου (30<i<300) που επεβλήθει προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος δοκιμής, δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα σε δείγματα με χαμηλό συντελεστή ομοιομορφίας (**Kaoλίνης – Άμμος 85-**15% με U=10,7). Αντίθετα στα δείγματα με υψηλό συντελεστή ομοιομορφίας (**Kaoλίνης –** Άμμος 15-85% με U=47,5) και χαμηλής πλαστικότητας μετά την υπέρβαση ενός ορίου υδραυλικής βαθμίδας προκαλείται διαφοροποίηση υδραυλικής αγωγιμότητας και απόκλιση από το νόμο του Darcy ως αποτέλεσμα διάβρωσης και παράσυρσης των εδαφικών κόκκων.

Το περατόμετρο τριαξονικής φόρτισης δίδει αξιόπιστα αποτελέσματα λόγω μη πλευρικών διαρροών αλλά και της δυνατότητας προσδιορισμού του βαθμού κορεσμού του δείγματος.

Τέλος, επιβεβαιώθηκε ότι το περατόμετρο πίπτοντος φορτίου παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα για τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας $k<10^{-5}$ m/s, παρόλο που ο κίνδυνος πλευρικών διαρροών είναι πιθανός.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα υδραυλικής αγωγιμότητας των τριών μεθόδων δοκιμής παρατηρούμε ότι είναι εφικτή η μείωση του χρόνου δοκιμών αυξάνοντας την υδραυλική βαθμίδα για τα δείγματα με υψηλό ποσοστό αργίλου (Καολίνης – Άμμος 85-15%,Καολίνης-Άμμος 50-50%) αλλά όχι για το αμμώδες δείγμα (Καολίνης-Άμμος 15-85%) στο οποίο προκαλείται εσωτερική διάβρωση παρουσιάζοντας τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας υψηλότερες του πραγματικού.

Η υδραυλική αγωγιμότητα εκτιμήθηκε εργαστηριακά, μία φορά για κάθε δείγμα, λόγο χρονικών περιορισμών. Απαιτείται επανάληψη των δοκιμών προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία τους

Βιβλιογραφία

ΕΛΛΗΝΙΚΗ

Στειακάκης, Εμμ., (2008). Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας - Εδαφομηχανικής. Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Χανιά.

Γαμβρούδης, Χ., (2010). Μεταπτυχιακή Εργασία : Διερεύνηση Διαπερατότητας Συμπυκνωμένων λεπτόκοκκων γεωυλικών, Χανια.

Αλεξόπουλος, Απ. (1996). Σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωλογία. Γεωλογικό Τμήμα Πανεπιστημίου Αθηνών Τομέας Δυν.Τεκτ. και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Αθήνα.

ΞΕΝΌΓΛΩΣΣΗ

ASTM D 2434. Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head). Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock; Building Stones. ASTM, Philadelphia.

ASTM D 4318. Standard test methods for liquid limit, plasticity limit, and plasticity index of soils. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock; Building Stones. ASTM, Philadelphia.

ASTM D 5084. Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.08, Soil and Rock; Building Stones. ASTM, Philadelphia.

ASTM D 5856. Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Porous Materials Using a Rigid-Wall, Compaction-Mold Permeameter

BS1377-1:1990. Methods of test for soils for civil engineering purposes. General requirements and sample preparation. British Standards Institution.

Barnes, G.E. (2000). Soil Mechanics: Principles and Practice, Palgrave MacMillan LTD, 2nd Edition. Απόδοση στα Ελληνικά, Καραντώνη. Φ, 2005, Εδαφομηχανική, Αρχές και Εφαρμογές, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.

Daniel, D.E., Anderson, D.C. and Boynton, S.S. (1986). Fixed-wall Versus Flexiblewall Permeameters, Hydraulic Barriers in Soil and Rock, ASTM STP 874, A.I Johnson, R.K Frobel, N.J Cavalli, and C.B. Pettersson, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 107-126.

ELE International, Inc. (2004). Operating Instructions for Hign Pressure Permeameter Set, Model : 25-0670 (K-670A).

Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979). Groundwater. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Hansbo, S. (1960). Consolidation of clay, with special reference to influence of vertical sand drains. Proc. R. Swed. Georech.Inst., No 18, pp.41-61.

Ishaku J., Gadzama E., Kaigama U. (2010). Evaluation of empirical formulae for the determination of hydraulic conductivity based on grain-size analysis.

Kozeny, J. (1927). Uber Kapillare Leitung Des Wassers in Boden. Sitzungsber Akad. Wiss.Wien Math.Naturwiss.Kl., Abt.2a, 136,271-306 (In German)

Mαnual of laboratory testing, (1986). Vol.3 :Effective Stress Tests, K.H Head, MA (Cantab), C. Eng, FICE, FGS for ELE International limited.

Mesri, G. and Olson, R.E. (1971). Mechanisms controlling the permeability of clays. Clays and Clay Minerals, vol. 19, pp. 151-158.

Murray E.J., Davis J., Keeton P., Hill R.G. (2001), Laboratory Permeability Measurements With Mercia Mudstone .

Odong J. (2007). Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis, Journal of American Science, 3(3).

Olson, R.E. (1986). State of the art : Consolidation Testing. Consolidation of Soils : Testing and Evaluation, ASTM STP 892, R.N. Yong and F.C Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 7-70.

Olson, R.E. and Daniel, D.E. (1981). Measurement of the Hydraulic Conductivity of Fine-Grained Soils, Permeability and Groundwater Contaminant Transport, ASTM STP 746, T.F Zimmie and C.O. Rigs, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 18-64.

Skempton, A.W. (1954). The Pore Pressure Coefficients A and B, Geotechnique, Vol. 4, No.4, pp. 143-147.

Steiakakis, E., Gamvroudis, X., Komodromos, A., Repouskou, E. (2012). Hydraulic Condactivity of Compacted Kaolin-Sand Specimens under High Hydraulic Gradients, EJGE, vol. 17.

Steiakakis, E., Gamvroudis, X., Alevizos, G. (2012). Kozeny-Carman Equation and Hydraulic Conductivity of Compacted Clayey Soils, Geomaterials, 2, 37-41.

Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1964). Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley, New York.

Zimmie, T.F. (1981). Geotechnical Testing Considrations in the Determination of Laboratory Permeability for Hazardous Waste Disposal Siting:, Hazardous Solid Waste Testing: First Conference, ASTM STP 760, R.A Conway and B.C Malloy, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 293-304.

Παράρτημα

Δείγμα		K85A15	K50A50	K15A85	
	Διάμετρος κοσκίνου mm	Διερχόμενο Ποσοστό %			
	2,000000	100,00	100,00	100,00	
	0,850000	100,00	100,00	100,00	
2000	0,425000	99,97	99,90	99,83	
Αμμος	0,250000	97,04	90,14	83,23	
	0,106000	85,01	50,03	15,04	
	0,075000	85,00	50,01	15,02	
	0,042314	75,85	44,62	13,38	
	0,029920	75,85	44,62	13,38	
	0,021261	74,73	43,96	13,19	
	0,015052	73,81	43,42	13,03	
	0,010966	73,94	43,50	13,05	
	0,007932	67,58	39,75	11,93	
	0,006521	65,48	38,52	11,55	
	0,005700	63,25	37,20	11,16	
Καολίνης	0,005167	59,05	34,73	10,42	
	0,003923	52,81	31,07	9,32	
	0,003096	46,51	27,36	8,21	
	0,002698	44,41	26,13	7,84	
	0,002513	40,15	23,62	7,09	
	0,001544	25,25	14,86	4,46	
	0,001341	23,74	13,97	4,19	
	0,000997	21,25	12,50	3,75	
	0,000693	14,82	8,72	2,62	

Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών κοκκομετρικών αναλύσεων

Πίνακας μετρήσεων ορίων Atterberg

Δείγμα		K15A85					
	Αριθμός	W	W υπ+υγρό	W	W	W) ((0 (
	Χτύπων	υπ.(g)	(g)	υπ+ξηρό(g)	υγρού(g)	ξηρού(g)	Υγρασια%
Οριο πλαστικότητας		41.45	49.19	48.27	7.74	6.82	13.5
	40	42.91	59.08	57.26	16.17	14.35	12.7
	29	42.89	59.96	57.96	17.07	15.07	13.3
	23	41.87	56.85	55.06	14.98	13.19	13.6
	16	40.42	60.27	57.77	19.85	17.35	14.4
Όριο υδαρότητας				13.7			
Δείγμα				K50A50			
	Αριθμός	W	W υπ+υγρό	W	W	W	Vuoqqíq%
	Χτύπων	u т (а)		uπ+8noó(a)	υνοού(α)	ξηρού(α)	r ypuolu /o
	101100	UII.(9)	(9)	on sipo(g)	01p00(g)	5.1600(3)	
Οριο πλαστικότητας		42.89	42.36	2.58	2.05	0.52	25.5
Οριο πλαστικότητας	39	42.89 40.6	42.36	2.58 48.38	2.05 9.76	0.52	25.5 25.4
Οριο πλαστικότητας	39 29	42.89 40.6 40.38	42.36 50.36 48.49	2.58 48.38 46.67	2.05 9.76 8.11	0.52 7.78 6.29	25.5 25.4 28.9
Οριο πλαστικότητας	39 29 22	42.89 40.6 40.38 41.58	42.36 50.36 48.49 52.84	2.58 48.38 46.67 50.16	2.05 9.76 8.11 11.26	0.52 7.78 6.29 8.58	25.5 25.4 28.9 31.2
Οριο πλαστικότητας	39 29 22 13	42.89 40.6 40.38 41.58 42.88	42.36 50.36 48.49 52.84 50.8	2.58 48.38 46.67 50.16 48.84	2.05 9.76 8.11 11.26 7.92	0.52 7.78 6.29 8.58 5.96	25.5 25.4 28.9 31.2 32.9
Οριο πλαστικότητας Οριο υδαρότητας	39 29 22 13	42.89 40.6 40.38 41.58 42.88	42.36 50.36 48.49 52.84 50.8	2.58 48.38 46.67 50.16 48.84 29.3	2.05 9.76 8.11 11.26 7.92	0.52 7.78 6.29 8.58 5.96	25.5 25.4 28.9 31.2 32.9
Οριο πλαστικότητας	39 29 22 13	42.89 40.6 40.38 41.58 42.88	42.36 50.36 48.49 52.84 50.8	2.58 48.38 46.67 50.16 48.84 29.3	2.05 9.76 8.11 11.26 7.92	0.52 7.78 6.29 8.58 5.96	25.5 25.4 28.9 31.2 32.9
Οριο πλαστικότητας Οριο υδαρότητας Δείγμα	39 29 22 13	42.89 40.6 40.38 41.58 42.88	42.36 50.36 48.49 52.84 50.8	2.58 48.38 46.67 50.16 48.84 29.3 K85A15	2.05 9.76 8.11 11.26 7.92	0.52 7.78 6.29 8.58 5.96	25.5 25.4 28.9 31.2 32.9
Οριο πλαστικότητας Όριο υδαρότητας Δείγμα Οριο πλαστικότητας	39 29 22 13	42.89 40.6 40.38 41.58 42.88	42.36 50.36 48.49 52.84 50.8	2.58 48.38 46.67 50.16 48.84 29.3 K85A15 31.2	2.05 9.76 8.11 11.26 7.92	0.52 7.78 6.29 8.58 5.96	25.5 25.4 28.9 31.2 32.9

Πίνακας μετρήσεων δοκιμής συμπύκνωσης

	Δείγμα		καολίνι	ης 15%-άμμ	ος 85%	
	Μέθοδος			Proctor		
	Δοκιμή	1	2	3	4	5
	Βάρος μήτρας (g)	1751	1751	1751	1751	
9	Μήκος μήτρας (cm)	11.68	11.68	11.68	11.68	
Kíþ	Διάμετρος μήτρας (cm)	10.145	10.145	10.145	10.145	
₽o	Όγκος μήτρας (cm³)	944.14	944.14	944.14	944.14	
	Βάρος μήτρας & υλικού (g)	3682	3672	3655	3572	
	Βάρος υποδοχέα	46.47	46.45	41.83	41.83	
	Βάρος υγρού δείγματος & υποδοχέα (g)	84.98	84.37	80.59	87.23	
пαто	Βάρος υγρού δείγματος (g)	38.51	37.92	38.76	45.4	
Tpíµ	Βάρος ξηρού δείγματος & υποδοχέα (g)	80.74	81.16	77.61	84.54	
	Βάρος ξηρού δείγματος (g)	34.27	34.71	35.78	42.71	
	ρ _u (g/cm³)	2.0	2.0	2.0	1.9	
ματα	Υγρασία w (%)	12.4	9.2	8.3	6.3	
ελέσ	ρ _d (g/cm3)	1.82	1.86	1.86	1.81	
Аттот	Βέλτιστη υγρασία			8.80%		

	Δείγμα	καολίνης 50%-άμμος 50%				
	Μέθοδος			Proctor		
	Δοκιμή	1	2	3	4	5
	Βάρος μήτρας (g)	1733	1733	1733	1733	1733
≌	Μήκος μήτρας (cm)	11.68	11.68	11.68	11.68	11.68
kíp	Διάμετρος μήτρας (cm)	10.145	10.145	10.145	10.145	10.145
₽ 0	Όγκος μήτρας (cm³)	944.14	944.14	944.14	944.14	944.14
	Βάρος μήτρας & υλικού (g)	3514	3632	3660	3726	3720
	Βάρος υποδοχέα	47.4	39.14	42.88	40.43	40.43
	Βάρος υγρού δείγματος &					
ğ	υποδοχέα (g)	83.37	60.42	72.88	70.91	70.59
μα	Βάρος υγρού δείγματος (g)	35.97	21.28	30	30.48	30.16
Τρíμ	Βάρος ξηρού δείγματος & υποδοχέα (α)	79.9	58.04	69.25	66.86	66.36
	Βάρος ξηρού δείγματος (g)	32.5	18.9	26.37	26.43	25.93
	γ _υ (g/cm ³)	1.9	2.0	2.0	2.1	2.1
ιατα	Υγρασία w (%)	10.7	12.6	15.2	16.2	17.4
ιελέσι	γ _d (g/cm3)	1.70	1.79	1.83	1.81	1.75
Ато	Βέλτιστη υγρασία			15.40%		

Π	ίνακας	μετρήσεων	δοκιμής	συμπύκνωσης

	Δείγμα	καολίνης 85%-άμμος 15%						
	Μέθοδος	Proctor						
	Δοκιμή	1	2	3	4	5		
	Βάρος μήτρας (g)	1751	1751	1751	1751			
2	Μήκος μήτρας (cm)	11.68	11.68	11.68	11.68			
kí,	Διάμετρος μήτρας (cm)	10.145	10.145	10.145	10.145			
δo	Όγκος μήτρας (cm³)	944.14	944.14	944.14	944.14			
	Βάρος μήτρας & υλικού (g)	3381	3477	3565	3589			
	Βάρος υποδοχέα	39.15	46.52	46.46	41.27			
_	Βάρος υγρού δείγματος & υποδοχέα (g)	112.37	111.71	107.75	120.22			
ατο	Βάρος υγρού δείγματος (g)	73.22	65.19	61.29	78.95			
Тріµи	Βάρος ξηρού δείγματος & υποδοχέα (g)	100.75	100.92	96.42	104.63			
	Βάρος ξηρού δείγματος (g)	61.6	54.4	49.96	63.36			
	$\gamma_{\rm u}$ (g/cm ³)	1.7	1.8	1.9	1.9			
ματα	Υγρασία w (%)	18.9	19.8	22.7	24.6			
τελέσ	γ _d (g/cm3)	1.45	1.53	1.57	1.56			
Ато	Βέλτιστη υγρασία			23.32%				

Εργαστηριακή δοκιμή :	Περατόμετρο Υψηλού Φορτίου					
Δείγμα:			καολίνης-άμμ	ιος		
Κωδικός δείγματος :			K15-A85			
Ποσοστό	υγρασία	ς δείγματ	ος w %			
Απόβαρο (g)		40.52	2		42.79	
Βάρος εδάφους υγρό + απόβαρο (g)		66.32	7		70.4	
Βάρος εδάφους ξηρό + απόβαρο (g)		64.03	1		66.23	
Βάρος υγρού εδάφους (g)		25.8	5		27.61	
Βάρος ξηρού εδάφους (g)		23.49	9		23.44	
Αρχικό ποσοστό υγρασίας w %		10.05	5		17.79	
Τελικό ποσοστό υγρασίας w _f %		17.79	9		17.79	
Σ	τοιχεία δ	είγματος				
	Σύμβολο	Μονάδες	Τύπος		Τιμή	
Διάμετρος δείγματος	Do	mm			33.20	
Ύψος δείγματος	H,	mm			66.29	
Εμβαδόν διατομής δείγματος	Ao	mm ²	$-\frac{\pi \times D_0}{4}$		865.3	
Όγκος δείγματος	Vo	mm ³	$= A_0 \times H_0$		57358.0	
Βάρος δειγματολήπτη		9			123.38	
Βάρος δειγματολήπτη + αρχικό υγρό δείγμα		9			235.92	
Βάρος δειγματολήπτη + τελικό υγρό δείγμα		9			242.83	
Αρχικό βάρος υγρού δείγματος	W _o	9			112.54	
Αρχικό βάρος ξηρού δείγματος	W _d	9	= ^W _o 1 + w		102.27	
Αρχική υγρή πυκνότητα δείγματος	ρь	Mg/m ³	$=\frac{W_0 \times 10^3}{W}$		1.96	
Αρχικό υγρό φαινόμενο βάρος	Υь	kN/m ³	$= \rho_{b} \times {}^{\circ}g$		19.25	
Αρχική ξηρή πυκνότητα δείγματος	ρ _d	Mg/m ³	$=\frac{W_a \times 10^3}{V_o}$		1.78	
Αρχικό ξηρό φαινόμενο βάρος	Yd	kN/m ³	$= \rho_d \times g$		17.49	
Ειδικό βάρος στερεών δείγματος	Gs	Αδιάστατο			2.63	
Φαινόμενο βάρος νερού	Yw	kN/m ³			9.81	
Αρχικός δείκτης πόρων (λόγος κενών)	eo		$= \frac{G_{+} \times (i + w)}{\rho_{+}} = i$		0.475	
Αρχικός βαθμός κορεσμού	50	%	$= \frac{\rho_{\star} \times w \times G_{\star}}{G_{\star} \times (1 + w) - \rho_{\star}}$		55.6	
Αρχικό πορώδες	no	%	= <u>e</u> , 1 + e,		32.2	
Τελικό βάρος υγρού δείγματος	W _f	9			119.45	
Τελικό βάρος ξηρού δείγματος	W _{df}	9	$=\frac{W_{f}}{1+w_{f}}$		101.41	
Τελική υγρή πυκνότητα δείγματος	ρ _{bf}	Mg/m ³	$=\frac{W_{\gamma} \times 10^{\circ}}{V_{\circ}}$		2.083	
Τελικό υγρό φαινόμενο βάρος	Ybf	kN/m ³	$= \rho_{bf} \times g$		20.43	
Τελικός δείκτης πόρων (λόγος κενών)	e _f		$= \frac{G_{+} \times (1 + w_{+})}{g_{+}} = 1$		0.488	
Τελικός βαθμός κορεσμού (%)	S _f	%	- <u>* , * G ,</u>		96.0	
Τελικό πορώδες	n _f	%	$=\frac{\epsilon_{f}}{1+\epsilon_{f}}$		32.8	
Τελικό ύψος δείγματος	H _f	mm			18.69	

Φύλλο εργασίας Περατομέτρου Υψηλού Φορτίου Κ15Α85

Εργαστηριακή δοκιμή :	Περατόμετρο Υψηλού Φορτίου						
Δείγμα:			καολίνης-άμμ	ιος			
Κωδικός δείγματος :			K50A50	•			
Ποσοστά	υγρασία	ς δείγματ	ος w %				
Απόβαρο (g)		41					
Βάρος εδάφους υγρό + απόβαρο (g)		71.8	6				
Βάρος εδάφους ξηρό + απόβαρο (g)		67.3	1				
Βάρος υγρού εδάφους (g)		30.80	6				
Βάρος ξηρού εδάφους (g)		26.3	1				
Αρχικό ποσοστό υγρασίας w %		17.3					
Τελικό ποσοστό υγρασίας w _f %							
Σ	τοιχεία δ	είγματος					
	Σύμβολο	Μονάδες	Τύπος	Τιμή			
Διάμετρος δείγματος	D _o	mm		33.20			
Ύψος δείγματος	H°	mm		66.29			
Εμβαδόν διατομής δείγματος	Ao	mm ²	$= \frac{\pi \times D_0^3}{4}$	865.3			
Όγκος δείγματος	Vo	mm ³	$= A_0 \times H_0$	57358.0			
Βάρος δειγματολήπτη		9		134.17			
Βάρος δειγματολήπτη + αρχικό υγρό δείγμα		9		242.86			
Βάρος δειγματολήπτη + τελικό υγρό δείγμα		9					
Αρχικό βάρος υγρού δείγματος	₩₀	9		108.69			
Αρχικό βάρος ξηρού δείγματος	W _d	9	= ^W ₀ 1 + w	92.66			
Αρχική υγρή πυκνότητα δείγματος	ρь	Mg/m ³	$=\frac{W_0 \times 10^3}{2}$	1.89			
Αρχικό υγρό φαινόμενο βάρος	Yb	kN/m ³	$= \rho_{b} \overset{V}{\times} ^{0}g$	18.59			
Αρχική ξηρή πυκνότητα δείγματος	ρ _d	Mg/m ³	$=\frac{W_{\star}\times10^{2}}{V_{0}}$	1.62			
Αρχικό ξηρό φαινόμενο βάρος	Yd	kN/m ³	$= \rho_d \times g$	15.85			
Ειδικό βάρος στερεών δείγματος	Gs	Αδιάστατο		2.65			
Φαινόμενο βάρος νερού	Yw	kN/m ³		9.81			
Αρχικός δείκτης πόρων (λόγος κενών)	eo		= (G, × (1+ W)	- 1 0.640			
Αρχικός βαθμός κορεσμού	50	%	$= \frac{\rho_1 \times w \times G_1}{G_1 \times (1 \pm w) = \rho_1}$	71.6			
Αρχικό πορώδες	no	%	• <u>*</u>	39.0			
Τελικό βάρος υγρού δείγματος	W _f	9					
Τελικό βάρος ξηρού δείγματος	W _{df}	9	$=\frac{W_{f}}{1+w_{f}}$				
Τελική υγρή πυκνότητα δείγματος	ρ_{bf}	Mg/m ³	$=\frac{W_{\gamma} \times 10^{4}}{V_{2}}$				
Τελικό υγρό φαινόμενο βάρος	Ybf	kN/m ³	$= \rho_{bf} \times g$				
Τελικός δείκτης πόρων (λόγος κενών)	ef		$= \frac{G_{+} \times (1 + w_{+})}{g_{+}} = 1$				
Τελικός βαθμός κορεσμού (%)	S _f	%	- <u>* , * C ,</u>				
Τελικό πορώδες	n _f	%	= <u>e</u> / 1+e/				
Τελικό ύψος δείγματος	H _f	mm					

Φύλλο εργασίας Περατομέτρου Υψηλού Φορτίου Κ50Α50

Εργαστηριακή δοκιμή :	Περατόμ	ετρο Υψηλα	ού Φορτίου		
Δείγμα:			καολίνης-άμμο	s	
Κωδικός δείγματος :			K85A15		
Ποσοστά	ό υγρασία	ις δείγματ	ος w %		
Απόβαρο (g)		41.6	8	41.68	
Βάρος εδάφους υγρό + απόβαρο (g)		62.0	56.03		
Βάρος εδάφους ξηρό + απόβαρο (g)		57.8	9	53.06	
Βάρος υγρού εδάφους (g)		20.3	5	14.35	
Βάρος ξηρού εδάφους (g)		16.2	1	11.38	
Αρχικό ποσοστό υγρασίας w %		25.5	5	26.10	
Τελικό ποσοστό υγρασίας w _f %		26.1	L		
Σ	Ετοιχεία δ	είγματος			
	Σύμβολο	Μονάδες	Τύπος	Τιμή	
Διάμετρος δείγματος	D₀	mm		33.20	
Ύψος δείγματος	H₀	mm		66.29	
Εμβαδόν διατομής δείγματος	Ao	mm ²	$= \frac{\pi \times D_0^2}{4}$	865.3	
Όγκος δείγματος	Vo	mm ³	$= A_0 \times H_0$	57358.0	
Βάρος δειγματολήπτη		9		123.34	
Βάρος δειγματολήπτη + αρχικό υγρό δείγμα		9		233.54	
Βάρος δειγματολήπτη + τελικό υγρό δείγμα		g		235.39	
Αρχικό βάρος υγρού δείγματος	Wo	9		110.2	
Αρχικό βάρος ξηρού δείγματος	W _d	9	$=\frac{W_{o}}{1+w}$	87.78	
Αρχική υγρή πυκνότητα δείγματος	ρь	Mg/m ³	$=\frac{W_0 \times 10^3}{10^3}$	1.92	
Αρχικό υγρό φαινόμενο βάρος	Υь	kN/m ³	$= \rho_{b} \times {}^{\circ}g$	18.85	
Αρχική ξηρή πυκνότητα δείγματος	ρd	Mg/m ³	$=\frac{W_{a}\times 10^{3}}{V_{o}}$	1.53	
Αρχικό ξηρό φαινόμενο βάρος	Yd	kN/m ³	$= \rho_d \times g$	15.01	
Ειδικό βάρος στερεών δείγματος	Gs	Αδιάστατο		2.69	
Φαινόμενο βάρος νερού	Yw	kN/m ³		9.81	
Αρχικός δείκτης πόρων (λόγος κενών)	e _o		$=\frac{G_{1} \times (1+W)}{\rho_{1}}$	1 0.758	
Αρχικός βαθμός κορεσμού	5.	%	$\frac{\rho_{+} \times _{W} \times G_{+}}{G_{+} \times (1 + _{W}) - \rho_{+}}$	90.7	
Αρχικό πορώδες	no	%	$= \frac{c_1}{1+c_2}$	43.1	
Τελικό βάρος υγρού δείγματος	W _f	9		112.05	
Τελικό βάρος ξηρού δείγματος	W _{df}	9	$=\frac{W_{f}}{1+w_{f}}$	112.05	
Τελική υγρή πυκνότητα δείγματος	ρ _{bf}	Mg/m ³	$=\frac{W_{\gamma} \times 10^{4}}{V_{0}}$	1.954	
Τελικό υγρό φαινόμενο βάρος	Ybf	kN/m ³	$= \rho_{bf} \times g$	19.16	
Τελικός δείκτης πόρων (λόγος κενών)	ef		$=\frac{G_{+}\times(1+w_{+})}{g_{+}}=1$	0.736	
Τελικός βαθμός κορεσμού (%)	S _f	%	$=\frac{w_{j}\times G_{j}}{\varepsilon_{j}}$	95.3	
Τελικό πορώδες	n _f	%	$=\frac{\epsilon_j}{1+\epsilon_j}$	42.4	
Τελικό ύψος δείγματος	Hf	mm			

Φύλλο εργασίας Περατομέτρου Υψηλού Φορτίου Κ85Α15

Στοιχεία Δείγματος							
Διαστάσεις		Βάρη (g)	πριν	μετά			
Είδος	K15-A85	Βάρος μήτρας	123,38	123,38			
Διάμετρος (cm)	3,32	Βάρος πορόλιθου	10,79	10,79			
Ε διατομής (cm²)	8,66	Βάρος υγρού+μήτρα	235,92	242,83			
Ύψος μήτρας (cm)	7,142	Βάρος υγρού	112,54	119,45			
ύψος πορόλ.(cm)	0,513	Βάρος υποδοχέα	40,52	42,79			
ύψος δείγματος (cm)	6,629	Βάρος υγρού +υπ.	66,37	70,40			
Όγκος δείγματος (cm³)	57,39	Βάρος υγρού	25,85	27,61			
Έναρξη κορεσμού	19/3/2010	Βάρος ξηρού +υπ.	64,01	66,23			
Πίεση κορεσμού (kPa)	30	Βάρος ξηρού	23,49	23,44			
Χρόνος κορεσμού (hrs)	0,5	υγρή πυκ. (g/cm³)	1,96	2,08			
Όγκος νερού κατά τον κορεσμό (ml)	22	w%	10,05	17,79			
		ξηρή πυκ. (g/cm ³)	1,78	1,77			
kPa	cm H2O	ξηρό φαιν. βάρος (kN/cm3)	17,48	17,34			
1	10,2						
Πίεση μανομέτρου στην έξοδο (kPa)	0						

Πίνακας Αποτελεσμάτων Περατομέτρου Υψηλού Φορτίου Κ15Α85

Έναρξη	Λήξη	Χρόνος	Στάθμη νερού στον ογκομετρικό (cm)		Πίεση
			πριν την εφαρμογή	μετά την εφαρμογή	μανομέτρου (kPa)
19/3/2010 13:49	19/3/2010 14:15	0:26:00	5,25	2,25	20
19/3/2010 14:20	19/3/2010 14:39	0:19:00	5,25	2,25	20
19/3/2010 14:44	19/3/2010 14:56	0:12:00	5,2	2,2	25
19/3/2010 14:59	19/3/2010 15:09	0:10:00	5,1	2,1	30
19/3/2010 15:11	19/3/2010 15:20	0:09:00	5	2	35
19/3/2010 15:25	19/3/2010 15:32	0:07:00	4,8	1,8	40
19/3/2010 15:43	19/3/2010 15:49	0:06:00	4,6	1,6	45
19/3/2010 15:51	19/3/2010 15:56	0:05:00	4,3	1,3	50
19/3/2010 15:59	19/3/2010 16:05	0:06:00	4	1	55
19/3/2010 16:08	19/3/2010 16:15	0:07:00	3,5	0,5	60

υδραυλική κλίση i	όγκος εκροής (cm³)	θ (° C)	Q (cm³/s)	v (m/s)	k (m/s) (20°C)
31,34	22	21,5	1,41E-02	1,63E-05	4,95E-07
31,34	16	21,7	1,40E-02	1,62E-05	4,92E-07
39,03	14	22,1	1,94E-02	2,25E-05	5,48E-07
46,70	19	22,6	3,17E-02	3,66E-05	7,28E-07
54,38	24,5	22,6	4,54E-02	5,24E-05	8,96E-07
62,05	31	22,9	7,38E-02	8,53E-05	1,28E-06
69,71	43	22,7	1,19E-01	1,38E-04	1,84E-06
77,36	45	22,4	1,50E-01	1,73E-04	2,13E-06
85,01	71,5	22,8	1,99E-01	2,29E-04	2,51E-06
92,62	106	22,6	2,52E-01	2,92E-04	2,93E-06

Στοιχεία Δείγματος							
Διαστάσεις		Βάρη (g)	πριν	μετά			
Είδος	K50-A50	Βάρος μήτρας	123,15				
Διάμετρος (cm)	3,32	Βάρος πορόλιθου	10,15				
Ε διατομής (cm²)	8,66	Βάρος υγρού+μήτρα	242,86				
Ύψος μήτρας (cm)	7,142	Βάρος υγρού	119,71				
ύψος πορόλ.(cm)	0,513	Βάρος υποδοχέα	41				
ύψος δείγματος (cm)	6,629	Βάρος υγρού +υπ.	71,86				
Όγκος δείγματος (cm³)	57,39	Βάρος υγρού	30,86				
Έναρξη κορεσμού	10/11/2010	Βάρος ξηρού +υπ.	67,31				
Πίεση κορεσμού (kPa)	30	Βάρος ξηρού	26,31				
Χρόνος κορεσμού (hrs)	190	υγρή πυκ. (g/cm ³)	2,09				
Όγκος νερού κατά τον κορεσμό (ml)	2,5	w%	17,29				
		ξηρή πυκ. (g/cm³)	1,78				
kPa	cm H2O	ξηρό φαιν. βάρος (kN/cm3)	17,45				
1	10,2						
Πίεση μανομέτρου στην έξοδο (kPa)	0						

Πίνακας Αποτελεσμάτων Περατομέτρου Υψηλού Φορτίου Κ50Α50

Έναρξη	Λήξη	Χρόνος	Στάθμη νερού στον	Πίεση	
			πριν την εφαρμογή	μετά την εφαρμογή	μανομέτρου (kPa)
11/10/10 15:07	11/18/10 13:15	190:08:00			30
18/11/2010 13:19	22/11/2010 13:13	95:54:00	9,2	9,05	30
22/11/2010 13:15	24/11/2010 13:26	48:11:00	9,05	9	50
24/11/2010 13:30	26/11/2010 11:05	45:35:00	9	8,9	70
26/11/2010 11:05	27/11/2010 11:33	24:28:00	8,9	8,85	100
27/11/2010 11:36	28/11/2010 11:40	24:04:00	8,85	8,8	120
28/11/2010 11:44	29/11/2010 9:43	21:59:00	8,8	8,75	150
29/11/2010 9:56	30/11/2010 10:38	24:42:00	8,75	8,75	200

Υδραυλική κλίση i	V εκροής (cm³)	θ (° C)	Q (cm³/s)	v (m/s)	k(m/s) (20°C)					
	2,5									
47,54	3,5	23,3	1,01E-05	1,17E-08	2,29E-10					
78,3	3	24	1,73E-05	1,99E-08	2,31E-10					
109,06	4	22	2,44E-05	2,81E-08	2,45E-10					
155,21	3	22,7	3,40E-05	3,93E-08	2,35E-10					
185,97	3,5	21,9	4,03E-05	4,66E-08	2,38E-10					
232,13	4	22,5	5,05E-05	5,83E-08	2,33E-10					
309,06	4,5	23	5,06E-05	5,84E-08	1,75E-10					
Στοιχεία Δείγματος										
--------------------------------------	----------------	----------	------------------------------	--------	--------	--	--	--	--	--
Δ	αστάσεις		Βάρη (g)	πριν	μετά					
Είδος		K85-A15	Βάρος μήτρας	123,38						
Διάμετρος (cm)		3,32	Βάρος πορόλιθου	10,79	10,45					
Ε διατομής (cm ²)		8,66	Βάρος υγρού+μήτρα	233,54	235,39					
Ύψος μήτρας (cm)		7,142	Βάρος υγρού	110,16	112,01					
ύψος πορόλ.(cm)		0,513	Βάρος υποδοχέα	41,68	41,68					
ύψος δείγματος (cm)		6,629	Βάρος υγρού +υπ.	62,03	56,03					
Όγκος δείγματος (cm³)		57,39	Βάρος υγρού	20,35	14,35					
Έναρξη κορεσμού		5/2/2010	Βάρος ξηρού +υπ.	57,89	53,06					
Πίεση κορεσμού (kPa)		30	Βάρος ξηρού	16,21	11,38					
Χρόνος κορεσμού (hrs))	285	υγρή πυκ. (g/cm³)	1,92	1,95					
Όγκος νερού κατά το	ν κορεσμό (ml)	4	w%	25,54	26,10					
			ξηρή πυκ. (g/cm³)	1,53	1,55					
kPa		cm H2O	ξηρό φαιν. βάρος (kN/cm3)	15,00	15,18					
1		10,2								
Πίεση μανομέτρου στην έξοδο (kPa)		0								

Πίνακας Αποτελεσμάτων Περατομέτρου Υψηλού Φορτίου Κ85Α15

Έναρξη	Λήξη	Χρόνος (ώρα)	Στάθμη νερού στον ογκομετρικό (cm) μετά την ποιν την μέτοηση μέτοηση		Πίεση μανομέτρου στην είσοδο (/Pa)
5/2/10 13:28	17/2/10 10:13	284:45:00	3.7	μετρηση 3.7	30
17/2/10 10:14	18/2/10 10:17	24:03:00	3,7	3,65	30
18/2/10 10:18	22/2/10 10:15	95:57:00	3,65	3,6	50
22/2/10 10:18	24/2/10 10:45	48:27:00	3,6	3,6	70
24/2/10 10:48	26/2/10 14:18	51:30:00	3,6	3,55	100
26/2/10 14:20	28/2/10 18:00	51:40:00	3,55	3,45	150
28/2/10 18:00	2/3/10 13:00	43:00:00	3,45	3,35	200

υδραυλική κλίση i	όγκος εκροής (cm³)	θ (° C)	Q (cm3/s)	v (m/s)	k(m/s) (20° C)
46,7	4	20,2	3,90E-06	4,51E-09	9,65E-11
46,7	1	22	1,16E-05	1,33E-08	2,72E-10
77,5	5	21,6	1,45E-05	1,67E-08	2,05E-10
108,3	4,5	21,7	2,58E-05	2,98E-08	2,62E-10
154,4	7,5	23,7	4,05E-05	4,67E-08	2,75E-10
231,3	9	21,4	4,84E-05	5,59E-08	2,36E-10
308,3	10	21,8	6,46E-05	7,46E-08	2,30E-10

Δείγμα	Καολίνης 1	5% Άμμος 85%
Ε σωλήνα 2,α (cm²)	0,0724	
Ε σωλήνα 3,α (cm²)	0,0269	
Lκυψέλης (cm)	13,075	
Εσ.δ. Κυψέλης,δ (cm)	δ _κ 9,96	
Εκυψέλης,Α (cm	1 ²) 77,91	
Όγκος Μήτρας (cm ³⁾	944,1	
Βάρος Μήτρας (g) 1751	
Υγρασία Έναρξη W (%)	ן 10,9	

Πίνακας Αποτελεσμάτων Περατομέτρου Πίπτοντος Φορτίου Κ15Α85

	Έναρξη	Λήξη	time (hr)	h1 (cm)	∆h (cm)	h2 (cm)	T (°C)	i	k(m/s) 20 °C
	18/3/2010	18/3/2010							1.24F-09
1η Μέτρηση	10:58	17:41	6:43:00	118	57,5	60,5	20	3,4	_,
	17/3/2010	17/3/2010							2,82E-09
2η Μέτρηση	10:33	14:41	4:08:00	118	71,5	46,5	20	2,3	
	22/3/2010	22/3/2010							8 87F-10
3η Μέτρηση	13:13	19:17	6:04:00	118	66,8	51,2	22	2,7	0,07L-10

Πίνακας Αποτελεσμάτων Περατομέτρου Πίπτοντος Φορτίου Κ50Α50

Δείγμα Καολίνης 50% Άμμος 50%

Ε σωλήνα,α (cm²)	0,0269
Lκυψέλης (cm)	13,075
Εσ.δ. Κυψέλης,δ _κ	
(cm)	9,96
Ε κυψέλης,Α (cm²)	77,91
Όγκος Μήτρας (cm ³⁾	944,1
Βάρος Μήτρας (g)	1751
Υγρασία Έναρξης W (%)	17,3

	Έναρξη	Λήξη	time (hr)	h1 (cm)	Δh (cm)	h2 (cm)	T (°C)	i	k(m/s) 20°
	18/11/2010	18/11/2010							
1η Μέτρηση	11:23	12:00	0:37:00	118	1	117	22	7,7	1,6E-10
	18/11/2010	19/11/2010							
2η Μέτρηση	11:23	14:15	26:52:00	118	51	67	22	3,9	2,5E-10
	18/11/2010	20/11/2010							
3η Μέτρηση	11:23	11:13	47:50:00	118	80	38	22	1,6	2,8E-10
	20/11/2010	21/11/2010							
4η Μέτρηση	11:23	11:35	24:12:00	118	51	67	22	3,9	2,8E-10
	20/11/2010	22/11/2010							
5η Μέτρηση	11:23	14:48	51:25:00	118	70	48	22	2,4	2,1E-10

Πίνακας Αποτελεσμάτων Περατομέτρου Πίπτοντος Φορτίου K85A15

Δείγμα Καολίνης 85% Άμμος 15%

Ε σωλήνα,α (cm²)	0,0724
Lκυψέλης (cm)	13,075
Εσ.δ. Κυψέλης,δ _κ (cm)	9,96
Εκυψέλης,Α (cm²)	77,91
Όγκος Μήτρας (cm ³⁾	944,1
Βάρος Μήτρας (g)	1751
Υγρασία Έναρξης W (%)	25,5

	Έναρξη	Λήξη	time (hr)	h1 (cm)	Δh (cm)	h2 (cm)	T (°C)	i	K(m/s) 20°
	19/2/2010	1/3/2010							
1η Μέτρηση	13:40	12:39	238:59:00	118	74,5	43,5	21	2,1	1,37E-10
	1/3/2010	8/3/2010							
2η Μέτρηση	12:40	10:57	166:17:00	98,2	57,9	40,3	21	1,8	1,76E-10

Αποτελέσματα Τριαξονικής Δοκιμής

Στοιχεία Δείγματος							
Είδος	Άμμος 15%- Καολίνης85%						
Διάμετρος (cm)	3,9						
Ε διατομής (cm ²)	11,95						
Ύψος (cm)	8,1						
Όγκος (cm ³)	96,76						
w%	25,68						
Βάρος υγρού (g)	182,59						

t κορεσμού (ώρες)		142		
Στη λήξη	σ ₃ (kPa)		back(kPa)	pwp(kPa)
κορεσμού		500	470	486

t(sec)	Back P ₂ (kPa)	σ _{eff} (kPa)	ΔP(kPa)	Vol(ml)	i	v(m/s)	Q(ml/s)	K(m/s)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3600	486	20,5	15	0,073	19	1,69E-08	0,001	8,59E-10
3600	509	19,5	56	0,300	71	6,97E-08	0,005	9,76E-10

Στοιχεία Δείγματος		
Είδος	Άμμος 50%- Καολίνης 50%	
Διάμετρος (cm)	3,8	
Ε διατομής (cm²)	11,34	
Ύψος (cm)	8,2	
Όγκος (cm ³)	93,00	
w%	17	
Βάρος υγρού (g)	198,68	

t κορεσμού (ώρες)		151		
Στη λήξη	σ₃(kPa)		back(kPa)	pwp(kPa)
κορεσμού		450	378	433

t(sec)	Back P ₂ (kPa)	σ _{eff} (kPa)	ΔP(kPa)	Vol(ml)	i	v(m/s)	Q(ml/s)	K(m/s)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	421	19	19	0,12	23	6,11E-08	0,004156	2,58E-09
30	401	21,5	57	4,26	70	2,09E-06	0,142245	2,96E-08

T (° C)	R _T
10	1.298
11	1.263
12	1.228
13	1.195
14	1.165
15	1.135
16	1.106
17	1.078
18	1.051
19	1.025
20	1
21	0.975
22	0.952
23	0.93
24	0.908
25	0.887
26	0.867
27	0.847
28	0.829
29	0.811
30	0.793