



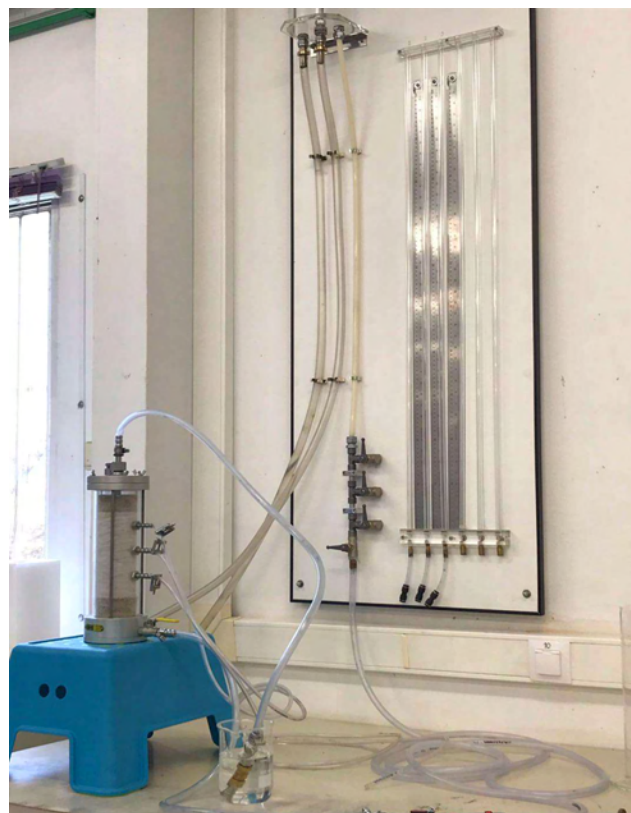
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Η επίδραση των λεπτοκόκκων στη διαπερατότητα άμμου

υπό

ΠΕΤΡΟΥ ΖΑΚΥΝΘΙΝΟΥ



Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2020

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία
Η επίδραση των λεπτοκόκκων στη διαπερατότητα άμμου

υπό
ΠΕΤΡΟΥ ΖΑΚΥΝΘΙΝΟΥ

Επιβλέπων Καθηγητής: Καλλιόγλου Πολυξένη

Βόλος, 2020

© Ζακυνθινός Πέτρος, 2020

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για την απόκτηση του Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού 2020

Η έγκριση της διπλωματική εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2)

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής: Δρ. Πολυξένη Καλλιόγλου
Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής: Δρ. Παναγιώτης Ντακούλας
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής: Δρ. Θεοφάνης Γραμμένος
Επ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου, ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου, Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου καθώς και τη διδάσκουσα κα. Αντιγόνη Βράννα για την πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγηση και στήριξη καθ'όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής αυτής εργασίας. Καθώς και τα χρήσιμα σχόλια τους στην διαδικασία συγγραφής αυτής. Επίσης, ιδιαίτερη αναφορά, θα ήθελα να γίνει στους συναδέλφους μου Μαρτίδη Άγγελο και Λώλο Γεώργιο, για την άριστη συνεργασία και την ανταλλαγή πληροφοριών, κατά την παράλληλη εκπόνηση των δοκιμών και τις ώρες που περάσαμε μαζί κατά την συγγραφή των διπλωματικών μας εργασιών. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια, ιδιαίτερα την αδερφή μου και τους φίλους μου για την υποστήριξη τους και την αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Ζακυνθινός Πέτρος

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ ΣΤΗ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΑΜΜΩΝ

Ζακυνθινός Πέτρος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2020

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Πολυξένη Καλλιόγλου, Λέκτορας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το έδαφος είναι τριφασικό υλικό (αέρας, νερό, στερεοί κόκκοι) και χαρακτηρίζεται από τα κενά που υπάρχουν στο εσωτερικό του. Η παρουσία νερού στα κενά του, καθορίζει τη μηχανική εδαφική συμπεριφορά του εδάφους. Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της ροής του νερού στους εδαφικούς πόρους και συγκεκριμένα η εργαστηριακή μελέτη της επίδρασης της παρουσίας λεπτοκόκκων στη διαπερατότητα αμμωδών εδαφών. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε ένα πρόγραμμα δοκιμών διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου και υπολογίστηκε ο συντελεστής διαπερατότητας σε διάφορες τιμές της υδραυλικής βαθμίδας σε μια ιλυώδη άμμο. Παράλληλα, εκτιμήθηκε ο συντελεστής διαπερατότητας μέσω εμπειρικών συσχετίσεων από τη βιβλιογραφία και συγκρίθηκε με τις πειραματικές τιμές.

ABSTRACT

Soil mass is referred to as three-phase system consisting of soil solids and voids (containing pore water and/or air). The influence of pore water on the mechanical behaviour of soils is very important. The subject of this diploma thesis is the study of water flow in soils and particularly a laboratory research on the influence of on the permeability of sandy soils. For this purpose, a series of constant head permeability tests has been in order to determine the permeability coefficient of a silty sandy at various values of hydraulic gradient. The permeability coefficient was also estimated based on the empirical correlations proposed in literature and compared laboratory measurements.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	5
Κατάλογος Σχημάτων	7
Κεφάλαιο 1. Σκοπός και στόχος της εργασίας	11
1.1 Γενικά.....	11
1.2. Σκοπός της εργασίας.....	12
1.2 Οργάνωση και Δομή της εργασίας.....	12
Κεφάλαιο 2. Ροή νερού διαμέσου εδάφους	14
2.1 Εισαγωγή	14
2.2. Περιγραφή της υδάτινης ροής στο έδαφος	16
2.3. Ο συντελεστής διαπερατότητας k	20
2.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαπερατότητα.....	21
2.3.2 Τυπικές τιμές του συντελεστή διαπερατότητας	24
2.4. Εμπειρικές σχέσεις προσδιορισμού του συντελεστή διαπερατότητας.....	24
Κεφάλαιο 3. Πειραματικές μέθοδοι προσδιορισμού της εδαφικής διαπερατότητας	37
3.1. Εισαγωγή	37
3.2. Εργαστηριακές δοκιμές.....	37
3.1.1 Δοκιμή σταθερού υδραυλικού φορτίου	38
3.1.2 Δοκιμή μεταβαλλόμενου υδραυλικού φορτίου.....	39
3.2 Επιτόπου δοκιμές	41
Κεφάλαιο 4. Δοκιμή διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου	50
4.1 Περιγραφή συσκευής διαπερατότητας.....	50
4.2 Βαθμονόμηση εξοπλισμού.....	51
4.3 Σχεδιασμός εδαφικών φίλτρων	52
4.4 Βοηθητικός εξοπλισμός δοκιμής διαπερατότητας	53
4.5 Διαδικασία δοκιμής διαπερατότητας	54
4.5.1 Προετοιμασία συσκευής - κυψέλης δοκιμίου	54
4.5.2 Προετοιμασία εδαφικού δοκιμίου.....	54
4.5.3 Αντικατάσταση του αέρα των πόρων με CO_2 και κορεσμός του εδαφικού δοκιμίου	55
4.5.4 Μέτρηση της παροχής του νερού.....	56
4.6 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k	57
4.7 Έντυπο δοκιμής.....	58
Κεφάλαιο 5. Μελετηθέν έδαφος και πρόγραμμα δοκιμών	76

5.1 Εισαγωγή	76
5.2 Ορυκτολογική σύσταση	76
5.3 Δοκιμές κατάταξης.....	77
5.3.1 Κοκκομετρική διάβαθμιση.....	77
5.3.2 Ειδικό βάρος στερεών κόκκων	83
5.3.3 Μέγιστος δείκτης κενών	84
5.3.4 Ελάχιστος δείκτης κενών	86
5.4 Πρόγραμμα δοκιμών διαπερατότητας.....	88
Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου.....	100
6.1 Εισαγωγή	100
6.2 Βαθμονόμηση μανομέτρων και σύντομη περιγραφή της διαδικασίας	100
6.3. Σχεδιασμός και δημιουργία του εδαφικού φίλτρου	100
6.4. Αποτελέσματα δοκιμής σταθερού υδραυλικού φορτίου.....	102
Κεφάλαιο 7. Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων και εμπειρικών εκτιμήσεων - Συμπεράσματα.....	144
7.1 Εισαγωγή	144
7.2 Αποτελέσματα πειραματικής δοκιμής	144
7.3 Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας μέσω εμπειρικών συσχετίσεων.....	145
7.4 Σύγκριση πειραματικών - εμπειρικών αποτελεσμάτων	Error! Bookmark not defined.
7.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων ιλυώδης - καθαρής άμμου	146
Βιβλιογραφία	149

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές πορώδους βάσει βιβλιογραφίας	29
Πίνακας 2.2: Περιγραφή εδάφους με βάση τη σχετική πυκνότητα	29
Πίνακας 2.3: Περιγραφή εδάφους με βάση το συντελεστή διαπερατότητας Terzaghi και Peck το (1967).....	29
Πίνακας 3.1 Κατηγοριοποίηση της κατάστασης της βραχώμαζας με βάση την τιμή Lugeon	45
Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα δοκιμής προσδιορισμού ειδικού βάρους στερεών κόκκων	89
Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα δοκιμής προσδιορισμού μεγίστου δείκτη κενών	90
Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα δοκιμής ελαχίστου δείκτη κενών (Proctor).....	91
Πίνακας 5.4 Τιμές υδραυλικής βαθμίδας για το σύνολο των δοκιμών.....	91
Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα βαθμονόμησης μανομέτρων	104
Πίνακας 6.2 Ποσότητες για τη σύνθεση 1 kg εδαφικού φίλτρου	Error! Bookmark not defined.
Πίνακας 6.3 Ποσότητα για την σύνθεση του εδαφικού φίλτρου, με βάση 1kg εδαφικού φίλτρου.....	104
Πίνακας 6.4 Συμπληρωμένο Έντυπο Δοκιμής, Υπολογισμος D _r για δοκιμές 1-5	105
Πίνακας 6.5 Συμπληρωμένο Έντυπο Δοκιμής, Υπολογισμος D _r για δοκιμές 6-7	108
Πίνακας 6.6 Συμπληρωμένο Έντυπο Δοκιμής, Υπολογισμος D _r για δοκιμές 8-12	111
Πίνακας 6.7 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k, για την πρώτη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή	114
Πίνακας 6.8 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k, για την πρώτη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή	114
Πίνακας 6.9 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k, για την δεύτερη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή	115
Πίνακας 6.10 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας,k, για την δεύτερη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή	115
Πίνακας 6.11 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k, για την τρίτη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή	116
Πίνακας 6.12 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας,k, για την τρίτη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή	116
Πίνακας 6.13 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k, για την τέταρτη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή	117
Πίνακας 6.14 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας,k, για την τέταρτη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή	117
Πίνακας 6.15 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k, για την πέμπτη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή	118
Πίνακας 6.16 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας,k, για την πέμπτη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή	118
Πίνακας 6.17 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k, για την έκτη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή	119
Πίνακας 6.18 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας,k, για την έκτη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή	119
Πίνακας 6.19 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k, για την έβδομη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή	120
Πίνακας 6.20 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας,k, για την έβδομη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή	120
Πίνακας 6.21 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k, για την όγδοη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή	121

Πίνακας 6.22 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k , για την όγδοη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή	121
Πίνακας 6.23 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k , για την ένατη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή	122
Πίνακας 6.24 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k , για την ένατη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή	122
Πίνακας 6.25 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k , για την δέκατη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή	123
Πίνακας 6.26 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k , για την δέκατη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή	123
Πίνακας 6.27 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k , για την ενδέκατη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή	124
Πίνακας 6.28 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k , για την ενδέκατη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή	124
Πίνακας 6.29 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k , για την δωδέκατη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή	125
Πίνακας 6.30 Παρουσίαση του υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας, k , για την δωδέκατη δοκιμή, με ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή	125
Πίνακας 7.1 Οι τελικές τιμές του συντελεστή διαπερατότητας, k , για κάθε υδραυλική βαθμίδα για όλες τις δοκιμές.....	147

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Η κίνηση του υδροφόρου ορίζοντα, υπό τοπογραφικές επιφάνειες αλλά και κυμαινόμενες στάθμες (G.E. Barnes, 2005).....	30
Σχήμα 2.2: Ροή νερού μέσω γεωκατασκευής (G.E Barnes,2005).....	30
Σχήμα 2.3: Παρουσίαση Πιέσεων Άνωσης κάτω από κατασκευές (G.E Barnes, 2005).....	31
Σχήμα 2.4: Ροή στο εσωτερικό εκσκαφής (G.E. Barnes, 2005).....	31
Σχήμα 2.5: Εκσκαφές αποστράγγισης (G.E. Barnes, 2005).....	31
Σχήμα 2.6: Χωμάτινο φράγμα υπό υδραυλική υποσκαφή (G.E. Barnes, 2005).....	32
Σχήμα 2.7: Οι τρεις φάσεις που αποτελούν ένα εδαφικό υλικό (Καββαδάς, 2005).....	32
Σχήμα 2.8 Παρουσίαση της (α) πραγματικής και (β) φαινόμενης ροής (K.H.Head, 2006).....	33
Σχήμα 2.9 Μονοδιάστατη ροή διαμέσου του εδάφους ανάμεσα σε δύο δεξαμενές (K.H. Head, 2006) ..	33
Σχήμα 2.10 Σχηματική απεικόνιση της απόκλισης της ταχύτητας ροής από τον νόμο του Darcy σε αργιλικά εδάφη (Hansbo, 1960).....	34
Σχήμα 2.11 Εμπερική σχέση μεταξύ του δυναμικού ιξώδους και της θερμοκρασίας(Kaye and Laby, 1973)	35
Σχήμα 2.12 Χαρακτηριστικά εδάφους με βάση το συντελεστή διαπερατότητας (K.H. Head, 2006)	35
Σχήμα 2.13 Τυπικές τιμές της ειδικής επιφανείας σφαιρικών κόκκων άμμου και ιλύος (K.H. Head, 2006).....	36
Σχήμα 3.1 Τα δύο είδη διαπερατομέτρων: (α) Σταθερού Υδραυλικού Φορτίου (β) Μεταβαλλόμενου Υδραυλικού Φορτίου(Καββαδάς, 2005).....	46
Σχήμα 3.2 Τυπική διάταξη μίας δοκιμής Σταθερού Υδραυλικού Φορτίου	47
Σχήμα 3.3 Τυπική διάταξη μίας δοκιμής Μεταβαλλόμενου Υδραυλικού Φορτίου	48
Σχήμα 3.4 Διάταξη μίας επί-τόπου δοκιμής Lefranc (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002)	49
Σχήμα 3.5 Διάταξη μία επί-τόπου δοκιμής Lugeon (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002).....	52
Σχήμα 3.6 Διάταξη μίας επί-τόπου δοκιμής Maag(Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002).....	52
Σχήμα 4.1 Δεξαμενή παροχής νερού	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.2 Σύστημα απαέρωσης νερού	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.3 Κυψέλη δοκιμίου	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.4 Μανόμετρα	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.5 Φιάλη διοξειδίου του άνθρακα.....	64
Σχήμα 4.6 Ογκομετρικός κύλινδρος για τη μέτρηση της παροχής.....	64
Σχήμα 4.7 Ογκομετρικός κύλινδρος, σύριγγα και υποδοχέας για τη διαδικασία της βαθμονόμησης των μανομέτρων	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.8 Πλήρης διάταξη διαπερατομέτρου	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.9 Συμπλήρωση κατάλληλης ποσότητας νερού στα μανόμετρα, για εξάλειψη σφαλμάτων	66
Σχήμα 4.10 Παρουσίαση μιας τυπικής καμπύλης εδαφικού, με βάση τα κριτήρια σχεδιασμού (K.H.Head, 2006).....	65
Σχήμα 4.11 Διαβάθμιση χονδροκόκκων υλικών για την παρασκευή εδαφικού φίλτρου .	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.12 Διαχωρισμός του εδαφικού υλικού που προέκυψε από τη διαδικασία βαθμονόμησης με βάση την διάμετρο τους.....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.13 Σύθεση ενός εδαφικού φίλτρου, 1 kg, με κατάλληλες ποσότητες από κάθε διάμετρο κόκκων	Error! Bookmark not defined.

Σχήμα 4.14 Μέτρηση της εσωτερικής διαμέτρου της κυψέλης δοκιμίου με τη χρήση βερνιέρου.....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.15 Μέτρηση της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών οπών της κυψέλης δοκιμίου με τη χρήση βερνιέρου	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.16 Διερεύνηση της σκοπιμότητας χρήσης εδαφικού και χάρτινου φίλτρου.(α) Δοκιμή χωρίς χρήση χάρτινου φίλτρου. (β) Δοκιμή με μόνο χρήση χάρτινου φίλτρου. (γ) Δοκιμή με την χρήση και των δύο φίλτρων.....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.17 Τοποθέτηση χάρτινου φίλτρου στην κάτω βάση της κυψέλης δοκιμίου .	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.18 Τυπική κυψέλη του διαπερατομέτρου μετά την ολοκλήρωση διαμόρφωσης του εδαφικού δοκιμίου (K.H. Head, 2006).....	70
Σχήμα 4.19 Κατάλληλες ποσότητες του εξεταζόμενου εδαφικού υλικού (άμμος + ιλύς) για τη διαμόρφωση του δοκιμίου στο εσωτερικό της κυψέλης.....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.20 Συμπύκνωση της πρώτης στρώσης του εδαφικού δοκιμίου	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.21 Συμπύκνωση της τελικής στρώσης του εδαφικού δοκιμίου	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.22 Κυψέλη με το εδαφικό δοκίμιο	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.23 Αντικατάσταση του αέρα των εδαφικών πόρων με CO ₂ .(α) Διάταξη απαέρωσης και (β) Διάταξη ελέγχου ροής	73
Σχήμα 4.24 Διάταξη κορεσμού του εδαφικού δοκιμίου	73
Σχήμα 4.25 Δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας του κορεσμού και άνοιγμα της ειδικής βαλβίδας για την πλήρη απομάκρυνση του CO ₂ από το εσωτερικό της κυψέλης.....	74
Σχήμα 4.26 Μέτρηση της θερμοκρασίας στο εξερχόμενο νερό του δοκιμίου	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 4.27 Διαπερατόμετρο κατά τη διάρκεια δοκιμής.....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 5.1 Άποψη του σχήματος και της μορφής των κόκκων της καθαρής άμμου M31 (Βράννα, 2016).	92
Σχήμα 5.2 Άποψη του σχήματος και της μορφής των κόκκων της ιλύος D6 (Βράννα, 2016).....	92
Σχήμα 5.3 Κόκκοι μίγματος ιλυώδους άμμου (85% M31- 15% D6) στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) σε διάφορες μεγενθύνσεις (Βράννα, 2016).....	93
Σχήμα 5.4 Κοκκομετρική καμπύλη της ιλυώδους άμμου	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 5.5 Σύγκριση των τιμών της τιμής Proctor (Μπλε Καμπύλη), σε σύγκριση με αντίστοιχη καμπύλη άλλης διπλωματικής (Κόκκινη Καμπύλη) (Κουλαουζίδου Κυριακή, 2016)...	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 5.6 Προετοιμασία για δοκιμή κοκκομετρίας.....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 5.7 Υγρή δοκιμή κοκκομετρίας με υποβοήθηση υδροβολέα.....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 5.8 Συνέχεια δοκιμής με μετρήσης αραιομέτρου	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 5.9 Διαδικασία ζύγισης της ληκύθου (α) άδεια (β) με το εξεταζόμενο εδαφικό υλικό.....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 5.10 Διαδικασία απαερισμού του νερού που χρησιμοποιείται για την δοκιμή.....	95
Σχήμα 5.11 Με υδροβολέα προσεκτικό γέμισμα με νερό μέχρι την μέση	96
Σχήμα 5.12 Διαδικασία ζύγισης των ληκύθων (α) με απαερωμένο νερό και το εδαφικό υλικό (β) γεμάτες μόνο με απαερωμένο νερό.....	96
Σχήμα 5.13 Πλήρης εξοπλισμός πριν την δοκιμή Proctor	97
Σχήμα 5.14 Τοποθέτηση εδαφικού δείγματος με προκαθορισμένη υγρασία στην μήτρα	Error! Bookmark not defined.

Σχήμα 5.15 Διαδικασία συμπίκνωσης με σφύρα	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 6.1 Αποτελέσματα από την διαδικασία της βαθμονόμησης για το πρώτο μανόμετρο, με γραφική παράσταση, όπου στον άξονα x απεικονίζεται η διαφορά δυναμικού (cm) και στον άξονα γ η διαφορά όγκου νερού(ml)	126
Σχήμα 6.2 Αποτελέσματα από την διαδικασία της βαθμονόμησης για το δεύτερο μανόμετρο, με γραφική παράσταση, όπου στον άξονα x απεικονίζεται η διαφορά δυναμικού (cm) και στον άξονα γ η διαφορά όγκου νερού(ml).....	127
Σχήμα 6.3 Αποτελέσματα από την διαδικασία της βαθμονόμησης για το τρίτο μανόμετρο, με γραφική παράσταση, όπου στον άξονα x απεικονίζεται η διαφορά δυναμικού (cm) και στον άξονα γ η διαφορά όγκου νερού(ml).....	128
Σχήμα 6.4 Κοκκομετρική καμπύλη του φίλτρου. (Από αριστερά προς δεξιά) (α) Κοκκομετρική Καμπύλη του εδαφικού υλικού. (β) Αριστερό όριο του εδαφικού φίλτρου. (γ) Τελική κοκκομετρική καμπύλη του εδαφικού φίλτρου (δ) Δεξί όριο του εδαφικού φίλτρου.	129
Σχήμα 6.5 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, πρώτη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή.....	130
Σχήμα 6.6 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, πρώτη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την αρχική τιμή.....	130
Σχήμα 6.7 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, δεύτερη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή. Στον άξονα x παριστάνεται ο χρόνος, t , σε sec και στον άξονα γ η παροχή, q , σε ml/sec	131
Σχήμα 6.8 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, δεύτερη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την αρχική τιμή.....	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 6.9 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, τρίτη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή.....	132
Σχήμα 6.10 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, τρίτη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την αρχική τιμή.....	132
Σχήμα 6.11 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, τέταρτη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή.....	133
Σχήμα 6.12 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, τέταρτη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την αρχική τιμή.....	133
Σχήμα 6.13 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, πέμπτη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή.....	134
Σχήμα 6.14 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, πέμπτη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την αρχική τιμή.....	134
Σχήμα 6.15 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, έκτη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή.....	135
Σχήμα 6.16 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, έκτη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την αρχική τιμή.....	135
Σχήμα 6.17 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, έβδομη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή.....	136
Σχήμα 6.18 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, έβδομη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την αρχική τιμή.....	136
Σχήμα 6.19 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, όγδοη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή.....	137

Σχήμα 6.20 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, όγδοη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την αρχική τιμή.	137
Σχήμα 6.21 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, ένατη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή.	138
Σχήμα 6.22 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, ένατη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την αρχική τιμή.	138
Σχήμα 6.23 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, δέκατη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή.	139
Σχήμα 6.24 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, δέκατη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την αρχική τιμή.	139
Σχήμα 6.25 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, ενδέκατη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή.	140
Σχήμα 6.26 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, ενδέκατη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την αρχική τιμή.	140
Σχήμα 6.27 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, δωδέκατη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή.	Error! Bookmark not defined.
Σχήμα 6.28 Γραφική παράστασης της παροχής σε σχέση με τον χρόνο, δωδέκατη δοκιμή, με βάση την διαφορά όγκου, ΔV , σε σχέση με την αρχική τιμή.	141
Σχήμα 6.29 Τιμές του συντελεστή διαπερατότητας, k , (α) μπλε τετράγωνα αναπαριστούν τον λόγο του ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή, (β) πορτοκαλί τετράγωνα αναπαριστούν τον λόγο του ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή. Απεικονίζονται οι δοκιμές 1-5.	142
Σχήμα 6.30 Τιμές του συντελεστή διαπερατότητας, k , (α) μπλε τετράγωνα αναπαριστούν τον λόγο του ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή, (β) πορτοκαλί τετράγωνα αναπαριστούν τον λόγο του ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή. Απεικονίζονται οι δοκιμές 6-7.	142
Σχήμα 6.31 Τιμές του συντελεστή διαπερατότητας, k , (α) μπλε τετράγωνα αναπαριστούν τον λόγο του ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή, (β) πορτοκαλί τετράγωνα αναπαριστούν τον λόγο του ΔV σε σχέση με την αρχική τιμή. Απεικονίζονται οι δοκιμές 8-12.	143
Σχήμα 7.1 Τελική αναπαράσταση όλων των συντελεστών διαπερατότητας, k , για τις αντίστοιχες υδραυλικές βαθμίδες, i	148
Σχήμα 7.2 Αναπαράσταση όλων των συντελεστών διαπερατότητας, για την αντιστοιχη σχετική πυκνότητα.	148

Κεφάλαιο 1

Σκοπός και στόχος της εργασίας

1.1 Γενικά

Η υδάτινη ροή στους εδαφικούς πόρους είναι φαινόμενο που συνδέεται σημαντικά με το αντικείμενο του Πολιτικού Μηχανικού και πιο άμεσα του Γεωτεχνικού Μηχανικού. Η υδάτινη ροή σε κάποια τεχνικά έργα είναι επιθυμητή, όπως στην περίπτωση των γεωτρήσεων για την άντληση νερού από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, ενώ σε κάποια άλλα μπορεί να αποβεί καταστροφική, όπως στην περίπτωση των χωμάτινων φραγμάτων όπου η πιθανή ροή νερού μέσα στο σώμα του φράγματος (λόγω κακού σχεδιασμού) οδηγεί στην αστοχία του. Το φυσικό μέγεθος που συνδέεται με την ανάπτυξη της υδάτινης ροής διαμέσου του εδάφους και που εκφράζει την αντίστοιχη ικανότητα του εδάφους είναι η διαπερατότητα. Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων, η διαπερατότητα εμφανίζει μεγάλο εύρος τιμών. Οι άργιλοι ως τα πιο λεπτόκοκκα εδάφη έχουν τη μικρότερη διαπερατότητα ενώ τη μεγαλύτερη διαπερατότητα εμφανίζουν τα χαλίκια και οι κροκάλες. Καθώς η παρουσία άλλων ρευστών στο έδαφος είναι σημαντικά μικρότερη από αυτήν του νερού, στην πλειοψηφία των τεχνικών έργων ενδιαφέρει η υδάτινη ροή. Τα τελευταία χρόνια ωστόσο, στα πλαίσια των γεωπεριβαλλοντικών μελετών μελετώνται τα φαινόμενα ροής ή μεταφοράς ρύπων δηλαδή ρευστών διαφορετικών του νερού διαμέσου του εδάφους.

Η αντιμετώπιση των περισσότερων γεωτεχνικών προβλημάτων, τα οποία συνδέονται με την υδάτινη ροή, απαιτεί τον υπολογισμό του συντελεστή διαπερατότητας, k . Υπάρχουν διάφορες πειραματικές μέθοδοι προσδιορισμού του συντελεστή διαπερατότητας, οι οποίες χρησιμοποιούνται ανάλογα με το είδος του εδάφους και του τεχνικού έργου. Οι μέθοδοι υπολογισμού του k ανήκουν στις εξής κατηγορίες:

- ❖ Εργαστηριακές δοκιμές
- ❖ Επί τόπου δοκιμές (μικρής ή μεγάλης κλίμακας)
- ❖ Εκτιμήσεις με εμπειρικές σχέσεις που προτείνονται στην βιβλιογραφία

1.2. Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k , σε μία ιλύδη άμμο. Στα πλαίσια της μελέτης αυτής: (α) πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στη συσκευή σταθερού υδραυλικού φορτίου, στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Π.Θ., σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D2434, για τον προσδιορισμό του k (β) χρησιμοποιήθηκαν οι εμπειρικές σχέσεις που προτείνονται από τους Terzaghi, Hazen, Kozeny- Carman και Charpuis, για την εκτίμηση του k , και (γ) συγκρίθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα για το k με τα αντίστοιχα μιας καθαρής άμμου, για τη μελέτη της επίδρασης των λεπτόκοκκων στο συντελεστή διαπερατότητας.

1.2 Οργάνωση και Δομή της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας και η δομή των κεφαλαίων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο αναφορικά με την υδάτινη ροή. Γίνεται αναφορά στην έννοια του συντελεστή διαπερατότητας, στους παράγοντες οι οποίοι τον επηρεάζουν, και στην εκτίμησή του μέσω των εμπειρικών σχέσεων που δίνονται στη βιβλιογραφία. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται οι εργαστηριακές δοκιμές προσδιορισμού του συντελεστή διαπερατότητας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή του εργαστηριακού εξοπλισμού, που απαιτείται, και της διαδικασίας που ακολουθείται, για την δοκιμή διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου (συσκευή, βαθμονόμηση μανομέτρων, σχεδιασμός και προετοιμασία εδαφικών φίλτρων, εξοπλισμός, προετοιμασία δοκίμιου, διαδικασία δοκιμής).

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το μελετηθέν εδαφικό υλικό (85% M31-15% D6), καθώς επίσης και οι φυσικές του ιδιότητες. Επίσης περιγράφονται οι δοκιμές κατάταξης (κοκκομετρική ανάλυση, ειδικό βάρος στερεών κόκκων, ελάχιστη ξηρή πυκνότητα, δοκιμή συμπύκνωσης Proctor). Τέλος, παρουσιάζεται το πρόγραμμα των δοκιμών διαπερατότητας που εκτελέστηκε.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται εκτενώς τα αποτελέσματα των δοκιμών της διαπερατότητας του σταθερού υδραυλικού φορτίου.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται σχολιασμός και αξιολόγηση των αποτελέσματα των δοκιμών διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου και παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν. Γίνεται εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας μέσω των εμπειρικών εξισώσεων που προτείνονται στη βιβλιογραφία και σύγκριση με τις πειραματικές τιμές. Τέλος, συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα με τα αντίστοιχα μιας καθαρής άμμου για τη μελέτη της επίδρασης του ποσοστού των λεπτοκόκκων στο συντελεστή διαπερατότητας.

Κεφάλαιο 2

Ροή νερού διαμέσου εδάφους

2.1 Εισαγωγή

Η παρουσία νερού με τη συνεπακόλουθη ροή του στο εσωτερικό του εδάφους οφείλεται στον υδρολογικό κύκλο, ο οποίος περιγράφει την ολική ανακύκλωση του νερού στην ατμόσφαιρα, και έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας ζώνης κορεσμού κάτω από το επίπεδο του εδάφους. Η επιφάνεια αυτής της ζώνης που βρίσκεται στο κορυφαίο σημείο, αποτελεί τον υδροφόρο ορίζοντα του εδάφους. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα υφίσταται εποχιακές μεταβολές. Τους χειμερινούς μήνες, στους οποίους παρουσιάζονται αυξημένες κατακρημνίσεις, η στάθμη του ανεβαίνει. Αναλυτικότερα, οι διακυμάνσεις στην ποσότητα του νερού στον υδροφόρο ορίζοντα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.1. Οι διακυμάνσεις αυτές πολλές φορές είναι υπεύθυνες για τις αστοχίες σε κατασκευές και ειδικότερα σε περιπτώσεις αυξημένης ροής νερού μέσω του εδάφους. Επομένως, κρίνεται σημαντικό (α) να αναλυθούν οι καταστάσεις οι οποίες είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε αστοχία μίας κατασκευής και παρουσιάζονται στον Ευρωκώδικα EC7, και (β) να παρουσιαστούν οι τρόποι αντιμετώπισης αυτών.

Ροή διαμέσω γεωκατασκευών

Κατά τον σχεδιασμό αλλά και την λειτουργία μίας γεωκατασκευής (χωμάτινο φράγμα), πρέπει να ληφθούν εξ αρχής μέτρα έναντι αστοχίας. Το υπέδαφος στο οποίο θα στηριχθεί η κατασκευή πρέπει να ελεγχθεί προσεκτικά, καθώς επίσης και οποιαδήποτε πιθανότητα ροής στο εσωτερικό του, η οποία μπορεί να προκαλέσει την κατάρρευση αυτής. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος αντιμετώπισης είναι μία αρχική ενίσχυση του υπεδάφους με πέτασμα τσιμεντενέσεων και ένας κεντρικός αργιλικός και πρακτικά αδιαπέρατος πυρήνας. Άλλος τρόπος αντιμετώπισης, είναι η χρήση στραγγιστηρίων, τα οποία επιτρέπουν στο νερό να εισχωρήσει και να περάσει ανεμπόδιστα διαμέσου τους. Συμπληρωματικά, πάντα απαιτείται η προστασία με ειδικά εδαφικά

φίλτρα, τα οποία εμποδίζουν τους εδαφικούς κόκκους από τον αργιλικό πυρήνα να μεταφερθούν στις στρώσεις στράγγισης και να τις φράξουν (Σχήμα 2.2).

Πιέσεις άνωσης

Η ροή διαμέσω των διαπερατών σχηματισμών έδρασης ή θεμελίωσης των τεχνικών έργων, έχει ως αποτέλεσμα, την δημιουργία ενός πολύ μεγαλύτερου πρίσματος υδατικής πίεσεως άνωσης στη βάση του έργου σε σύγκριση με την υδροστατική του πίεση του σχηματισμού. Αξίζει να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο πρόβλημα παρατηρείται κυρίως σε εδαφικές στρώσεις χαμηλής διαπερατότητας. Ως τρόποι αντιμετώπισης προτείνονται αγκύρωση ή ένα μεγάλο μόνιμο φορτίο, που υπερβαίνει την πίεση της άνωσης. Στο Σχήμα 2.3, παρουσιάζεται το πρόβλημα που προκαλείται από τις πιέσεις άνωσης.

Ροή μέσα σε εκσκαφές

Τα φρεάτια άντλησης, μπορούν να δημιουργήσουν προϋποθέσεις για την εκμετάλλευση και την άντληση των υπόγειων υδάτων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την αξιοποίηση των υπόγειων υδάτων είναι η εκτίμηση της παροχής της ροής, ώστε να υπολογισθεί ο επιθυμητός αριθμός φρεατίων και η ισχύς για μέγιστη λειτουργία τους. Η εφαρμογή των φρεατίων άντλησης είναι περιοσμένη σε ανοιχτές χαλικώδεις αποθέσεις με μικρά πιεζομετρικά ύψη (Σχήμα 2.4).

Αποστράγγιση

Συχνά στα τεχνικά έργα, στη φάση της εκσκαφής, κρίνεται απαραίτητη η υποβάθμιση του υδροφόρου ορίζοντα, ώστε οι εργασίες να πραγματοποιηθούν σε ξηρές συνθήκες. Οι περισσότερο σημαντικές τεχνικές αποστράγγισης είναι τα φρεάτια ή τα ρηγά πηγάδια κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Και στις δύο περιπτώσεις είναι απαραίτητη η γνώση της παροχής του νερού, ώστε να προσδιοριστεί ο συνολικός αριθμός και το βάθος των φρεατίων, καθώς επίσης και η καταλληλότητα των θέσεών τους (Σχήμα 2.5).

Υδραυλική υποσκαφή (διασωλήνωση)

Το νερό κατά τη διέλευσή του μέσα από το σώμα των γεωκατασκευών, δημιουργεί μια διαβρωτική δύναμη ανάλογη της ταχύτητας ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τη δημιουργία διαφόρων αγωγών (διασωλήνωση), οι οποίοι οδηγούν σε προοδευτική διάβρωση και εν τέλει σε κατάσταση αστοχίας της κατασκευής. Στις περιπτώσεις αυτές, η συμπεριφορά των λεπτόκοκκων εδαφών μπορεί να είναι προβληματική (π.χ. περίπτωση χωμάτων φραγμάτων, αντιπλημμυρικών αναχωμάτων ή σε διάφορες επενδύσεις ανοιχτών αγωγών, Σχήμα 2.6), εάν δεν προστατεύονται από ειδικά εδαφικά φίλτρα χονδρόκοκκων υλικών.

2.2. Περιγραφή της υδάτινης ροής στο έδαφος

Το έδαφος συνθέτουν ο εδαφικός σκελετός και τα περιεχόμενα ρευστά (αέρας και νερό) στους εδαφικούς πόρους (ή αλλιώς κενά). Ο εδαφικός σκελετός απαρτίζεται από εδαφικούς κόκκους διαφόρων σχημάτων, μεγέθους και με διαφορετικό ποσοστό συμμετοχής, που βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη διάταξη που περιγράφεται ως εδαφική δομή (fabric). Για το λόγο αυτό το έδαφος περιγράφεται ως τριφασικό υλικό. Αναλυτικότερα, οι τρεις φάσεις που το αποτελούν είναι η στερεά (εδαφικοί κόκκοι), η υγρή (νερό) και η αέρια (αέρας) (Σχήμα 2.7).

Ο όγκος (V) ενός εδαφικού στοιχείου ισούται με το σύνολο του όγκου των στερεών κόκκων (V_s) και των κενών (V_v). Ο όγκος των κενών ισούται με το άθροισμα του όγκου του περιεχόμενου νερού (V_w) και του όγκου του περιεχόμενου αέρα (V_g). Η ίδια λογική ισχύει για την εδαφική μάζα με τη διαφορά, πως η μάζα του αέρα θεωρείται μηδενική.

Ποσοτική έκφραση των εδαφικών πόρων αποτελούν το πορώδες, n , και ο δείκτης πόρων, e , σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.1)$$

$$e = \frac{V_w + V_g}{V_s} = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.2)$$

Το πορώδες ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών ως προς τον ολικό όγκο του εδάφους. Με βάση την τιμή του πορώδους, το έδαφος μπορεί να χαρακτηριστεί από πυκνό έως χαλαρό. Τυπικές τιμές του n , παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Ο δείκτης πόρων, e , συνδέεται με το πορώδες με την εξής σχέση:

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (2.3)$$

Μία άλλη πολύ σημαντική ιδιότητα των χονδρόκοκκων εδαφών, είναι η σχετική πυκνότητα, D_r , η οποία ορίζεται από τη σχέση (2.4). Η σχετική πυκνότητα συνδέεται με το δείκτη πόρων, e , καθώς διακρίνει την κατάσταση ενός εδαφικού υλικού σε σχέση με την ελάχιστη και τη μέγιστη πυκνότητά του. Τυπικές τιμές της σχετικής πυκνότητας απεικονίζονται στον Πίνακα 2.2.

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100(\%) \quad (2.4)$$

Όπου:

e_{max} : ο δείκτης κενών στην ελάχιστη πυκνότητα

e_{min} : ο δείκτης κενών στη μέγιστη πυκνότητα

Άλλη μια σημαντική ιδιότητα του εδάφους, που αναφέρεται στην ποσότητα του νερού που περιέχει, είναι η υγρασία (w), η οποία αποτελεί ποσοστιαίο μέγεθος και ορίζεται ως εξής:

$$w(\%) = \frac{M_w}{M_s} \quad (2.5)$$

Όπου:

M_w : η μάζα του νερού

M_s : η μάζα του ξηρού εδάφους

Για την έκφραση του ποσοστού του εδαφικού όγκου που καταλαμβάνει το περιεχόμενο νερό χρησιμοποιείται ο βαθμός κορεσμού (S). Ορίζεται ως εξής:

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_w + V_g} \quad (2.6)$$

Η διαπερατότητα του εδάφους, εκφράζει την «ευκολία» με την οποία το νερό κινείται στο εσωτερικό του εδάφους, δηλαδή διαμέσου των εδαφικών πόρων που επικοινωνούν μεταξύ τους.

Η πραγματική ροή του νερού στο εσωτερικό ενός εδαφικού υλικού (Σχήμα 2.8), διαφέρει από αυτήν που θεωρείται για λόγους ευκολίας και για χάρη των υπολογισμών ως πραγματική και ονομάζεται «φαινόμενη». Η πραγματική ροή από ένα σημείο Α σε ένα σημείο Β ακολουθεί μια ελικοειδή διαδρομή ανάμεσα στους πόρους του εδάφους που επικοινωνούν μεταξύ τους. Η πραγματική ταχύτητα είναι χρονικά μεταβαλλόμενη και εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος των κενών, καθώς επίσης και από οποιαδήποτε ρωγμή ή ασυνέχεια στο έδαφος. Καθώς ο υπολογισμός της πραγματικής ροής είναι πρακτικά αδύνατος, θεωρείται πως τα μόρια του νερού κινούνται εντός του εδάφους πάνω στις γραμμές ροής με σταθερή ταχύτητα.

Η ροή του νερού μεταξύ δύο σημείων συμβαίνει λόγω της διαφοράς δυναμικού μεταξύ αυτών. Με την τοποθέτηση ενός πιεζομετρικού σωλήνα σε οποιοδήποτε σημείο ανάμεσα των δύο αυτών σημείων, το νερό θα αρχίζει να ανεβαίνει και τελικά θα σταθεροποιηθεί σε ένα τελικό ύψος, το οποίο παρουσιάζει την πίεση του νερού στο συγκεκριμένο σημείο. Το ύψος του νερού στο σωλήνα ονομάζεται πιεζομετρικό ύψος. Στο Σχήμα 2.9 απεικονίζεται η μονοδιάστατη ροή μεταξύ δύο δεξαμενών. Η πίεση του νερού, (p), ορίζεται ως εξής:

$$p = h \times \rho_w \times g \quad (2.7)$$

Όπου:

p: η πίεση του νερού (kN/m²)

h: το ύψος του νερού στο πιεζομετρικό σωλήνα (mm)

ρ_w : η πυκνότητα του νερού (Mg/m³)

g: η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s²)

Για τον υπολογισμό της παροχής, Q, στην περίπτωση μονοδιάστατης ροής χρησιμοποιείται ο νόμος Darcy, ο οποίος βασίζεται στις εξής παραδοχές: (α) υπάρχει γραμμική ροή και (β) η ροή στο εσωτερικό του μέσου είναι στρωτή και όχι τυρβώδης. Η δεύτερη υπόθεση ισχύει για την πλειοψηφία των εδαφικών υλικών, από αργίλους έως χονδρόκοκκες άμμους, και συνεπώς ισχύει

για το έδαφος που μελετήθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Με βάση την εξίσωση του Darcy, η παροχή του νερού είναι ανάλογη της ποσότητας του νερού που διέρχεται στη μονάδα του χρόνου, του εμβαδού της διατομής του δοκιμίου, καθώς επίσης και της υδραυλικής βαθμίδας, και ορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$Q = k \times i \times A \quad (2.8)$$

Όπου:

Q: η παροχή (m³/s)

k: συντελεστής διαπερατότητας (m/s)

A: εμβαδόν διατομής δοκιμίου (m²)

i: υδραυλική κλίση ή υδραυλική βαθμίδα

Η υδραυλική κλίση ή κλίση πιεζομετρικής συνάρτησης, αποτελεί ένα αδιάστατο μέγεθος, που ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο σημείων ως προς τη μεταξύ τους απόσταση. Ο τύπος υπολογισμού της είναι ο εξής:

$$i = \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (2.9)$$

Όπου:

ΔH: η διαφορά του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο σημείων

ΔL: η οριζόντια απόσταση μεταξύ των δύο σημείων

Όπως προαναφέρθηκε, ο νόμος του Darcy έχει εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος εδαφών και υδραυλικών βαθμίδων, καθώς η ανάπτυξη στρωτής και γραμμικής ροής λαμβάνει χώρα σε μεγάλο εύρος εδαφών. Δεν έχει όμως εφαρμογή για μεγάλες τιμές υδραυλικής κλίσης, i , σε πολύ χονδρόκοκκα εδάφη, όπως χάλικες, όπου η ροή του νερού από στρωτή αλλάζει σε τυρβώδης. Ταυτόχρονα, δεν ισχύει σε πολύ μικρές τιμές της υδραυλικής κλίσης, κυρίως για αργίλους. Σε αργιλικά εδαφικά δοκίμια, για πολύ μικρές τιμές της υδραυλικής κλίσης ($i < i_0$), έχει εφαρμογή μία μη γραμμική σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα ροής (v) και την υδραυλική βαθμίδα, ενώ αντιθέτως για πολύ μεγάλες υδραυλικές βαθμίδες ($i \geq i_0$) η συσχέτιση γίνεται γραμμική. Η απεικόνιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10.

2.3. Ο συντελεστής διαπερατότητας k

Η ταχύτητα ροής του νερού στο έδαφος που εκτιμάται από τον νόμο του Darcy δεν είναι η πραγματική και ακανόνιστη ταχύτητα των σωματιδίων νερού ανάμεσα στα κενά των εδαφικών κόκκων, αλλά είναι μία προσέγγιση αυτής που ονομάζεται φαινόμενη ταχύτητα ροής. Για τον ορισμό της φαινόμενης ταχύτητας θεωρείται ότι μια ποσότητα νερού Q (m^3) ρέει στο εσωτερικό ενός εδαφικού δοκιμίου διατομής A (m^2) (που είναι κάθετη στις γραμμές ροής), για ένα χρονικό διάστημα t (s). Ο ρυθμός ροής που δηλώνεται με q (m^3/s) ισούται με Q/t , και συνεπώς η ταχύτητα ροής v (m/s) ορίζεται ως εξής:

$$v = \frac{Q}{A \times t} = \frac{q}{A} \quad (2.10)$$

Η πραγματική ταχύτητα ροής, v_r , έχει τιμές μεγαλύτερες από την φαινόμενη ταχύτητα, v , και δίνεται από την σχέση:

$$v_r = \frac{v}{n} \quad (2.11)$$

Μια πιο απλή διατύπωση του νόμου του Darcy δηλώνει πως η ταχύτητα ροής του νερού στα κενά ενός εδαφικού υλικού υπό σταθερές συνθήκες είναι ανάλογη με την διαφορά δυναμικού, η οποία προκαλεί τη ροή, και αντιστρόφως ανάλογη με το ιξώδες του ρευστού. Ισχύει η αναλογία που ακολουθεί:

$$v \propto \frac{i_p}{\eta} \quad (2.12)$$

Όπου:

v : η φαινόμενη ταχύτητα ροής

i_p : η υδραυλική κλίση, $(\Delta p/\Delta L)$, δηλαδή η διαφορά της συνολικής πίεσης ανά μονάδα μήκους ροής

η : το δυναμικό ιξώδες του υγρού

Η σχέση που προηγήθηκε, μπορεί να εκφραστεί και ως εξής:

$$v = \frac{K \times \rho_w \times g \times i}{\eta} \quad (2.13)$$

Η «απόλυτη» ή «ειδική» διαπερατότητα, K , που συναντάται στο παραπάνω τύπο, είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες του υγρού. Συνδέεται με το συντελεστή διαπερατότητας, k , με την παρακάτω σχέση:

$$k = \frac{K \times \rho_w \times g}{n_w} \quad (2.14)$$

Η σχέση μεταξύ «απόλυτης» διαπερατότητας, K και του συντελεστή διαπερατότητας, k εφόσον το k μετράται σε m/s και το K σε mm² στην περίπτωση του νερού είναι η παρακάτω:

$$\rho_w = 1.00 \text{ Mg/m}^3$$

$$\eta_w = 1.0 \text{ mPas (20}^\circ\text{C)} = 10^{-3} \text{ pas}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Άρα,

$$k = \frac{K}{1000^2} \times \frac{1000 \times 9.81}{10^{-3}} = 9.81K \quad (2.15)$$

Ισχύει κατά προσέγγιση, $k \text{ (m/s)} = 10K \text{ (mm}^2\text{)}$

2.3.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διαπερατότητα

Η διαπερατότητα δεν αποτελεί μονοσήμαντη ιδιότητα του εδάφους, αλλά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες:

(α) τύπος του εδάφους:

- Κοκκομετρική καμπύλη εδάφους
- Σχήμα και υφή των εδαφικών κόκκων
- Ορυκτολογική σύσταση των αργιλικών σωματιδίων

(β) εδαφικοί πόροι και παρουσία νερού:

- Δείκτης πόρων
- Βαθμός κορεσμού

(γ) ανομοιογένεια του εδάφους

- Στρώσεις εδάφους

(δ) άλλοι παράγοντες

- Είδος υγρού των πόρων
- Τύπος ροής

- Θερμοκρασία

Κάθε ένας από αυτούς τους παράγοντες αναλύεται παρακάτω.

2.3.1.1 Κοκκομετρική καμπύλη εδάφους

Η διαπερατότητα αυξάνεται με την αύξηση του όγκου των πόρων. Είναι ανάλογη του μεγέθους των εδαφικών κόκκων και του συντελεστή ομοιομορφίας της κοκκομετρικής καμπύλης του εδάφους.

2.3.1.2 Σχήμα και υφή των κόκκων

Η διαπερατότητα επηρεάζεται από την υφή και το σχήμα των κόκκων. Οι επιμήκεις ή οι κόκκοι με ακανόνιστο σχήμα, δημιουργούν διαδρομές ροής που είναι περισσότερο ελικοειδείς από ότι στην περίπτωση των σφαιρικών κόκκων, επηρεάζοντας έτσι τον τύπο και την ταχύτητα ροής σε μικροσκοπικό επίπεδο. Κόκκοι με τραχείες επιφάνειες δημιουργούν μεγαλύτερη αντίσταση τριβής στη ροή (συγκριτικά με τους κόκκους που έχουν λεία και στιλπνή επιφάνεια) τη μείωση της διαπερατότητας.

2.3.1.3 Ορυκτολογική σύσταση

Η ορυκτολογική σύσταση των εδαφικών κόκκων παίζει ρόλο στην περίπτωση των αργιλικών εδαφών, τα οποία έχουν τη δυνατότητα απορρόφησης και συγκράτησης μεγάλων ποσοτήτων νερο, π.χ. μοντμοριλλονίτης.

2.3.1.4 Δείκτης πόρων

Ο δείκτης πόρων, e , και κατά συνέπεια το πορώδες, n , σχετίζεται με τις γεωλογικές συνθήκες ιζηματογένεσης των σχηματισμών και επηρεάζει σημαντικά τη διαπερατότητα των εδαφών. Περιλαμβάνεται στον τύπο του Kozeny (Σχέση 2.21) για την εκτίμηση της διαπερατότητας της άμμου. Για συγκεκριμένη άμμο η διαπερατότητα αυξάνεται με την αύξηση του δείκτη πόρων.

2.3.1.5 Βαθμός κορεσμού

Η μείωση του βαθμού κορεσμού λόγω της αύξησης της παρουσίας του αέρα στους εδαφικούς πόρους συνεπάγεται τη μείωση της διαπερατότητας. Κατά τον εργαστηριακό προσδιορισμό του συντελεστή διαπερατότητας χρησιμοποιούνται πλήρως κορεσμένα δοκίμια,

καθώς στην αντίθετη περίπτωση δεν ισχύει ο νόμος του Darcy. Η παρασκευή κορεσμένων αργιλικών δοκιμίων είναι εξαιρετικά δύσκολη.

2.3.1.6 Στρώσεις εδάφους

Τα εδάφη εκτός από κοκκώδη υλικά, είναι επίσης ανομοιογενή και ανισότροπα λόγω της φύσης τους. Στη φύση εμφανίζονται εναλλαγές εδαφικών στρώσεων με το βάθος που συνθέτουν την εδαφική τομή στην περιοχή μελέτης ενός έργου. Στις περιπτώσεις αυτές, για το βάθος επιρροής του έργου, συχνά ενδιαφέρει η διαπερατότητα στην παράλληλη και στην κάθετη διεύθυνση ως προς την στρωματοποιημένη δομή. Η διαπερατότητα στην παράλληλη διεύθυνση με την διαστρωμάτωση (k_h) είναι συνήθως μεγαλύτερη από τη διαπερατότητα (k_v) στην κάθετη διεύθυνση (k_v), με το λόγο k_h/k_v να παίρνει τιμές ακόμη και πάνω από 100. Άλλοι παράγοντες της εδαφικής ανομοιογένειας που επηρεάζουν τη διαπερατότητα είναι οι ασυνέχειες, η παρουσία οργανικής ύλης και οι λεπτές ενστρώσεις ή φακοί συνήθως άμμου ή ιλύος εντός των αργιλικών σχηματισμών. Στις περιπτώσεις αυτές, η χρήση μικρών εδαφικών δειγμάτων για τον εργαστηριακό προσδιορισμό της εδαφικής διαπερατότητας μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα.

2.3.1.7 Είδος του υγρού των πόρων

Η διαπερατότητα του εδάφους εξαρτάται από την πυκνότητα και το δυναμικό ιξώδες του ρευστού που το διαρρέει. Και οι δύο αυτές ιδιότητες μεταβάλλονται με τις αλλαγές της θερμοκρασίας, μεταβάλλοντας κατά συνέπεια και την τιμή του συντελεστή διαπερατότητας του εδάφους.

2.3.1.8 Τύπος της ροής

Ο νόμος Darcy που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας στα περισσότερα εδάφη θεωρεί πως η ροή που λαμβάνει χώρα εντός των εδαφικών πόρων είναι στρωτή. Ωστόσο, σε περιπτώσεις χονδρόκοκκων εδαφών με μεγάλους κόκκους όπως οι χάλικες, η ροή παύει να είναι στρωτή και γίνεται τυρβώδης με μεγάλη ταχύτητα και ως εκτούτου η χρήση του νόμου Darcy δεν είναι δυνατή. Στις περιπτώσεις αυτές, η εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας γίνεται με πειραματικές μεθόδους.

2.3.1.9 Θερμοκρασία

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πυκνότητα και το δυναμικό ιξώδες του νερού των πόρων μεταβάλλεται με τη θερμοκρασιακή μεταβολή του περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα για μια θερμοκρασιακή μείωση από 20°C σε 10°C το δυναμικό ιξώδες, η_w , αυξάνεται έως και 30%, μειώνοντας ταυτόχρονα την τιμή του συντελεστή διαπερατότητας. Η πυκνότητα του νερού αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας. Κατά την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού της διαπερατότητας στα εδάφη θεωρείται σταθερή θερμοκρασία 20°C. Βεβαίως στις επιτόπου δοκιμές η θερμοκρασία δεν είναι ελεγχόμενη, αλλά σίγουρα είναι μετρήσιμη και συνήθως διαφορετική των 20°C. Για το λόγο αυτό γίνεται η παρακάτω διόρθωση της εξίσωσης (2.16) που λαμβάνει υπόψη την επίδραση της θερμοκρασίας στην τιμή του συντελεστή διαπερατότητας.

Αν μια δοκιμή διαπερατότητας που διεξάγεται σε T (°C) δίνει έναν συντελεστή διαπερατότητας, k_T , η τιμή που ενδιαφέρει είναι στους 20 °C (k_{20}) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$k_{20} = k_T \times \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \quad (2.16)$$

Όπου, ο υπολογισμός του η_T/η_{20} γίνεται από το Σχήμα 2.11.

2.3.2 Τυπικές τιμές του συντελεστή διαπερατότητας

Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται κάποιες τυπικές τιμές του συντελεστή διαπερατότητας, όπως προτείνονται από τους Terzaghi και Peck (1967). Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή διαπερατότητας για διάφορους τύπους εδαφών με τις αντίστοιχες πειραματικές μεθόδους προσδιορισμού του συντελεστή διαπερατότητας δίνονται στο Σχήμα 2.12.

2.4. Εμπειρικές σχέσεις προσδιορισμού του συντελεστή διαπερατότητας

Πολύ συχνά στη γεωτεχνική πράξη για λόγους οικονομίας, ευκολίας αλλά και ελέγχου των εργαστηριακών μετρήσεων, χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας εμπειρικές συσχετίσεις που δίνονται στη βιβλιογραφία. Οι περισσότερες από τις σχέσεις αυτές

προέρχονται από πειραματικές μετρήσεις και συνδέουν το συντελεστή διαπερατότητας ενός εδάφους με τις φυσικές του ιδιότητες. Μερικές από αυτές τις συσχετίσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.4.1 Μέθοδος Hazen

Η μέθοδος συνδέει τη διαπερατότητα λεπτόκοκκων και ομοιόμορφων άμμων με τη διάμετρο D_{10} των εδαφικών κόκκων. Προέκυψε από πειραματικά αποτελέσματα και παρουσιάζεται από τους Terzaghi και Peck (1948) στον παρακάτω τύπο:

$$k \left(\frac{cm}{s} \right) = C_1 \times (D_{10})^2 \quad (2.17)$$

Όπου:

D_{10} : Η διάμετρος των κόκκων, που αντιστοιχεί σε διερχόμενο ποσοστό κόκκων 10% (mm)

C_1 : Εμπειρικός συντελεστής με τιμή 100 (cm^{-1}/s^{-1})

Σύμφωνα με τον Taylor (1948), η τιμή του C_1 κυμαίνεται από 40 έως 150. Οι Lambe και Whitman (1979) προσθέτουν τα συμπεράσματα από τις δοκιμές των Lane και Washburn (1946) σε ένα μεγάλο εύρος εδαφών (από χονδρούς χάλικες έως ιλείς), και προτείνουν μια μέση τιμή για τον C_1 ίση με 16.

Μία άλλη έκφραση του τύπου Hazen σε μονάδες SI:

$$k \left(\frac{m}{s} \right) = C_1 (D_{10})^2 \times 10^{-4} \quad (2.18)$$

Όπου το D_{10} μετράται σε mm.

Για C_1 ίσο με 100 η εξίσωση μετατρέπεται σε:

$$k = 0.01(D_{10})^2 \quad (2.19)$$

Για C_1 ίσο με 16 η εξίσωση μετατρέπεται σε:

$$k = 0.0016(D_{10})^2 \quad (2.20)$$

Οι παραπάνω δύο σχέσεις εκφράζονται σε m/s και έχουν μικρή διαφορά μεταξύ τους.

Η μέθοδος Hazen δεν εμπεριέχει μία σημαντική παράμετρο για τη διαπερατότητα στα τα αμμώδη εδάφη και συγκεκριμένα τον δείκτη πόρων, e .

2.4.2 Μέθοδος Kozeny-Carman

Ο εμπειρικός τύπος που προτάθηκε από τον Kozeny (1927) επιτρέπει τον προσδιορισμό του συντελεστή διαπερατότητας συναρτήσει του μεγέθους των κόκκων, του πορώδους (n), της ειδικής επιφάνειας των κόκκων (S), της στρογγυλότητας των κόκκων και του ιξώδους του νερού (η_w):

$$k = \frac{\rho_w g n^3}{C \eta_w S^2 (1 - n)^2} \quad (2.21)$$

Ο τύπος αυτός τροποποιήθηκε από τον Carman (1939), χρησιμοποιώντας το δείκτη πόρων στη θέση του πορώδους $n=e/(1+e)$. Προέκυψε η ακόλουθη σχέση, γνωστή και ως η εξίσωση Kozeny-Carman:

$$k = \frac{\rho_w g}{C \eta_w S^2} \times \frac{e^3}{1 + e} \quad (2.22)$$

Για τον υπολογισμό της ειδικής επιφάνειας, S , σε ένα σύνολο σφαιρικών κόκκων με διάμετρο που κυμαίνεται μεταξύ d_1 και d_2 , χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$S = \frac{6}{\sqrt[2]{(d_1 d_2)}} \quad (2.23)$$

Από το γινόμενο $d_1 d_2$ λαμβάνεται η μέση γεωμετρική διάμετρος των σωματιδίων. Η σχέση που συνδέει την ειδική επιφάνεια με την μέση γεωμετρική διάμετρο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.13.

Η σταθερά, C , είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από το σχήμα των κόκκων, ο οποίος για σφαιρικούς κόκκους ισούται με 5. Ωστόσο στη φύση, οι εδαφικοί κόκκοι είναι σπανίως

απολύτως σφαιρικοί. Για το λόγο αυτό, εισάγεται ο συντελεστής γωνιότητας των κόκκων, f , που λειτουργεί ως διορθωτικός συντελεστής:

$$k = \frac{\rho_w g}{5 f \eta_w S^2} \times \left(\frac{e^3}{1 + e} \right) \quad (2.24)$$

Όπου:

k : ο συντελεστής διαπερατότητας (m/s)

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81 m/s²)

ρ_w : η πυκνότητα του νερού (1,00 Mg/m³)

η_w : το δυναμικό ιξώδες του νερού, στους 20 °C (1 mPas)

e : ο δείκτης πόρων του εδάφους

S : η ειδική επιφάνεια των κόκκων (mm²/mm³=mm⁻¹)

Επιπλέον, οι τιμές που προτείνει ο Loudon (1952) για το συντελεστή f είναι οι εξής:

Στρογγυλεμένοι κόκκοι, $f = 1,1$

Ημιστρογγυλεμένοι κόκκοι, $f = 1,25$

Γωνιώδεις κόκκοι, $f = 1,4$

Απλοποιώντας την παραπάνω εξίσωση για νερό στους 20 °C, η σχέση παίρνει την μορφή:

$$k_{20} = \frac{2}{f S^2} \left(\frac{e^3}{1 + e} \right) \quad (2.25)$$

2.4.3 Μέθοδος Terzaghi

Ο Terzaghi (1925) πρότεινε την ακόλουθη σχέση για την εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας αμμωδών εδαφών:

$$k = C_0 \frac{\mu_{10}}{\mu_T} \left(\frac{n - 0.13}{\sqrt[3]{1 - n}} \right)^2 \times D_{10}^2 \quad (2.26)$$

Όπου,

n : το πορώδες

D_{10} : η διάμετρος κόκκων

C_0 : 8 για τους λείους στρογγυλεμένους κόκκους και 4.6 για τους κόκκους ακανόνιστων σχημάτων

μ_{10}, μ_T : το δυναμικό ιξώδες του νερού για θερμοκρασίες 10°C και $T^\circ\text{C}$ αντίστοιχα

Ο λόγος μ_{10}/μ_T , εμπειρικά και με αποτελέσματα βάση πειραμάτων ισούται με 1,3.

Η εξίσωση (2.26) δεν έχει εφαρμογή σε χονδρόκοκκες άμμους.

2.4.4 Μέθοδος Chapuis

Ο Chapuis (2004) πρότεινε την ακόλουθη σχέση για την εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας μη συνεκτικών εδαφών συναρτήσει του δείκτη πόρων, e , και της διαμέτρου D_{10} :

$$k = 2.4622 \left(\frac{e^3}{1+e} \times D_{10}^{-2} \right)^2 \quad (2.27)$$

Όπου,

k , ο συντελεστής διαπερατότητας σε cm/s

D_{10} , η διάμετρος των κόκκων που διέρχεται από το 10% της κοκκομετρικής καμπύλης σε mm.

Η ακρίβεια της σχέσης του Chapuis μειώνεται στην περίπτωση εδαφών με εύθρυπτους κόκκους οι οποίοι κατά τη διάρκεια της φόρτισης αποκτούν γωνιώδες σχήμα.

Πίνακας 2.1: Τυπικές τιμές πορώδους βάσει βιβλιογραφίας

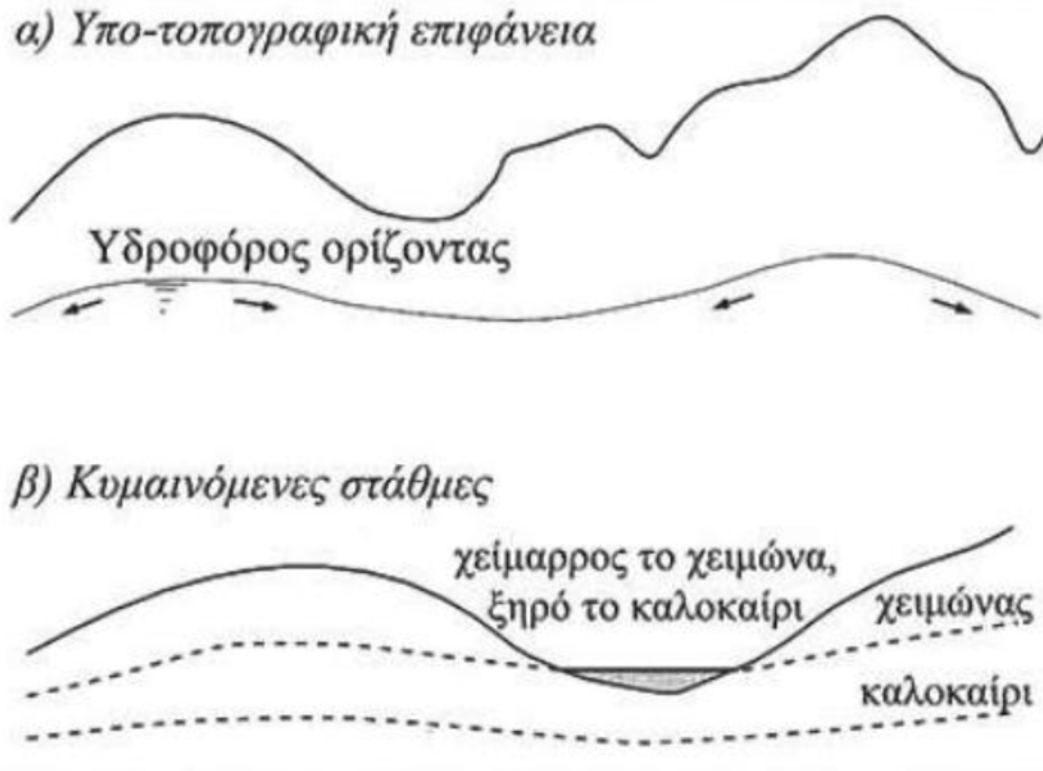
Προσχώσεις	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Ρωγματομέν α	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Γλυόλιθοι	21-41	Μη ρωγματομένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	0-40	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστοποιη μένοι ασβεστόλιθοι	0-40	Αποσαθρω μένοι γρανίτες	34-57
Πλύς	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				

Πίνακας 2.2: Περιγραφή εδάφους με βάση τη σχετική πυκνότητα (Καββαδάς, 2005)

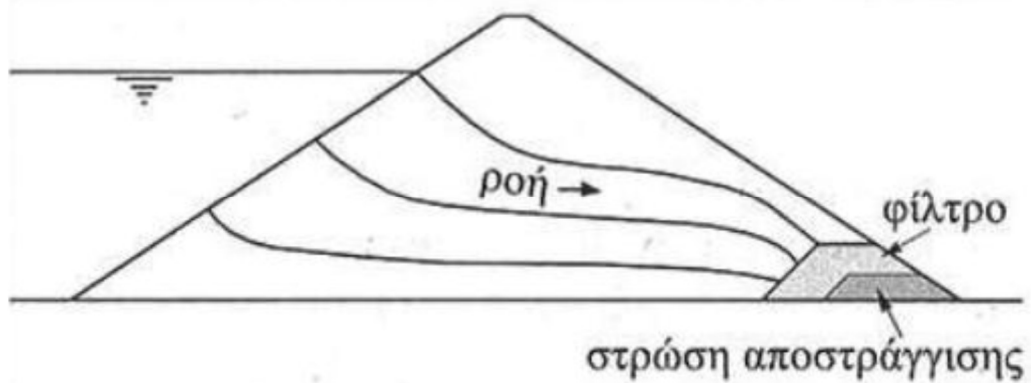
Σχετική πυκνότητα (%)	Περιγραφή μή-συνεκτικού εδάφους
0 - 15	Πολύ χαλαρό
15 - 35	Χαλαρό
35 - 65	Μέσης πυκνότητας
65 - 85	Πυκνό
85 - 100	Πολύ πυκνό

Πίνακας 2.3: Περιγραφή εδάφους με βάση το συντελεστή διαπερατότητας (Terzaghi & Peck, 1967)

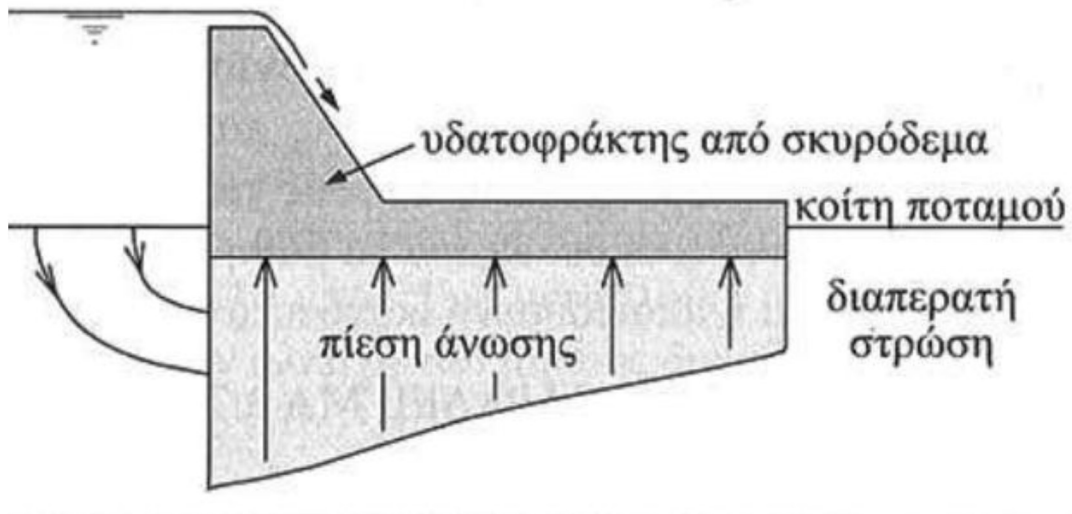
Βαθμός διαπερατότητας	Εύρος συντελεστή διαπερατότητας, k(m/s)
Υψηλή	$> 10^{-3}$
Μέση	$10^{-3} - 10^{-5}$
Χαμηλή	$10^{-5} - 10^{-7}$
Πολύ χαμηλή	$10^{-7} - 10^{-9}$
Πρακτικά αδιαπέρατο	$< 10^{-9}$



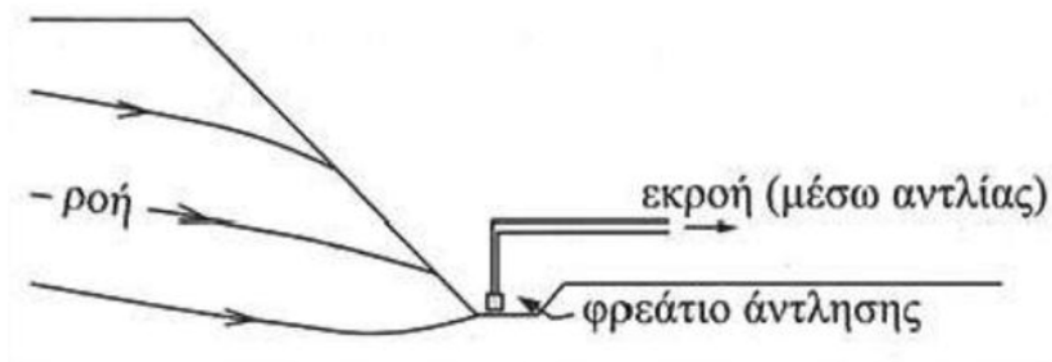
Σχήμα 2.1: Η κίνηση του υδροφόρου ορίζοντα, υπό τοπογραφικές επιφάνειες αλλά και κυμαινόμενες στάθμες (Barnes, 2005)



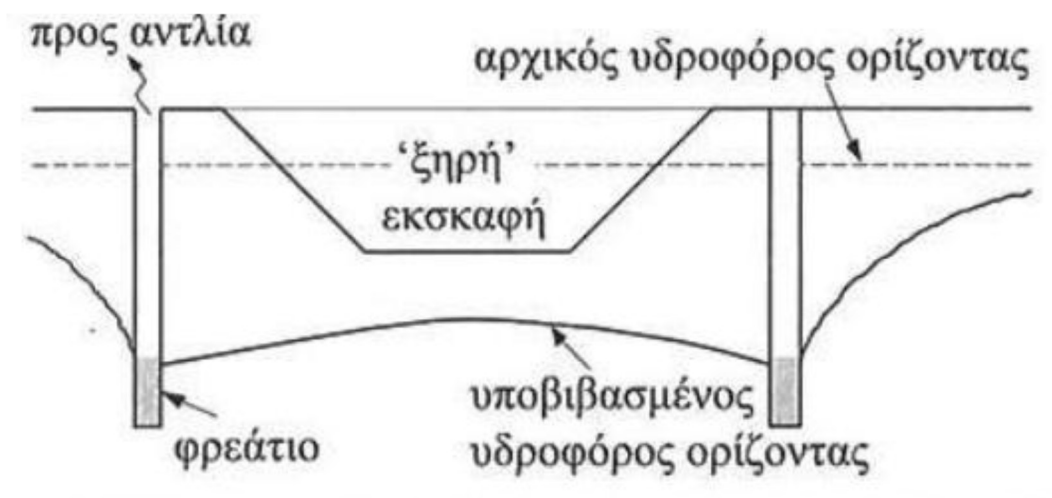
Σχήμα 2.2: Ροή νερού μέσω γεωκατασκευής (Barnes, 2005)



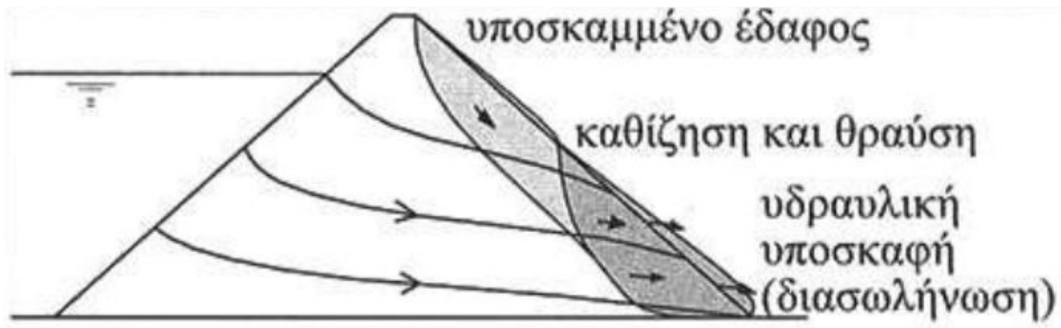
Σχήμα 2.3: Παρουσίαση Πιέσεων Άνωσης κάτω από κατασκευές (Barnes, 2005)



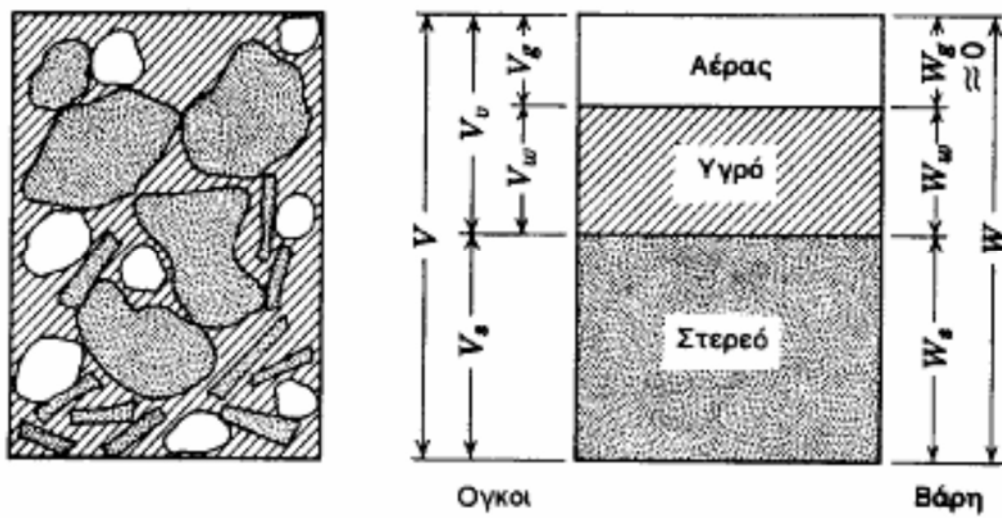
Σχήμα 2.4: Ροή στο εσωτερικό εκσκαφής (Barnes, 2005)



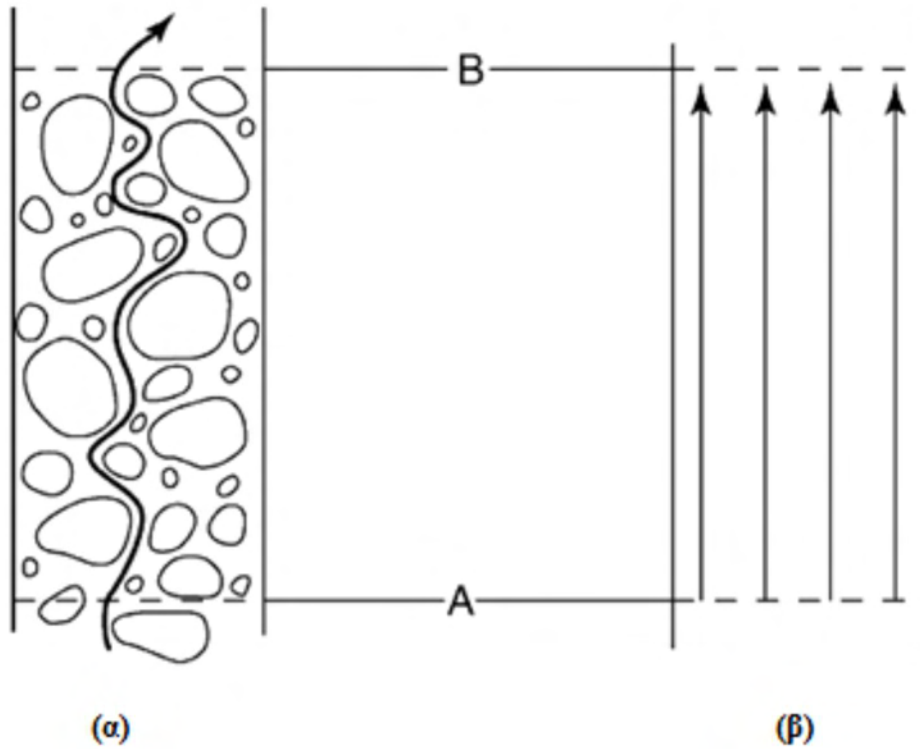
Σχήμα 2.5: Φρεάτια αποστράγγισης (Barnes, 2005)



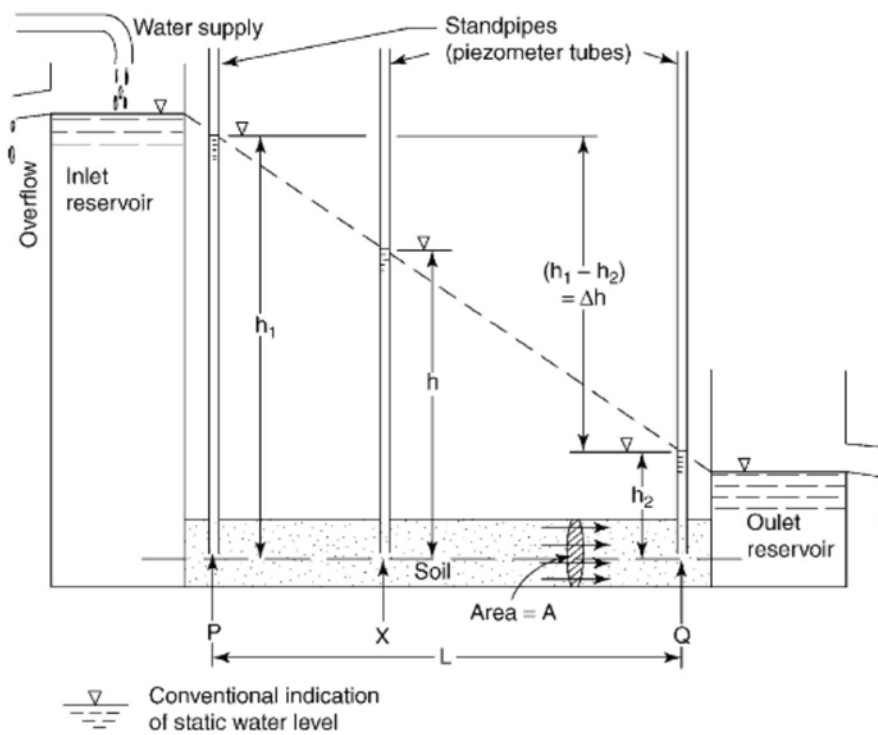
Σχήμα 2.6: Χωμάτινο φράγμα υπό υδραυλική υποσκαφή (Barnes, 2005)



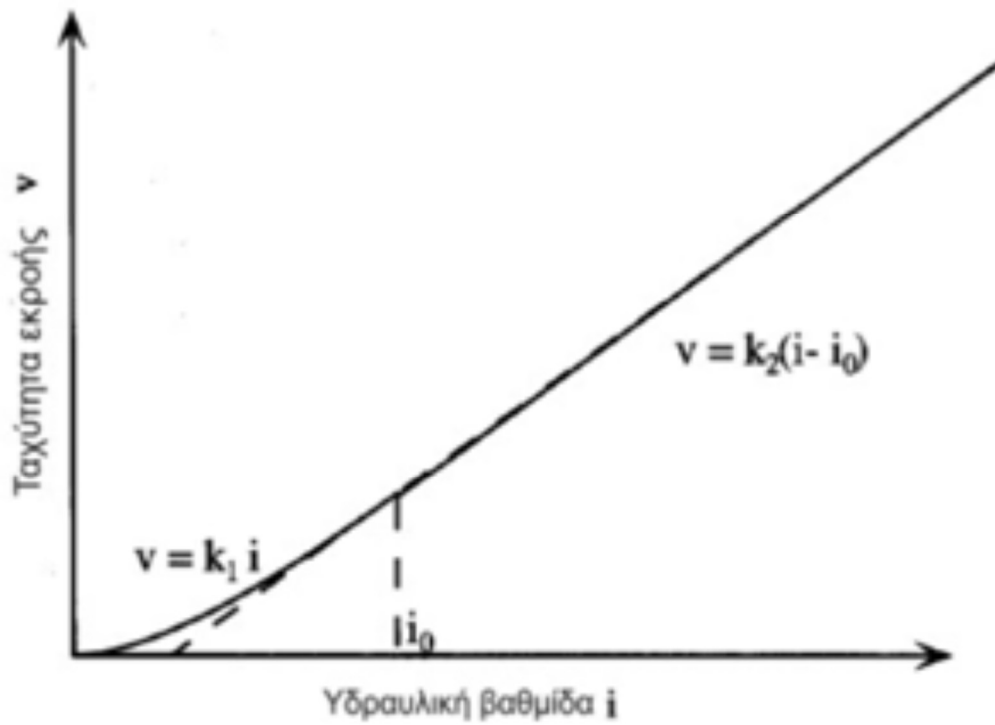
Σχήμα 2.7: Οι τρεις φάσεις που αποτελούν ένα εδαφικό υλικό (Καββαδάς, 2005)



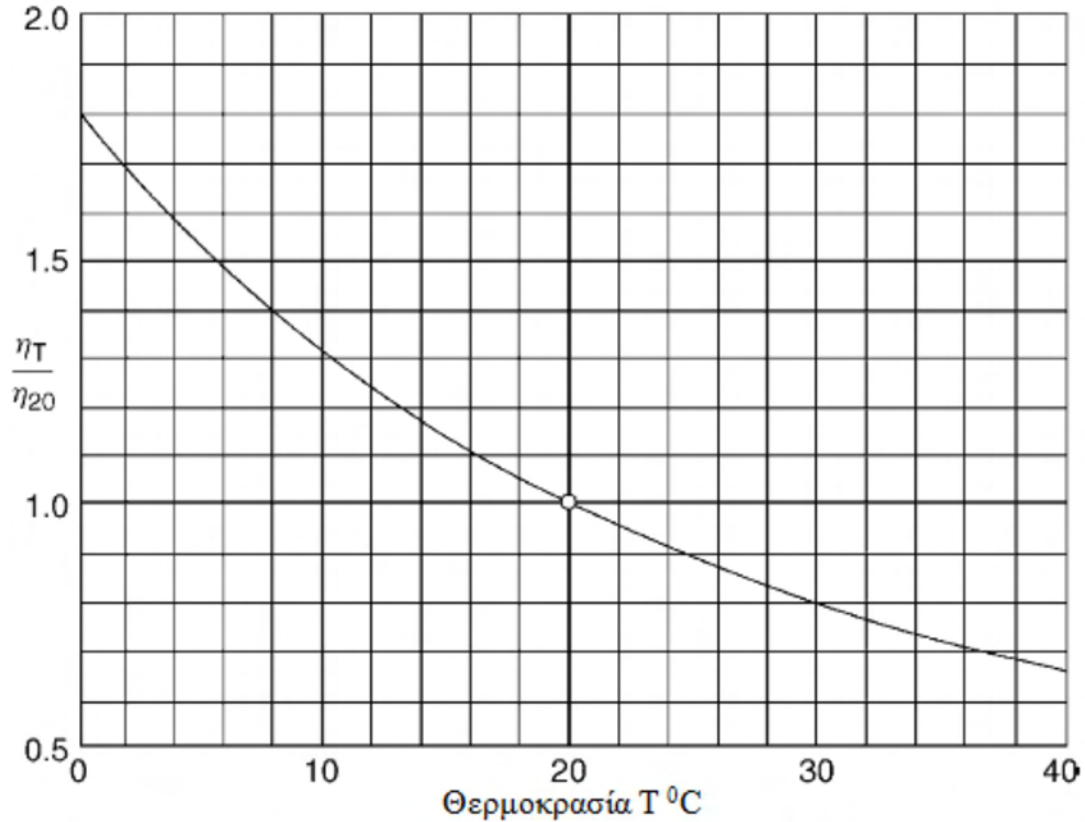
Σχήμα 2.8 Παρουσίαση της (α) πραγματικής και (β) φαινόμενης ροής (Head, 2006)



Σχήμα 2.9 Μονοδιάστατη ροή διαμέσου του εδάφους ανάμεσα σε δύο δεξαμενές (Head, 2006)



Σχήμα 2.10 Σχηματική απεικόνιση της απόκλισης της ταχύτητας ροής από τον νόμο του Darcy σε αργιλικά εδάφη (Hansbo, 1960)



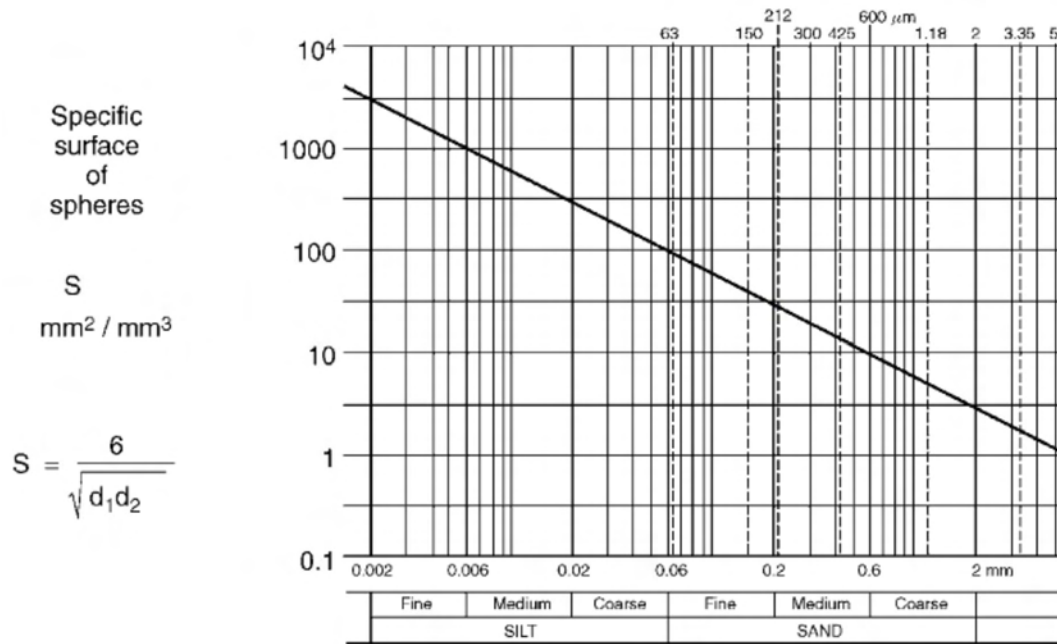
Σχήμα 2.11 Εμπειρική σχέση μεταξύ του δυναμικού ιξώδους και της θερμοκρασίας (Kaye & Laby, 1973)

Coefficient of permeability m/s

	k = 1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	
Drainage characteristics	GOOD					POOR			PRACTICALLY IMPERVIOUS					
Permeability classification	HIGH		MEDIUM		LOW		VERY LOW		PRACTICALLY IMPERMEABLE					
General soil type	GRAVELS		CLEAN SANDS		FISSURED & WEATHERED CLAYS			VERY FINE OR SILTY SANDS		INTACT CLAYS				
Test methods: direct	large CH cell		Standard CH cell		FH cell								FH in oedometer	
indirect	X		Computation from PSD				X				From consolidation data			

CH = Constant head
 FH = Falling head
 PSD = particle size distribution analysis

Σχήμα 2.12 Χαρακτηριστικά εδάφους με βάση το συντελεστή διαπερατότητας (Head, 2006)



Σχήμα 2.13 Τυπικές τιμές της ειδικής επιφανείας σφαιρικών κόκκων άμμου και ιλύος (Head, 2006)

Κεφάλαιο 3

Πειραματικές μέθοδοι προσδιορισμού της εδαφικής διαπερατότητας

3.1. Εισαγωγή

Η τιμή του συντελεστή διαπερατότητας, μπορεί να εκτιμηθεί με επιτόπου δοκιμές και εργαστηριακές δοκιμές, καθώς επίσης και με εμπειρικές συσχετίσεις, που προτείνονται στη βιβλιογραφία. Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι μέθοδοι αυτές, καθώς επίσης και ο τρόπος υπολογισμού του συντελεστή διαπερατότητας.

3.2. Εργαστηριακές δοκιμές

Ο προσδιορισμός της τιμής του συντελεστή διαπερατότητας, k , στο εργαστήριο πραγματοποιείται με την καταγραφή του ρυθμού ροής, με τον οποίο το νερό κινείται ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η συσκευή που χρησιμοποιείται ονομάζεται διαπερατόμετρο. Δύο είναι οι τύποι των εργαστηριακών δοκιμών προσδιορισμού του k (Σχήμα 3.1) :

- Δοκιμή σταθερού υδραυλικού φορτίου
- Δοκιμή μεταβλητού υδραυλικού φορτίου

Ιδανικά, για την πραγματοποίηση των δοκιμών διαπερατότητας και για τον υπολογισμό του συντελεστή διαπερατότητας, k , ενός εδάφους, το χρησιμοποιούμενο νερό θα πρέπει να είναι το νερό του εδάφους στις επιτόπου συνθήκες. Τούτο όμως είναι πρακτικά αδύνατο, καθώς η ποσότητα του απαιτούμενου νερού στα πλαίσια της δοκιμής είναι μεγάλη, κι επίσης η τυχόν παρουσία οργανικής ύλης, αλάτων, βακτηρίων και άλλων οργανισμών ή υλικών που βρίσκονται στο υπόγειο νερό του εδάφους στις επιτόπου συνθήκες μπορεί να προκαλέσει ζημιά στη συσκευή διαπερατομέτρου. Για το λόγο αυτό, η δοκιμή στο στάδιο της ροής του νερού διαμέσου του εδάφους για τη μέτρηση του συντελεστή διαπερατότητας συνήθως γίνεται με νερό του

δικτύου ύδρευσης, εφόσον δε περιέχει αέρα, ή με αποσταγμένο / απιονισμένο νερό στο οποίο έχει γίνει απαέρωση. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται απαέρωση του χρησιμοποιούμενου νερού στα πλαίσια της δοκιμής είναι ότι ο συντελεστής διαπερατότητας εξαρτάται σημαντικά από το βαθμό κορεσμού του εδάφους. Η χρήση του νερού του δικτύου ύδρευσης δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα της διαπερατότητας αμμωδών εδαφών, ενώ στην περίπτωση ιλύων και αργίλων η χρήση του δεν είναι ενδεδειγμένη καθώς οδηγεί σε εσφαλμένες μετρήσεις. Η απαέρωση του νερού μπορεί να γίνει είτε με βρασμό είτε με χρήση αντλίας κενού.

3.2.1 Δοκιμή σταθερού υδραυλικού φορτίου

Η δοκιμή σταθερού υδραυλικού φορτίου περιγράφεται στο βρετανικό πρότυπο BS 1377:1990 και βρίσκει εφαρμογή σε εδάφη με συντελεστή διαπερατότητας 10^{-2} - 10^{-5} m/s, δηλαδή χονδρόκοκκα εδάφη (άμμοι και αμμοχάλικα), με ποσοστό λεπτοκόκκων ($<2\mu\text{m}$) μικρότερο του 10%.

Στη δοκιμή διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου, η ροή του νερού πραγματοποιείται στο εσωτερικό ενός συμπαγούς κυλινδρικού εδαφικού δοκιμίου, λόγω της διαφοράς του υδραυλικού φορτίου μεταξύ των βάσεων του. Η κυψέλη στη συσκευή - διαπερατόμετρο σταθερού υδραυλικού φορτίου (Σχήμα 3.2) έχει μέγεθος ανάλογο με το μέγεθος των κόκκων του εξεταζόμενου εδάφους. Με βάση το BS 1377, η συνήθης διάμετρος της κυψέλης που περιέχει το εδαφικό δοκίμιο είναι 75 mm. Το μέγιστο μέγεθος της διαμέτρου των εδαφικών κόκκων πρέπει να είναι μικρότερο από το ένα δωδέκατο της διαμέτρου της κυψέλης του διαπερατομέτρου, ώστε το δοκίμιο να είναι αντιπροσωπευτικό του εδάφους που μελετάται. Επομένως, σε διαπερατόμετρο με κυψέλη διαμέτρου 75 mm, κόκκοι εδάφους με διάμετρο μεγαλύτερη των 6 mm πρέπει να αφαιρούνται.

Η κυψέλη της συσκευής συνδέεται, μέσω σωλήνων, με μία δεξαμενή εισόδου και μία δεξαμενή εξόδου, οι οποίες καθιστούν εφικτή τη διατήρηση σταθερού υδραυλικού φορτίου κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής, το νερό που διαρρέει το έδαφος είναι απαερωμένο. Πριν την έναρξη των μετρήσεων, το εξεταζόμενο έδαφος καθίσταται πλήρως κορεσμένο. Η επιβαλλόμενη ροή ρυθμίζεται μέσω της υδραυλικής βαθμίδας, ώστε να είναι στρωτή για αποφυγή της διατάραξης του εδαφικού δοκιμίου. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής,

μετράται κατά τακτά χρονικά διαστήματα η ποσότητα του νερού που διαρρέει την εδαφική στήλη. Η σχέση για τον υπολογισμό του k είναι η εξής:

$$k = \frac{Q \times L}{A \times \Delta h \times \Delta t} \quad (3.1)$$

Όπου:

Q: ο διερχόμενος όγκος του νερού σε χρονικό διάστημα Δt

L: το ύψος της εδαφικής στήλης (εδαφικό δοκίμιο)

A: η διατομή του εδαφικού δοκιμίου

Δh : η συνολική διαφορά του υδραυλικού φορτίου

Δt : το χρονικό διάστημα στο οποίο μετράται ο όγκος του νερού Q

Η δοκιμή πραγματοποιείται σε εδαφικά δοκίμια που διαμορφώνονται στο εργαστήριο και όχι σε φυσικά αδιατάρακτα δείγματα, καθώς:

- Το μέγεθος της κυψέλης του διαπερατομέτρου είναι μικρό και τα εδαφικά δοκίμια δεν μπορεί να είναι αντιπροσωπευτικά της εδαφικής δομής (με ασυνέχειες), που χαρακτηρίζει το σχηματισμό προέλευσης και τη στρωματογραφία της περιοχής μελέτης.
- Η δοκιμή περιορίζει τη μελέτη στη μονοδιάστατη ροή νερού (κατακόρυφη), ενώ στη φύση η ροή λαμβάνει χώρα σε όλες τις διευθύνσεις.
- Η διατάραξη που υφίσταται ένα φυσικό εδαφικό δείγμα κατά τη δειγματοληψία, τη μεταφορά του στο εργαστήριο, τη διαμόρφωση του δοκιμίου και την τοποθέτησή του στη συσκευή είναι μεγάλη και επηρεάζει την τιμή του συντελεστή διαπερατότητας.

3.2.2 Δοκιμή μεταβαλλόμενου υδραυλικού φορτίου

Η δοκιμή διαπερατότητας μεταβαλλόμενου υδραυλικού φορτίου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή διαπερατότητας λεπτόκοκκων εδαφών (ιλείς και άργιλοι) με μέση ή μικρή διαπερατότητα (μικρότερη του 10^{-4} m/s). Η εφαρμογή της μπορεί να γίνει σε αδιατάρακτα εδαφικά δοκίμια στο εσωτερικό ενός κυλίνδρου ή μιας κυψέλης οιδημέτρου.

Το εδαφικό δοκίμιο εντός της κυψέλης (Σχήμα 3.3) συνδέεται με ένα σωλήνα σταθερής πίεσης, μέσω του οποίου επιβάλλεται το υδραυλικό φορτίο (πιθανά και μέσω μιας δεξαμενής νερού). Η διάμετρος του σωλήνα είναι συνάρτηση των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους.

Το δοκίμιο του εδάφους καθίσταται κορεσμένο στην αρχή της δοκιμής και ο σωλήνας γεμίζει με απαερωμένο νερό έως ένα ορισμένο ύψος. Στη συνέχεια, το νερό εισρρέει στο εσωτερικό του εδαφικού δοκιμίου, μέχρι έως ότου η στάθμη του νερού στο σωλήνα κατέβει σε ένα συγκεκριμένο ύψος. Ο χρόνος που απαιτείται για την πτώση της στάθμης του νερού στο σωλήνα αποτελεί χρόνο, t . Έπειτα, ο σωλήνας ξαναγεμίζει με νερό στο ίδιο ύψος και η δοκιμή επαναλαμβάνεται αρκετές φορές για λόγους ακριβείας. Ο χρόνος, t , που απαιτεί για την πτώση της στάθμης του νερού στις διάφορες δοκιμές έχει επιτρεπτή διαφορά της τάξης του 10%, διαφορετικά η δοκιμή επαναλαμβάνεται. Ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός επαναληπτικών δοκιμών είναι 3 – 4.

Ο συντελεστής διαπερατότητας, k , του εδαφικού δοκιμίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k = 2.3 \times \frac{\alpha \times L \times \log_{10} \frac{h_0}{h_1}}{A \times t} \quad (3.2)$$

Όπου:

α : η διατομή του σωλήνα

L : το ύψος της στήλης του εδαφικού δοκιμίου

h_0 : η ανώτερη στάθμη του νερού στο σωλήνα

h_1 : η κατώτερη στάθμη νερού στο σωλήνα

A : η διατομή του εδαφικού δοκιμίου

t : ο χρόνος για την πτώση της στάθμης του νερού στο σωλήνα

Η δοκιμή μεταβαλλόμενου υδραυλικού φορτίου παρουσιάζει τους ίδιους περιορισμούς με τη δοκιμή σταθερού υδραυλικού φορτίου, που συνοδεύονται από τα εξής προβλήματα:

- Ο κορεσμός του δοκιμίου είναι δύσκολος.
- Τα αργιλικά εδάφη παρουσιάζουν τάση προς διόγκωση, όταν κατά τη διάρκεια της δοκιμής δεν επιβάλλονται οι τάσεις πεδίου και συνεπώς το ύψος, L , του εδαφικού δοκιμίου μεταβάλλεται.
- Υπάρχει πιθανότητα απώλειας λεπτόκοκκου υλικού κατά τη διάρκεια της ροής.

3.3 Επιτόπου δοκιμές

Οι επιτόπου δοκιμές είναι απαλλαγμένες από τα θέματα διατάραξης του εδάφους κατά τη δειγματοληψία, μεταφορά και συντήρηση των δειγμάτων στο εργαστήριο. Επίσης, οι μετρήσεις δεν προέρχονται από ένα μικρό δείγμα εδάφους και συνεπώς δεν τίθεται θέμα αντιπροσωπευτικότητας των τιμών διαπερατότητας.

Από το σύνολο των επιτόπου δοκιμών, οι δοκιμές εισπίεσης νερού (pumping-in tests), αποτελούν τις καταλληλότερες για την εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας, k , σε γεωτεχνικές γεωτρήσεις στην ακόρεστη ζώνη. Εφόσον, ως αντικείμενο μελέτης ορίζεται η ακόρεστη ζώνη (τμήμα υπεδάφους μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας και του υδροφόρου ορίζοντα), οι δοκιμές αυτές χρησιμοποιούνται ευρέως. Στα βασικά τους πλεονεκτήματα, προστίθενται η ταχύτητα εκτέλεσής τους, η δυνατότητα χρήσης τους κατ' επανάληψη και με μεγάλη συχνότητα στην περιοχή μελέτης, χωρίς την διατάραξη και την καταστροφή του εδαφικού υλικού που εξετάζεται. Οι πιο γνωστές δοκιμές εισπίεσης νερού είναι οι παρακάτω:

3.3.1 Δοκιμή Lefranc

Η δοκιμή Lefranc είναι μια δοκιμή σταθερού υδραυλικού φορτίου που εφαρμόζεται σε χονδρόκοκκα εδάφη. Σε μια εδαφική γεώτρηση στην περιοχή μελέτης συμπληρώνεται το νερό που εκρέει, ώστε η στάθμη του νερού στο εσωτερικό της γεώτρησης να παραμένει σταθερή. Άρα δημιουργείται ένα περιβάλλον, όπου η εισροή του νερού είναι ίδια με την εκροή του. Κατά τη δοκιμή αυτή σημειώνεται η διηθούμενη παροχή νερού, q , σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (ανά 1 λεπτό), για ένα χρονικό διάστημα μελέτης (δέκα με είκοσι λεπτά). Για τον προσδιορισμό του συντελεστή διαπερατότητας, k , χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$k = \frac{q}{c \times h} \quad (3.3)$$

Όπου:

q : διηθούμενη παροχή του νερού (cm^3/s)

c : συντελεστής χαρακτηρισμού του εδαφικού τμήματος ως προς την γεωμετρία του

h : ύψος από το οποίο παρέχεται νερό στην δοκιμή (cm)

Όσον αφορά τον υπολογισμό του συντελεστή, h , ορίζεται ένα επίπεδο αναφοράς στο χαμηλότερο σημείο του. Εάν η δοκιμή πραγματοποιείται σε ξηρό περιβάλλον, ως επίπεδο

αναφοράς θεωρείται το μέσο του εξεταζόμενου τμήματος. Σε περίπτωση που η δοκιμή πραγματοποιείται κάτω από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, ως άξονας αναφοράς λαμβάνεται η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

Για το συντελεστή γεωμετρίας, c , δίνονται οι τύποι:

- $c = 4\pi r$, για σφαιρικό σχήμα εξεταζόμενου δοκιμίου, ακτίνας r
- $c = 2,75d$ όταν εξεταζόμενο τμήμα θεωρείται η κυκλική βάση του πυθμένα της γεώτρησης, με d την εσωτερική διάμετρο της προσωρινής σωλήνωσης της γεώτρησης
- $c = 2d$ όταν η δοκιμή γίνεται στην επαφή υδροστεγανού – υδροπερατού σχηματισμού
- $c = (2\pi L) / \ln(2L/D)$ όταν το εξεταζόμενο τμήμα είναι διαμέτρου D και μήκους L με σχέση $L \geq 5D$
- $c = (2\pi L) / \sinh^{-1}(L/D)$ όταν το εξεταζόμενο τμήμα είναι διαμέτρου D και μήκους L με σχέση $5D > L > D/2$

Άρα, η εξίσωση για τον υπολογισμό του συντελεστή διαπερατότητας, k , για εξεταζόμενο εδαφικό τμήμα το οποίο χαρακτηρίζεται ως κυλινδρικό διαμέτρου D και μήκους L με σχέση $L \geq 5D$, μετασχηματίζεται σε:

$$k = \frac{q}{2 \times L \times H} \times \ln\left(\frac{2L}{D}\right) \quad (3.4)$$

Όπου,

k : ο συντελεστής διαπερατότητας (cm/sec)

q : η παροχή (cm³/sec)

L : μήκος εδαφικού τμήματος που εξετάζεται (cm)

H : υδραυλικό φορτίο που προστίθεται στην δοκιμή από τη διηθούμενη παροχή (cm)

D : διάμετρος εδαφικού τμήματος που εξετάζεται (cm)

Η διάταξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.

3.3.2 Δοκιμή Lugeon

Η δοκιμή Lugeon αποτελεί επιτόπου δοκιμή εκτίμησης του συντελεστή διαπερατότητας μιας βραχομάζας. Η δοκιμή πραγματοποιείται σε τμήμα γεώτρησης, το οποίο αποκόβεται από το περιβάλλον με συμπιεσμένο αέρα. Το νερό ρέει σε αυτό, με την χρήση σωλήνα με σχισμές, ο οποίος συνδέεται στην γεώτρηση με παρεμβύσματα. Τα παρεμβύσματα, έχουν την δυνατότητα να μεγαλώσουν και να διογκωθούν με τη χρήση συμπιεστή αερίου στην επιφάνεια και μπορούν

έτσι, να απομονώσουν και να σφραγίσουν το τμήμα της γεωτρήσης. Με την χρήση του σωλήνα καθίσταται ανέφικτη η εκροή του νερού από το εσωτερικό της γεώτρησης. Στο τμήμα που απομονώνεται και σφραγίζεται στο εσωτερικό της γεώτρησης τοποθετείται πιεζόμετρο για τον προσδιορισμό της πίεσεως.

Η διαδικασία της δοκιμής ξεκινά με τη χρήση του πιεζόμετρου. Με την χρήση αυτού, προσδιορίζεται μία μέγιστη πίεση για την εξεταζόμενη δοκιμή (P_{max}), έτσι ώστε να μην ξεπεραστεί η ελάχιστη τάση στο εξεταζόμενο σημείο και να αποφευχθεί οποιαδήποτε πιθανότητα υδραυλικής θραύσης. Το πείραμα περιλαμβάνει πέντε στάδια, με μεταβαλλόμενη τιμή πίεσης μεταξύ της μηδενικής και της μέγιστης τιμής, P_{max} . Σε κάθε ένα από αυτά τα επίπεδα, εφαρμόζεται σταθερή τιμή πίεσεως για χρονικό διάστημα 10 λεπτών, ενώ παράλληλα αντλείται νερό. Η πίεση στο εσωτερικό της γεώτρησης καθώς και η ταχύτητα, μετρούνται ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (ανά 1 λεπτό). Τα πέντε στάδια (τρία στάδια φόρτισης και δύο στάδια αποφόρτισης) είναι τα εξής:

Στο πρώτο στάδιο εφαρμόζεται πίεση που υπολογίζεται ως $P_{max}/2$. Στο δεύτερο στάδιο, η πίεση αυξάνεται στα $3 \cdot P_{max}/4$. Στο τρίτο στάδιο, η πίεση φτάνει την P_{max} . Και στα επόμενα δύο στάδια η πίεση μειώνεται σταδιακά. Στο τέταρτο, η πίεση έχει τιμή $3 \cdot P_{max}/4$. Και στο πέμπτο και τελικό στάδιο η πίεση φτάνει την τιμή $0.5 \cdot P_{max}$.

Με τη χρήση των μέσων τιμών της πίεσης του νερού και του συνολικού ρυθμού ροής που μετρείται σε κάθε στάδιο της δοκιμής υπολογίζεται μία μέση τιμή για τον συντελεστή διαπερατότητας, k , της βραχώμαζας. Ο υπολογισμός του k πραγματοποιείται σε μονάδες Lugeon, μέσω ενός εμπειρικού τύπου. Τα Lugeon εκφράζουν τον απαιτούμενο συντελεστή διαπερατότητας για την ροή νερού ενός λίτρου ανά λεπτό ανά μέτρο υπό σταθερή πίεση 1 MPa. Για τον προσδιορισμό του Lugeon, ο τύπος είναι ο εξής:

$$Lugeon = \frac{q}{L} \times \frac{P_0}{P} \quad (3.5)$$

Όπου:

q : η διηθούμενη παροχή νερού (l/min)

L : το συνολικό μήκος της γεώτρησης μελέτης (m)

P_0 : η πίεση αναφοράς στο μέγεθος (1 MPa)

P : η πίεση της εξεταζόμενης δοκιμής (MPa)

Εάν η βραχόμαζα του εξεταζόμενου τμήματος θεωρείται ομοιογενής και ισότροπη, ένα Lugeon έχει την τιμή 1.3×10^{-7} m/s. Η τιμή της διαπερατότητας της βραχόμαζας, αυξάνεται όταν στο εσωτερικό αυτής υπάρχουν κενά και ασυνέχειες. Με την υπάρξη κενών και ασυνεχειών, η ροή στο εσωτερικό της βραχόμαζας μπορεί να αλλάξει και να χαρακτηριστεί ως τυρβώδης, με χαρακτηριστικές επιπτώσεις στο εξεταζόμενο τμήμα. Άρα, το Lugeon σαν μονάδα, μπορεί να χαρακτηρίσει την συχνότητα εμφάνισης κενών, σχισμών και ασυνεχειών στο εσωτερικό των βράχων και να χαρακτηρίσει την υγεία της βραχόμαζας. Το τυπικό εύρος των τιμών Lugeon και η κατάσταση της βραχόμαζας παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1, ενώ μία τυπική διάταξη της δοκιμής παρουσιάζεται εμφανίζεται στο Σχήμα 3.5.

3.3.3 Δοκιμή Maag

Η δοκιμή Maag είναι μια επιτόπου δοκιμή μεταβλητού υδραυλικού φορτίου που εφαρμόζεται σε λεπτόκοκκα εδάφη, και η οποία πραγματοποιείται με την παροχή μίας ποσότητας νερού και της μέτρηση του απαιτούμενου χρόνου για τον υποβιβασμό της στάθμης του νερού σε πιο χαμηλή θέση. Σε περίπτωση που το επιπλέον υδραυλικό φορτίο, συγκριτικά με την στάθμη ύδατος του υδροφόρου ορίζοντα, έχει μια διαφορά ύψους μεγαλύτερη από 2 μέτρα, οι μετρήσεις χρόνου-στάθμης πραγματοποιούνται κάθε φορά που η στάθμη του πέφτει γύρω στα 10 εκατοστά. Σε περίπτωση που το επιπλέον υδραυλικό φορτίο έχει διαφορά ύψους μικρότερη από ένα μέτρο, οι μετρήσεις αυτές χρόνου-στάθμης γίνονται ανά 1.2 ή 5 εκατοστά. Ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης της δοκιμής συνεχίζεται μέχρι το επιπλέον υδραυλικό φορτίο να μειωθεί κατά 20% και ο συνολικός συντελεστής διαπερατότητας, k , των λεπτοκόκκων υπολογίζεται από τον τύπο:

$$k = \frac{A}{c \times t} \times \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (3.6)$$

Όπου:

A: το εμβαδό της διατομής του εξεταζόμενου τμήματος (cm^2)

c: συντελεστής εξαρτώμενος από τη γεωμετρία του εξεταζόμενου τμήματος (ίδιες τιμές με δοκιμή Lefranc)

t: η χρονική διάρκεια για τον υποβιβασμό της στάθμης του νερού στη δοκιμή (sec)

h₁: το αρχικό ύψος της στάθμης του νερού πάνω από το επίπεδο αναφοράς (cm)

h₂: το τελικό ύψος της στάθμης του νερού πάνω από το επίπεδο αναφοράς (cm)

Ένας μετασχηματισμός του τύπου (3.6) για ένα εξεταζόμενο τμήμα όπου το μήκος του είναι πενταπλάσιο ή και μεγαλύτερο της διαμέτρου του ($L \geq 5D$), είναι ο ακόλουθος:

$$k = \frac{A \times \ln\left(\frac{2L}{D}\right) \times \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)}{2 \times \pi \times L \times t} \quad (3.7)$$

Όπου,

k: συντελεστής διαπερατότητας (cm/sec)

D: εξωτερική διάμετρος του σωλήνα (cm)

L: μήκος του εξεταζόμενου τμήματος (cm)

t: χρονική διάρκεια του υποβιβασμού της στάθμης του νερού (sec)

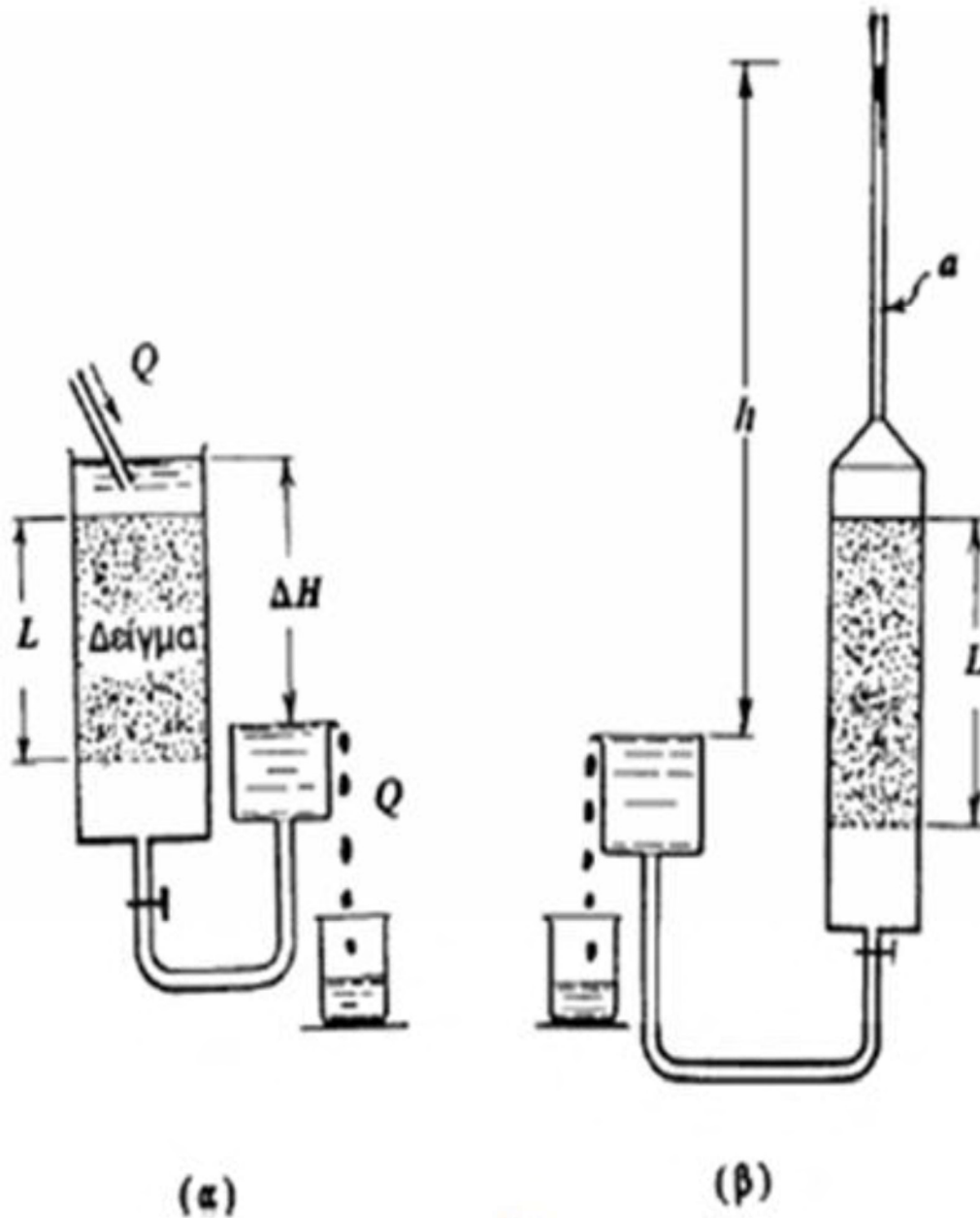
h₁: αρχικό ύψος της στάθμης του νερού πάνω από το επίπεδο αναφοράς (cm)

h₂: τελικό ύψος της στάθμης του νερού πάνω από το επίπεδο αναφοράς (cm)

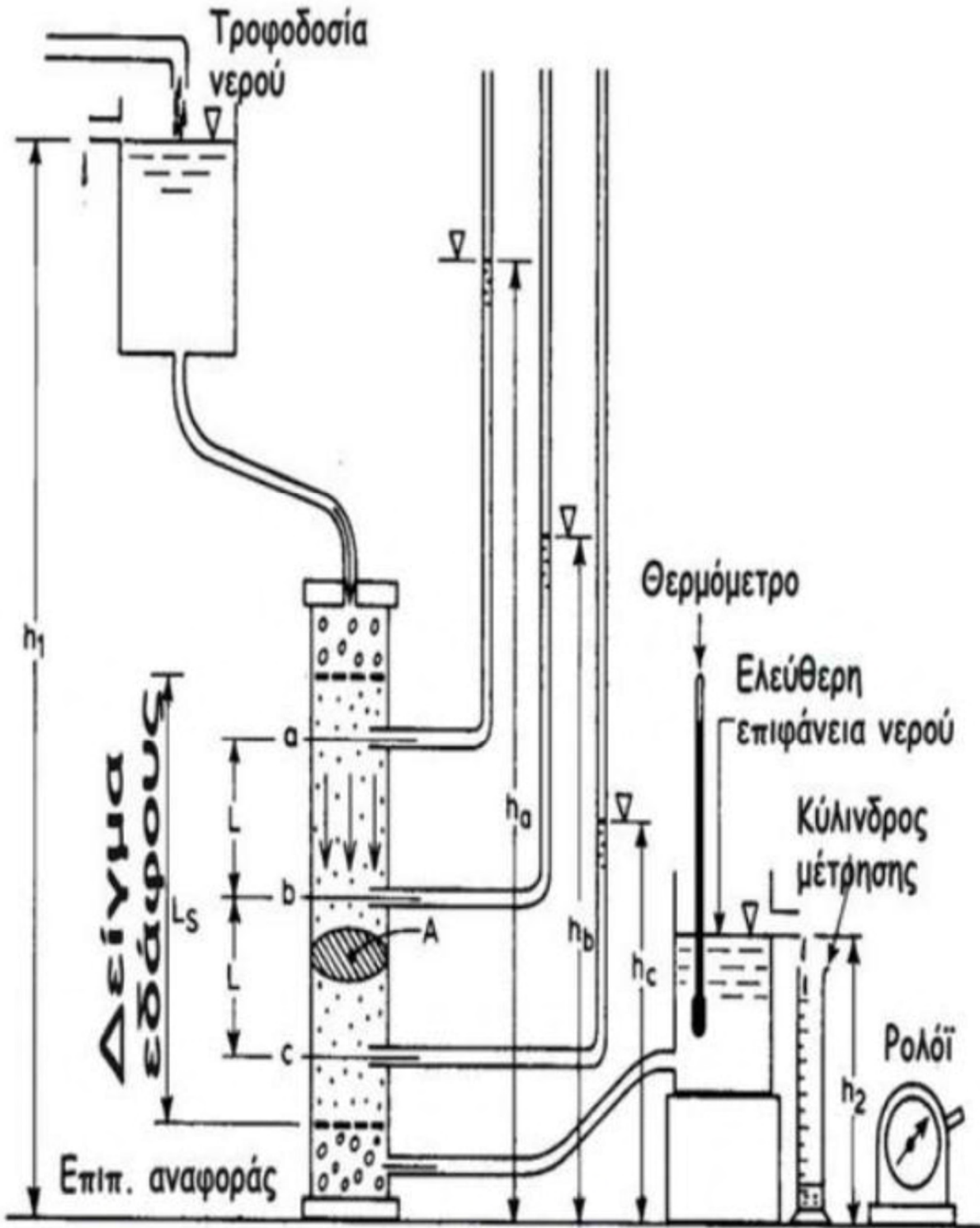
Η διάταξη της δοκιμής φαίνεται στο Σχήμα 3.6.

Πίνακας 3.1 Κατηγοριοποίηση της κατάστασης της βραχώμαζας με βάση την τιμή Lugeon

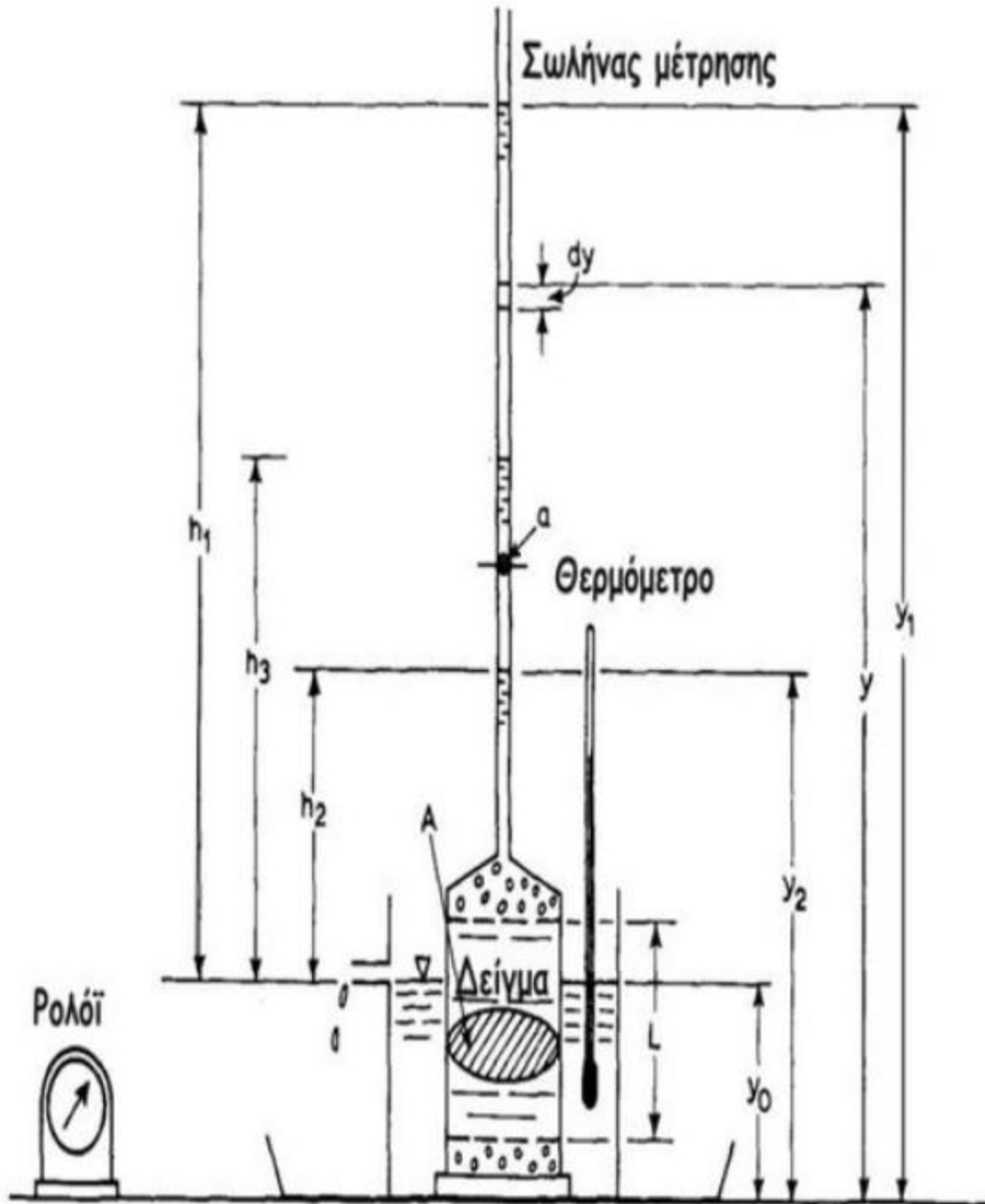
Lugeon Value	Conductivity classification	Rock discontinuity condition
<1	Very low	Very tight
1-5	Low	Tight
5-15	Moderate	Few partly open
15-50	Medium	Some open
50-100	High	Many open
>100	Very high	Open closely spaced or voids



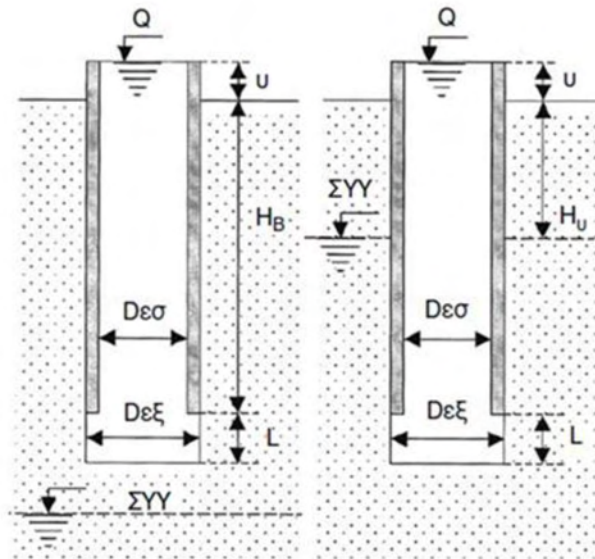
Σχήμα 3.1 Σχηματικό διάγραμμα του εργαστηριακού εξοπλισμού των δοκιμών: (α) Σταθερού Υδραυλικού Φορτίου (β) Μεταβαλλόμενου Υδραυλικού Φορτίου (Καβαδάς, 2005)



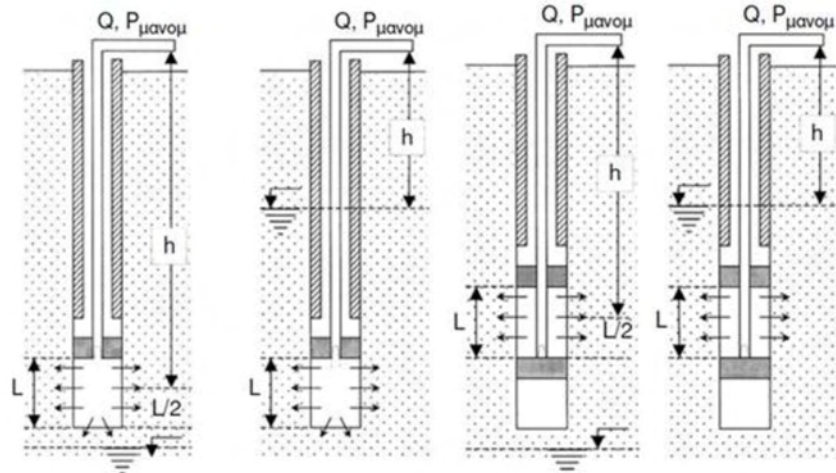
Σχήμα 3.2 Τυπική διάταξη μίας δοκιμής Σταθερού Υδραυλικού Φορτίου (Καββάδας, 2005)



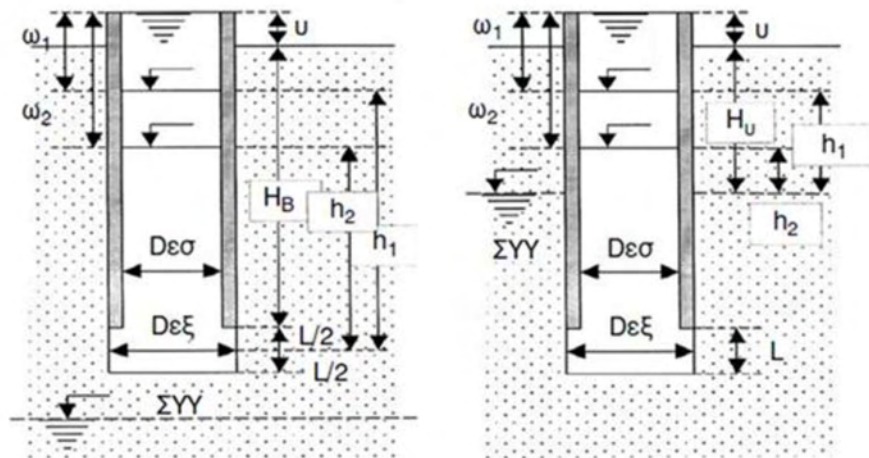
Σχήμα 3.3 Τυπική διάταξη μίας δοκιμής Μεταβαλλόμενου Υδραυλικού Φορτίου (Καββαδάς, 2005)



Σχήμα 3.4 Διάταξη μίας επί-τόπου δοκιμής Lefranc (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002)



Σχήμα 3.5 Διάταξη μία επί-τόπου δοκιμής Lugeon (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002)



Σχήμα 3.6 Διάταξη μίας επί-τόπου δοκιμής Maag (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2002)

Κεφάλαιο 4

Δοκιμή διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου

4.1 Περιγραφή συσκευής διαπερατότητας

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διάταξη της συσκευής διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου, η οποία χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Επίσης περιγράφεται η βαθμονόμηση του εξοπλισμού και η διαδικασία της δοκιμής. Τα κύρια μέρη που απαρτίζουν τη συσκευή διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου είναι τα εξής:

(α) Σύστημα παροχής νερού με σταθερή πίεση (Σχήμα 4.1). Αφορά σε μία δεξαμενή, η οποία βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος από τα υπόλοιπα μέρη του εξοπλισμού της συσκευής και η οποία περιέχει απαερωμένο νερό. Το νερό προέρχεται από το δίκτυο ύδρευσης και απαερώνεται με ειδική διάταξη που περιλαμβάνει κυψέλης απαέρωσης και αντλία κενού (Σχήμα 4.2), πριν καταλήξει στη δεξαμενή. Η δεξαμενή, αφού γεμίσει με απαερωμένο νερό, συνδέεται με το εσωτερικό του εδαφικού δοκιμίου μέσω σωληνώσεων και εξαιτίας της προκαλούμενης διαφοράς δυναμικού στο εδαφικό δοκίμιο, αποτελεί την πηγή προέλευσης του νερού που διαρρέει τους εδαφικούς πόρους. Η παροχή απαερωμένου νερού στην κυψέλη είναι συνεχής και η στάθμη του νερού στο εσωτερικό της κυψέλης διατηρείται σταθερή μέσω ενός υπερχειλιστή. Κατά συνέπεια, η επιβαλλόμενη διαφορά δυναμικού (υδραυλικού φορτίου) στα πλαίσια της δοκιμής είναι σταθερή.

(β) Κυψέλη Plexi-Glass (Σχήμα 4.3). Στην κυψέλη διαμορφώνεται το εδαφικό δοκίμιο. Στην άνω και την κάτω βάση της κυψέλης, δυο διάτρητες μεταλλικές πλάκες επιτρέπουν τη ροή του νερού χωρίς την παραμόρφωση του δοκιμίου. Ο συνήθης τύπος κυψέλης είναι διαμέτρου 75 mm (εσωτερικά) και μήκους 260 mm (μεταξύ των διάτρητων πλακών). Η μεγαλύτερη κυψέλη, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί έχει διάμετρο 114 mm και μήκος 460 mm. Η άνω βάση φέρει υποδοχή για τη σύνδεση της κυψέλης με το σωλήνα ροής, καθώς επίσης και ειδική βαλβίδα απαέρωσης. Κατά μήκος της κυψέλης υπάρχουν τρεις οπές, με ίση απόσταση μεταξύ τους, που συνδέονται μέσω σωληνώσεων με μανόμετρα. Η κάτω βάση της κυψέλης διαθέτει κατάλληλη

υποδοχή για σωλήνα ροής με βάνια ελέγχου. Οι σωλήνες που συνδέουν την κυψέλη με τα μανόμετρα και τη δεξαμενή φέρουν σφικτήρες που ρυθμίζουν την λειτουργία της.

(γ) Μανόμετρα (Σχήμα 4.4). Είναι κατακόρυφοι διαφανείς σωλήνες, προσαρμοσμένοι σε επιτοίχια βάση, με βαθμολογημένη κλίμακα. Τα μανόμετρα πρέπει να είναι πλήρως απαερωμένα πριν την διεξαγωγή της δοκιμής.

(δ) Φιάλη διοξειδίου του άνθρακα (Σχήμα 4.5). Συνδέεται στην κάτω βάση της κυψέλης του δοκιμίου στο οποίο παρέχει, με φορά ροής από κάτω προς τα πάνω, διοξείδιο του άνθρακα. Η εισροή του αερίου στο δοκίμιο, αντικαθιστά τον αέρα των πόρων του δοκιμίου με διοξείδιο του άνθρακα. Το τελευταίο αντικαθιστάται ευκολότερα από το νερό συγκριτικά με τον αέρα κατά τη διαδικασία του κορεσμού.

(ε) Ογκομετρικός κύλινδρος (Σχήμα 4.6). Ο σωλήνας εκροής, που βρίσκεται στην κάτω βάση της κυψέλης του δοκιμίου καταλήγει σε βαθμονομημένο γυάλινο ογκομετρικό κύλινδρο, όπου προσμετράται ο όγκος του νερού, σε τακτά χρονικά διαστήματα.

4.2 Βαθμονόμηση εξοπλισμού

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης των μανομέτρων. Η κυψέλη του δοκιμίου συνδέεται με τη δεξαμενή νερού και αφού γεμίσει πλήρως με απαερωμένο νερό κλείνουν οι βάνες εισροής και εκροής. Οι μεταλλικοί σφικτήρες πάνω στα μανόμετρα είναι επίσης ασφαλισμένοι. Η απασφάλιση των σφικτήρων και η ροή του νερού στα μανόμετρα ξεκινά μετά την απαέρωση των σωλήνων σύνδεσης. Με σειρά από πάνω προς κάτω συνδέεται το πρώτο μανόμετρο στην κυψέλη δοκιμίου και ανοίγει ο αντίστοιχος μεταλλικός σφικτήρας. Το νερό ανεβαίνει και σταθεροποιείται σε στάθμη του μανομέτρου. Σε έντυπο δοκιμής καταγράφεται η τιμή της αρχικής στάθμης του μανομέτρου. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με τη βοήθεια κατάλληλης κλίμακας (χάρακας), η οποία είναι τοποθετημένη κατά μήκος του μανομέτρου. Έπειτα, συγκεκριμένη ποσότητα απαερωμένου νερού εισάγεται στο μανόμετρο με την χρήση σύριγγας από το πάνω άνοιγμα του μανομέτρου. Μετράται η νέα τιμή της στάθμης του νερού στο μανόμετρο και επαναλαμβάνεται η διαδικασία, μέχρι να γεμίσει τελείως το μανόμετρο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τα άλλα δύο μανόμετρα του συστήματος.

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται, καθώς και μία σύντομη παρουσίαση της διαδικασίας εμφανίζεται στα Σχήματα 4.7-4.9.

4.3 Σχεδιασμός εδαφικών φίλτρων

Η γενική χρήση του εδαφικού φίλτρου, είναι ο έλεγχος της ροής του νερού στο έδαφος, η παρεμπόδιση της μεταφοράς των εδαφικών κόκκων και η αποφυγή της διάβρωσης του εδάφους. Στη δοκιμή σταθερού υδραυλικού φορτίου τα εδαφικά φίλτρα αποτελούνται από χονδρόκοκκα εδάφη μεγάλης διαπερατότητας (άμμοι και χάλικες τοποθετούνται στις βάσεις του δοκιμίου και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ροής του νερού στο εσωτερικό του). Ο σχεδιασμός ενός εδαφικού φίλτρου απαιτεί η κοκκομετρική καμπύλη του φίλτρου να βρίσκεται σε παραλληλία με την κοκκομετρική καμπύλη του εδάφους που προστατεύει και να πληρεί μια σειρά από κριτήρια που δίνονται στη συνέχεια.

Τα πρώτα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των εδαφικών φίλτρων ανήκουν στους Terzaghi & Peck:

$$D_{15,F} > 4 (D_{15,B}) \quad (4.1)$$

$$D_{15,F} \leq 4 (D_{85,B}) \quad (4.2)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις το F, αναφέρεται στο εδαφικό φίλτρο και το B στο υλικό βάσης, δηλαδή το έδαφος για το οποίο προσδιορίζεται το φίλτρο.

Όπου:

$D_{15, F}$: διάμετρος κόκκων του φίλτρου που αντιστοιχεί σε διερχόμενο ποσοστό 15%

$D_{15, B}$: διάμετρος κόκκων του υλικού βάσης που αντιστοιχεί σε διερχόμενο ποσοστό 15%

$D_{85, B}$: διάμετρος κόκκων του υλικού βάσης που αντιστοιχεί σε διερχόμενο ποσοστό 85%

Τρία πρόσθετα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των εδαφικών φίλτρων από τους Lambe & Whitman είναι τα ακόλουθα:

$$4 < \frac{D_{15,F}}{D_{15,B}} < 20 \quad (4.3)$$

$$D_{15,F} < 5 (D_{85,B}) \quad (4.4)$$

$$\frac{D_{50,F}}{D_{50,B}} < 25 \quad (4.4)$$

Το σύνολο των κριτηρίων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10. Βάσει των κριτηρίων αυτών, αρχικά ορίζεται το εύρος των κοκκομετρικών καμπυλών του φίλτρου. Στη συνέχεια, βάσει της παραλληλίας με την κοκκομετρική καμπύλη του προστατευόμενου εδάφους σχεδιάζεται η μέση κοκκομετρική καμπύλη στο εύρος των καμπυλών που προσδιορίστηκαν από τα κριτήρια.

Για την παρασκευή του εδαφικού φίλτρου επιλέγεται ένα χονδρόκοκκο εδαφικό υλικό (άμμος ή χάλικες), το οποίο διαχωρίζεται σε μεγέθη κόκκων με τη χρήση κοσκίνων (Σχήμα 4.11). Τα κόσκινα τοποθετούνται σε μία στήλη με το χονδρόκοκκο υλικό στην κορυφή της στήλης και ανακινούνται με κατάλληλο τρόπο. Οι εδαφικοί κόκκοι που συγκρατούνται στα κόσκινα συλλέγονται και τοποθετούνται με βάση την χαρακτηριστική τους διάμετρο σε υποδοχείς (Σχήμα 4.12). Υπολογίζεται το απαιτούμενο ποσοστό των εδαφικών κόκκων σε κάθε διάμετρο για την παρασκευή ορισμένης ποσότητας εδαφικού φίλτρου βάσει της μέσης κοκκομετρικής καμπύλης (Σχήμα 4.13).

4.4 Βοηθητικός εξοπλισμός δοκιμής διαπερατότητας

Πέραν της συσκευής σταθερού υδραυλικού φορτίου, για τη δοκιμή διαπερατότητας χρησιμοποιείται ο ακόλουθος βοηθητικός εξοπλισμός:

- Έντυπο δοκιμής
- Βερνιέρος
- Βαθύμετρο
- Σέσουλα
- Γυάλινοι ογκομετρικοί κύλινδροι
- Υποδοχείς
- Ζυγός Ακριβείας 1%
- Στέλεχος συμπύκνωσης
- Κλίβανος με ελεγχόμενη θερμοκρασία 105-110 °C

4.5 Διαδικασία δοκιμής διαπερατότητας

Η διαδικασία της δοκιμής αφορά στην περιγραφή των μετρήσεων στην κυψέλη του δοκιμίου, στην προετοιμασία του εδαφικού δοκιμίου, στην αντικατάσταση του αέρα των πόρων με CO₂ και στον κορεσμό του εδαφικού δοκιμίου, και τέλος στη μέτρηση του όγκου του νερού που διέρχεται από το εδαφικό δοκίμιο.

Αναφέρεται ότι η συσκευή του διαπερατομέτρου σταθερού υδραυλικού φορτίου που χρησιμοποιήθηκε, συναρμολογήθηκε και λειτούργησε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

4.5.1 Προετοιμασία συσκευής - κυψέλης δοκιμίου

Μετράται η εσωτερική διάμετρος της κυψέλης του δοκιμίου με τη χρήση του βερνιέρου για τον υπολογισμό της εγκάρσιας διατομής της κυψέλης (Σχήμα 4.14). Με τη χρήση βερνιέρου μετρώνται επίσης οι αποστάσεις μεταξύ των διαδοχικών οπών που συνδέονται με τα μανόμετρα, με σκοπό τον υπολογισμό της απόστασης, Δs, που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της υδραυλικής κλίσης (Σχήμα 4.15). Επιπλέον διερευνάται, πειραματικά η σημασία της ταυτόχρονης χρήσης χάρτινου και εδαφικού φίλτρου. Αυτή η διερεύνηση πραγματοποιείται μέσω τριών μετρήσεων του χρονικού διαστήματος που απαιτείται για το άδειασμα της κυψέλης. Στην πρώτη μέτρηση, με την κυψέλη δοκιμίου χωρίς φίλτρα και κλειστή τη βάνα εξόδου στην κάτω βάση της, γεμίζεται η κύψελη με νερό έως το ύψος της πρώτης οπής μανομέτρου. Η μέτρηση του χρόνου πραγματοποιείται από το άνοιγμα της βάνας και μέχρι να αδειάσει η κυψέλη. Στη δεύτερη μέτρηση, οι αρχικές συνθήκες είναι οι ίδιες, με την διαφορά ότι τοποθετείται στην κυψέλη ένα χάρτινο φίλτρο (Whatman No50) πριν το γέμισμα αυτής με νερό. Τέλος, στην τρίτη μέτρηση τοποθετείται χάρτινο και εδαφικό φίλτρο. Από τα αποτελέσματα αυτά κρίνεται, εάν η χρήση και των δύο φίλτρων (Σχήμα 4.16) αυξάνουν το χρόνο αδειάσματος της κυψέλης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν δεν αύξησαν τον χρόνο αδειάσματος της κυψέλης.

4.5.2 Προετοιμασία εδαφικού δοκιμίου

Από το εδαφικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για την προετοιμασία των δοκιμών, λαμβάνεται δείγμα το οποίο τοποθετείται στον κλίβανο με ελεγχόμενη θερμοκρασία (105°C) για

τον προσδιορισμό της υγρασίας του. Τοποθετείται χάρτινο φίλτρο στη βάση της κυψέλης (Σχήμα 4.17) και μετράται με τη χρήση του βαθυμέτρου η απόσταση της κορυφής της κυψέλης από το χάρτινο φίλτρο. Υπολογίζεται η απόσταση από το μέσο όρο τεσσάρων μετρήσεων. Μία τυπική κυψέλη του διαπερατομέτρου με το εδαφικό δοκίμιο απεικονίζεται στο Σχήμα 4.18. Στη συγκεκριμένη μελέτη, το εδαφικό υλικό αποτελεί μείγμα ιλύος και άμμου σε ξηρή κατάσταση. Το δείγμα παρασκευάζεται από τη μίξη της άμμου με την ιλύ σε συγκεκριμένη αναλογία, μέσα σε υποδοχείς (Σχήμα 4.19). Με τη χρήση σέσουλας, τοποθετείται εδαφικό φίλτρο τελικού ύψους περίπου 4 cm, το οποίο και συμπυκνώνεται με τη χρήση κατάλληλου μέσου συμπύκνωσης (σφύρα). Το εδαφικό φίλτρο καλύπτεται με χάρτινο φίλτρο (Whatman No50) και μετράται η απόσταση μέχρι την άνω βάση της κυψέλης με το βαθύμετρο (μέσος όρος τεσσάρων μετρήσεων). Στη συνέχεια, προσεκτικά, τοποθετείται με κουτάλι το ξηρό εδαφικό δείγμα ιλυώδους άμμου σε διαδοχικές στρώσεις. Κάθε υποδοχέας περιέχει το εδαφικό υλικό μίας στρώσης. Ο αριθμός των στρώσεων καθώς και το πάχος αυτών, καθορίζεται από την κοκκομετρία του. Σε κάθε στρώση, το εδαφικό υλικό συμπυκνώνεται (Σχήματα 4.20 & 4.21). Με τη συμπύκνωση της τελικής στρώσης του εδαφικού δοκιμίου, καταγράφεται η απόσταση μέχρι την άνω βάση της κυψέλης και υπολογίζεται το συνολικό ύψος του δοκιμίου. Στην κορυφή του εδαφικού δοκιμίου τοποθετείται χάρτινο φίλτρο, στο οποίο επικάθεται το εδαφικό φίλτρο. Στη συνέχεια η κυψέλη κλείνει με όλες τις βάνες και τους σφικτήρες κλειστούς. Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζεται η κυψέλη με το διαμορφωμένο εδαφικό δοκίμιο και τα φίλτρα.

4.5.3 Αντικατάσταση του αέρα των πόρων με CO₂ και κορεσμός του εδαφικού δοκιμίου

Συνδέεται η φιάλη του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) με την κυψέλη (κάτω βάση). Η φορά που ακολουθεί η ροή του διοξειδίου του άνθρακα στο εδαφικό δοκίμιο είναι από κάτω προς τα πάνω. Κατά την διάρκεια της εισόδου του διοξειδίου του άνθρακα στους εδαφικούς πόρους, πρέπει οι σφικτήρες των τριών οπών που, συνδεόνται με τα μανόμετρα, να είναι κλειστοί, ενώ η οπή στο άνω μέρος της κυψέλης να είναι ανοιχτή. Η παροχή CO₂ στο δοκίμιο είναι μικρή, συνεχής και σταθερή ώστε να μη διαταράζει το δοκίμιο. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την πάροδο είκοσι λεπτών και έχει ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση του εγκλωβισμένου στους εδαφικούς πόρους αέρα (Σχήμα 4.23). Ο έλεγχος της ροής γίνεται με την τοποθέτηση του σωλήνα της άνω βάσης στην κυψέλη του δοκιμίου εντός δοχείου με νερό. Με την ολοκλήρωση

της διαδικασίας, η βάνα στη βάση της κυψέλης κλείνει, ώστε να παραμείνει το δοκίμιο απαερωμένο και η φιάλη διοξειδίου του άνθρακα βγαίνει από το σύστημα.

Για τη διαδικασία του κορεσμού γίνεται η σύνδεση της κυψέλης δοκιμίου (κάτω βάση) με τη δεξαμενή νερού. Η βάνα ανοίγει και ξεκινά η ροή του νερού στην διάταξη με φορά από κάτω προς τα πάνω. Αυτό οδηγεί στην πλήρωση των εδαφικών πόρων με νερό και την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα (Σχήμα 4.24). Κατά τη διαδικασία του κορεσμού γίνεται έλεγχος της ροής. Μετά την ολοκλήρωση του κορεσμού, γίνεται απομάκρυνση του CO₂ από την κυψέλη μέσω της βαλβίδας της άνω βάσης (Σχήμα 4.25). Η διαδικασία έχει μικρή διάρκεια και όταν ολοκληρωθεί, διακόπτεται η παροχή νερού, κλείνει η βάνα στο κάτω μέρος της κυψέλης και το δοκίμιο, παραμένει κορεσμένο.

Οι τρεις οπές της κυψέλης συνδέονται με ισάριθμα μανόμετρα. Μετά την ολοκλήρωση του κορεσμού του δοκιμίου, ανοίγουν οι σφικτήρες που διέκοπταν την ροή του νερού προς τα μανόμετρα. Αρχικά ανοίγει ο σφικτήρας της κάτω οπής και στο τέλος της άνω οπής ώστε να γεμίσουν οι σωλήνες και τα μανόμετρα με νερό και να διαφύγει ο εγκλωβισμένος αέρας από το εσωτερικό τους.

4.5.4 Μέτρηση της παροχής του νερού

Για τον προσδιορισμό του όγκου του νερού που διέρχεται από το εσωτερικό του εδαφικού δοκιμίου γίνεται αλλαγή της φοράς της ροής. Συγκεκριμένα, η φορά αλλάζει σε ροή από πάνω προς τα κάτω. Για το σκοπό αυτό το προηγούμενο σύστημα ο σωλήνας της δεξαμενής αποσυνδέεται από την κάτω βάση της κυψέλης και στη θέση του τοποθετείται ένας σωλήνας που το ελεύθερο άκρο του καταλήγει σε έναν ογκομετρικό κύλινδρο.

Η παροχή νερού στην κυψέλη δοκιμίου γίνεται από την δεξαμενή του απαερωμένου νερού στην άνω βάση της κυψέλης. Σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (ανά 1 λεπτό) και με τη χρήση χρονομετρητή καταγράφεται: (α) ο όγκος του νερού που εξέρχεται από το δοκίμιο και καταλήγει στο εσωτερικό του κυλίνδρου, (β) η θερμοκρασία του νερού (Σχήμα 4.26), και (γ) οι ενδείξεις της στάθμης νερού στα τρία μανόμετρα. Επίσης μετράται η διαφορά στη στάθμη ΔΗ, μεταξύ της στάθμης του νερού στη δεξαμενή και την κυψέλη του διαπερατόμετρου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για αρκετές διαφορετικές τιμές του ΔΗ (μεταβάλλοντας τη θέση – ύψος της κυψέλης του δοκιμίου), καθώς οι διαφορετικές τιμές του ΔΗ αλλάζουν την ένδειξη των μανομέτρων. Μια εναλλακτική με καλύτερα αποτελέσματα είναι η ρύθμιση της

βάνας του σωλήνα της δεξαμενής στην άνω βάση της κυψέλης του δοκιμίου, που καθορίζει την παροχή του νερού στο δοκίμιο. Μεταβάλλοντας τη θέση της βάνας (λιγότερο ή περισσότερο ανοιχτή), μεταβάλλεται η παροχή και συνεπώς η υδραυλική κλίση.

Στο Σχήμα 4.27, παρουσιάζεται η πλήρης διάταξη μίας δοκιμής διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου.

4.6 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k

Ο προσδιορισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k, γίνεται με τη χρήση του νόμου Darcy:

$$k = \frac{Q \times \Delta L}{A \times t \times \Delta h} \quad (4.5)$$

Όπου:

k: ο συντελεστής διαπερατότητας (m/s)

Q: ο μετρούμενος διηθούμενος όγκος του νερού (m³/s) σε χρόνο t

ΔL: η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών οπών στην κυψέλη

A: η διατομή της κυψέλης (κάθετη στη ροή του νερού)

Δh: η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο διαδοχικών οπών (ενδείξεις μανομέτρων)

t: ο διερχόμενος χρόνος κατά την διαδικασία της μέτρησης

Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών οπών στην κυψέλη δίνει την υδραυλική κλίση ή βαθμίδα:

$$i = \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (4.6)$$

Όπου:

ΔH: η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο διαδοχικών οπών

ΔL: η απόσταση μεταξύ των δύο διαδοχικών οπών

Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σε λογιστικό φύλλο excel. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η υδραυλική κλίση για τους συνδυασμούς των αποστάσεων των τριών μανομέτρων σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο και λαμβάνεται ο μέσος όρος. Έπειτα με βάση τους καταγεγραμμένους όγκους, ΔV του εξερχόμενου νερού, για τις χρονικές στιγμές Δt που

εξετάζονται στην δοκιμή, υπολογίζεται η παροχή $q = \Delta V / \Delta t$. Με την εξίσωση 4.5 υπολογίζεται ο συντελεστής διαπερατότητας, k , και λαμβάνεται ο μέσος όρος αυτών. Τέλος σχεδιάζονται τα διαγράμματα $q-t$ για την κάθε δοκιμή.

4.7 Έντυπο δοκιμής

Για τις απαιτήσεις της δοκιμής σταθερού υδραυλικού φορτίου δημιουργήθηκε και συμπληρώθηκε το έντυπο που ακολουθεί. Περιλαμβάνει αναλυτικά, όλες τις παραμέτρους που θα επηρεάσουν τη δοκιμή.



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Τίτλος: Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής	Δοκιμή Προσδιορισμού του συντελεστή διαπερατότητας (Μέθοδος Σταθερού Υδραυλικού Φορτίου)
Ημερομηνία	
Περιγραφή εδάφους	
Κανονισμοί	ASTMD 2434 <input type="checkbox"/> BS <input type="checkbox"/>

ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕ ΚΥΨΕΛΗ

Εσωτερική διάμετρος D (mm)	
Διατομή A (mm)	
Αριθμός μανομέτρων	
Απόσταση μεταξύ διαδοχικών μανομέτρων (mm)	DS ₁₋₂ = DS ₂₋₃ =

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΛΑΦΟΥΣ

D _{max} – εδάφους (mm)	
D _{min} – εδάφους (mm)	
Για D _{sp} = 76mm, D _{max} – εδάφους = 2.00mm ASTM	
F.C. (%) ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ D < 75 μm (No 200)	
max F.C. (%)	ASTM (10%)
Ποσοστό (%) με D > 2mm	
G _s	
e _{min}	
e _{max}	

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Ξηρή κατάσταση (αέρας) <input type="checkbox"/>	Υγρή κατάσταση <input type="checkbox"/>
Μέθοδος Κοσκίνων / Αφαίρεση (D _{max} < 2mm) <input type="checkbox"/>	Μέθοδος Τετραερισμού <input type="checkbox"/>
Αρχική ξηρή μάζα εδαφικού δείγματος M _d (gr)	
Αρχική μάζα χρησιμοποιημένου δείγματος M _{in} (gr)	ASTM (Min ≈ 2 * M _{sp})

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (105°C)

Αριθμός υποδοχέα	
Μάζα υποδοχέα (gr)	
Μάζα υποδοχέα + Εδαφικού δείγματος (gr)	
Μάζα υποδοχέα + Ξηρού εδαφικού δείγματος (gr)	
Υγρασία δείγματος w (%)	

ΕΔΑΦΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

ΕΔΑΦΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ ΚΑΤΩ ΒΑΣΗΣ					
Πάχος Εδαφικού Φίλτρου (mm) (≈40mm Head)					
Χρήση χάρτινων φίλτρων		Άνω <input type="checkbox"/>		Κάτω <input type="checkbox"/>	
Πάχος χάρτινου φίλτρου (mm)					
Απόσταση μεταξύ της άνω βάσης του χάρτινου φίλτρου και της κορυφής της κυψέλης του δοκιμίου					
Μετρήσεις	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	M.O.
H _{in} (mm)					
ΕΔΑΦΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ ΑΝΩ ΒΑΣΗΣ					
Πάχος Εδαφικού Φίλτρου (mm) (≈40mm Head)					
Χρήση χάρτινων φίλτρων		Άνω <input type="checkbox"/>		Κάτω <input type="checkbox"/>	
Πάχος χάρτινου φίλτρου (mm)					
Απόσταση μεταξύ της άνω βάσης του χάρτινου φίλτρου και της κορυφής της κυψέλης του δοκιμίου					
Μετρήσεις	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	M.O.
H _{in} (mm)					

ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΟΥ

Εναπόθεση με χανί <input type="checkbox"/>	Στον αέρα <input type="checkbox"/>	Στο νερό <input type="checkbox"/>
Συμπύκνωση σε στρώσεις <input type="checkbox"/>	Ξηρή <input type="checkbox"/>	Με αρχική υγρασία <input type="checkbox"/>
Περιγραφή μέσου συμπύκνωσης		
Μάζα μέσου συμπύκνωσης (gr)		
Πάχος εδαφικής στρώσης (mm)		(ASTM, >15mm, D _{max} =1mm)
Μάζα εδαφικής στρώσης (gr)		
Αριθμός στρώσεων		
Αριθμός κύλων ανά στρώση		
Μάζα δοκιμίου M _{sp} (gr) (M _{sp} =Min-M _{rest})		
Ύψος δοκιμίου H _{sp} (mm) (H _{sp} =H _{in} -H _{fm} + Πάχος χάρτ. Φίλτρου)		
Απόσταση άνω βάσης δοκιμίου από την έξοδο του άνω μανομέτρου (mm)		
Σημείωση στην κυψέλη το ύψος του δοκιμίου		<input type="checkbox"/>

ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ASTM (minimum 15min)

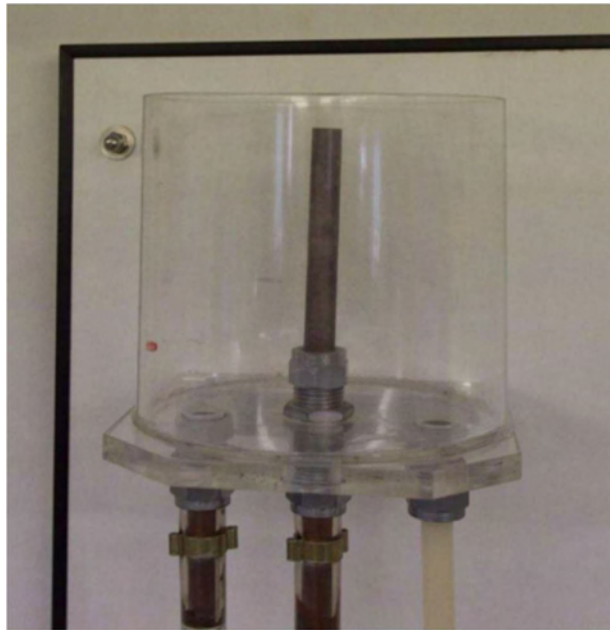
Μέθοδος CO ₂ <input type="checkbox"/>	Ροή προς τα πάνω <input type="checkbox"/>	Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>	Διάρκεια :
Μέθοδος Κενού <input type="checkbox"/>	Ροή προς τα πάνω <input type="checkbox"/>	Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>	Διάρκεια :
Εισροή αλαερομένου νερού <input type="checkbox"/>	Ροή προς τα πάνω <input type="checkbox"/>	Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>	Όγκος νερού:
Ύψος δοκιμίου μετά τον κορεσμό H _{sat} (mm)			
Μεταβολή ύψους δοκιμίου κατά τον κορεσμό (ΔH _s =H _{sp} -H _{sat}) (mm)			

ΔΟΚΙΜΗ:

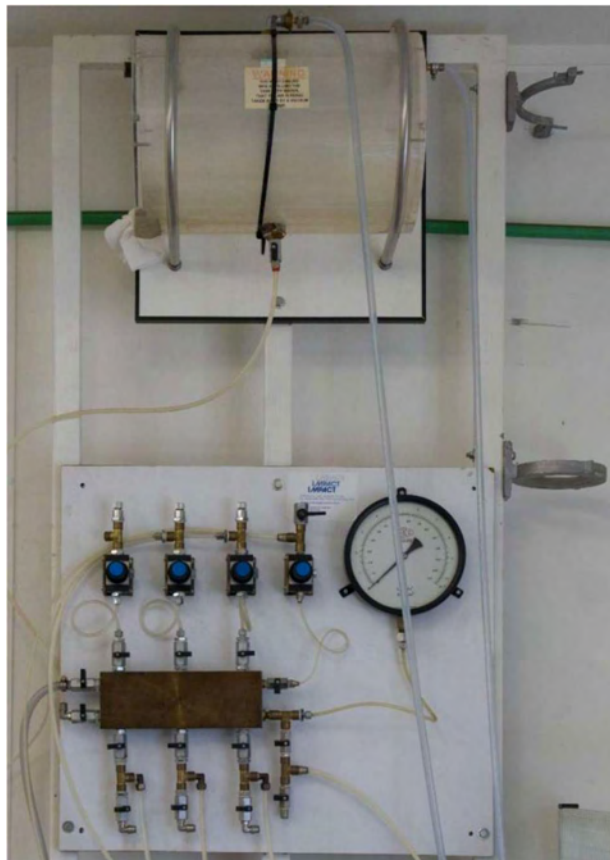
Αριθμός δοκιμής	
Ροή διαμέσου του εδάφους	Ροή προς τα πάνω <input type="checkbox"/> Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>
Ξηρή μάζα δοκιμίου M_d (gr) ($M_d = M_{sp}/(1+w)$)	
Αρχικό ύψος δοκιμίου H_{sat} (mm)	
Τελικό ύψος δοκιμίου H_{fin} (mm)	
$\Delta H = H_{sat} - H_{fin}$ (mm)	
γ_d (kN/m^3)	
e	
D_r	



Υψος κυψέλης :												
t (s)	ΜΑΝΟΜΕΤΡΑ			ΔH_{1-2} (mm)	ΔH_{2-3} (mm)	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s ²)	T (°C)
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)									
0'												
60'												
120'												
180'												
240'												
300'												
360'												
420'												
480'												
540'												
600'												
ΔH												



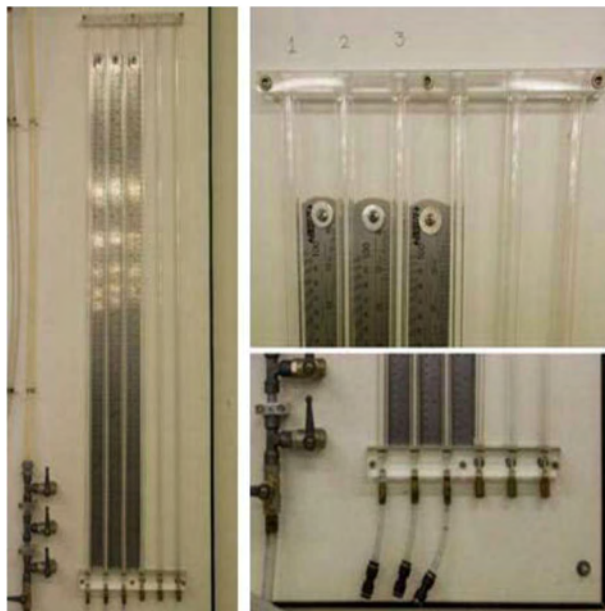
Σχήμα 4.1 Δεξαμενή παροχής νερού



Σχήμα 4.2 Σύστημα απαέρωσης νερού



Σχήμα 4.3 Κυψέλη δοκιμίου



Σχήμα 4.4 Μανόμετρα



Σχήμα 4.5 Φιάλη διοξειδίου του άνθρακα



Σχήμα 4.6 Ογκομετρικός κύλινδρος για τη μέτρηση της παροχής



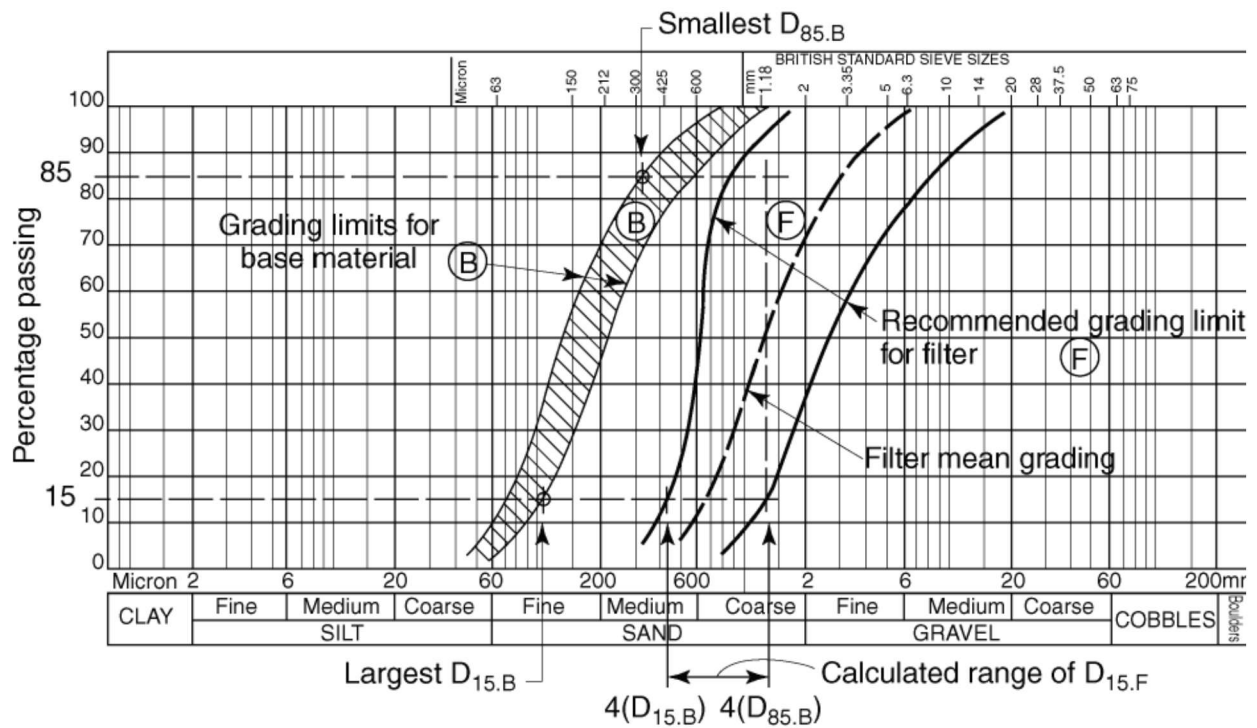
Σχήμα 4.7 Ογκομετρικός κύλινδρος, σύριγγα και υποδοχέας για τη διαδικασία βαθμονόμησης των μανομέτρων



Σχήμα 4.8 Πλήρης διάταξη διαπερατομέτρου



Σχήμα 4.9 Συμπλήρωση κατάλληλης ποσότητας νερού στα μανόμετρα



Σχήμα 4.10 Παρουσίαση μίας τυπικής καμπύλης εδαφικού φίλτρου, με βάση τα κριτήρια σχεδιασμού (Head, 2006)



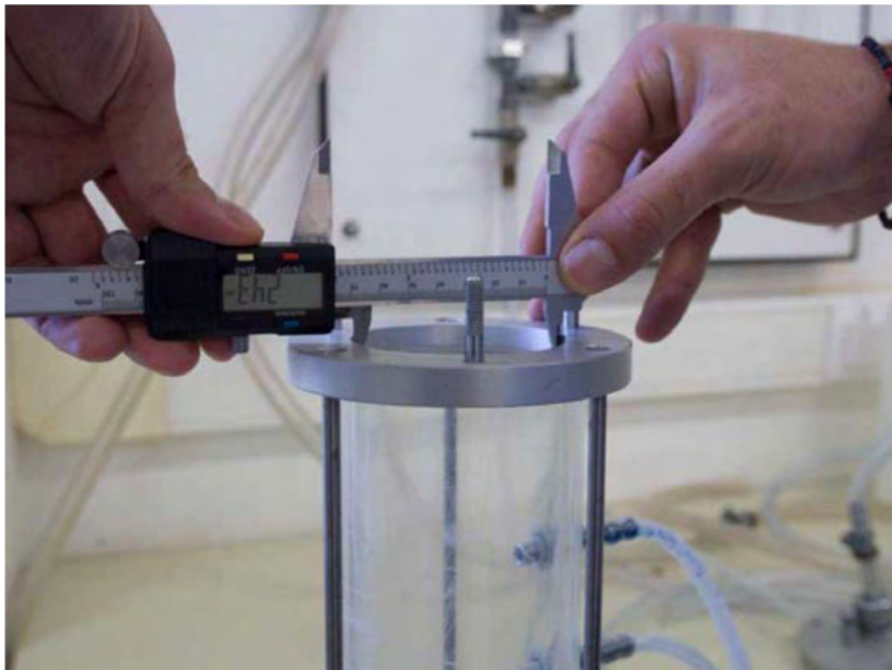
Σχήμα 4.11 Διαβάθμιση χονδροκόκκων υλικών για την παρασκευή εδαφικού φίλτρου



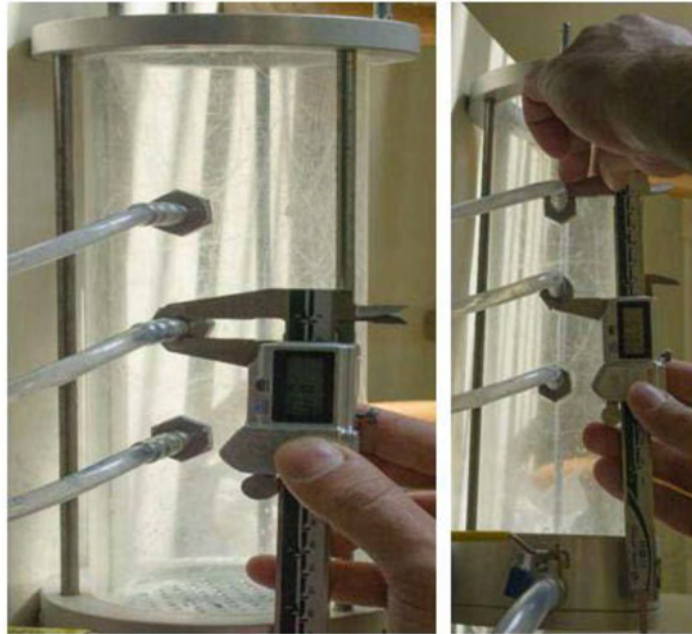
Σχήμα 4.12 Διαχωρισμός του εδαφικού υλικού με βάση την διάμετρο τους για την παρασκευή του εδαφικού φίλτρου



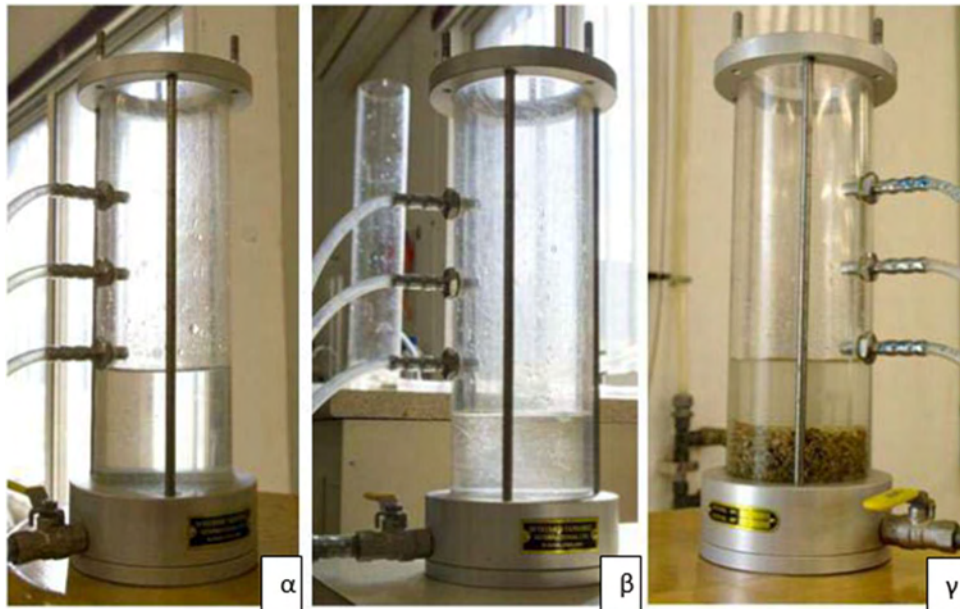
Σχήμα 4.13 Σύνθεση ενός εδαφικού φίλτρου, 1kg, με κατάλληλες ποσότητες από κάθε διάμετρο κόκκων



Σχήμα 4.14 Μέτρηση της εσωτερικής διαμέτρου της κυψέλης δοκιμίου με τη χρήση βερνιέρου



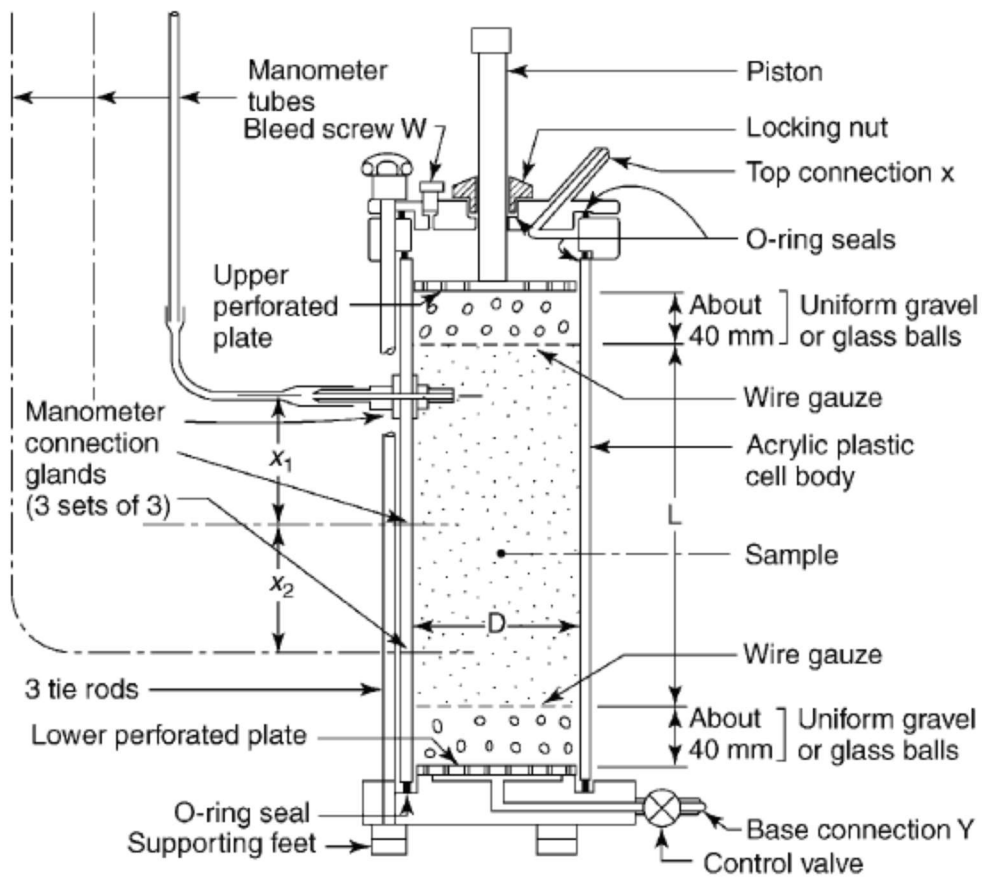
Σχήμα 4.15 Μέτρηση της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών οπών της κυψέλης δοκιμίου με τη χρήση βερνιέρου



Σχήμα 4.16 Διερεύνηση της σκοπιμότητας χρήσης εδαφικού και χάρτινου φίλτρου. (α) Δοκιμή χωρίς χρήση χάρτινου και εδαφικού φίλτρου. (β) Δοκιμή με χρήση μόνο χάρτινου φίλτρου. (γ) Δοκιμή με τη χρήση και των δύο φίλτρων (χάρτινου και εδαφικού).



Σχήμα 4.17 Τοποθέτηση χάρτινου φίλτρου, στην κάτω βάση της κυψέλης δοκιμίου



Σχήμα 4.18 Τυπική κυψέλη του διαπερατομέτρου μετά την ολοκλήρωση διαμόρφωσης του εδαφικού δοκιμίου (Head, 2006)



Σχήμα 4.19 Κατάλληλες ποσότητες του εξεταζόμενου εδαφικού υλικού (μίγμα άμμου και ιλύος) για τη διαμόρφωση του δοκιμίου στο εσωτερικό της κυψέλης



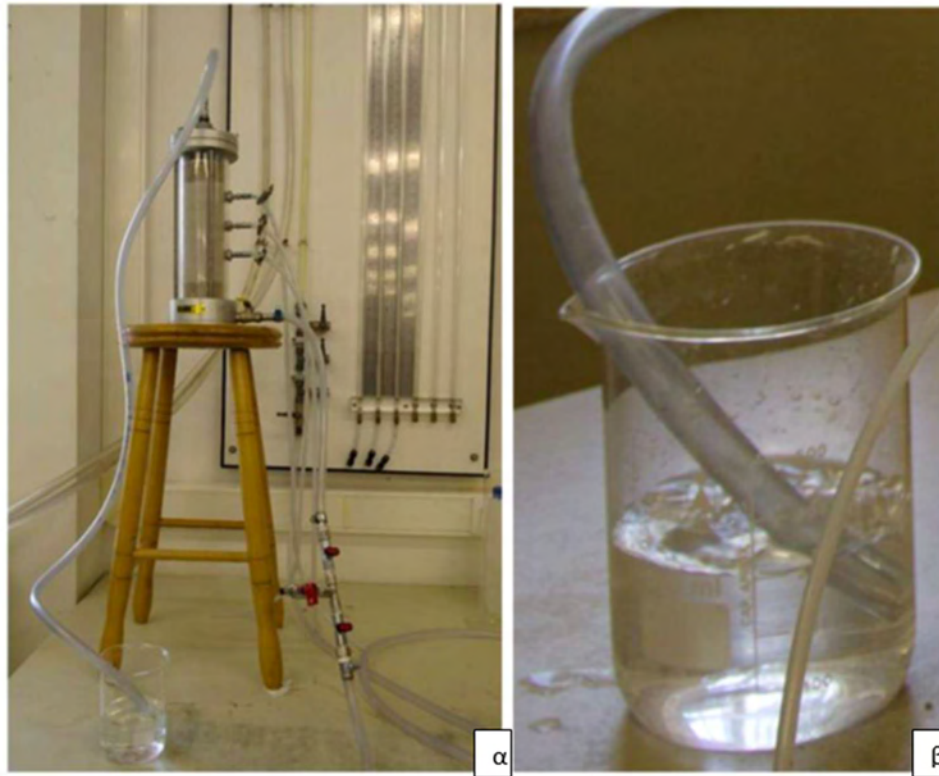
Σχήμα 4.20 Συμπύκνωση της πρώτης στρώσης του εδαφικού δοκιμίου



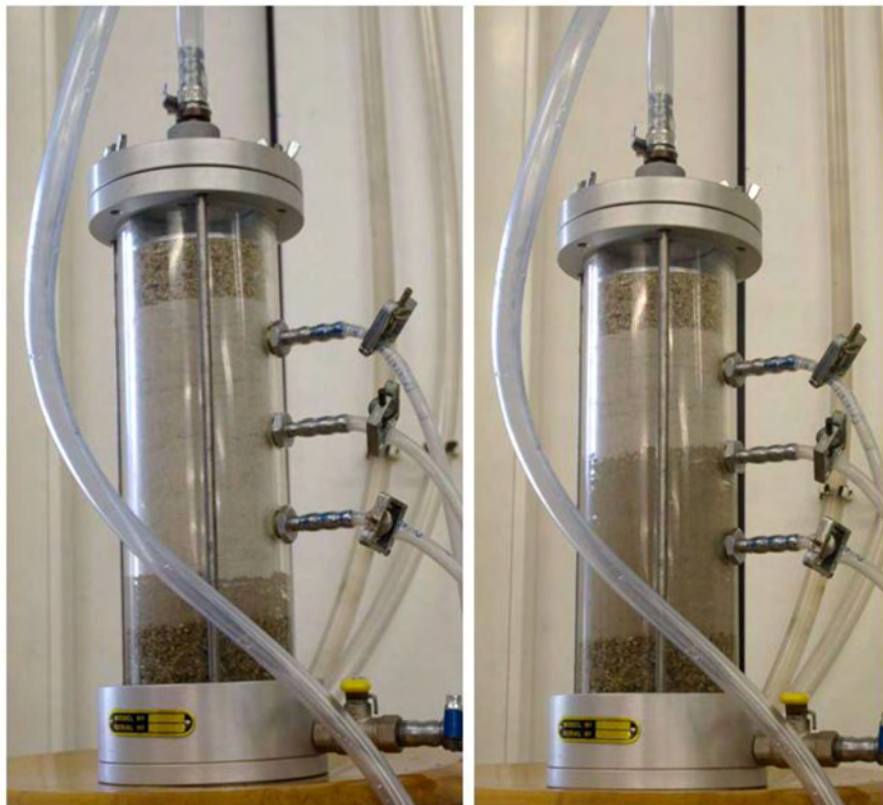
Σχήμα 4.21 Συμπύκνωση της τελικής στρώσης του εδαφικού δοκιμίου



Σχήμα 4.22 Κυψέλη με το εδαφικό δοκίμιο



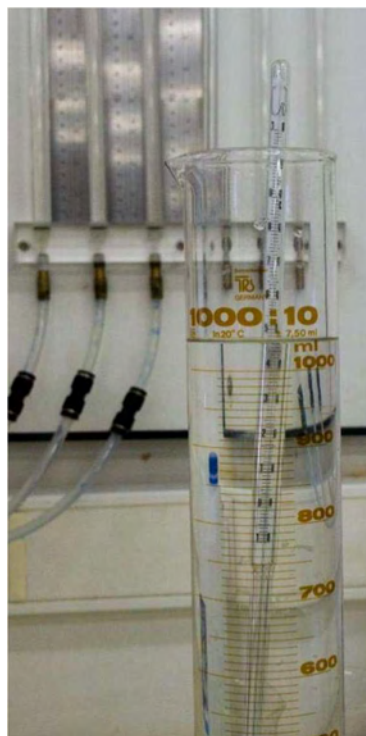
Σχήμα 4.23 Αντικατάσταση του αέρα των εδαφικών πόρων με CO₂. (α) Διάταξη απαέρωσης και (β) Διάταξη ελέγχου ροής



Σχήμα 4.24 Διάταξη κορεσμού του εδαφικού δοκιμίου



Σχήμα 4.25 Δοκίμιο μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας του κορεσμού και άνοιγμα της ειδικής βαλβίδας για την πλήρη απομάκρυνση του CO₂ από το εσωτερικό της κυψέλης.



Σχήμα 4.26 Μέτρηση της θερμοκρασίας στο εξερχόμενο νερό του δοκιμίου



Σχήμα 4.27 Διαπερατόμετρο κατά τη διάρκεια δοκιμής

Κεφάλαιο 5

Μελετηθέν έδαφος και πρόγραμμα δοκιμών

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα εδαφικά υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την προετοιμασία του εδφικού μίγματος άμμου και ιλύος που μελετήθηκε στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Επίσης, περιγράφονται οι δοκιμές ταξινόμησης των εδαφικών υλικών και συγκεκριμένα οι δοκιμές για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής καμπύλης, του ειδικού βάρους στερεών κόκκων, καθώς και οι δοκιμές προσδιορισμού του ελαχίστου και μέγιστου δείκτη κενών. Τέλος, παρουσιάζεται το πρόγραμμα των δοκιμών διαπεράτοτητας που ακολουθήθηκε.

5.2 Ορυκτολογική σύσταση

Η άμμος M31 είναι μια φυσική χαλαζιακή καθαρή άμμος με σχετικά ομοιόμορφα στιλβωμένους κόκκους, ανομοιόμορφη στρογγυλότητα και σφαιρικότητα (Σχήμα 5.1). Η στίβλωση των κόκκων της οφείλεται στις συνθήκες του περιβάλλοντος προέλευσης (υδάτινο περιβάλλον). Οι περισσότεροι από το σύνολο των κόκκων είναι διαυγείς, με ένα μικρό ποσοστό (5%-10%) να είναι ημιδιαφανείς. Στο υλικό υπάρχει σχεδόν μηδαμινή ποσότητα (<1%) μαύρων κόκκων σιδηροξειδίων, η προέλευση των οποίων δεν μπορεί να εντοπιστεί (Βράννα, 2016).

Η αμμώδης ιλύς D6, είναι υλικό που προέρχεται από θραύση χαλαζιακής άμμου, με μηδαμινή ποσότητα (<1‰) μαύρων κόκκων, προέλευση των οποίων αποτελεί η μόλυνση από ανθρώπινες δραστηριότητες. Οι κόκκοι χαρακτηρίζονται ως διαυγείς, εξαιρετικά γωνιώδεις με έντονη στιλπνότητα, λόγω της κογχώδης θραύσης τους (Σχήμα 5.2). Χαρακτηρίζεται παράλληλα ως μη πλαστική, αδρανής και με ουδέτερη οξύτητα (pH) (Βράννα, 2016).

Το εδαφικό υλικό που μελετήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής αποτελεί μίγμα των δύο παραπάνω εδαφών (Σχήμα 5.3).

5.3 Δοκιμές κατάταξης

Στο εξεταζόμενο εδαφικό υλικό εκτελέστηκαν δοκιμές κατάταξης, οι οποίες περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό των παρακάτω παραμέτρων:

- Κοκκομετρική διαβάθμιση με κόσκινα και αραιόμετρο
- Ειδικό βάρος, G_s , με τη μέθοδο των ληκύθων
- Μέγιστο δείκτη κενών, e_{max} , με ξηρή εναπόθεση σε γυάλινο ογκομετρικό κύλινδρο
- Ελάχιστο δείκτη κενών, e_{min} , με τη δοκιμή Proctor

5.3.1 Κοκκομετρική διάβαθμιση

Η κοκκομετρική διαβάθμιση ενός εδαφικού δείγματος χρησιμοποιείται για την ταξινόμησή του σε κάποια ομάδα εδαφών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αντοχής, συμπίεστότητας και διαπερατότητας. Αποτέλεσμα της κοκκομετρικής ανάλυσης είναι η σχεδίαση της κοκκομετρικής καμπύλης. Η δοκιμή γίνεται με δύο μεθόδους:

- (α) μέθοδος των κοσκίων για εδάφη με διάμετρο κόκκων > 0.075 mm.
- (β) μέθοδος αραιομέτρου για εδάφη με διάμετρο κόκκων < 0.075 mm.

Βοηθητικός εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την κοκκομετρική διαβάθμιση:

- Κλίβανος με ελεγχόμενη θερμοκρασία 105-110 °C.
- Ζυγός ακριβείας με ακρίβεια 0.01 gr
- Αναδευτήρας
- Μεταλλικές βούρτσες
- Υποδοχείς και δίσκους
- Έντυπο δοκιμής
- Πολυφωσφορικό νάτριο
- Γυάλινος ογκομετρικός κύλινδρος
- Θερμόμετρο
- Αραιόμετρο
- Νερό

- Μαχαίρι
- Υδροβολέας
- Χρονόμετρο
- Ξηραντήρας (θάλαμος με άνυδρο silica gel)

Διαδικασία

Τοποθετείται το εδαφικό δείγμα στον κλίβανο στους 105 °C – 110 °C για 24 ώρες και ζυγίζεται μετά την ξήρανση. Επιλέγεται κατάλληλη ποσότητα αντιπροσωπευτικού εδαφικού δείγματος, η οποία ζυγίζεται και καταγράφεται. Σε γυάλινο υποδοχέα τοποθετούνται 125ml νερού και 5gr πολυφωσφορικού νατρίου (Σχήμα 5.4). Το εδαφικό δείγμα καλύπτεται με το μίγμα νερού και πολυφωσφορικού νατρίου, αναμιγνύεται και φυλάσσεται για 24 ώρες. Με το πέρας των 24 ωρών, το εδαφικό δείγμα τοποθετείται στην κορυφή της στήλης των κοσκίνων. Τα κόσκινα έχουν τοποθετηθεί κατακόρυφα, το ένα πάνω στο άλλο, με φθίνουσα διάμετρο βρόγχου. Στο τέλος έχει τοποθετεί ένα τυφλό κόσκινο – συλλέκτης. Με τη χρήση απιονισμένου νερού μέσα σε υδροβολέα, γίνεται η διέλευση του εδαφικού δείγματος από μέσω των κοσκίνων (Σχήμα 5.5). Η μάζα του εδαφικού δείγματος που έχει συγκρατηθεί σε κάθε κόσκινο τοποθετείται σε προζυγισμένο υποδοχέα και στη συνέχεια στον κλίβανο στους 105 °C – 110 °C για 24 ώρες. Στη συνέχεια ζυγίζεται. Η συγκεκριμένη μέθοδος ονομάζεται υγρή κοκκομετρία με κόσκινα.

Το εδαφικό δείγμα που διέρχεται από το κόσκινο No. 200 και συγκεντρώνεται στον συλλέκτη, μεταφέρεται σε ογκομετρικό σωλήνα 1000 ml, ο οποίος συμπληρώνεται στη συνέχεια με νερό. Η πυκνότητα του διαλύματος εντός του σωλήνα μετράται με τη χρήση αραιομέτρου. Το αραιόμετρο αφήνεται προσεκτικά εντός του διαλύματος στον ογκομετρικό κύλινδρο (Σχήμα 5.6), και ένδειξη του αραιομέτρου καθώς και η θερμοκρασία του διαλύματος με τη χρήση ενός θερμομέτρου. Οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (πυκνά στην αρχή και αραιά στη συνέχεια) έως τη συμπλήρωση 24 ωρών από την έναρξη της διαδικασίας. Η κοκκομετρική καμπύλη συντίθεται από τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων (της κοκκομετρίας με τα κόσκινα και με το αραιόμετρο.)

Υπολογισμοί

Υπολογίζεται το ποσοστό που διέρχεται και συγκρατείται από το κάθε κόσκινο σε συναρτήση με την αρχική ξηρή μάζα του εδαφικού υλικού. Στη συνέχεια υπολογίζεται για την

μάζα του υλικού που διέρχεται το κόσκινο No. 200, με τους τύπους του αραιομέτρου το ποσοστό των κόκκων συγκεκριμένης διαμέτρου.

Το ποσοστό της συγκρατούμενης ξηρής μάζας του εδαφικού δείγματος (με διάμετρο κόκκων d_i) σε κάθε κόσκινο με δεδομένη διάμετρο (d_i) προσδιορίζεται από το τύπο:

$$S_i(\%) = \frac{B_{ολ} - \Sigma(B_i)}{B_{ολ}} \quad (5.1)$$

Όπου:

$B_{ολ}$: το συνολικό ξηρό βάρος του εδαφικού δείγματος, και

$\Sigma(B_i)$: το συνολικό ξηρό βάρος του συγκρατηθέντος υλικού στα κόσκινα με διάμετρο $> d_i$

Οι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής καμπύλης από τα δεδομένα της δοκιμής αραιομέτρου είναι οι ακόλουθοι:

Η διόρθωση θερμοκρασίας, M_t , προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$M_t = 0.0056 \times T^2 - 0.0444 \times T - 1.3639 \quad (5.2)$$

Όπου:

T: η θερμοκρασία σε °C

Η συνολική διόρθωση αραιομέτρου, R_0 , προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$R_0 = C_m + M_t - C_d + C_0 \quad (5.3)$$

Όπου:

C_m : η διόρθωση μηνίσκου

M_t : η διόρθωση θερμοκρασίας

C_d : η διόρθωση μέσου διασποράς

C_0 : η διόρθωση μηδενικής ένδειξης

Η διορθωμένη ένδειξη αραιομέτρου, R' , προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$R' = R_{h'} + C_m \quad (5.4)$$

Όπου:

R_h : αποτελεί την ένδειξη του αραιομέτρου

C_m : η διόρθωση μηνίσκου

Το ύψος πτώσης των κόκκων μέσα στο διάλυμα, L , προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$L = 17.565 - 0.2105 \times R' \quad (5.5)$$

Όπου:

R' : η διορθωμένη ένδειξη του αραιομέτρου

Η πυκνότητα του νερού, ρ_w , προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$\rho_w = -0.000006 \times T^2 + 0.00004 \times T + 0.9999 \quad (5.6)$$

Όπου:

T : η θερμοκρασία σε °C

Το ιξώδες του νερού, n , προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$n = 0.0005 \times T^2 - 0.0463 \times T + 1.7586 \quad (5.7)$$

Όπου:

T : η θερμοκρασία σε °C

Ο συντελεστής, K , προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$K = 0.005531 \times \sqrt[2]{\frac{n}{G_s - 1}} \quad (5.8)$$

Όπου:

n : το πορώδες

G_s : ειδικό βάρος των στερεών κόκκων

Η διάμετρος των κόκκων, D , προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$D = K \times \sqrt[2]{\frac{L}{t}} \times 1000 \quad (5.9)$$

Όπου:

K: συντελεστής διόρθωσης

L: το ύψος πτώσης των εδαφικών κόκκων μέσα στο διάλυμα

t: ο διελθών χρόνος

Η τελική ένδειξη του αραιομέτρου, R, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R = R_{h'} + C_m - C_d + C_0 \quad (5.10)$$

Όπου:

R_{h'}: η ένδειξη του αραιομέτρου

C_m: η διόρθωση μνήσκου

M_t: η διόρθωση θερμοκρασίας

C_d: η διόρθωση μέσου διασποράς

C₀: η διόρθωση μηδενικής ένδειξης

Το διερχόμενο ποσοστό προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$P(\%) = \frac{G_s \times R \times 100}{M_d \times (G_s - 1)} \quad (5.11)$$

Όπου:

G_s: το ειδικό βάρος των στερεών κόκκων

R: η τελική ένδειξη του αραιομέτρου

M_d: η ξηρή μάζα του υλικού

Σχεδιάζεται η κοκκομετρική καμπύλη που αντιστοιχεί στο υλικό μελέτης και υπολογίζεται ο συντελεστής ομοιομορφίας (C_u) και ο συντελεστής καμπυλότητας (C_c).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (5.12)$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (5.13)$$

Αποτελέσματα - Σχολιασμός

Η κοκκομετρική καμπύλη που προκύπτει από το συνδυασμό της μεθόδου κοσκίνων και αραιομέτρου παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.7.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν για την κατάταξη του εδάφους από την κοκκομετρική καμπύλη είναι τα εξής:

- Το διερχόμενο ποσοστό του εδαφικού δείγματος από το κόσκινο No. 200 είναι μικρότερο από 50% του υλικού, και άρα το έδαφος χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκο.
- Το διερχόμενο ποσοστό του εδαφικού δείγματος από το κόσκινο No. 200 είναι μεγαλύτερο από 5% και δεν υπάρχουν χάλικες στο δείγμα.
- Το έδαφος χαρακτηρίζεται ως ιλυώδης άμμος (SM) χωρίς πλαστικότητα (NP).

Από την κοκκομετρική καμπύλη υπολογίζονται οι τρεις χαρακτηριστικές διαμέτροι (D_{60} , D_{30} , D_{10}), μέσω των οποίων υπολογίζονται και ο συντελεστής ομοιομορφίας (C_u) και ο συντελεστής κυρτότητας (C_c):

- $D_{60} = 0.35 \text{ mm}$
- $D_{30} = 0.2 \text{ mm}$
- $D_{10} = 0.035 \text{ mm}$

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 10$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = 3.26$$

Το εδαφικό υλικό χαρακτηρίζεται ως «καλά διαβαθμισμένο».

5.3.2 Ειδικό βάρος στερεών κόκκων

Το ειδικό βάρος στερεών κόκκων, G_s , εξαρτάται από την ορυκτολογική σύσταση των κόκκων. Η μέση τιμή του G_s για τα συνήθη εδάφη είναι ίση με 2.65 (2.55-2.75). Το G_s είναι αδιάστατο μέγεθος και χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό της κοκκομετρικής καμπύλης με τη μέθοδο του αραιομέτρου, του δείκτη κενών και του βαθμού κορεσμού των εδαφών.

Βοηθητικός Εξοπλισμός

- Τρεις λήκυθοι όγκου 50ml με διάτρητο πώμα.
- Κλίβανος με ελεγχόμενη θερμοκρασία 105-110 °C
- Ζυγός με ακρίβεια 0,001 gr
- Θάλαμος κενού
- Εστία θέρμανσης
- Δοχείο ζέσεως
- Χωνί
- Σταγονόμετρο
- Απεσταγμένο νερό
- Έντυπο δοκιμής
- Ξηραντήρας (θάλαμος με άνυδρο silica gel)

Διαδικασία

Ζυγίζονται τρεις καθαρές και στεγνές λήκυθοι (Σχήμα 5.8). Μετά την ξήρανση του στον κλίβανο, εδαφικό υλικό 10 gr τοποθετείται στο εσωτερικό κάθε μιας λυκήθου, οι οποίες ξαναζυγίζονται. Στην συνέχεια, απεσταγμένο νερό τοποθετείται σε δοχείο ζέσεως και υπόκειται σε βρασμό πάνω σε ηλεκτρική εστία για 10 λεπτά, για την απομάκρυνση του εγκλωβισμένου αέρα από το νερό (Σχήμα 5.9). Το δοχείο αφαιρείται από την εστία και κρυώνει έως τους 20 °C. Από αυτό το νερό προστίθεται στις ληκύθους ως τη μέση του ύψους τους, ώστε να καλύπτεται η επιφάνεια του εδάφους. Οι τρεις λήκυθοι τοποθετούνται σε θάλαμο κενού (αντλία ξηρού τύπου με σταθερή πίεση 0.6 στο δυναμόμετρο), χωρίς τα καπάκια τους για 8 ώρες. Στη συνέχεια, οι λήκυθοι εξέρχονται από το θάλαμο κενού και γεμίζονται πλήρως με απεσταγμένο νερό (Σχήμα

5.10). Τα καπάκια των αντίστοιχων ληκύθων τοποθετούνται και ζυγίζονται ξανά οι λήκυθοι (Σχήμα 5.11). Η διαδικασία ολοκληρώνεται με τον καθαρισμό των ληκύθων από το εδαφικό υλικό (εσωτερικά και εξωτερικά) και την ζύγιση αυτών γεμάτες με απεσταγμένο νερό και με το καπάκι τους.

Υπολογισμοί

Ο υπολογισμός του ειδικού βάρους των στερεών κόκκων, προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$G_s = \frac{m_A}{m_B - m_\Gamma} \quad (5.14)$$

Όπου,

m_A : η ξηρή μάζα του εδάφους (gr)

m_B : η μάζα του νερού σε γεμάτη λήκυθο (gr)

m_Γ : η μάζα του νερού που χρησιμοποιείται στην λήκυθο με το έδαφος (gr)

Αποτελέσματα – Σχολιασμός

Τα αποτελέσματα της δοκιμής απεικονίζονται στον Πίνακα 5.1. Ως τελική τιμή G_s λαμβάνεται η μέση τιμή των τριών δοκιμών.

- Η τιμή του ειδικού βάρους, G_s , είναι 2,664.

5.3.3 Μέγιστος δείκτης κενών

Η δοκιμή πραγματοποιείται με ξηρή απόθεση σε γυάλινο ογκομετρικό κύλινδρο. Σκοπός της δοκιμής είναι ο προσδιορισμός του μέγιστου δείκτη πόρων (e_{max}), με τη χρήση της ελάχιστης ξηρής πυκνότητας και του ειδικού βάρους των στερεών κόκκων.

Βοηθητικός εξοπλισμός

- Διαβαθμισμένος γυάλινος ογκομετρικός κύλινδρος χωρητικότητας 2000 cm³
- Πώμα

- Πλαστικά λάστιχα
- Κλίβανος με ελεγχόμενη θερμοκρασία 105-110 °C
- Ζυγός με ακρίβεια 0,1 gr
- Έντυπο Δοκιμής
- Ξηραντήρας (θάλαμος με άνυδρο silica gel)

Διαδικασία

Σε διαβαθμισμένο ογκομετρικό σωλήνα τοποθετείται ξηρό εδαφικό υλικό, και κλείνει με κατάλληλο πώμα. Ανακινείται ο κύλινδρος 5 φορές πάνω κάτω με τον ίδιο ρυθμό. Κατά την τελευταία επαναφορά ο κύλινδρος τοποθετείται στον πάγκο του εργαστηρίου αργά με προσοχή, ώστε να μη διαταραχτεί το υλικό. Καταγράφεται η ένδειξη του όγκου του κυλίνδρου. Σε επίπεδη επιφάνεια εδάφους η ανάγνωση της ένδειξης γίνεται απευθείας, ενώ σε αντίθετη περίπτωση ένα ή δύο λάστιχα προσαρμόζονται στο ύψος της μέσης επιφάνειας του εδάφους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται 10 φορές. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με το άδειασμα του εδαφικού υλικού και τη ζύγιση του κυλίνδρου.

Υπολογισμοί

Η ελάχιστη ξηρή πυκνότητα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\rho_{Dmin} = \frac{m_D}{V} \quad (5.15)$$

Όπου:

m_D : η μάζα του ξηρού εδαφικού δείγματος

V : ο όγκος του εδαφικού δείγματος

Ο μέγιστος δείκτης πόρων υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$e_{max} = \frac{G_s}{\rho_{Dmin}} - 1 \quad (5.16)$$

Όπου:

G_s : το ειδικό βάρος

ρ_{Dmin} : η ελάχιστη ξηρή πυκνότητα

Αποτελέσματα - Σχολιασμός

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής ελάχιστης πυκνότητας με ξηρή απόθεση σε ογκομετρικό κύλινδρο. Με το πέρας των ανακινήσεων, λαμβάνεται η τιμή της ελάχιστης ξηρής πυκνότητας. Με τη χρήση της ελάχιστης ξηρής πυκνότητας και του ειδικού βάρους, υπολογίζεται η τιμή του μέγιστου δείκτη πόρων.

- Η τιμή του μέγιστου δείκτη κενών, e_{max} , είναι 0,68796.

5.3.4 Ελάχιστος δείκτης κενών

Σκοπός της δοκιμής Proctor είναι ο προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ της περιεχόμενης υγρασίας και της ξηρής πυκνότητας του εδάφους. Η συμπύκνωση του εδαφικού δείγματος προκαλεί μείωση του όγκου των εδαφικών πόρων, αύξηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους, και μείωση των καθιζήσεων, της διαπερατότητας και της διάβρωσης. Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε.

Βοηθητικός εξοπλισμός

- Μήτρα καθορισμένων διαστάσεων
- Υποδοχείς
- Νερό
- Ζυγός με ακρίβεια 0.1 gr
- Κλίβανος με ελεγχόμενη θερμοκρασία 105-110° C
- Ξηραντήρας (θάλαμος με άνυδρο silica gel)
- Βερνιέρος ακριβείας 0.01mm
- Σπάτουλα-κουτάλι
- Σφύρα βάρους 2.4948 kg
- Πινέλο καθαρισμού
- Έντυπο Δοκιμής

Διαδικασία

Μετράται το ύψος και η διάμετρος της μήτρας με χρήση βερνιέρου. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται τέσσερις φορές και την τιμή της διαμέτρου αποτελεί ο μέσος όρος αυτών. Ζυγίζεται το σταθερό τμήμα και η βάση της μήτρας. Στην συνέχεια, σε ξηρό εδαφικό δείγμα (διερχόμενο από το κόσκινο Νο.4) προστίθεται κατάλληλη ποσότητα νερού, ώστε η υγρασία του να φτάσει $w=8\%$ (Σχήμα 5.13). Μετά την ανάμιξη του εδάφους, το τελευταίο διαχωρίζεται σε 3 ισοβαρή μέρη. Η μεταλλική μήτρα συναρμολογείται και τοποθετείται το πρώτο από τα τρία μέρη. Με τη χρήση σφύρας, το εδαφικό υλικό συμπυκνώνεται με εικοσιπέντε κτύπους (ταχύτερα από 1.5sec/χτύπο), σε όλη την επιφάνεια της μήτρας, με τον άξονα της σφύρας να είναι κάθετος στην επιφάνεια της μήτρας (Σχήμα 5.14). Έπειτα, τοποθετείται το δεύτερο μέρος πάνω στο ήδη συμπυκνωμένο και ακολουθεί η ίδια διαδικασία χτύπων. Παρόμοια και το τρίτο μέρος. Το πλήρες συμπυκνωμένο υλικό πρέπει να υπερβαίνει το ύψος του σταθερού τμήματος της μήτρας αλλά όχι του συνολικού. Αφαιρείται το μη σταθερό τμήμα και καθαρίζεται η επιφάνεια του εδαφικού δείγματος από τα τμήματα που προεξέχουν. Ζυγίζεται το σταθερό τμήμα της μήτρας με το συμπυκνωμένο έδαφος. Εδαφικά δείγματα λαμβάνονται από το άνω, μέσο και κάτω τμήμα του εδαφικού δοκιμίου, των οποίων οι μάζες καταγράφονται και τοποθετούνται εντός υποδοχέων στον κλίβανο για 24 ώρες. Με το πέρας των 24 ωρών, οι υποδοχείς με τα δείγματα ζυγίζονται για τον προσδιορισμό της υγρασίας του εδαφικού δοκιμίου σε διάφορα σημεία του. Η μέθοδος της συμπίκνωσης πραγματοποιείται 5 φορές με σταδιακή αύξηση της υγρασίας του δείγματος (εδώ χρησιμοποιήθηκαν οι εξής επιπλέον τιμές υγρασίας $w=10\%$, $w=12\%$, $w=13\%$, $w=14\%$).

Υπολογισμοί

Η υγρασία του εδάφους, προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$w(\%) = \frac{\text{Μάζα περιεχομένου ύδατος}}{\text{Μάζα ξηρού δείγματος}} \times 100 \quad (5.17)$$

Η ξηρή φαινόμενη πυκνότητα προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} \quad (5.18)$$

Όπου:

ρ : η υγρή πυκνότητα

w : η υγρασία

Αποτελέσματα - Σχολιασμός

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής Proctor (συμπύκνωση) και στο Σχήμα 5.15 η καμπύλη συμπύκνωσης, όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παρούσας δοκιμής με άλλη δοκιμή Proctor στο ίδιο έδαφος.

- Η τιμή του ελαχίστου δείκτη πόρων, e_{min} , είναι 0,414.

5.4 Πρόγραμμα δοκιμών διαπερατότητας

Η διαμόρφωση των δοκιμών της αμμόδους ιλύος για τη δοκιμή διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου έγινε ως εξής:

1. Στην πρώτη δοκιμή ο αριθμός των εδαφικών στρώσεων ήταν 14, με μάζα κάθε στρώσης ίση με 100 gr. Κάθε μία από αυτές συμπυκνώθηκε με τη σφύρα 25 φορές.
2. Στη δεύτερη δοκιμή ο αριθμός των εδαφικών στρώσεων ήταν 13, με μάζα κάθε στρώσης ίση με 100 gr. Κάθε μία από αυτές συμπυκνώθηκε με τη σφύρα 5 φορές
3. Στην τρίτη δοκιμή ο αριθμός των εδαφικών στρώσεων ήταν 6, με μάζα κάθε στρώσης ίση με 200 gr, πλην της τελευταίας που ήταν 100 gr. Οι στρώσεις δεν συμπυκνώθηκαν.

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζεται το πρόγραμμα των δοκιμών διαπερατότητας με τις σχετικές πυκνότητες των δοκιμών, καθώς επίσης και τις τιμές των υδραυλικών κλίσεων.

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα της δοκιμής προσδιορισμού του ειδικού βάρους στερεών κόκκων

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΙΔΙΚΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΣΤΕΡΕΩΝ ΚΟΚΚΩΝ				
Κωδικός έργου		Γεώτρηση:		
Περιγραφή εδάφους	Πυλώδης άμμος(85% M ₃₁ -15% D ₆)	Βάθος:		
Προετοιμασία εδάφους	24 ώρες στους 105-110°C	Ημερομηνία:	27/3/2019	
Ονομαστική διάμετρος μέγιστου κόκκου	0.85	Όγκος ληκύθων(ml):	50	
Εκτελέσαντες	Ζακυνθινός Π.	Πρότυπα Αναφοράς:	BS1337:1990-2	
Αριθμός δοκιμής			1	2
Όνομα Ληκύθου			1	2
Μάζα ληκύθου+έδαφος+νερό(gr)	M3		86.613	86.9442
Μάζα ληκύθου+έδαφος(gr)	M2		39.6268	40.146
Μάζα ληκύθου γεμάτη με νερό(gr)	M4		81.6972	81.4279
Μάζα ληκύθου(gr)	M1		31.7559	31.3191
Μάζα εδάφους(gr)	(M2-M1)		7.8709	8.8269
Μάζα νερού στη γεμάτη ληκύθο(gr)	(M4-M1)		49.9413	50.1088
Μάζα νερού που χρησιμοποιήθηκε(gr)	(M3-M2)		46.9862	46.7982
Όγκος εδαφικών κόκκων(gr)	(M4-M1)-(M3-M2)		2.9551	3.3106
Ειδική πυκνότητα,ρs(Mg/m ³)	(M2-M1)/((M4-M1)-(M3-M2))		2.6635	2.6663
Αποκλίσεις μεταξύ των τιμών ρs(Mg/m ³)	όριο 0.03g/BS1377: 1990-2		<0.03	<0.03
Μέση τιμή (Mg/m ³)	(ίδια τιμή έχει το Gs)		2.664	

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα της δοκιμής προσδιορισμού του μεγίστου δείκτη κενών

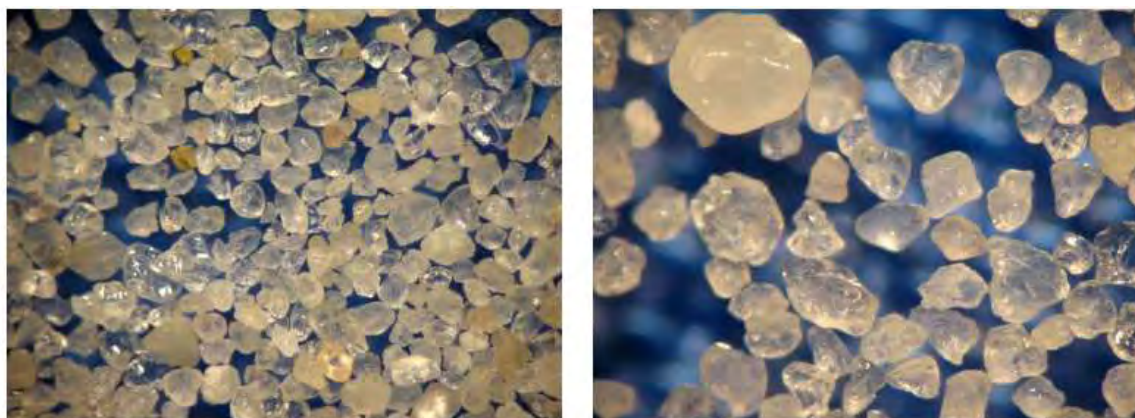
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΕΛΑΧΙΣΤΗΣ ΞΗΡΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ												
Κωδικός έργου:					Γεώτρηση:							
Περιγραφή εδάφους:	Γλυώδης άμμος(85% M31-15% D6)				Βάθος(m):							
Προετοιμασία εδάφους:	24 ώρες στους 105-110 °C				Ημερομηνία:		30/3/2019					
Εκτελέσαντες:	Ζακωνθινός Π.				Πρότυπα αναφοράς:		BS137704 & K.H. HEAD					
Ονομαστική διάμετρος μεγίστου κόκκου(mm):	0.85				Ποσοστό λεπτοκόκκων, FC(%), <63μm				10%			
Όγκος σωλήνα(cm ³)	2000	Τιμές										
Μέγεθος	Μονάδες	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Μάζα σωλήνα	g	951.89	951.89	951.89	951.89	951.89	951.89	951.89	951.89	951.89	951.89	
Μάζα ξηρού δοκιμίου + σωλήνα	g	2104	2103.4	2103.36	2103.29	2103.1	2102.97	2102.36	2102.15	2101.88	2101.66	
Μάζα ξηρού δοκιμίου, M _d	g	1152.11	1151.6	1151.47	1151.4	1151.2	1151.08	1150.47	1150.26	1149.99	1149.77	
Όγκος εδάφους V	cm ³	730	710	710	720	720	710	710	710	710	710	
Ξηρή πυκνότητα ρ _d	g/cm ³	1.57823	1.6219	1.62179	1.599167	1.5989	1.62124	1.62038	1.620085	1.619704	1.61939	
Ειδική βαρύτητα στερεών κόκκων G _s	2.664											
Δείκτης πόρων e		0.68796	0.6425	0.64263	0.665868	0.6662	0.64319	0.644059	0.644359	0.644745	0.64506	
Ελάχιστη ξηρή πυκνότητα ρ _{Dmin}	g/cm ³	1.57823										
Μέγιστος Δείκτης πόρων e _{max}		0.68796										

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα της δοκιμής Proctor

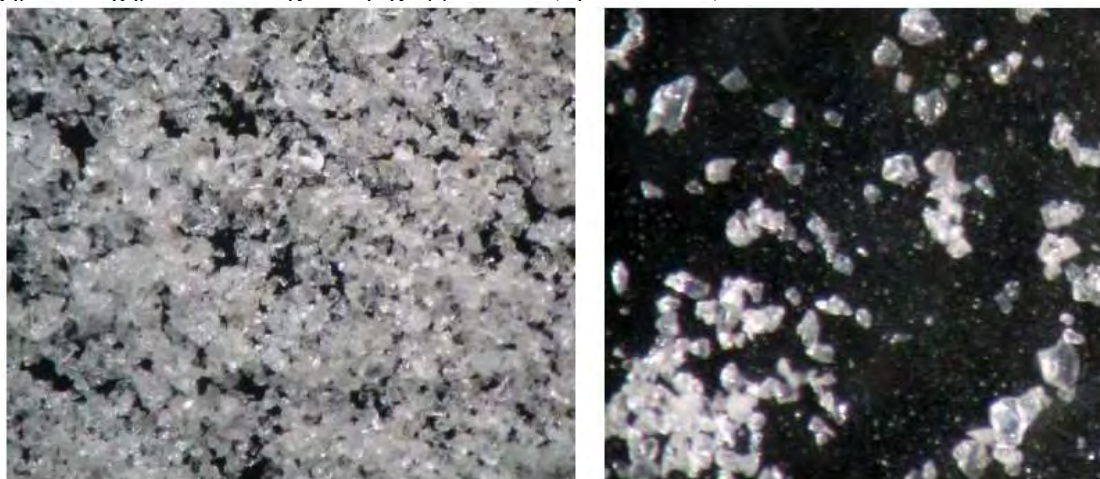
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗΣ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟ PROCTOR										
Κωδικός έργου:				Γαλιτεία:						
Περιγραφή εδάφους:	Ευλόφης άμμοσι 3.5% M2 (-1.5% D6)			Βάθος(m):						
Προεπιλεγμένη εδράση:	24 ώρες στους 40 °C			Ημερομηνία:	3/4/2019					
Εκτελεστές:	Ζακινθίνας Π.			Πρότυπα αναφοράς:	ASTM D-698					
Μέθοδος Δοκιμής			Standard							
Χαρακτηριστικά Μέτρα:										
Διάμετρος Μήτρας D (mm) :				101.6675						
Ακτίνα R (mm) :				50.83375						
Ύψος Μήτρας H (mm) :				116.62						
Μάζα M (g)				3400						
Επιφάνεια Βάσης A(cm ²)				81.18295765						
Όγκος V (cm ³)				946.7321281						
ΔΟΚΙΜΕΣ										
Αρ. δοκιμής	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 3	Δοκιμή 4	Δοκιμή 5					
Εισαγωγή Υγρασίας (%)	8	10	12	13	14					
Μάζα εδάφους + μήτρας (gr)	5079	5259	5225	5243	5258					
Μάζα εδάφους (gr)	3679.00	3759.00	3825.00	3843.00	3858.00					
Φαινόμενη πυκνότητα, ρ (gr/cm ³)	1.771879428	1.856304892	1.9259539	1.944951629	1.960781404					
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ										
Επιφάνεια	Άνω	Μέση	Άνω	Μέση	Άνω	Μέση	Άνω	Μέση	Άνω	Μέση
Αρ. υποδοχέα	38	3	44	5	2	45	γυάλινο 2	γυάλινο 3	γυάλινο 4	γυάλινο 5
Μάζα υποδοχέα	26.12	136.56	118.34	118.31	123.09	114.8	69.94	69.59	70.04	69.41
Μάζα υποδοχέα + αγρού δείγματος (g)	51.47	144.48	143.84	162.21	156.76	157.93	106.41	99.2	86.12	90.12
Μάζα υποδοχέα + ξηρού δείγματος (g)	49.67	142.4	141.7	158.31	153.27	153.63	102.5	96.3	84.29	88.17
Μάζα περιχύλι μανου ύδατος Mw	1.8	2.08	2.14	3.9	3.49	4.3	3.91	2.9	1.83	1.95
Μάζα ξηρού δείγματος, Ms (g)	23.55	25.84	23.56	40	30.88	38.83	32.56	26.71	14.25	18.76
Υγρασία, w(%)	7.6433	8.0485	9.0832	9.7500	11.5639	11.0739	12.0086	10.8574	12.84210526	10.3944563
Μέσος όρος Υγρασίας w(%)	7.846423853	9.416595925	11.11893078	11.43297845	11.61828078					
Ξηρή φαινόμενη πυκνότητα ρ _d (gr/cm ³)	1.642965399	1.696547837	1.730124325	1.746400384	1.756684828					

Πίνακας 5.4 Πρόγραμμα δοκιμών διαπερατότητας

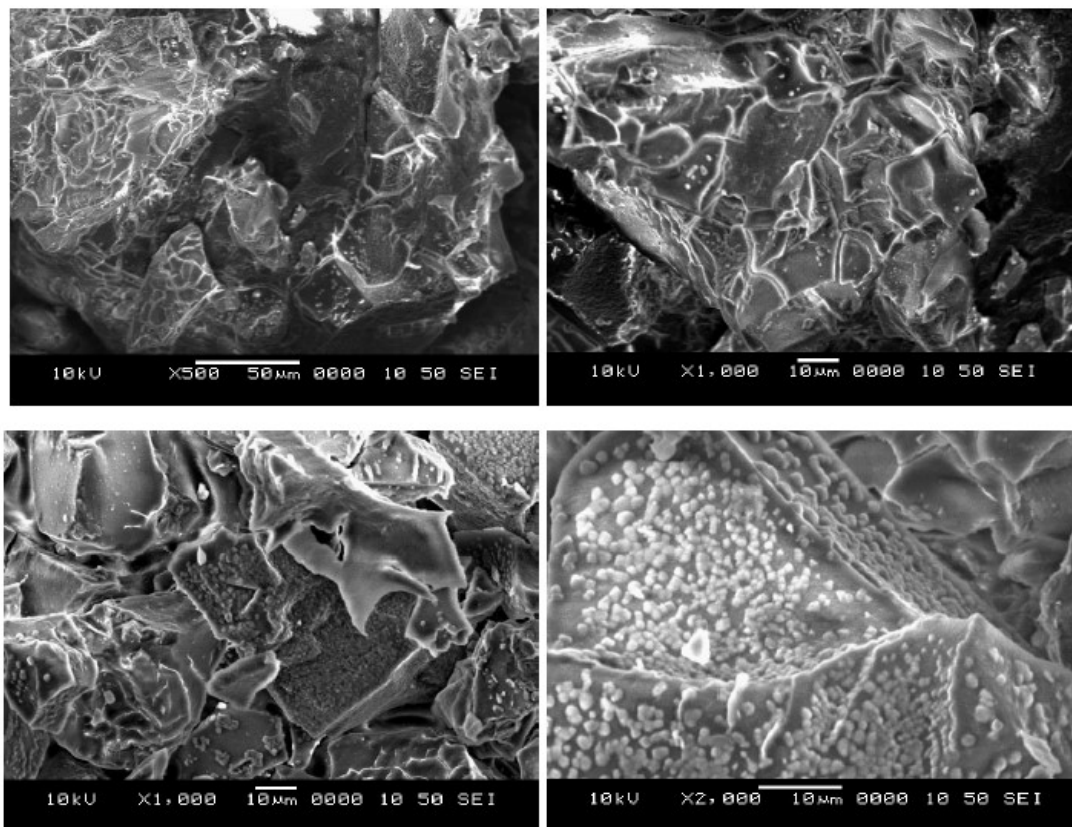
Dr (%)	Δοκιμή	Υδραυλική κλίση, i
88	1	3.67
	2	3.94
	3	5.53
	4	5.94
	5	5.76
62	6	1.76
	7	2.81
57	8	2.95
	9	1.77
	10	1.59
	11	0.39
	12	0.16



Σχήμα 5.1 Σχήμα κόκκων της καθαρής άμμου M31 (Βράννα, 2016).



Σχήμα 5.2 Σχήμα των κόκκων της ιλύος D6 (Βράννα, 2016).



Σχήμα 5.3 Κόκκοι μίγματος ιλυώδους άμμου (85% M31- 15% D6) σε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) σε διάφορες μεγεθύνσεις (Βράννα, 2016).



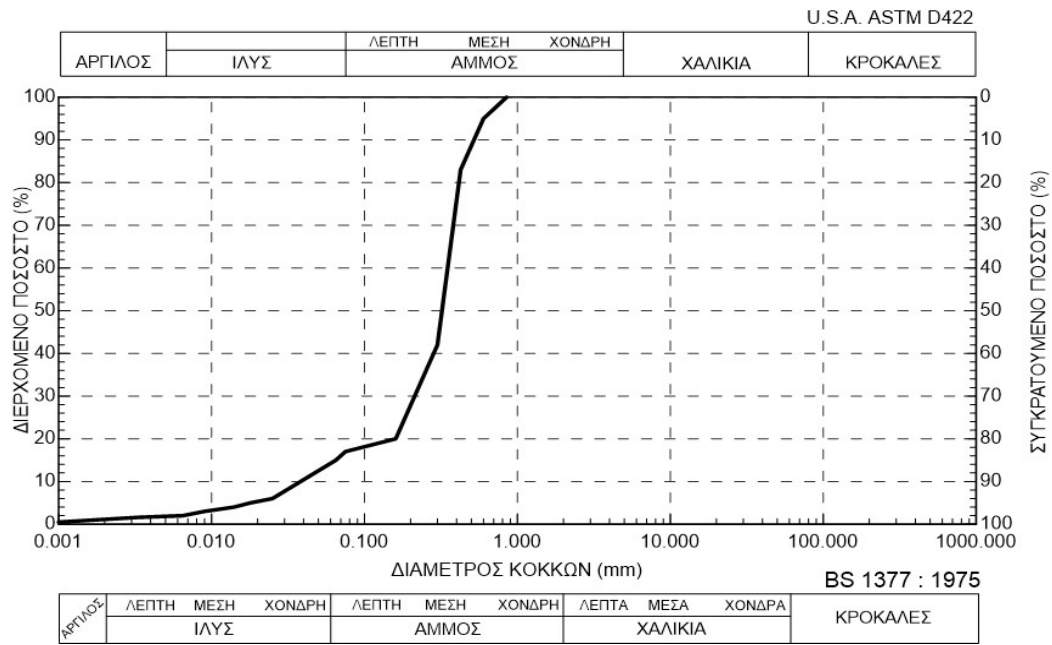
Σχήμα 5.4 Προετοιμασία δοκιμής κοκκομετρίας



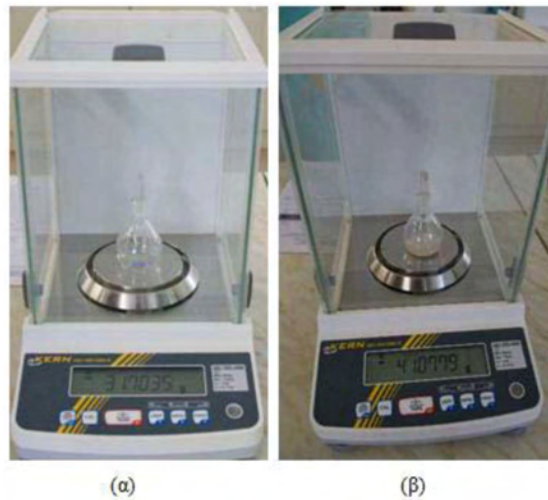
Σχήμα 5.5 Δοκιμή υγρής κοκκομετρίας με κόσκινα



Σχήμα 5.6 Δοκιμή αραιομέτρου



Σχήμα 5.7 Κοκκομετρική καμπύλη ιλυώδους άμμου (μελετηθέν έδαφος)



Σχήμα 5.8 Διαδικασία ζύγισης ληκύθου (α) άδεια (β) με το εδαφικό δοκίμιο



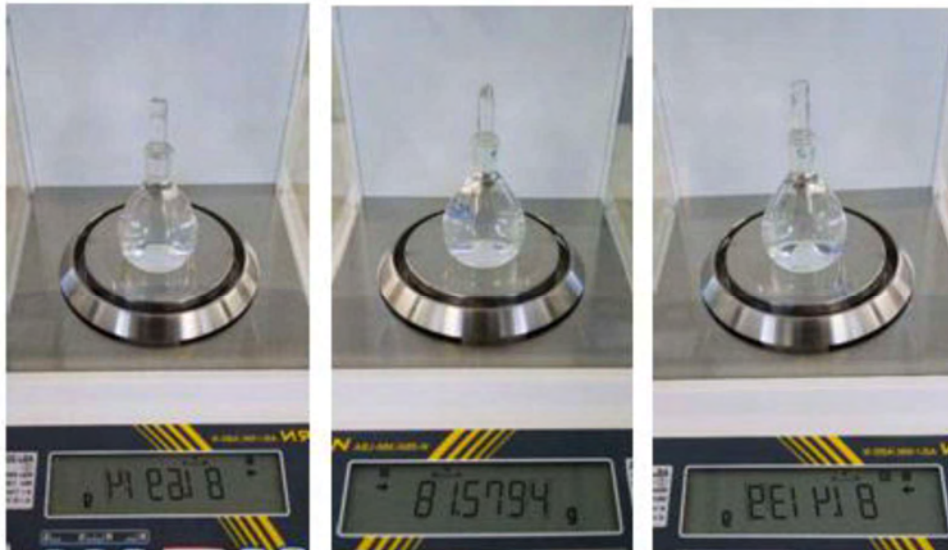
Σχήμα 5.9 Διαδικασία απαέρωσης νερού



Σχήμα 5.10 Γέμισμα ληκύθων με νερό



(α)



(β)

Σχήμα 5.11 Διαδικασία ζύγισης ληκύθων (α) με απαερωμένο νερό και εδαφικό υλικό (β) μόνο απαερωμένο νερό



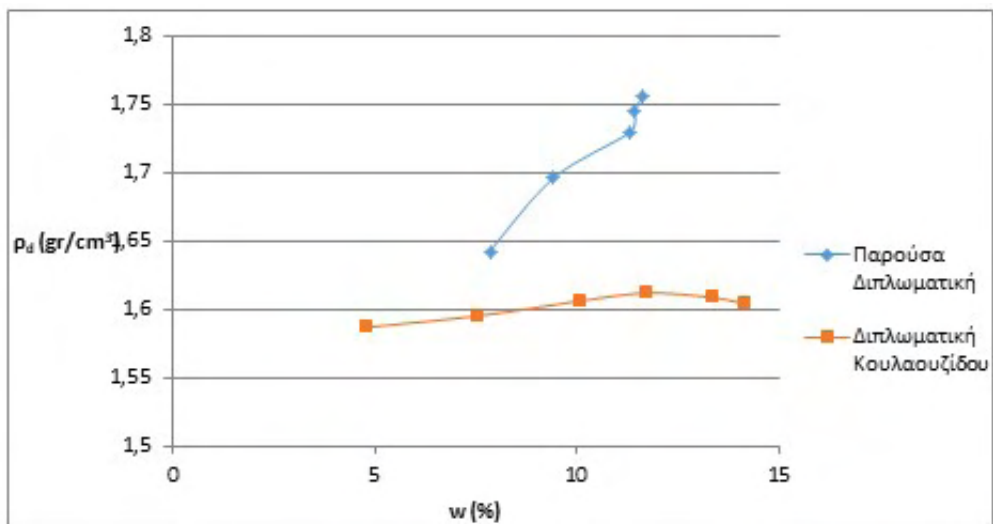
Σχήμα 5.12 Εξοπλισμός για τη δοκιμή Proctor



Σχήμα 5.13 Τοποθέτηση του εδαφικού δοκιμίου στη μήτρα Proctor



Σχήμα 5.14 Συμπύκνωση εδαφικού δοκιμίου με σφύρα στη δοκιμή Proctor



Σχήμα 5.15 Καμπύλες συμπίκνωσης Proctor

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα δοκιμών διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου, η βαθμονόμηση των μανομέτρων της συσκευής διαπερατότητας και ο σχεδιασμός των εδαφικών φίλτρων.

6.2 Βαθμονόμηση μανομέτρων και σύντομη περιγραφή της διαδικασίας

Στον Πίνακα 6.1 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης των τριών μανομέτρων. Εφαρμόζεται βαθμιαία αυξανόμενη πίεση (προσθήκη νερού), καταγράφεται η ένδειξη των μανομέτρων και προσδιορίζεται η σχέση μετρήσεων – πραγματικών πιέσεων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στα Σχήματα 6.1, 6.2, 6.3.

6.3. Σχεδιασμός και σύνθεση του εδαφικού φίλτρου

Ο υπολογισμός των ορίων της κοκκομετρικής καμπύλης του εδαφικού φίλτρου βασίζεται στην κοκκομετρική καμπύλη του εξεταζόμενου εδάφους. Τα 5 κριτήρια, ορίζουν μία διπλή ανισότητα, η οποία αποτελεί και όριο της κοκκομετρικής καμπύλης του φίλτρου. Κατά τα δύο πρώτα κριτήρια των Terzaghi & Peck (1967) ισχύει:

1^ο Κριτήριο

$$D_{15,F} > 4 D_{15,B} \Rightarrow \quad (6.1)$$

$$D_{15,F} > 4 \times 0.06 \Rightarrow$$

$$D_{15,F} > 0.24mm$$

2° Κριτήριο

$$D_{15,F} \leq 4 \times D_{85,B} \Rightarrow \quad (6.2)$$

$$D_{15,F} \leq 4 \times 0.43 \Rightarrow$$

$$D_{15,F} \leq 1.72 \text{ mm}$$

Τα επόμενα τρία κριτήρια κατά Lambe & Whitmann (1979) είναι τα εξής:

3° Κριτήριο

$$4 < \frac{D_{15,F}}{D_{15,B}} < 20 \Rightarrow \quad (6.3)$$

$$4 \times D_{15,B} < D_{15,F} < 20 \times D_{15,B} \Rightarrow$$

$$0.24 \text{ mm} < D_{15,F} < 1.2 \text{ mm}$$

4° Κριτήριο

$$D_{15,F} < 5 \times D_{85,B} \Rightarrow \quad (6.4)$$

$$D_{15} < 2.15 \text{ mm}$$

5° Κριτήριο

$$\frac{D_{50,F}}{D_{50,B}} < 25 \Rightarrow \quad (6.5)$$

$$D_{50,F} < 25 \times 0.32 \Rightarrow$$

$$D_{50,F} < 8 \text{ mm}$$

Με βάση τα αποτελέσματα των 5 κριτηρίων, ως όρια επιλέγονται αυτά των Terzaghi & Peck, καθώς αποτελούν τα περισσότερο αυστηρά όρια (μικρότερο εύρος καμπύλης). Αναλυτικότερα, αρχικά σχεδιάζονται παράλληλα στην κοκκομετρική καμπύλη του εξεταζόμενου εδάφους δύο καμπύλες στα όρια των Terzaghi και Peck, και στη συνέχεια η μέση κοκκομετρική καμπύλη εντός των ορίων, η οποία αποτελεί την καμπύλη του εδαφικού φίλτρου (Σχήμα 6.4). Βάσει της κοκκομετρικής καμπύλης του εδαφικού φίλτρου, στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζεται το ποσοστό του συγκρατούμενου ποσοστού ανά διάμετρο κόκκων, καθώς επίσης και οι αντίστοιχες απαιτούμενες ποσότητες των κόκκων για τη σύνθεση 1kg εδαφικού φίλτρου.

6.4. Αποτελέσματα δοκιμής σταθερού υδραυλικού φορτίου

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά δώδεκα δοκιμές σταθερού υδραυλικού φορτίου σε διαφορετικές τιμές του ΔH (μεταβάλλοντας τη θέση – ύψος της κυψέλης του δοκιμίου ή μεταβάλλοντας την παροχή με ρύθμιση της βάνας στο σωλήνα που συνδέει τη δεξαμενή του νερού με την κυψέλη του δοκιμίου) σε τρία διαφορετικά δοκίμια:

- Οι δοκιμές 1-5 πραγματοποιήθηκαν στο δοκίμιο με σχετική πυκνότητα $D_r=88\%$.
- Οι δοκιμές 6-7 πραγματοποιήθηκαν στο δοκίμιο με σχετική πυκνότητα $D_r=62\%$.
- Οι δοκιμές 8-12 πραγματοποιήθηκαν στο δοκίμιο με σχετική πυκνότητα $D_r=57\%$.

Στους Πίνακες 6.3, 6.4 και 6.5 παρουσιάζονται τα έντυπα με τα δεδομένα των δοκιμών διαπερατότητας σταθερού υδραυλικού φορτίου για τα δοκίμια με $D_r=88\%$, 62% και 57% αντίστοιχα

Για το σύνολο των δοκιμών, ο υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k , στη θερμοκρασία των 20°C (k_{20}) πραγματοποιήθηκε με δύο τρόπους:

- υπολογισμός της παροχής και της υδραυλικής κλίσης από τη μεταβολή του όγκου του νερού, ΔV , μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών στιγμών.
- υπολογισμός της παροχής και της υδραυλικής κλίσης από τη μεταβολή του όγκου του νερού, ΔV , από την αρχή της δοκιμής (αρχική τιμή των μανομέτρων).

Τα αποτελέσματα του συντελεστή διαπερατότητας (k_{20}) για το σύνολο των δοκιμών και για τους δύο τρόπους υπολογισμού παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.6 έως 6.29. Συγκεκριμένα,

οι Πίνακες 6.6 έως 6.15 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για το δοκίμιο με σχετική πυκνότητα $D_r=88\%$. Οι Πίνακες 6.16 έως 6.19 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για το δοκίμιο με σχετική πυκνότητα $D_r=62\%$. Οι Πίνακες 6.20 έως 6.29 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για το δοκίμιο με σχετική πυκνότητα $D_r=57\%$.

Στα Σχήματα 6.5 έως 6.28, παρουσιάζεται η μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , για το σύνολο των δοκιμών. Συγκεκριμένα, τα Σχήματα 6.5 έως 6.14 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για το δοκίμιο με σχετική πυκνότητα $D_r=88\%$. Τα Σχήματα 6.15 έως 6.18 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για το δοκίμιο με σχετική πυκνότητα $D_r=62\%$. Τα Σχήματα 6.19 έως 6.28 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για το δοκίμιο με σχετική πυκνότητα $D_r=57\%$. Ο υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας είναι αξιόπιστος στον τελικό κλάδο της καμπύλης μεταβολής $q - t$, όπου οι μεταβολές είναι μικρές και προσεγγίζει την ευθεία.

Σκόπιμη κρίνεται η γραφική απεικόνιση της μεταβολής του συντελεστή διαπερατότητας στη θερμοκρασία των 20°C , k_{20} , με την υδραυλική βαθμίδα, i , η οποία παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.29, 6.30 και 6.31 για τα δοκίμια με σχετική πυκνότητα $D_r=88\%$, 62% και 57% αντίστοιχα.

Πίνακας 6.1 Αποτελέσματα βαθμονόμησης μανομέτρων

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ		
H (cm)	ΔH (cm)	ΔV (ml)
1ο Μανόμετρο		
80.8	0	0
91.1	10.3	5
2ο μανόμετρο		
9.2	0	0
33.8	24.6	10
58.6	24.8	10
83.1	24.5	10
94.7	11.6	5
3ο μανόμετρο		
9.6	0	0
34.3	24.7	10
59.2	24.9	10
71.4	12.2	5
83.4	12	5
95	11.6	5

Πίνακας 6.2 Αναλογίες και ποσότητες για τη σύνθεση 1kg εδαφικού φίλτρου

Διάμετρος(mm)	Συγκρατούμενο Ποσοστό (%)	Βάρος(gr)
2 mm	12	120
2 mm - 1 mm	48	480
1mm - 0.85 mm	13	130
0.85 mm - 0.6 mm	11	110
0.6 mm - 0.425 mm	6	60
0.425 mm - 0.3 mm	3	30
0.3 mm - 0.15 mm	7	70

Πίνακας 6.3 Έντυπο δοκιμής διαπερατότητας για το δοκίμιο με $D_r=88\%$



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Τίτλος: Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής	Δοκιμή Προσδιορισμού του συντελεστή διαπερατότητας (Μέθοδος Σταθερού Υδραυλικού Φορτίου)
Ημερομηνία	11/06/2019
Περιγραφή εδάφους	85% M ₃₁ -15%D ₆
Κανονισμοί	ASTMD 2434 <input checked="" type="checkbox"/> BS <input type="checkbox"/>

ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕ ΚΥΨΕΛΗ

Εσωτερική διάμετρος D (mm)	75.8
Διατομή A (mm)	4512.6151
Αριθμός μανομέτρων	3(1,2,3)
Απόσταση μεταξύ διαδοχικών μανομέτρων (mm)	DS ₁₋₂ = 45.91 DS ₂₋₃ = 45.88

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

D _{max} – εδάφους (mm)	0.9
D _{min} – εδάφους (mm)	0.001
Για D _{sp} = 76mm, D _{max} – εδάφους = 2.00mm ASTM	
F.C. (%) ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ D < 75 μm (No 200)	15
maxF.C. (%)	ASTM (10%)
Ποσοστό (%) με D > 2mm	0
G _s	2.664
e _{min}	0.414
e _{max}	0.68796

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Ξηρή κατάσταση (αέρας) <input checked="" type="checkbox"/>	Υγρή κατάσταση <input type="checkbox"/>
Μέθοδος Κοσκίνων / Αφαίρεση (D _{max} < 2mm) <input type="checkbox"/>	Μέθοδος Τετραερισμού <input checked="" type="checkbox"/>
Αρχική ξηρή μάζα εδαφικού δείγματος M _d (gr)	2600
Αρχική μάζα χρησιμοποιημένου δείγματος M _{in} (gr)	ASTM (M _{in} ≈ 2 * M _{sp})

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (105°C)

Αριθμός υποδοχέα	2B
Μάζα υποδοχέα (gr)	48,47
Μάζα υποδοχέα + Εδαφικού δείγματος (gr)	97,01
Μάζα υποδοχέα + Ξηρού εδαφικού δείγματος (gr)	96,99
Υγρασία δείγματος w (%)	0,04

ΕΛΑΦΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

ΕΛΑΦΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ ΚΑΤΩ ΒΑΣΗΣ					
Πάχος Εδαφικού Φίλτρου (mm) Head)	(≈40mm)	43,46			
Χρήση χάρτινων φίλτρων	Άνω <input checked="" type="checkbox"/>		Κάτω <input checked="" type="checkbox"/>		
Πάχος χάρτινου φίλτρου (mm)	0,11				
Απόσταση μεταξύ της άνω βάσης του χάρτινου φίλτρου και της κορυφής της κυψέλης του δοκιμίου					
Μετρήσεις	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	M.O.
H _{in} (mm)	225,5	225,56	225,62	225,68	225,59
ΕΛΑΦΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ ΑΝΩ ΒΑΣΗΣ					
Πάχος Εδαφικού Φίλτρου (mm) Head)	(≈40mm)				
Χρήση χάρτινων φίλτρων	Άνω <input type="checkbox"/>		Κάτω <input checked="" type="checkbox"/>		
Πάχος χάρτινου φίλτρου (mm)	0,11				
Απόσταση μεταξύ της άνω βάσης του χάρτινου φίλτρου και της κορυφής της κυψέλης του δοκιμίου					
Μετρήσεις	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	M.O.
H _{fin} (mm)	57,6	57,5	57,62	58,1	57,71

ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Εναπόθεση με χωνί <input checked="" type="checkbox"/>	Στον αέρα <input type="checkbox"/>	Στο νερό <input type="checkbox"/>
Συμπύκνωση σε στρώσεις <input checked="" type="checkbox"/>	Ξηρή <input checked="" type="checkbox"/>	Με αρχική υγρασία <input type="checkbox"/>
Περιγραφή μέσου συμπύκνωσης	Ράβδος συμπύκνωσης	
Μάζα μέσου συμπύκνωσης (gr)	263,55	
Πάχος εδαφικής στρώσης (mm)	16,4	(ASTM, >15mm, D _{max} =1mm)
Μάζα εδαφικής στρώσης (gr)	100	
Αριθμός στρώσεων	14	
Αριθμός κτύπων ανά στρώση	25	
Μάζα δοκιμίου M _{sp} (gr) (M _{sp} =M _{in} -M _{est})	1400	
Υψος δοκιμίου H _{sp} (mm) Φίλτρου)	(H _{sp} =H _{in} -H _{fm} + Πάχος χάρτ.	167,77
Απόσταση άνω βάσης δοκιμίου από την έξοδο του άνω μανομέτρου (mm)	25	
Σημείωση στην κυψέλη το ύψος του δοκιμίου	<input checked="" type="checkbox"/>	

ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ASTM

(minimum 15 min)

Μέθοδος CO ₂ <input checked="" type="checkbox"/>	Ροή προς τα πάνω <input checked="" type="checkbox"/>	Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>	Διάρκεια :20 min
Μέθοδος Κενού <input type="checkbox"/>	Ροή προς τα πάνω <input type="checkbox"/>	Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>	Διάρκεια :
Εισροή αλαερομένου νερού	Ροή προς τα πάνω <input checked="" type="checkbox"/>	Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>	Όγκος νερού:3lt
Υψος δοκιμίου μετά τον κορεσμό H _{sat} (mm)	<u>167.77</u>		
Μεταβολή ύψους δοκιμίου κατά τον κορεσμό (ΔH _s =H _{sp} -H _{sat})	<u>0</u>		

ΔΟΚΙΜΗ:

Αριθμός δοκιμής	1
Ροή διαμέσου του εδάφους	Ροή προς τα πάνω <input type="checkbox"/> Ροή προς τα κάτω <input checked="" type="checkbox"/>
Ξηρή μάζα δοκιμίου M_d (gr) ($M_d = M_{sp}/(1+w)$)	1346.45
Αρχικό ύψος δοκιμίου H_{sat} (mm)	167.77
Τελικό ύψος δοκιμίου H_{fin} (mm)	167.77
$\Delta H = H_{sat} - H_{fin}$ (mm)	0
γ_d (kN/m ³)	26.64
e	0.4398
D_r	88.33

Πίνακας 6.4 Έντυπο δοκιμής διαπερατότητας για το δοκίμο με $D_r=62\%$



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Τίτλος: Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής	Δοκιμή Προσδιορισμού του συντελεστή διαπερατότητας (Μέθοδος Σταθερού Υδραυλικού Φορτίου)
Ημερομηνία	18/06/2019
Περιγραφή εδάφους	85% M ₃₁ -15%D ₆
Κανονισμοί	ASTMD 2434 <input checked="" type="checkbox"/> BS <input type="checkbox"/>

ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕ ΚΥΨΕΛΗ

Εσωτερική διάμετρος D (mm)	75.8
Διατομή A (mm)	4512.6151
Αριθμός μανομέτρων	3(1,2,3)
Απόσταση μεταξύ διαδοχικών μανομέτρων (mm)	DS ₁₋₂ = 45.91 DS ₂₋₃ = 45.88

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

D _{max} – εδάφους (mm)	0.9
D _{min} – εδάφους (mm)	0.001
Για D _{sp} = 76mm, D _{max} – εδάφους = 2.00mm ASTM	
F.C. (%) ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ D < 75 μm (No 200)	15
max F.C. (%)	ASTM (10%)
Ποσοστό (%) με D > 2mm	0
G _s	2.664
e _{min}	0.414
e _{max}	0.68796

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Ξηρή κατάσταση (αέρας) <input checked="" type="checkbox"/>	Υγρή κατάσταση <input type="checkbox"/>
Μέθοδος Κοσκίνων / Αφαίρεση (D _{max} < 2mm) <input type="checkbox"/>	Μέθοδος Τετραερισμού <input checked="" type="checkbox"/>
Αρχική ξηρή μάζα εδαφικού δείγματος M _d (gr)	2600
Αρχική μάζα χρησιμοποιημένου δείγματος M _{in} (gr)	ASTM (M _{in} ≈ 2 * M _{sp})

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (105°C)

Αριθμός υποδοχέα	2B
Μάζα υποδοχέα (gr)	48,47
Μάζα υποδοχέα + Εδαφικού δείγματος (gr)	94.01
Μάζα υποδοχέα + Ξηρού εδαφικού δείγματος (gr)	93.99
Υγρασία δείγματος w (%)	0,04

ΕΛΑΦΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

ΕΛΑΦΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ ΚΑΤΩ ΒΑΣΗΣ					
Πάχος Εδαφικού Φίλτρου (mm) Head)	(≈40mm	41.74			
Χρήση χάρτινων φίλτρων	Άνω <input checked="" type="checkbox"/>		Κάτω <input checked="" type="checkbox"/>		
Πάχος χάρτινου φίλτρου (mm)	0,11				
Απόσταση μεταξύ της άνω βάσης του χάρτινου φίλτρου και της κορυφής της κυψέλης του δοκιμίου					
Μετρήσεις	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	M.O.
H _{in} (mm)	228,22	228,2	227,86	228,06	228,09
ΕΛΑΦΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ ΑΝΩ ΒΑΣΗΣ					
Πάχος Εδαφικού Φίλτρου (mm) Head)	(≈40mm	41,73			
Χρήση χάρτινων φίλτρων	Άνω <input type="checkbox"/>		Κάτω <input checked="" type="checkbox"/>		
Πάχος χάρτινου φίλτρου (mm)	0,11				
Απόσταση μεταξύ της άνω βάσης του χάρτινου φίλτρου και της κορυφής της κυψέλης του δοκιμίου					
Μετρήσεις	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	M.O.
H _{fin} (mm)	65,72	66,28	65,76	66,22	66

ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

Εναπόθεση με χονί <input type="checkbox"/>	Στον αέρα <input type="checkbox"/>	Στο νερό <input type="checkbox"/>
Συμπύκνωση σε στρώσεις <input checked="" type="checkbox"/>	Ξηρή <input checked="" type="checkbox"/>	Με αρχική υγρασία <input type="checkbox"/>
Περιγραφή μέσου συμπύκνωσης	Ράβδος συμπύκνωσης	
Μάζα μέσου συμπύκνωσης (gr)	263,55	
Πάχος εδαφικής στρώσης (mm)	16	(ASTM, >15mm, D _{max} =1mm)
Μάζα εδαφικής στρώσης (gr)	100	
Αριθμός στρώσεων	13	
Αριθμός κτύπων ανά στρώση	5	
Μάζα δοκιμίου M _{sp} (gr) (M _{sp} =M _{in} -M _{rest})	1300	
Υψος δοκιμίου H _{sp} (mm) Φίλτρου)	(H _{sp} =H _{in} -H _{fm} + Πάχος χάρτ.	161,98
Απόσταση άνω βάσης δοκιμίου από την έξοδο του άνω μανομέτρου (mm)	20	
Σημείωση στην κυψέλη το ύψος του δοκιμίου	<input checked="" type="checkbox"/>	

ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ ASTM

(minimum 15min)

Μέθοδος CO ₂ <input checked="" type="checkbox"/>	Ροή προς τα πάνω <input checked="" type="checkbox"/> Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>	Διάρκεια :20 min
Μέθοδος Κενού <input type="checkbox"/>	Ροή προς τα πάνω <input type="checkbox"/> Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>	Διάρκεια :
Εισροή απαερομένου νερού	Ροή προς τα πάνω <input checked="" type="checkbox"/> Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>	Όγκος νερού:3lt
Ύψος δοκιμίου μετά τον κορεσμό H _{sat} (mm)	<u>161.98</u>	
Μεταβολή ύψους δοκιμίου κατά τον κορεσμό (ΔH _s =H _{sp} -H _{sat}) (mm)	<u>0</u>	

ΔΟΚΙΜΗ:

Αριθμός δοκιμής	6
Ροή διαμέσου του εδάφους	Ροή προς τα πάνω <input type="checkbox"/> Ροή προς τα κάτω <input checked="" type="checkbox"/>
Ξηρή μάζα δοκιμίου M _d (gr) (M _d = M _{sp} /(1+w))	1250
Αρχικό ύψος δοκιμίου H _{sat} (mm)	161.98
Τελικό ύψος δοκιμίου H _{fin} (mm)	161.98
ΔH= H _{sat} - H _{fin} (mm)	0
γ _d (kN/m ³)	24.64
e	0.4971
D _r	62.52

Πίνακας 6.5 Έντυπο δοκιμής διαπερατότητας για το δοκίμιο με $D_r=57\%$



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

+

Τίτλος: Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής	Δοκιμή Προσδιορισμού του συντελεστή διαπερατότητας (Μέθοδος Σταθερού Υδραυλικού Φορτίου)
Ημερομηνία	27/06/2019
Περιγραφή εδάφους	85% M_{31} -15% D_6
Κανονισμοί	ASTMD 2434 <input checked="" type="checkbox"/> BS <input type="checkbox"/>

ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕ ΚΥΨΕΛΗ

Εσωτερική διάμετρος D (mm)	75.8
Διατομή A (mm)	4512.6151
Αριθμός μανομέτρων	3(1,2,3)
Απόσταση μεταξύ διαδοχικών μανομέτρων (mm)	$DS_{1-2} = 45.91$ $DS_{2-3} = 45.88$

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

D_{max} - εδάφους (mm)	0.9
D_{min} - εδάφους (mm)	0.001
Για $D_{sp} = 76\text{mm}$, D_{max} - εδάφους = 2.00mm ASTM	
F.C. (%) ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ $D < 75 \mu\text{m}$ (No 200)	15
max F.C. (%)	ASTM (10%)
Ποσοστό (%) με $D > 2\text{mm}$	0
G_s	2.664
e_{min}	0.414
e_{max}	0.68796

ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

Ξηρή κατάσταση (αέρας) <input checked="" type="checkbox"/>	Υγρή κατάσταση <input type="checkbox"/>
Μέθοδος Κοσκίνων / Αφαίρεση ($D_{max} < 2\text{mm}$) <input type="checkbox"/>	Μέθοδος Τετραερισμού <input checked="" type="checkbox"/>
Αρχική ξηρή μάζα εδαφικού δείγματος M_d (gr)	2600
Αρχική μάζα χρησιμοποιημένου δείγματος M_{in} (gr)	ASTM ($M_{in} \approx 2 * M_{sp}$)

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (105°C)

Αριθμός υποδοχέα	2B
Μάζα υποδοχέα (gr)	48.47
Μάζα υποδοχέα + Εδαφικού δείγματος (gr)	90.01
Μάζα υποδοχέα + Ξηρού εδαφικού δείγματος (gr)	89.99
Υγρασία δείγματος w (%)	0,04

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (105°C)

Αριθμός υποδογέα	2B
Μάζα υποδογέα (gr)	48,47
Μάζα υποδογέα + Εδαφικού δείγματος (gr)	90.01
Μάζα υποδογέα + Ξηρού εδαφικού δείγματος (gr)	89.99
Υγρασία δείγματος w (%)	0,04

ΕΛΑΦΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ

ΕΛΑΦΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ ΚΑΤΩ ΒΑΣΗΣ					
Πάχος Εδαφικού Φίλτρου (mm) Head)	(≈40mm)	41.94			
Χρήση χάρτινων φίλτρων	Άνω <input checked="" type="checkbox"/>	Κάτω <input checked="" type="checkbox"/>			
Πάχος χάρτινου φίλτρου (mm)	0,11				
Απόσταση μεταξύ της άνω βάσης του χάρτινου φίλτρου και της κορυφής της κυψέλης του δοκιμίου					
Μετρήσεις	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	M.O.
H _{in} (mm)	227,02	227,08	227,16	227,16	227,11
ΕΛΑΦΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ ΑΝΩ ΒΑΣΗΣ					
Πάχος Εδαφικού Φίλτρου (mm) Head)	(≈40mm)	39,52			
Χρήση χάρτινων φίλτρων	Άνω <input type="checkbox"/>	Κάτω <input checked="" type="checkbox"/>			
Πάχος χάρτινου φίλτρου (mm)	0,11				
Απόσταση μεταξύ της άνω βάσης του χάρτινου φίλτρου και της κορυφής της κυψέλης του δοκιμίου					
Μετρήσεις	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	M.O.
H _{fin} (mm)	64,24	63,7	63,8	63,3	63,76

ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΟΥ

Εναπόθεση με χωνί <input type="checkbox"/>	Στον αέρα <input type="checkbox"/>	Στο νερό <input type="checkbox"/>
Συμπύκνωση σε στρώσεις <input type="checkbox"/>	Ξηρή <input type="checkbox"/>	Με αρχική υγρασία <input type="checkbox"/>
Περιγραφή μέσου συμπύκνωσης	Καμία Συμπύκνωση	
Μάζα μέσου συμπύκνωσης (gr)	0	
Πάχος εδαφικής στρώσης (mm)	16,1	(ASTM, >15mm, D _{max} =1mm)
Μάζα εδαφικής στρώσης (gr)	200,100	
Αριθμός στρώσεων	6 x 200 & 1 x 100	
Αριθμός κτύπων ανά στρώση	0	
Μάζα δοκιμίου M _{sp} (gr) (M _{sp} =M _{in} -M _{test})	1300	
Ύψος δοκιμίου H _{sp} (mm) Φίλτρου)	(H _{sp} =H _{in} -H _{fin} + Πάχος χάρτ.	163,24
Απόσταση άνω βάσης δοκιμίου από την έξοδο του άνω μανομέτρου (mm)	23	
Σημείωση στην κυψέλη το ύψος του δοκιμίου	<input checked="" type="checkbox"/>	

ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ _____ASTM

(minimum 15min)

Μέθοδος CO ₂ <input checked="" type="checkbox"/>	Ροή προς τα πάνω <input checked="" type="checkbox"/> Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>	Διάρκεια :20 min
Μέθοδος Κενού <input type="checkbox"/>	Ροή προς τα πάνω <input type="checkbox"/> Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>	Διάρκεια :
Εισροή απαερομένου νερού	Ροή προς τα πάνω <input checked="" type="checkbox"/> Ροή προς τα κάτω <input type="checkbox"/>	Όγκος νερού:3lt
Ύψος δοκιμίου μετά τον κορεσμό H _{sat} (mm)	163.24	
Μεταβολή ύψους δοκιμίου κατά τον κορεσμό (ΔH _s =H _{sp} -H _{sat}) (mm)	0	

+

ΔΟΚΙΜΗ:

Αριθμός δοκιμής	8
Ροή διαμέσου του εδάφους	Ροή προς τα πάνω <input type="checkbox"/> Ροή προς τα κάτω <input checked="" type="checkbox"/>
Ξηρή μάζα δοκιμίου M _d (gr) (M _d = M _{sp} /(1+w))	1250
Αρχικό ύψος δοκιμίου H _{sat} (mm)	163.24
Τελικό ύψος δοκιμίου H _{fin} (mm)	163.24
ΔH= H _{sat} - H _{fin} (mm)	0
γ _d (kN/m ³)	26.64
e	0.5088
D _r	57.27

Πίνακας 6.6 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (α) για την 1^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_f=88\%$

1η δοκιμή:				Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή										
Ύψος κυψέλης :				269.2		$\Delta s(\text{mm})$		45.91	45.88	A	4512.62	mm^2	0.00451262	m^2
t (s)	MANOMETRA			ΔH_{1-2} (mm)	ΔH_{2-3} (mm)	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s)	T (°C)		
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)											
0	177	10		167	10	3.64	0.22	1.93	0	0	0	26		
60	177	10		167	10	3.64	0.22	1.93	30	0.50	0.00051	26		
120	179	5		174	5	3.79	0.11	1.95	58	0.47	0.00095	26		
180	180	3		177	3	3.86	0.07	1.96	90	0.53	0.00181	26		
240	182	4		178	4	3.88	0.09	1.98	117	0.45	0.00114	26		
300	185	9		176	9	3.83	0.20	2.01	146	0.48	0.00055	26		
360	190	15		175	15	3.81	0.33	2.07	164	0.30	0.00020	26		
420	199	27		172	27	3.75	0.59	2.17	198	0.57	0.00021	26		
480	206	45		161	45	3.51	0.98	2.24	215	0.28	0.00006	26		
540	211	54		157	54	3.42	1.18	2.30	247	0.53	0.00010	26		
600	214	67		147	67	3.20	1.46	2.33	275	0.47	0.00007	26		
M.O.	600	191	23	168	23	3.665	0.493	2.079	275	0.46	0.00005	26		
									$\eta T/\eta_{20} =$	0.875	$k_{20} =$	0.00004		

Πίνακας 6.7 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (β) για την 1^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_f=88\%$

Υπολογισμός k, με ΔV σε σχέση με αρχική τιμή	
$q_{20}(\text{ml/s})$	$k_{20}(\text{m/s})$
0	0
0.5	2.66527E-05
0.4833333333	2.47277E-05
0.5	2.51469E-05
0.4875	2.43804E-05
0.486666667	2.46153E-05
0.455555556	2.31734E-05
0.471428571	2.43991E-05
0.447916667	2.47661E-05
0.457407407	2.59353E-05
0.458333333	2.77556E-05
M.O.	2.51553E-05

Πίνακας 6.8 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (α) για τη 2^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=88\%$

2η δοκιμή:				Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή										
Ύψος κυνέλης :				269.2		Δs (mm)		45.91	45.88	A	4512.62	mm ²	0.00451262	m ²
t (s)	MANOMETRA			ΔH_{1-2} (mm)	ΔH_{2-3} (mm)	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s)	T (°C)		
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)											
0	423	219	44	204	175	4.44	3.81	4.13	0	0	0	26		
60	423	219	44	204	175	4.44	3.81	4.13	30	0.50	0.00003	26		
120	430	229	48	201	181	4.38	3.95	4.16	63	0.55	0.00003	26		
180	433	234	52	199	182	4.33	3.97	4.15	94	0.52	0.00003	26		
240	437	244	67	193	177	4.20	3.86	4.03	123	0.48	0.00003	26		
300	445	260	92	185	168	4.03	3.66	3.85	151	0.47	0.00003	26		
360	448	264	96	184	168	4.01	3.66	3.83	179	0.47	0.00003	26		
420	450	268	100	182	168	3.96	3.66	3.81	208	0.48	0.00003	26		
480	453	275	114	178	161	3.88	3.51	3.69	236	0.47	0.00003	26		
540	458	282	116	176	166	3.83	3.62	3.73	267	0.52	0.00003	26		
600	455	272	99	183	173	3.99	3.77	3.88	297	0.50	0.00003	26		
M.O.	600	441	251	79	190	172	4.137	3.759	3.948	297	0.50	0.00003	26	
									$\eta T/\eta_{20} =$	0.875	$\kappa_{20} =$	0.00002		

Πίνακας 6.9 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (β) για τη 2^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=88\%$

Υπολογισμός k, με ΔV σε σχέση με αρχική τιμή	
q_{20} (ml/s)	k_{20} (m/s)
0	0
0.590909091	2.3481E-05
0.541666667	2.44612E-05
0.5	2.43956E-05
0.388059701	2.46532E-05
0.282608696	2.53783E-05
0.270833333	2.51414E-05
0.26	2.51841E-05
0.228070175	2.58139E-05
0.224137931	2.57318E-05
0.262626263	2.47477E-05
M.O.	2.48988E-05

Πίνακας 6.10 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (α) για την 3^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=88\%$

3η δοκιμή:		Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή											
Ύψος κυψέλης :		269.2			$\Delta s(\text{mm})$		45.91	45.88	A	4512.62 mm^2		0.00451262	m^2
t (s)	MANOMETRA			$\Delta H_{1-2}(\text{mm})$	$\Delta H_{2-3}(\text{mm})$	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s)	T ($^{\circ}\text{C}$)	
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)										
0	807	539	287	268	252	5.84	5.49	5.67	0	0	0	26	
60	807	539	287	268	252	5.84	5.49	5.67	44	0.73	0.00003	26	
120	810	544	289	266	255	5.79	5.56	5.68	86	0.70	0.00003	26	
180	813	545	291	268	254	5.84	5.54	5.69	128	0.70	0.00003	26	
240	814	545	291	269	254	5.86	5.54	5.70	174	0.77	0.00003	26	
300	815	546	290	269	256	5.86	5.58	5.72	217	0.72	0.00003	26	
360	814	541	281	273	260	5.95	5.67	5.81	270	0.88	0.00003	26	
420	823	563	324	260	239	5.66	5.21	5.44	300	0.50	0.00002	26	
480	830	577	346	253	231	5.51	5.03	5.27	341	0.68	0.00003	26	
540	836	510	368	326	142	7.10	3.10	5.10	380	0.65	0.00005	26	
600	839	596	369	243	227	5.29	4.95	5.12	417	0.62	0.00003	26	
M.O.	600	819	550	311	269	238	5.867	5.195	5.531	417	0.70	0.00003	26
									$\eta T/\eta_{20} =$	0.875	$k_{20} =$	0.00002	

Πίνακας 6.11 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (β) για την 3^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=88\%$

Υπολογισμός k, με ΔV σε σχέση με αρχική τιμή	
$q_{20}(\text{ml/s})$	$k_{20}(\text{m/s})$
0	0
0.733333333	2.51002E-05
0.716666667	2.44826E-05
0.711111111	2.42463E-05
0.725	2.46726E-05
0.723333333	2.45221E-05
0.75	2.50445E-05
0.714285714	2.54772E-05
0.710416667	2.61246E-05
0.703703704	2.67655E-05
0.695	2.63188E-05
M.O.	2.52755E-05

Πίνακας 6.12 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (α) για την 4^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=88\%$

4η δοκιμή:				Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή										
Ύψος κυψέλης :				269.2		$\Delta s(\text{mm})$		45.91	45.88	A	4512.62	mm^2	0.00451262	m^2
t (s)	MANOMETRA			ΔH_{1-2} (mm)	ΔH_{2-3} (mm)	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s)	T (°C)		
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)											
0	926	639	374	287	265	6.25	5.78	6.01	0	0	0	25		
60	926	639	374	287	265	6.25	5.78	6.01	40	0.67	0.00003	25		
120	927	639	374	288	265	6.27	5.78	6.02	90	0.83	0.00003	25		
180	926	644	374	282	270	6.14	5.88	6.01	138	0.80	0.00003	25		
240	927	644	374	283	270	6.16	5.88	6.02	181	0.72	0.00003	25		
300	927	646	384	281	262	6.12	5.71	5.92	226	0.75	0.00003	25		
360	930	653	389	277	264	6.03	5.75	5.89	270	0.73	0.00003	25		
420	932	651	394	281	257	6.12	5.60	5.86	315	0.75	0.00003	25		
480	933	653	394	280	259	6.10	5.65	5.87	358	0.72	0.00003	25		
540	934	653	394	281	259	6.12	5.65	5.88	400	0.70	0.00003	25		
600	935	659	396	276	263	6.01	5.73	5.87	443	0.72	0.00003	25		
M.O.	600	929	647	384	282	264	6.144	5.744	5.944	443	0.74	0.00003	25	
									$\eta T/\eta_{20} =$	0.9	$\kappa_{20} =$	0.00002		

Πίνακας 6.13 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (β) για την 4^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=88\%$

Υπολογισμός k, με ΔV σε σχέση με αρχική τιμή	
$q_{20}(\text{ml/s})$	$k_{20}(\text{m/s})$
0	0
0.666666667	2.21098E-05
0.75	2.48286E-05
0.766666667	2.54261E-05
0.754166667	2.49664E-05
0.753333333	2.53981E-05
0.75	2.53791E-05
0.75	2.55208E-05
0.745833333	2.53319E-05
0.740740741	2.51124E-05
0.738333333	2.50771E-05
M.O.	2.49150E-05

Πίνακας 6.14 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (α) για την 5^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=88\%$

5η δοκιμή:		Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή											
Ύψος κυψέλης :		269.2			$\Delta s(\text{mm})$		45.91	45.88	A	4512.62	mm^2	0.0045126	m^2
t (s)	MANOMETRA			ΔH_{1-2} (mm)	ΔH_{2-3} (mm)	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s)	T (°C)	
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)										
0	946	682	682	264	0	5.75	0.00	2.88	0	0		25	
60	946	682	682	264	0	5.75	0.00	2.88	42	0.70	0.00005	25	
120	946	681	681	265	0	5.77	0.00	2.89	84	0.70	0.00005	25	
180	946	679	679	267	0	5.82	0.00	2.91	126	0.70	0.00005	25	
240	947	680	680	267	0	5.82	0.00	2.91	168	0.70	0.00005	25	
300	947	680	680	267	0	5.82	0.00	2.91	210	0.70	0.00005	25	
357	948	681	681	267	0	5.82	0.00	2.91	250	0.70	0.00005	25	
420	952	688	688	264	0	5.75	0.00	2.88	295	0.71	0.00006	25	
480	954	692	692	262	0	5.71	0.00	2.85	335	0.67	0.00005	25	
540	955	694	694	261	0	5.69	0.00	2.84	374	0.65	0.00005	25	
600	955	695	695	260	0	5.66	0.00	2.83	415	0.68	0.00005	25	
M.O.	600	949	685	685	264	0	5.758	0.000	2.879	415	0.69	0.00005	25
									$\eta T/\eta_{20} =$	0.9	$\kappa_{20} =$	0.000048	

Πίνακας 6.15 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (β) για την 5^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=88\%$

Υπολογισμός k, με ΔV σε σχέση με αρχική τιμή	
$q_{20}(\text{ml/s})$	$k_{20}(\text{m/s})$
0	0
0.7	2.42782E-05
0.7	2.41865E-05
0.7	2.40054E-05
0.7	2.40054E-05
0.7	2.40054E-05
0.700280112	2.4015E-05
0.702380952	2.43607E-05
0.697916667	2.43907E-05
0.692592593	2.42973E-05
0.691666667	2.43582E-05
M.O.	2.41903E-05

Πίνακας 6.16 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (α) για την 6^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=88\%$

6η δοκιμή:		Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή											
Ύψος κυψέλης :		269.2			$\Delta s(\text{mm})$		45.91	45.88	A	4512.62	mm^2	0.00451	m^2
t (s)	MANOMETRA			$\Delta H_{1-2}(\text{mm})$	$\Delta H_{2-3}(\text{mm})$	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s)	T (°C)	
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)										
0	249	159	92	90	67	1.96	1.46	1.71	0	0		25	
60	273	183	114	90	69	1.96	1.50	1.73	28	0.47	0.00006	25	
120	272	183	109	89	74	1.94	1.61	1.78	36	0.13	0.00002	25	
180	273	184	109	89	75	1.94	1.63	1.79	55	0.32	0.00004	25	
240	273	184	109	89	75	1.94	1.63	1.79	73	0.30	0.00004	25	
300	274	183	107	91	76	1.98	1.66	1.82	92	0.32	0.00004	25	
360	273	184	108	89	76	1.94	1.66	1.80	110	0.30	0.00004	25	
420	282	194	122	88	72	1.92	1.57	1.74	125	0.25	0.00003	25	
480	284	195	123	89	72	1.94	1.57	1.75	148	0.38	0.00005	25	
540	285	197	124	88	73	1.92	1.59	1.75	165	0.28	0.00004	25	
600	285	197	124	88	73	1.92	1.59	1.75	185	0.33	0.00004	25	
M.O.	600	275	186	113	89	73	1.941	1.589	1.765	185	0.31	0.00004	25
									$\eta T/\eta_{20} =$	0.9	$\kappa_{20} =$	0.000035	

Πίνακας 6.17 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (β) για την 6^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=88\%$

Υπολογισμός k, με ΔV σε σχέση με αρχική τιμή	
$q_{20}(\text{ml/s})$	$k_{20}(\text{m/s})$
0	0
0.466666667	5.37326E-05
0.3	3.36943E-05
0.305555556	3.41089E-05
0.304166667	3.39539E-05
0.306666667	3.3618E-05
0.305555556	3.39021E-05
0.297619048	3.40537E-05
0.308333333	3.50606E-05
0.305555556	3.47446E-05
0.308333333	3.50604E-05
M.O.	3.61929E-05

Πίνακας 6.18 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (α) για την 7^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=62\%$

7η δοκιμή:		Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή											
Ύψος κυψέλης :		269.2			$\Delta s(\text{mm})$		45.91	45.88	A	4512.62	mm^2	0.00451	m^2
t (s)	MANOMETRA			ΔH_{1-2} (mm)	ΔH_{2-3} (mm)	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s)	T (°C)	
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)										
0	485	342	238	143	104	3.11	2.27	2.69	0	0		25	
60	485	342	238	143	104	3.11	2.27	2.69	30	0.50	0.00004	25	
120	553	398	300	155	98	3.38	2.14	2.76	57	0.45	0.00004	25	
180	588	455	332	133	123	2.90	2.68	2.79	86	0.48	0.00004	25	
240	609	462	348	147	114	3.20	2.48	2.84	116.5	0.51	0.00004	25	
300	617	472	352	145	120	3.16	2.62	2.89	148	0.53	0.00004	25	
360	620	483	360	137	123	2.98	2.68	2.83	178	0.50	0.00004	25	
420	629	486	363	143	123	3.11	2.68	2.90	212	0.57	0.00004	25	
480	632	490	363	142	127	3.09	2.77	2.93	243	0.52	0.00004	25	
M.O.	480	580	437	322	143	115	3.117	2.509	2.813	243	0.51	0.00004	25
									$\eta T/\eta_{20} =$	0.9	$\kappa_{20} =$	0.000036	

Πίνακας 6.19 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (β) για την 7^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=62\%$

Υπολογισμός k, με ΔV σε σχέση με αρχική τιμή	
$q_{20}(\text{ml/s})$	$k_{20}(\text{m/s})$
0	0
0.5	3.706E-05
0.475	3.43728E-05
0.477777778	3.41665E-05
0.485416667	3.40488E-05
0.493333333	3.40814E-05
0.494444444	3.48146E-05
0.504761905	3.47396E-05
0.50625	3.44533E-05
M.O.	3.47171E-05

Πίνακας 6.20 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (α) για την 8^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=57\%$

8η δοκιμή:		Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή											
Ύψος κυψέλης :		269.2			Δs (mm)		45.91	45.88	A	4512.62	mm ²	0.00451	m ²
t (s)	MANOMETRA			ΔH_{1-2} (mm)	ΔH_{2-3} (mm)	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s)	T (°C)	
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)										
0	424	283	145	141	138	3.07	3.01	3.04	0	0		26	
60	426	286	148	140	138	3.05	3.01	3.03	40	0.67	0.00005	26	
120	427	287	147	140	140	3.05	3.05	3.05	85	0.75	0.00005	26	
180	426	286	146	140	140	3.05	3.05	3.05	130	0.75	0.00005	26	
240	426	285	144	141	141	3.07	3.07	3.07	176	0.77	0.00006	26	
300	426	284	143	142	141	3.09	3.07	3.08	220	0.73	0.00005	26	
360	446	316	188	130	128	2.83	2.79	2.81	260	0.67	0.00005	26	
420	464	334	205	130	129	2.83	2.81	2.82	300	0.67	0.00005	26	
480	473	344	214	129	130	2.81	2.83	2.82	340	0.67	0.00005	26	
540	478	348	220	130	128	2.83	2.79	2.81	370	0.50	0.00004	26	
600	482	354	224	128	130	2.79	2.83	2.81	415	0.75	0.00006	26	
M.O.	600	445	310	175	136	135	2.952	2.938	2.945	415	0.69	0.00005	26
										$\eta T/\eta_{20} =$	0.875	$\kappa_{20} =$	0.000046

Πίνακας 6.21 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (β) για την 8^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=57\%$

Υπολογισμός k, με ΔV σε σχέση με αρχική τιμή	
q_{20} (ml/s)	k_{20} (m/s)
0	0
0.666666667	4.26815E-05
0.708333333	4.50251E-05
0.722222222	4.59079E-05
0.733333333	4.62836E-05
0.733333333	4.61201E-05
0.722222222	4.98227E-05
0.714285714	4.90849E-05
0.708333333	4.86757E-05
0.685185185	4.72677E-05
0.691666667	4.77146E-05
M.O.	4.68584E-05

Πίνακας 6.22 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (α) για την 9^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=57\%$

9η δοκιμή:		Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή											
Ύψος κυψέλης :		269.2			$\Delta s(\text{mm})$		45.91	45.88	A	4512.62	mm^2	0.004512615	m^2
t (s)	MANOMETRA			ΔH_{1-2} (mm)	ΔH_{2-3} (mm)	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s)	T (°C)	
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)										
240	254	173	92	81	81	1.76	1.77	1.76	100	0	0	26	
300	254	173	92	81	81	1.76	1.77	1.76	125	0.42	0.00005	26	
360	254	173	91	81	82	1.76	1.79	1.78	150	0.42	0.00005	26	
420	254	173	92	81	81	1.76	1.77	1.76	175	0.42	0.00005	26	
480	254	173	92	81	81	1.76	1.77	1.76	200	0.42	0.00005	26	
540	254	173	92	81	81	1.76	1.77	1.76	225	0.42	0.00005	26	
600	254	173	92	81	81	1.76	1.77	1.76	250	0.42	0.00005	26	
M.O.	600	254	173	92	81	81	1.764	1.769	1.766	150	0.25	0.00003	26
									$\eta T/\eta_{20} =$	0.875	$k_{20} =$	0.000027	

Πίνακας 6.23 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (β) για την 9^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=57\%$

Υπολογισμός k , με ΔV σε σχέση με αρχική τιμή	
$q_{20}(\text{ml/s})$	$k_{20}(\text{m/s})$
0	0
0.416666667	4.57772E-05
0.416666667	4.54962E-05
0.416666667	4.57772E-05
0.416666667	4.57772E-05
0.416666667	4.57772E-05
0.416666667	4.57772E-05
M.O.	3.91974E-05

Πίνακας 6.24 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (α) για τη 10^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_f=57\%$

10η δοκιμή:				Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή										
Ύψος κυψέλης :				269.2		$\Delta s(mm)$		45.91	45.88	A	4512.62	mm ²	0.00451	m ²
t (s)	MANOMETRA			$\Delta H_{1-2} (mm)$	$\Delta H_{2-3} (mm)$	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s)	T (°C)		
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)											
0	344	273	200	71	73	1.55	1.59	1.57	325	0		26		
60	348	277	204	71	73	1.55	1.59	1.57	350	0.42	0.00006	26		
120	350	278	205	72	73	1.57	1.59	1.58	368	0.30	0.00004	26		
180	352	278	205	74	73	1.61	1.59	1.60	395	0.45	0.00006	26		
240	352	278	206	74	72	1.61	1.57	1.59	415	0.33	0.00005	26		
300	352	280	206	72	74	1.57	1.61	1.59	440	0.42	0.00006	26		
360	354	280	206	74	74	1.61	1.61	1.61	460	0.33	0.00005	26		
420	352	280	206	72	74	1.57	1.61	1.59	490	0.50	0.00007	26		
480	352	280	205	72	75	1.57	1.63	1.60	510	0.33	0.00005	26		
540	353	280	206	73	74	1.59	1.61	1.60	530	0.33	0.00005	26		
600	352	280	207	72	73	1.57	1.59	1.58	550	0.33	0.00005	26		
M.O.	600	351	279	205	72	73	1.578	1.601	1.590	225	0.38	0.00005	26	
										$\eta T/\eta_{20} =$	0.875	$k_{20} =$	0.000046	

Πίνακας 6.25 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (β) για τη 10^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_f=57\%$

Υπολογισμός k, με ΔV σε σχέση με αρχική τιμή	
$q_{20}(ml/s)$	$k_{20}(m/s)$
0	0
0.416666667	5.14991E-05
0.358333333	4.39839E-05
0.388888889	4.70852E-05
0.375	4.57147E-05
0.383333333	4.67301E-05
0.375	4.50967E-05
0.392857143	4.78911E-05
0.385416667	4.66644E-05
0.37962963	4.59639E-05
0.375	4.60296E-05
M.O.	4.66659E-05

Πίνακας 6.26 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (α) για την 11^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=57\%$

11η δοκιμή:		Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή											
Ύψος κυψέλης :		269.2			$\Delta s(\text{mm})$		45.91	45.88	A	4512.62	mm^2	0.00451	m^2
t (s)	MANOMETRA			ΔH_{1-2} (mm)	ΔH_{2-3} (mm)	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s)	T (°C)	
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)										
0	356	341	323	15	18	0.33	0.39	0.36	850	0		26	
60	357	341	323	16	18	0.35	0.39	0.37	865	0.25	0.00015	26	
120	357	339	322	18	17	0.39	0.37	0.38	872	0.12	0.00007	26	
180	357	339	322	18	17	0.39	0.37	0.38	878	0.10	0.00006	26	
240	357	339	322	18	17	0.39	0.37	0.38	883	0.08	0.00005	26	
300	357	338	320	19	18	0.41	0.39	0.40	888	0.08	0.00005	26	
360	356	338	320	18	18	0.39	0.39	0.39	895	0.12	0.00007	26	
420	356	337	320	19	17	0.41	0.37	0.39	901	0.10	0.00006	26	
480	356	338	320	18	18	0.39	0.39	0.39	906	0.08	0.00005	26	
540	356	337	319	19	18	0.41	0.39	0.40	911	0.08	0.00005	26	
600	356	337	319	19	18	0.41	0.39	0.40	917	0.10	0.00005	26	
M.O.	600	356	339	321	18	18	0.390	0.384	0.387	67	0.11	0.00006	26
									$\eta T/\eta_{20} =$	0.875	$\kappa_{20} =$	0.000056	

Πίνακας 6.27 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (β) για την 11^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=57\%$

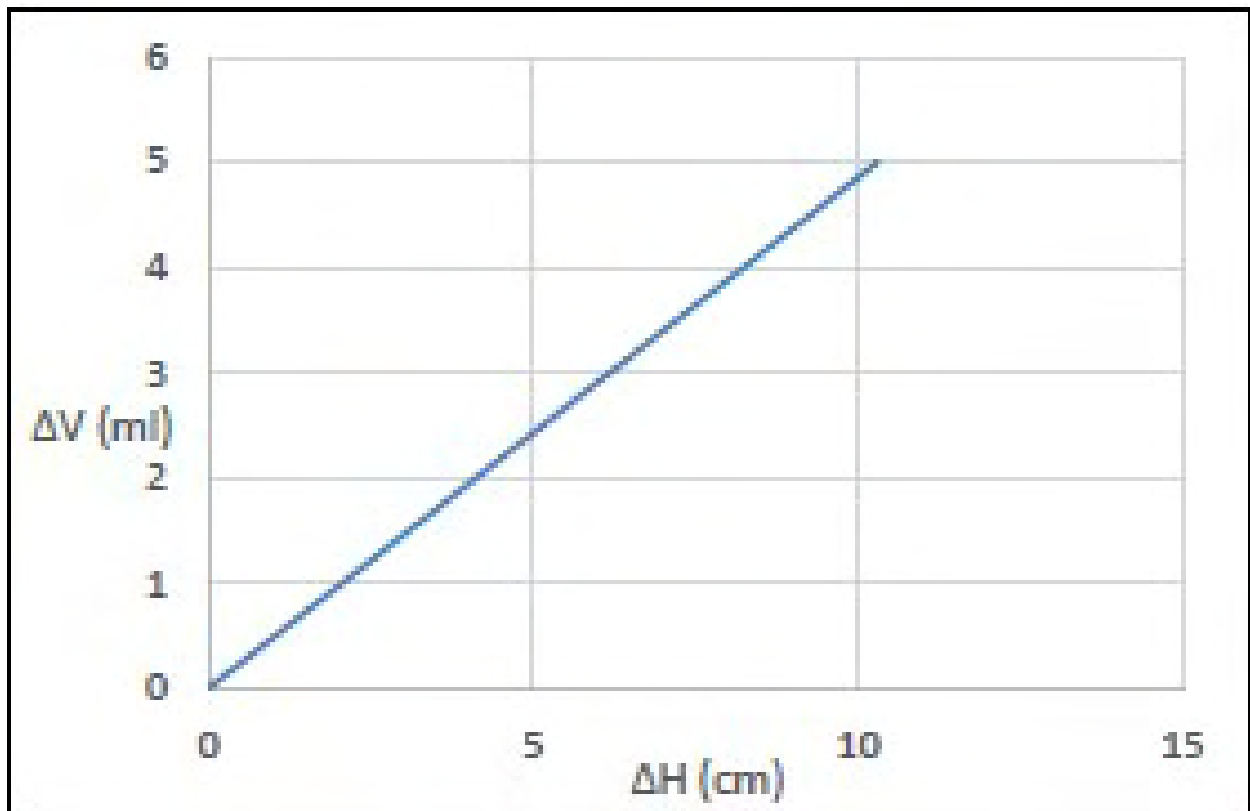
Υπολογισμός k, με ΔV σε σχέση με αρχική τιμή	
$q_{20}(\text{ml/s})$	$k_{20}(\text{m/s})$
0	0
0.25	0.000130866
0.183333333	9.32293E-05
0.155555556	7.91037E-05
0.1375	6.9922E-05
0.126666667	6.09312E-05
0.125	6.17992E-05
0.121428571	6.00346E-05
0.116666667	5.76792E-05
0.112962963	5.43392E-05
0.111666667	5.37156E-05
M.O.	7.21620E-05

Πίνακας 6.28 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (α) για τη 12^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_f=57\%$

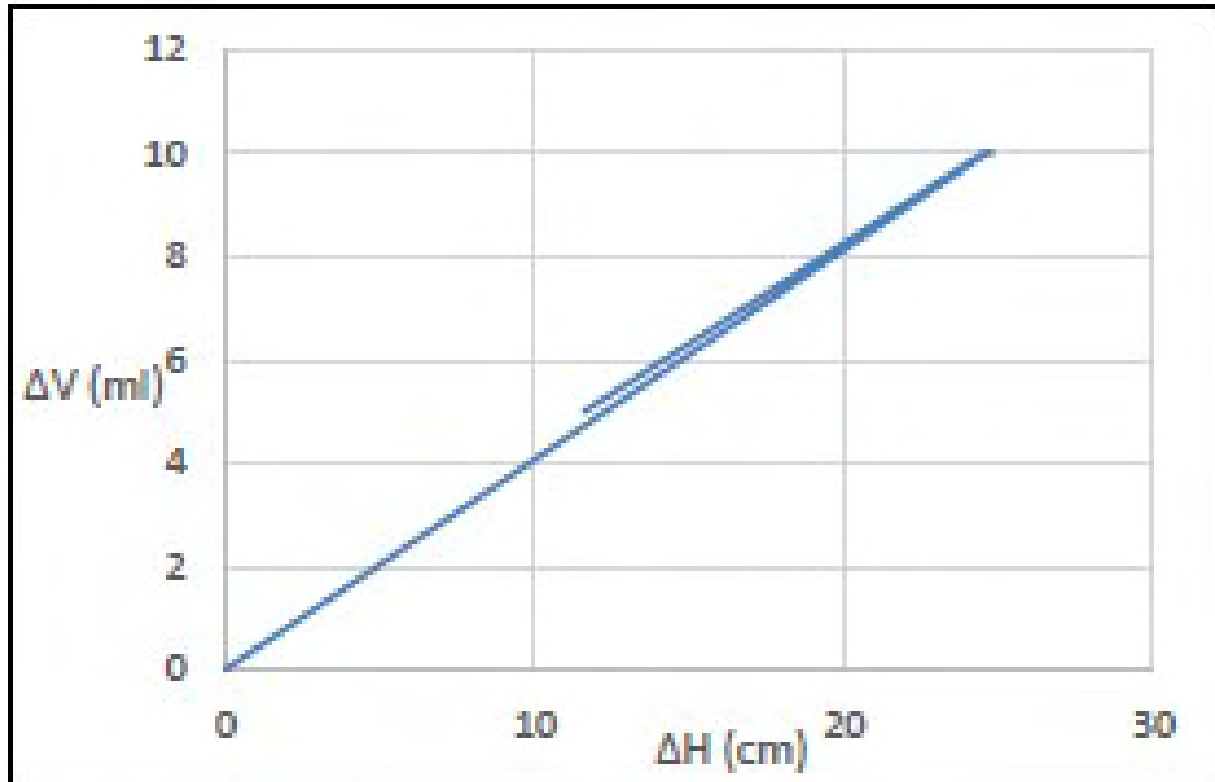
12η δοκιμή:		Υπολογισμός συντελεστή διαπερατότητας, με ΔV σε σχέση με την ακριβώς προηγούμενη τιμή											
Ύψος κυψέλης :		269.2			$\Delta s(\text{mm})$		45.91	45.88	A	4512.62	mm^2	0.00451262	m^2
t (s)	MANOMETRA			ΔH_{1-2} (mm)	ΔH_{2-3} (mm)	i_{1-2}	i_{2-3}	i^*	V (ml)	q (ml/s)	k (m/s)	T (°C)	
	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)										
0	333	318	307	15	11	0.33	0.24	0.28	515	0		26	
60	325	317	307	8	10	0.17	0.22	0.20	518	0.05	0.00006	26	
120	323	315	307	8	8	0.17	0.17	0.17	520	0.03	0.00004	26	
180	321	314	308	7	6	0.15	0.13	0.14	522	0.03	0.00005	26	
240	321	313	308	8	5	0.17	0.11	0.14	526	0.07	0.00010	26	
300	320	313	307	7	6	0.15	0.13	0.14	528	0.03	0.00005	26	
360	320	313	307	7	6	0.15	0.13	0.14	529	0.02	0.00003	26	
420	319	313	306	6	7	0.13	0.15	0.14	531	0.03	0.00005	26	
480	319	312	307	7	5	0.15	0.11	0.13	532	0.02	0.00003	26	
540	319	312	307	7	5	0.15	0.11	0.13	534	0.03	0.00006	26	
600	319	312	307	7	5	0.15	0.11	0.13	537	0.05	0.00008	26	
M.O.	600	322	314	307	8	7	0.172	0.147	0.159	22	0.04	0.00005	26
									$\eta T/\eta_{20} =$	0.875	$\kappa_{20} =$	0.000045	

Πίνακας 6.29 Υπολογισμός του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο (β) για τη 12^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_f=57\%$

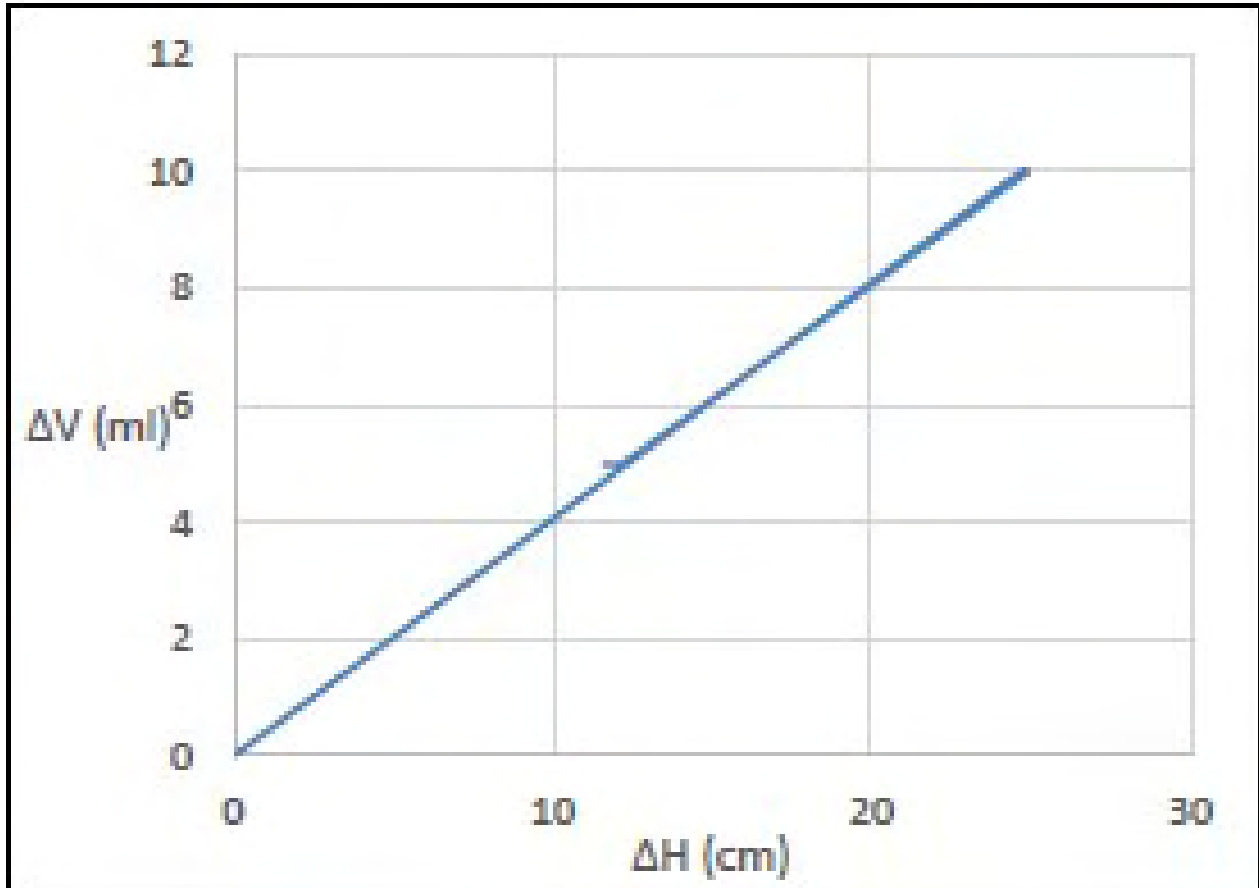
Υπολογισμός k, με ΔV σε σχέση με αρχική τιμή	
$q_{20}(\text{ml/s})$	$k_{20}(\text{m/s})$
0	0
0.05	4.94375E-05
0.041666667	4.63494E-05
0.038888889	5.32437E-05
0.045833333	6.27547E-05
0.043333333	5.93287E-05
0.038888889	5.32437E-05
0.038095238	5.21545E-05
0.035416667	5.25322E-05
0.035185185	5.21888E-05
0.036666667	5.43862E-05
M.O.	5.35619E-05



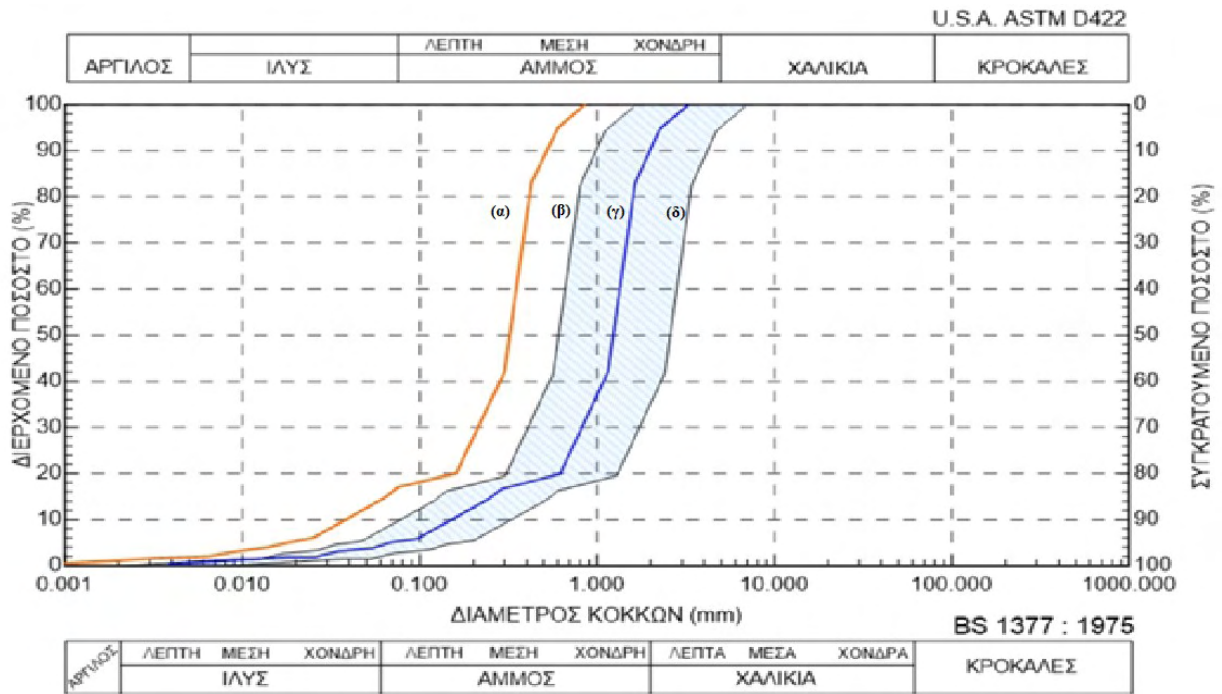
Σχήμα 6.1 Βαθμονόμηση πρώτου μανομέτρου.



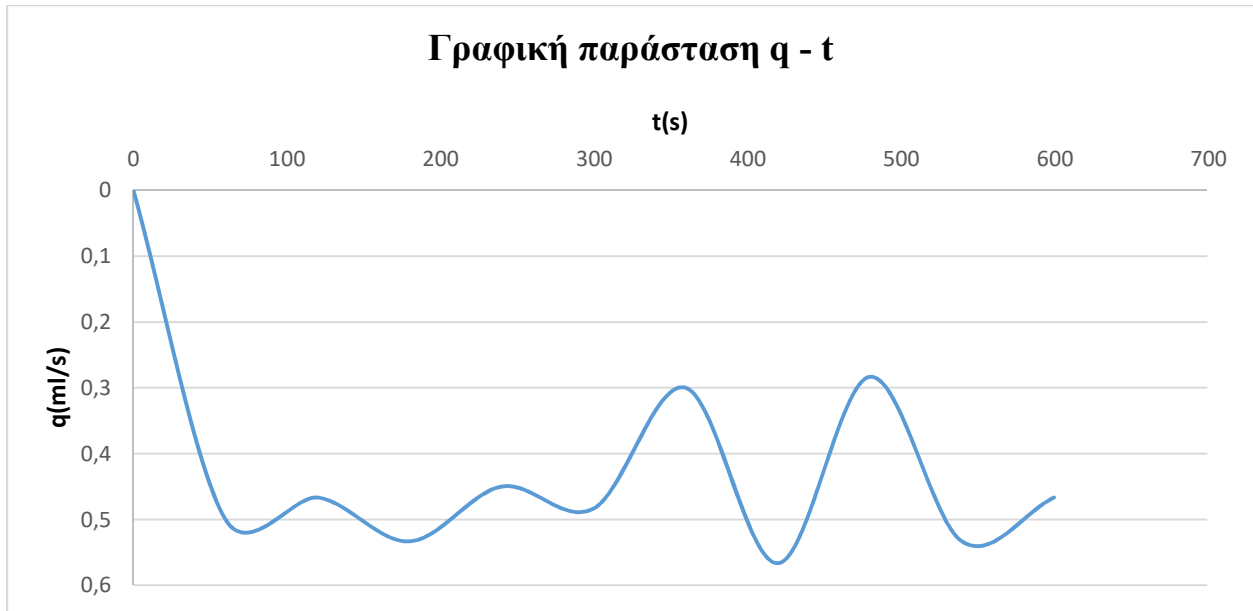
Σχήμα 6.2 Βαθμονόμηση δεύτερου μανομέτρου



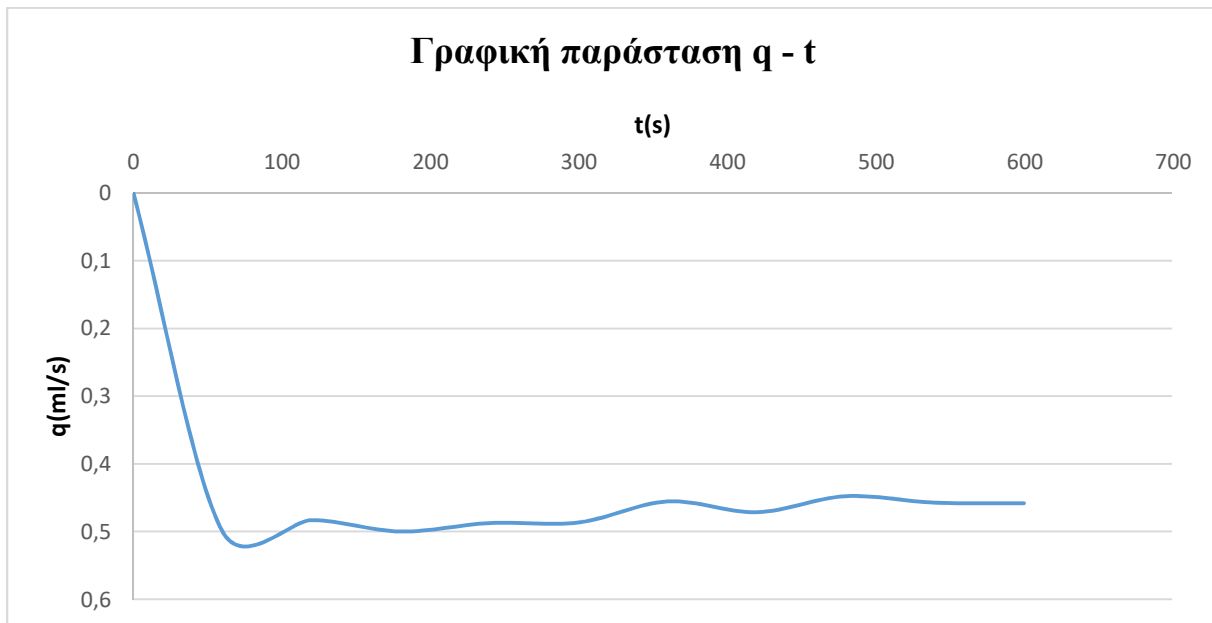
Σχήμα 6.3 Βαθμονόμηση τρίτου μανομέτρου



Σχήμα 6.4 Κοκκομετρική καμπύλη (α) του εξεταζόμενου εδάφους, (β) αριστερού ορίου του εδαφικού φίλτρου, (γ) του εδαφικού φίλτρου, και (δ) δεξιού ορίου του εδαφικού φίλτρου.



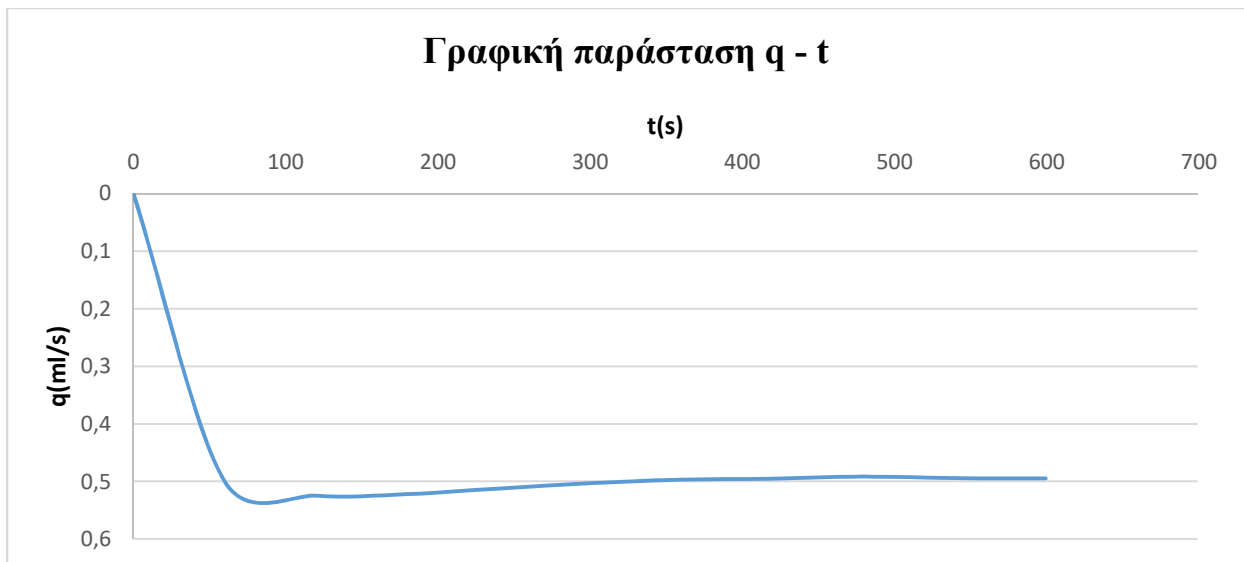
Σχήμα 6.5 Μεταβολή της παροχής, q, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t, με τον τρόπο (α) για την 1^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=88\%$



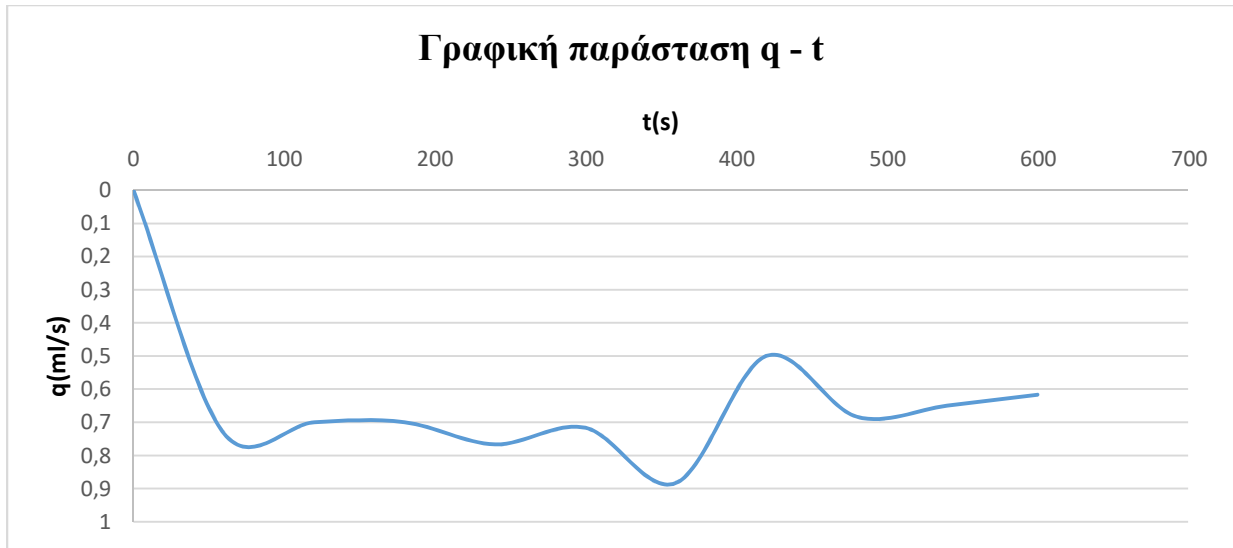
Σχήμα 6.6 Μεταβολή της παροχής, q, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t, με τον τρόπο (β) για την 1^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=88\%$



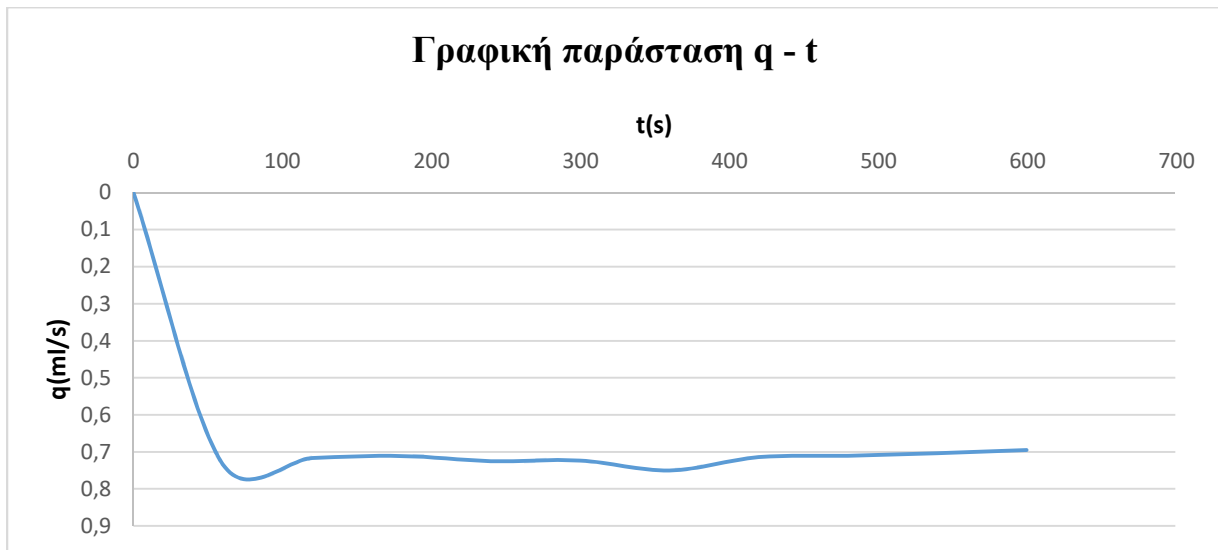
Σχήμα 6.7 Μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , με τον τρόπο (α) για τη 2^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=88\%$



Σχήμα 6.8 Μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , με τον τρόπο (β) για τη 2^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=88\%$



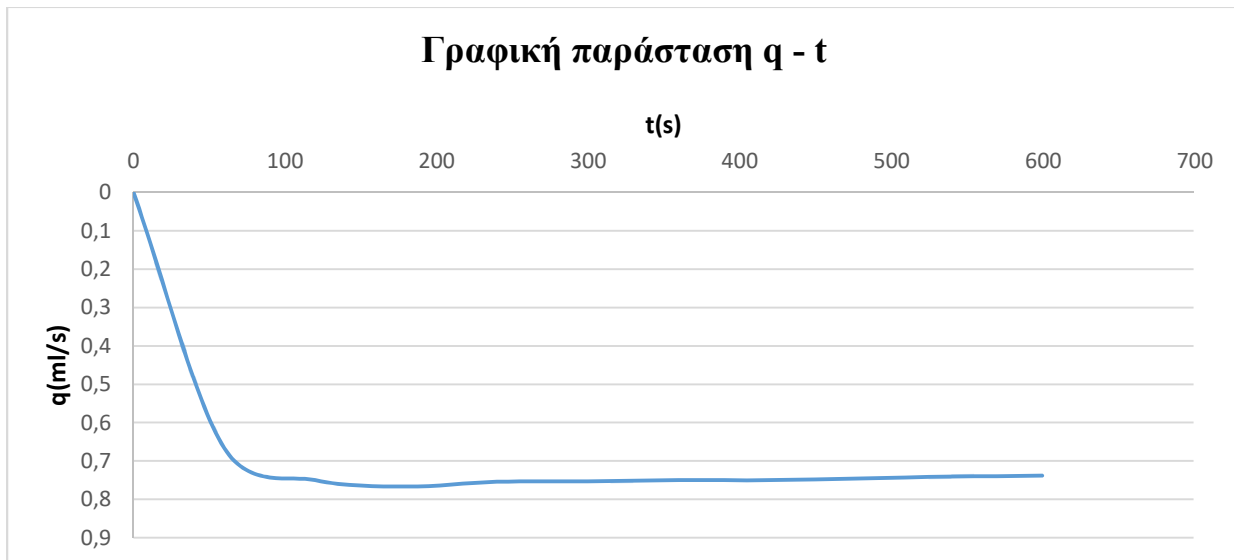
Σχήμα 6.9 Μεταβολή της παροχής, q, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t, με τον τρόπο (α) για την 3^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=88\%$



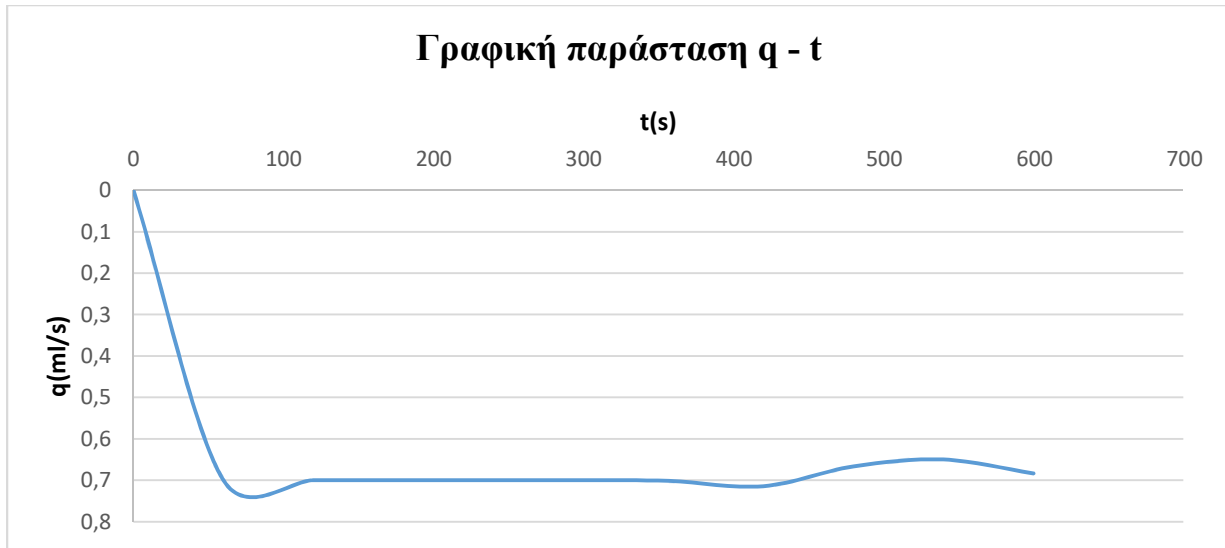
Σχήμα 6.10 Μεταβολή της παροχής, q, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t, με τον τρόπο (β) για την 3^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=88\%$



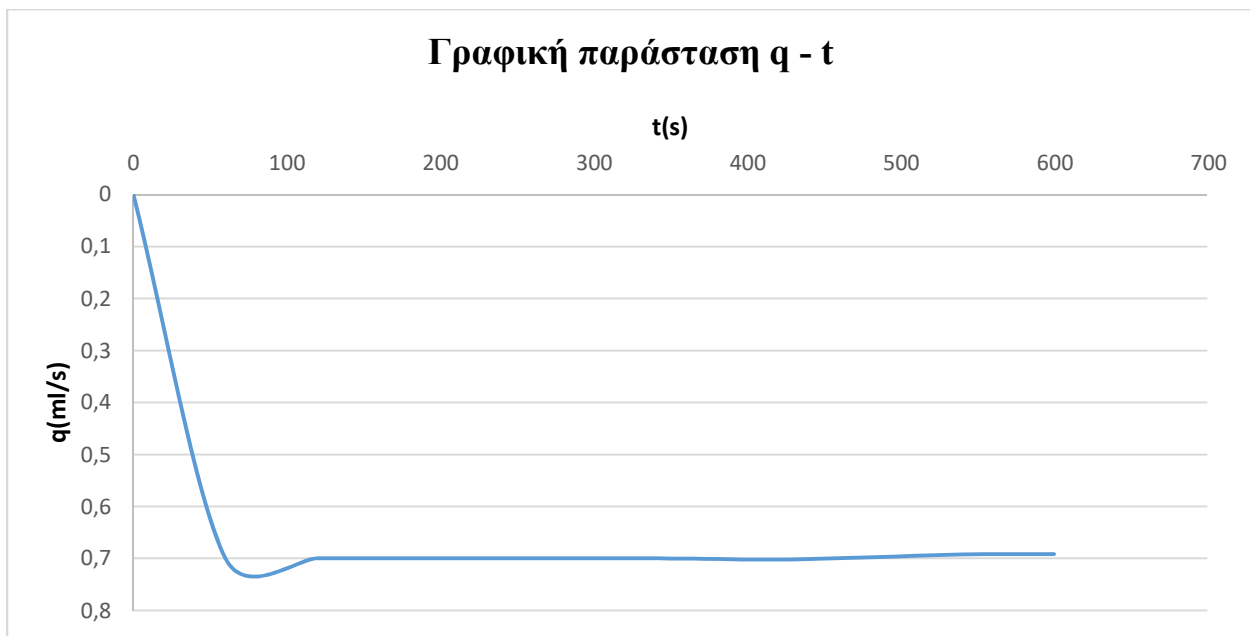
Σχήμα 6.11 Μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , με τον τρόπο (α) για την 4^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=88\%$



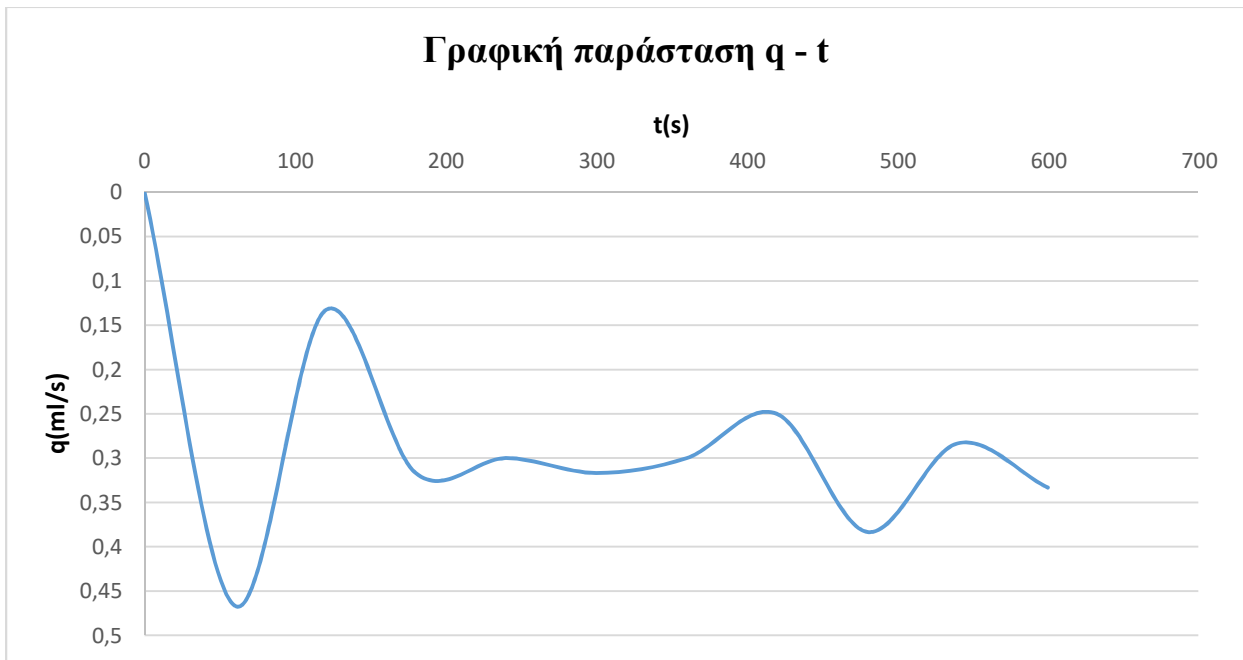
Σχήμα 6.12 Μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , με τον τρόπο (β) για την 4^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=88\%$



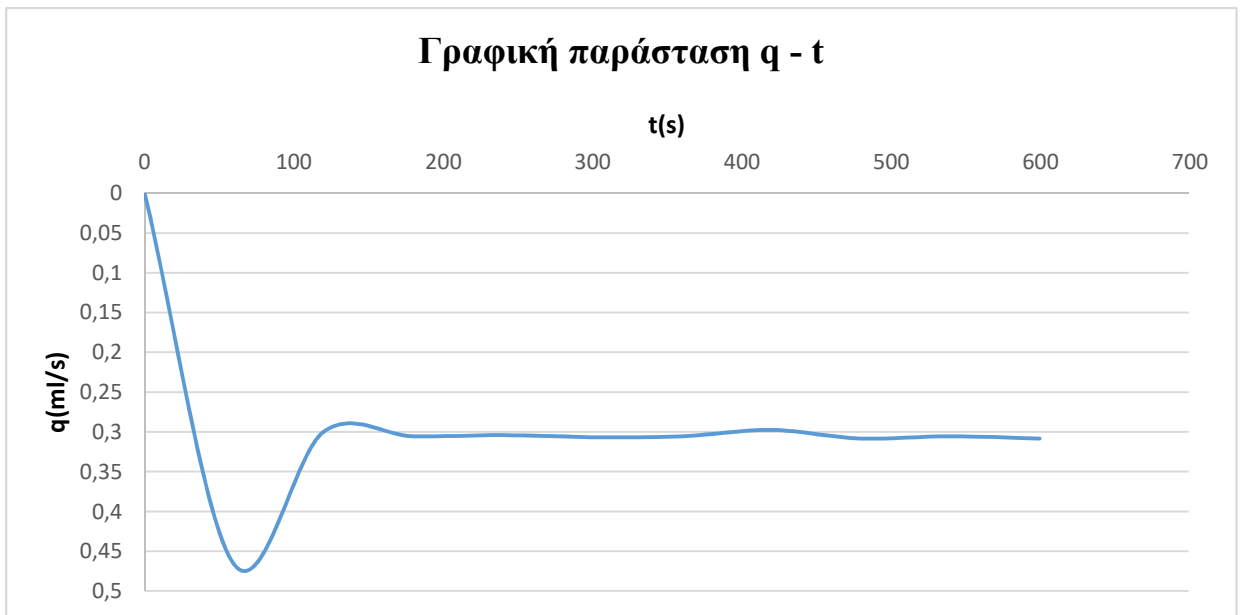
Σχήμα 6.13 Μεταβολή της παροχής, q, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t, με τον τρόπο (α) για την 5^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=88\%$



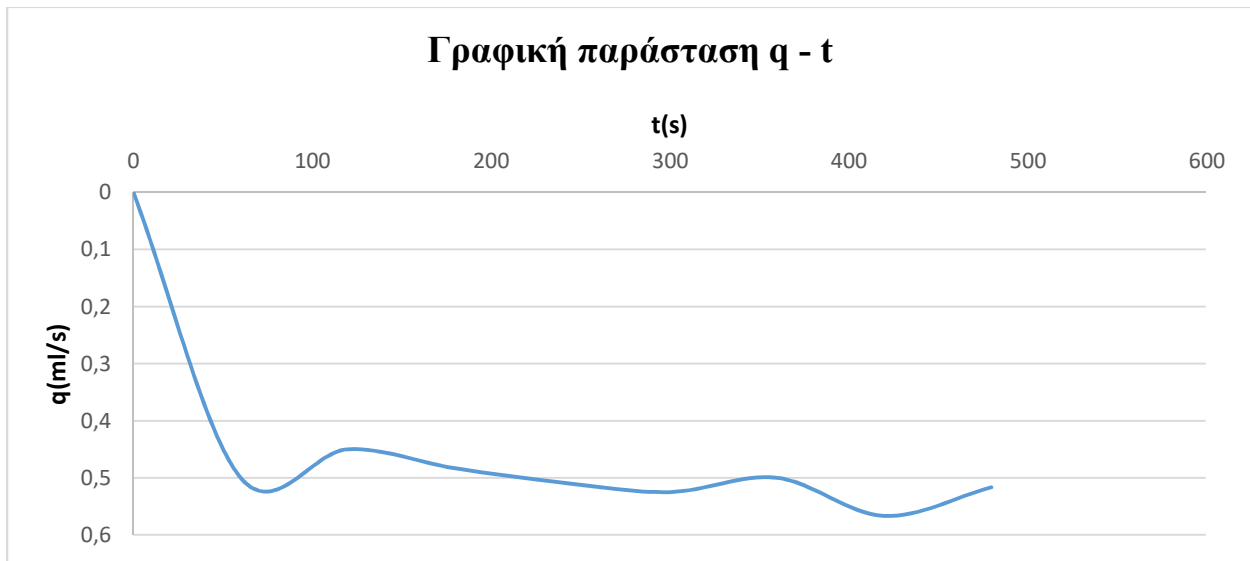
Σχήμα 6.14 Μεταβολή της παροχής, q, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t, με τον τρόπο (β) για την 5^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=88\%$



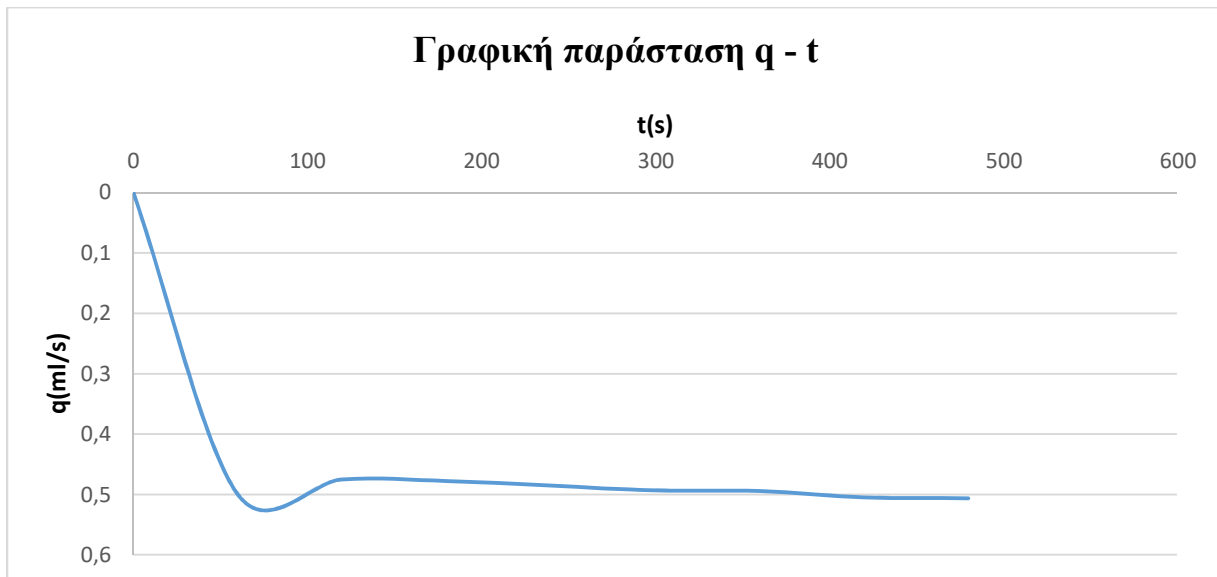
Σχήμα 6.15 Μεταβολή της παροχής, q, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t, με τον τρόπο (α) για την 6^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=62\%$



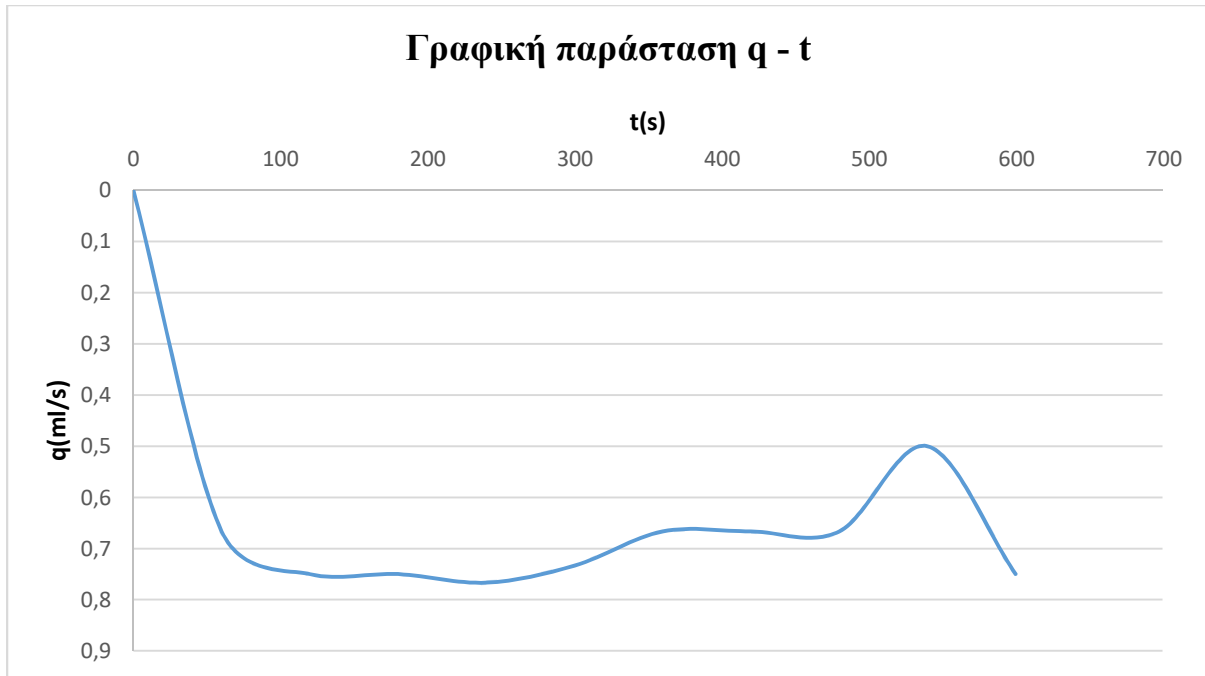
Σχήμα 6.16 Μεταβολή της παροχής, q, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t, με τον τρόπο (β) για την 6^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=62\%$



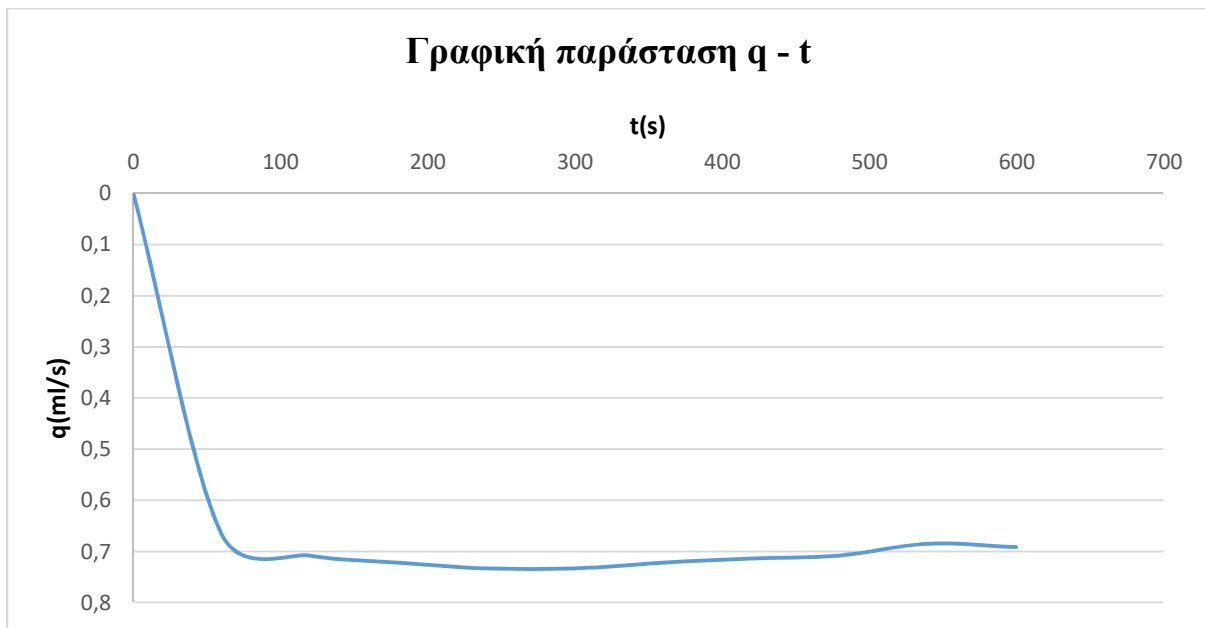
Σχήμα 6.17 Μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , με τον τρόπο (α) για την 7^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=62\%$



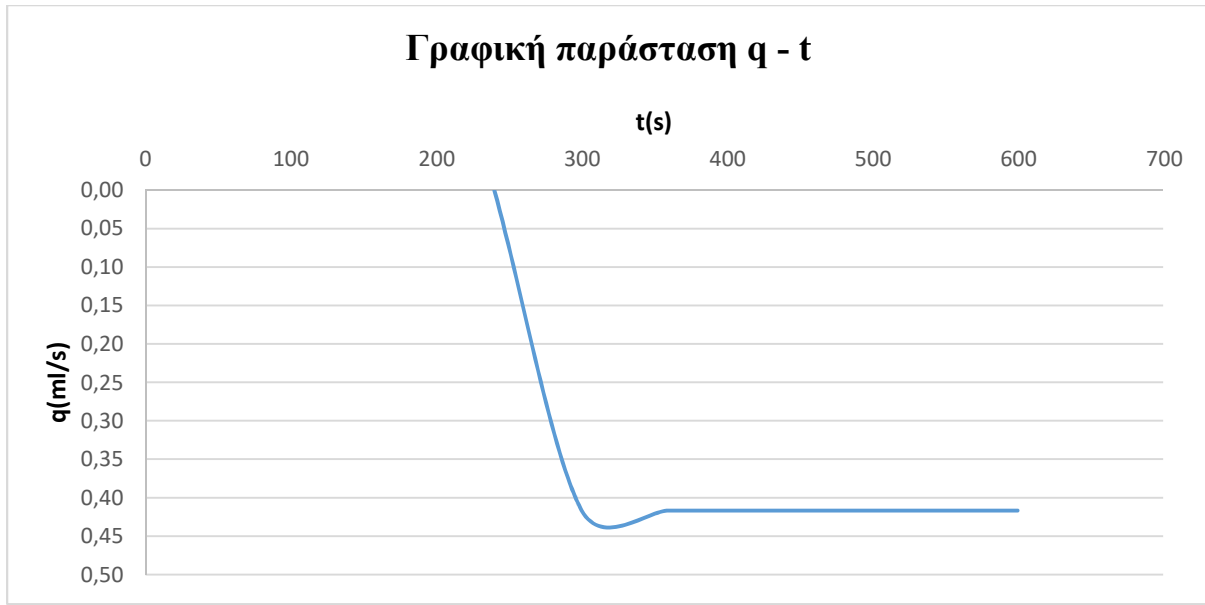
Σχήμα 6.18 Μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , με τον τρόπο (β) για την 7^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=62\%$



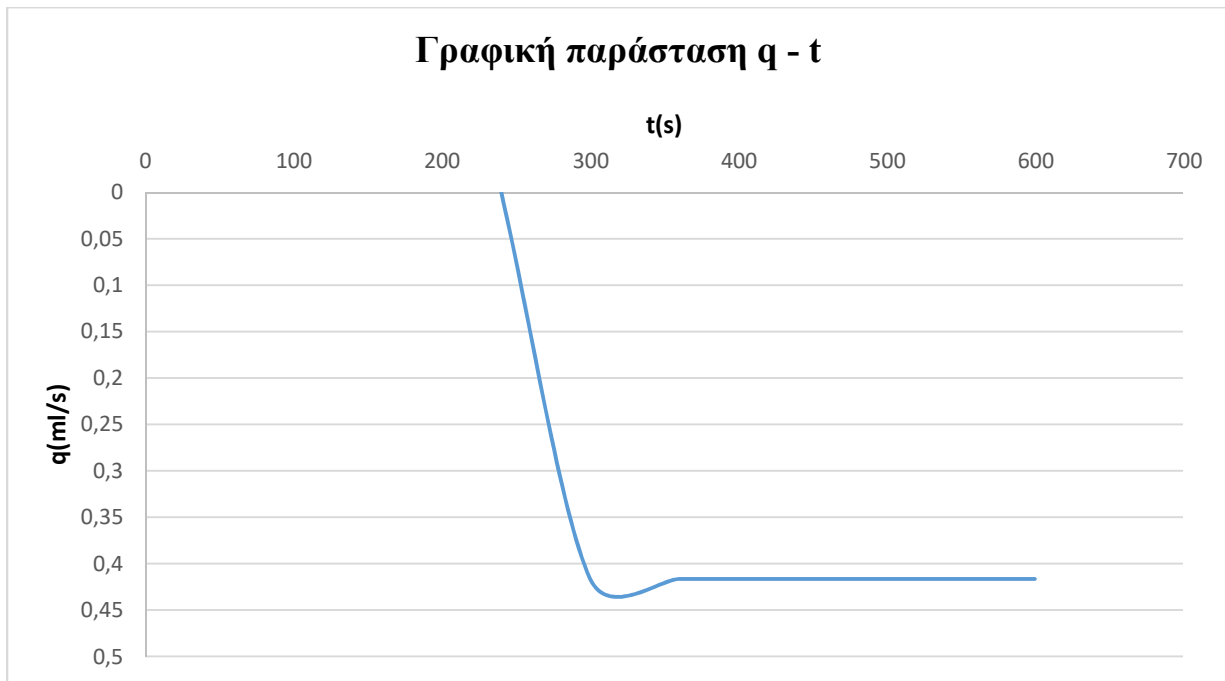
Σχήμα 6.19 Μεταβολή της παροχής, q, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t, με τον τρόπο (α) για την 8^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=57\%$



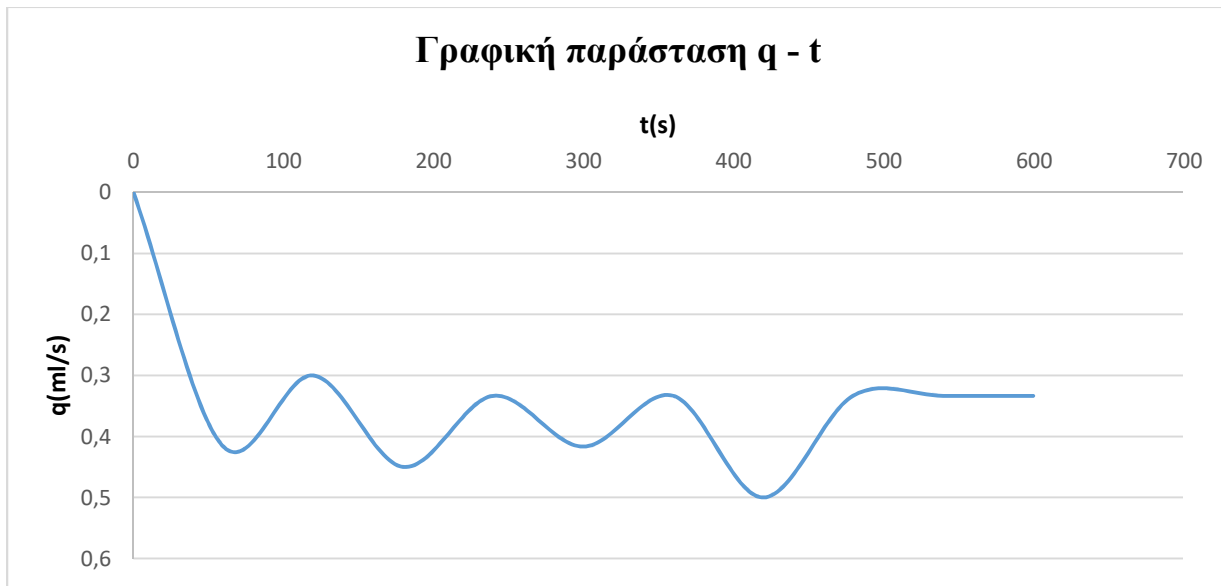
Σχήμα 6.20 Μεταβολή της παροχής, q, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t, με τον τρόπο (β) για την 8^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=57\%$



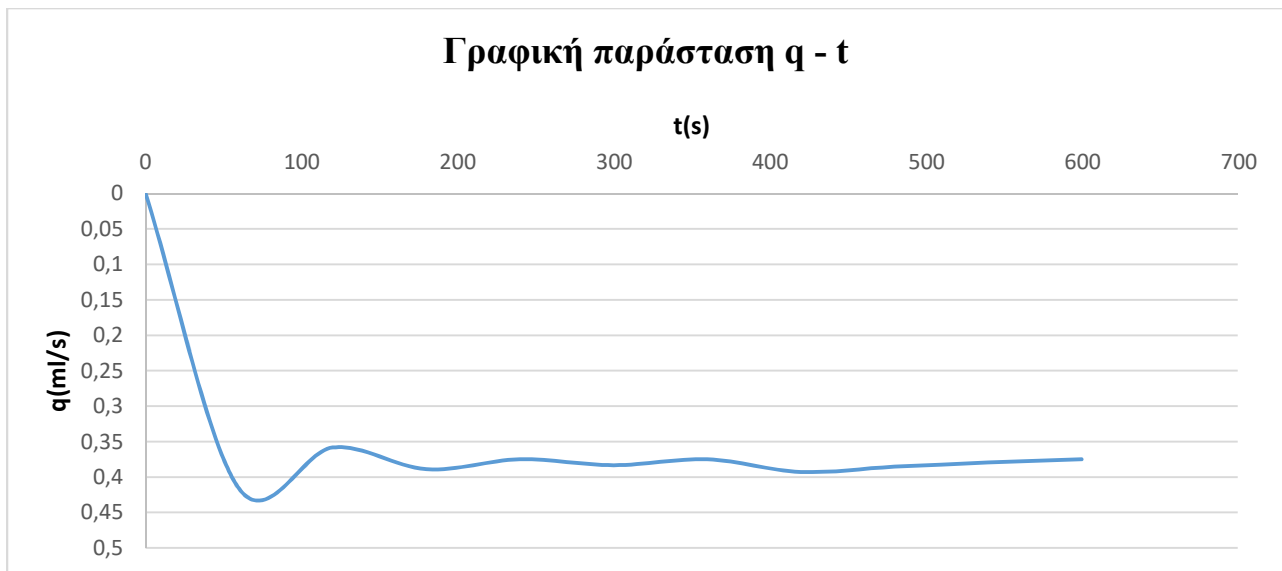
Σχήμα 6.21 Μεταβολή της παροχής, q, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t, με τον τρόπο (α) για την 9^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=57\%$



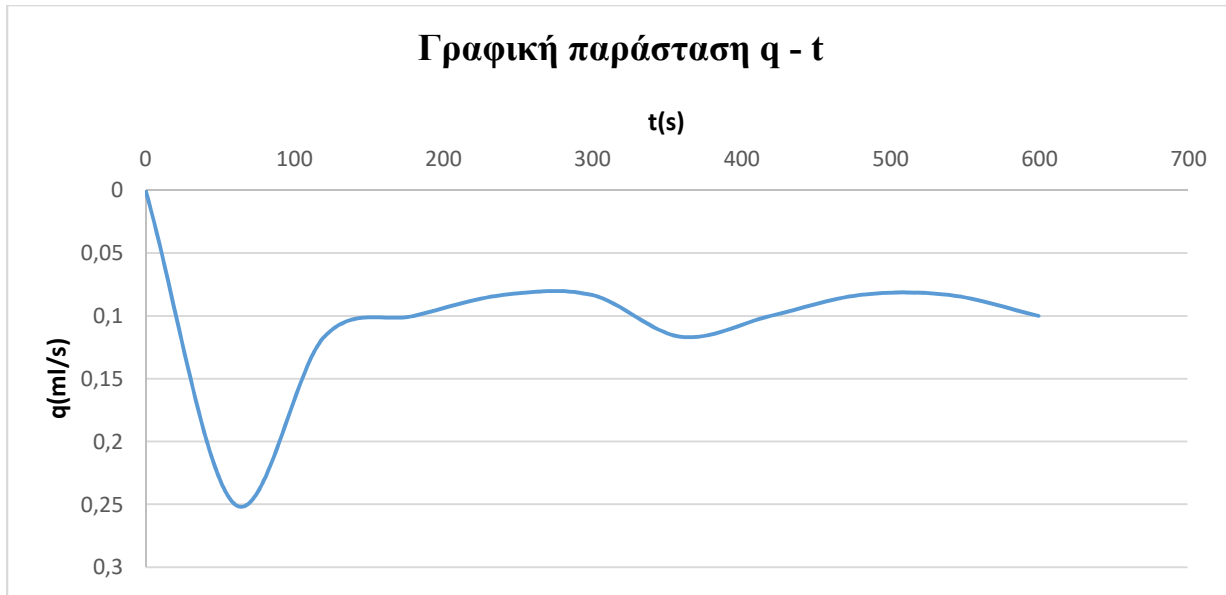
Σχήμα 6.22 Μεταβολή της παροχής, q, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t, με τον τρόπο (β) για την 9^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=57\%$



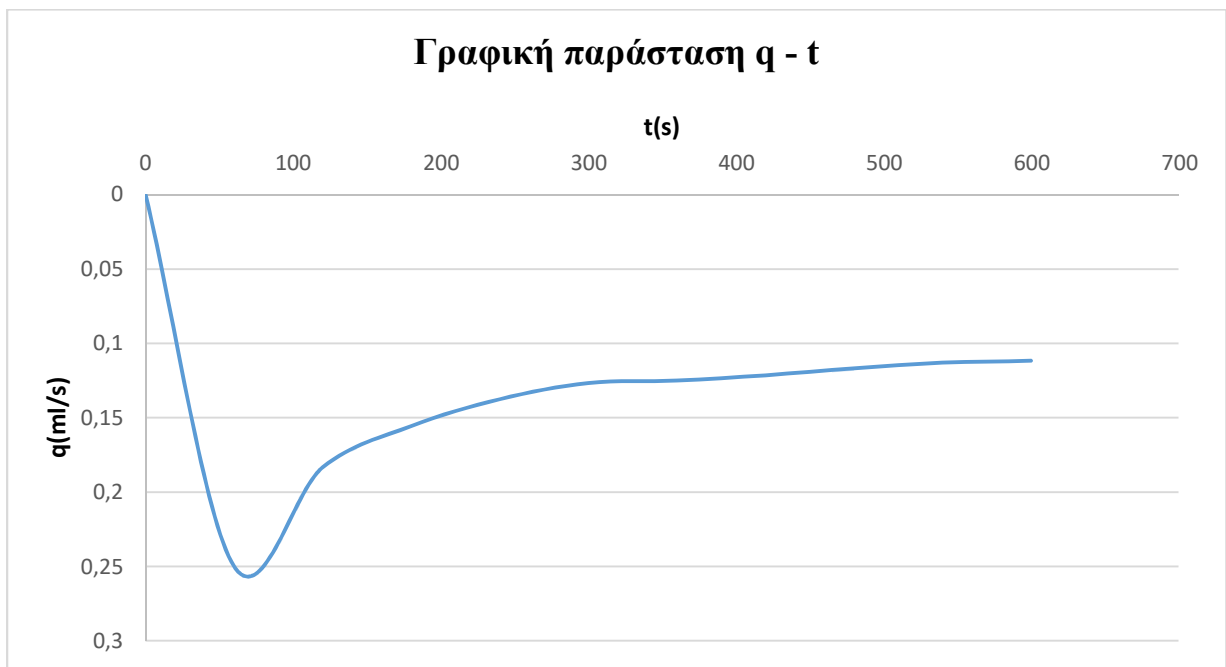
Σχήμα 6.23 Μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , με τον τρόπο (α) για τη 10^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=57\%$



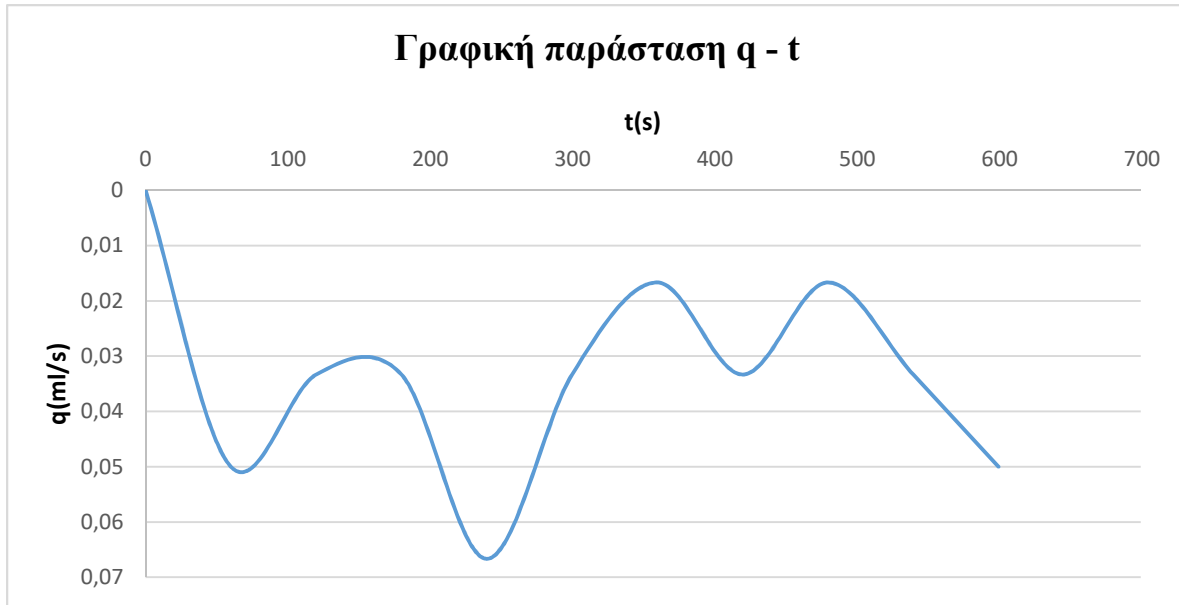
Σχήμα 6.24 Μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , με τον τρόπο (β) για τη 10^η δοκιμή και το δοκίμιο με $D_r=57\%$



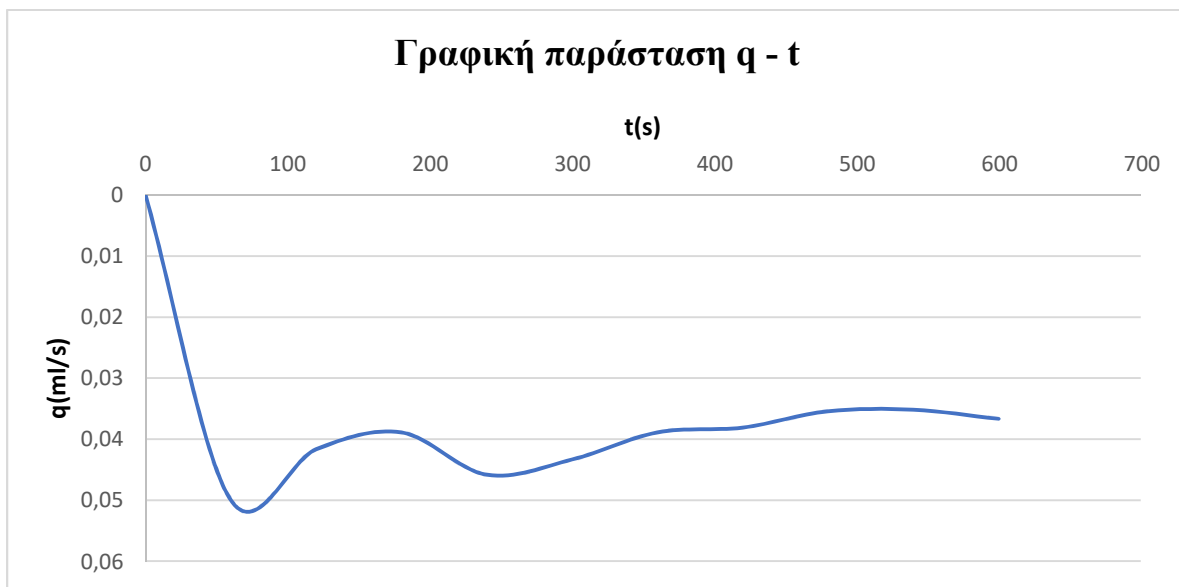
Σχήμα 6.25 Μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , με τον τρόπο (α) για την 11^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=57\%$



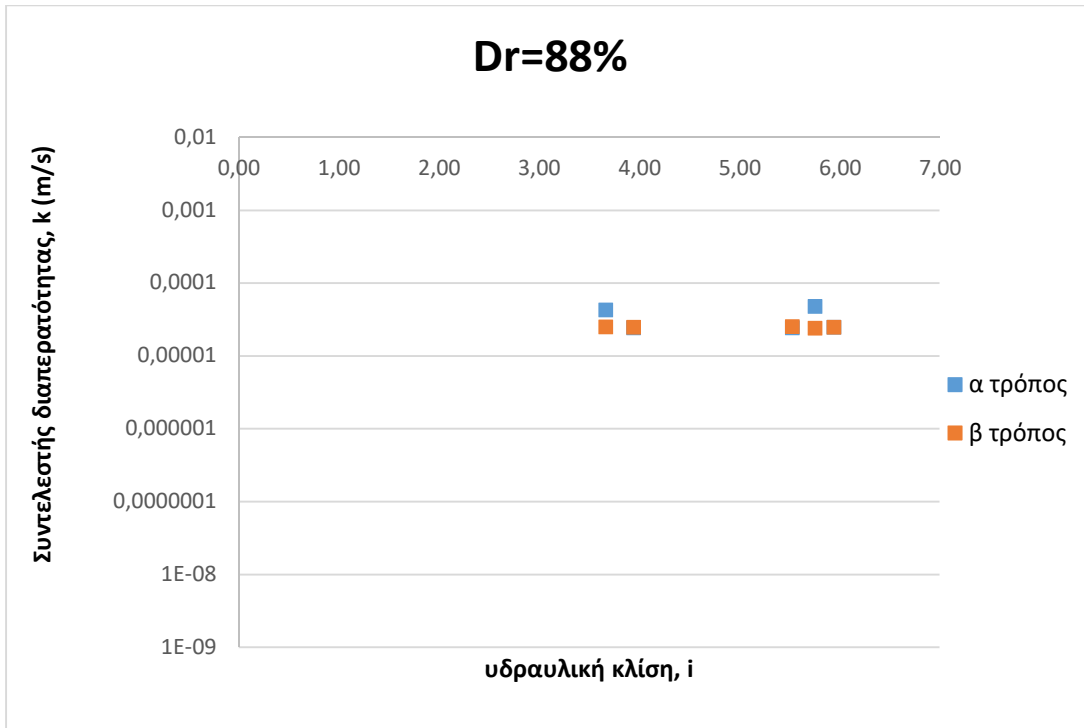
Σχήμα 6.26 25 Μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , με τον τρόπο (β) για την 11^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=57\%$



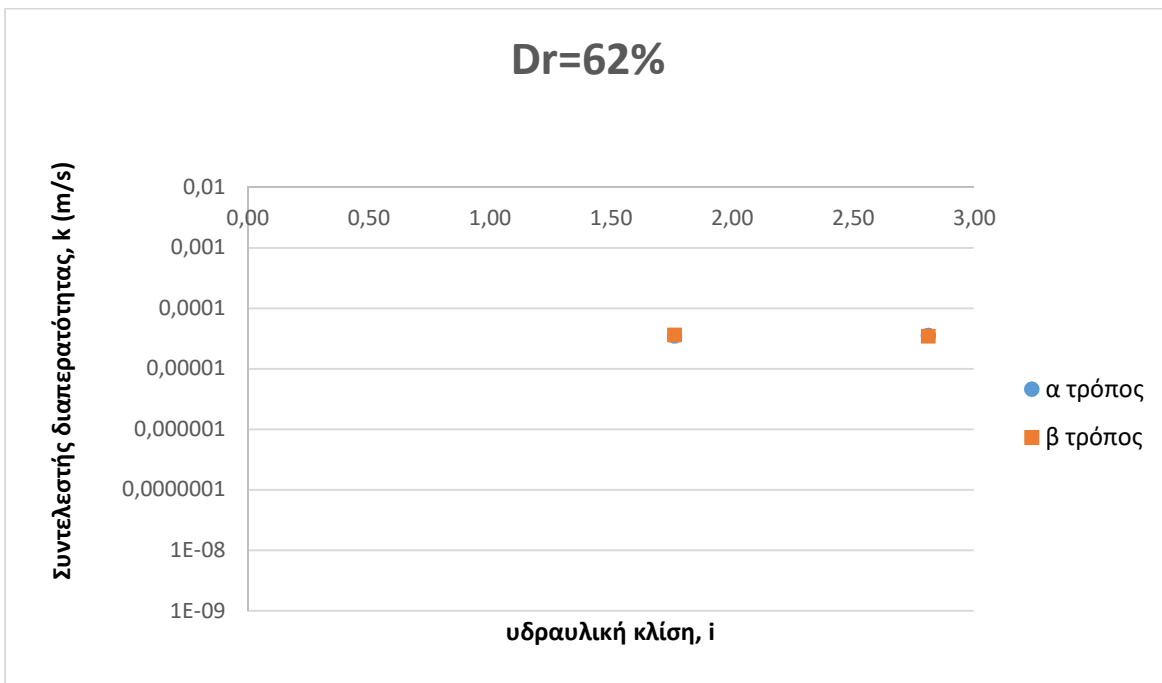
Σχήμα 6.27 25 Μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , με τον τρόπο (α) για τη 12^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=57\%$



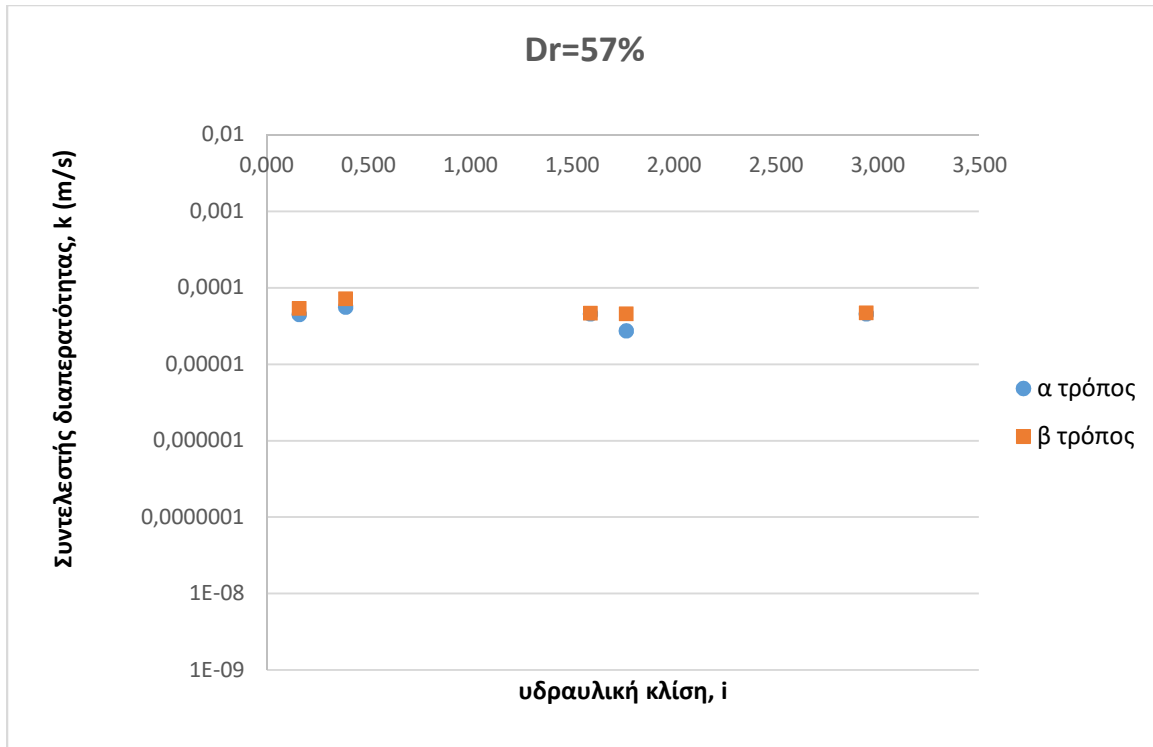
Σχήμα 6.28 Μεταβολή της παροχής, q , κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρόνος t , με τον τρόπο (β) για τη 12^η δοκιμή και το δοκίμο με $D_r=57\%$



Σχήμα 6.29 Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με την υδραυλική βαθμίδα, i , για το δοκίμιο με σχετική πυκνότητα $D_r=88\%$, και με τους δύο τρόπους υπολογισμού της διαπερατότητας (α & β)



Σχήμα 6.30 Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με την υδραυλική βαθμίδα, i , για το δοκίμιο με σχετική πυκνότητα $D_r=62\%$, και με τους δύο τρόπους υπολογισμού της διαπερατότητας (α & β)



Σχήμα 6.31 Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με την υδραυλική βαθμίδα, i , για το δοκίμιο με σχετική πυκνότητα $D_r=57\%$, και με τους δύο τρόπους υπολογισμού της διαπερατότητας (α & β)

Κεφάλαιο 7

Συγκρίσεις πειραματικών αποτελεσμάτων και εμπειρικών εκτιμήσεων - Συμπεράσματα

7.1 Εισαγωγή

Στην διπλωματική αυτή εργασία μελετήθηκε η διαπερατότητα μιας ιλυώδους άμμου χωρίς πλαστικότητα με ποσοστό λεπτοκόκκων 15% και προσδιορίστηκε πειραματικά ο συντελεστής διαπερατότητας, k_{20} , με τη μέθοδο του σταθερού υδραυλικού φορτίου.

Διαμορφώθηκαν τρία δοκίμια με τη διαδικασία της υγρής συμπύκνωσης στις εξής τρεις πυκνότητες: $D_r=88\%$, 62% και 57% . Τα δοκίμια υποβλήθησαν στη διαδικασία κορεσμού ($S_r=100\%$) με τη μέθοδο του CO_2 . Στα δοκίμια μικρότερης πυκνότητας η διαδικασία κορεσμού απαιτούσε μεγαλύτερο χρόνο, λόγω της έντονης παρουσίας αέρος στους εδαφικούς πόρους καθώς επίσης και για την αποφυγή διατάραξης της εδαφικής δομής. Ο συντελεστής διαπερατότητας κάθε δοκιμίου προσδιορίστηκε με δύο τρόπους υπολογισμού σε διάφορες τιμές της υδραυλικής κλίσης: (α) υπολογισμός της παροχής και της υδραυλικής κλίσης από τη μεταβολή του όγκου του νερού, ΔV , μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών στιγμών, και (β) υπολογισμός της παροχής και της υδραυλικής κλίσης από τη μεταβολή του όγκου του νερού, ΔV , από την αρχή της δοκιμής (αρχική τιμή των μανομέτρων).

7.2 Εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας από τα πειραματικά αποτελέσματα

Οι τιμές του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με τον τρόπο υπολογισμού (α) κυμαίνονται από 2.43×10^{-5} m/s έως 5.59×10^{-5} m/s, και με τον τρόπο υπολογισμού (β) 2.49×10^{-5} m/s έως 7.22×10^{-5} m/s (Πίνακας 7.1). Οι μέσες τιμές k_{20} είναι 3.78×10^{-5} m/s και 3.84×10^{-5} m/s για τον τρόπο (α) και τον τρόπο (β) αντίστοιχα. Ο τρόπος υπολογισμού (β) του k_{20} δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς το διάγραμμα της παροχής κατά τη διάρκεια της δοκιμής είναι σταθερό στο μεγαλύτερο τμήμα του. Βάσει αυτού του τμήματος της σχέσης q-t υπολογίζονται οι τιμές

του k_{20} που παρουσιάζονται ως τρόπος (γ) στην τελευταία στήλη του Πίνακα 7.1. Η μέση τιμή στην περίπτωση αυτή είναι 3.72×10^{-5} m/s, που προσεγγίζει πάρα πολύ τις τιμές που υπολογίστηκαν με τους άλλους δύο τρόπους (α & β).

Σύμφωνα με το Σχήμα 2.12, όπου παρουσιάζονται τα εύρη των τιμών του συντελεστή διαπερατότητας για διάφορες κατηγορίες εδαφών, παρατηρείται πως η τιμή του k που υπολογίστηκε για την ιλυώδη άμμο είναι στο εύρος των αναμενόμενων τιμών. Σύμφωνα με το ίδιο σχήμα το έδαφος χαρακτηρίζεται ως διαπερατό, με μέση διαπερατότητα.

Η επίδραση της υδραυλικής κλίσης, i , στις τιμές του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , για το σύνολο των δοκιμών παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1. Όπως φαίνεται, ο συντελεστής διαπερατότητας δεν επηρεάζεται από την τιμή της υδραυλικής κλίσης για το εύρος $i=0.16-5.94$ που μελετήθηκε.

Η επίδραση της σχετικής πυκνότητας στις τιμές του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2, όπου παρατηρείται μικρή μείωση του k_{20} με την αύξηση της D_r , για το εύρος $D_r=57-88\%$ που μελετήθηκε. Αναμένεται πως για τα περισσότερο χαλαρά δοκίμια η τιμή του k_{20} θα είναι μεγαλύτερη.

7.3 Εκτίμηση του συντελεστή διαπερατότητας μέσω εμπειρικών συσχετίσεων

Ο συντελεστής διαπερατότητας, k_{20} , εκτιμάται από τις σχέσεις που παρουσιάζονται στην ενότητα Κεφάλαιο 2.4. Ως δείκτης πόρων, e , λαμβάνεται η τιμή 0.5088 που αντιστοιχεί στο δοκίμιο με $D_r=57\%$. Η τιμή του D_{10} υπολογίζεται από την κοκκομετρική καμπύλη ίση με 0.035mm.

Εμπειρική σχέση Hazen (20 °C):

- $C_1=100$

$$k_{20} = c_1(D_{10})^2 \times 10^{-4} = 0.01 \times 0.035^2 = 1.23 \times 10^{-5} \frac{m}{s} \quad (7.1)$$

Εμπειρική σχέση Kozeny-Carman (20 °C):

- Κόκκοι στρογγυλοί: $f=1.1$ & $S=25\text{mm}^{-1}$

$$k_{20} = \frac{2}{fS^2} \times \left(\frac{e^3}{1+e} \right) = \frac{2}{1.1 \times 25^2} \times \left(\frac{0.5088^3}{1+0.5088} \right) = 2.54 \times 10^{-4} \frac{m}{s} \quad (7.2)$$

Εμπειρική σχέση Charuis (20 °C) :

$$k_{20} = 2.4622 \left(\frac{e}{1+e} \right)^3 \times D_{10}^2)^{0.7825} = 2.4622 \left(\frac{0.5088}{1+0.5088} \right)^3 \times 0.035^2)^{0.7825} \quad (7.3)$$

$$= 1.92 \times 10^{-4} \frac{m}{s}$$

Εμπειρική σχέση Terzaghi (20 °C):

- Κόκκοι ομαλά στρογγυλεμένοι: $C_0=8$ & $\mu_{10}/\mu_T=1.3$
- Υπολογισμός n:

$$n = \frac{e}{1+e} = \frac{0.5088}{1+0.5088} = 0.33 \quad (7.4)$$

$$k_{20} = C_0 \times \frac{\mu_{10}}{\mu_0} \times \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 \times D_{10}^2 = \quad (7.5)$$

$$8 \times 1.3 \times \left(\frac{0.5088-0.13}{\sqrt[3]{1-0.5088}} \right)^2 \times 0.035^2 = 5.08 \times 10^{-5} \frac{m}{s}$$

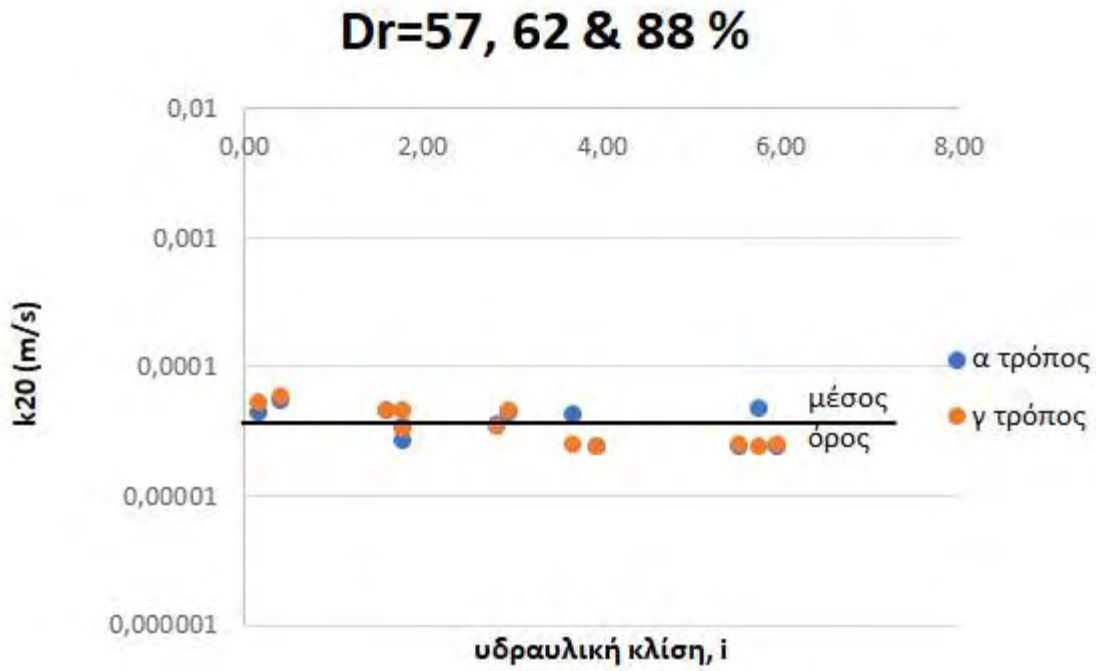
Την καλύτερη εκτίμηση με τα πειραματικά αποτελέσματα της ιλυώδους άμμου ($k=3.72 \times 10^{-5} m/s$) που μελετήθηκε δίνει η εξίσωση του Terzaghi ($k=5.08 \times 10^{-5} m/s$), ενώ ακολουθεί η εξίσωση του Hazen ($k=1.23 \times 10^{-5} m/s$). Οι εξισώσεις των Kozeny-Carman και Charuis υπερεκτιμούν το συντελεστή διαπερατότητας.

7.4 Σύγκριση με την καθαρή άμμο M31

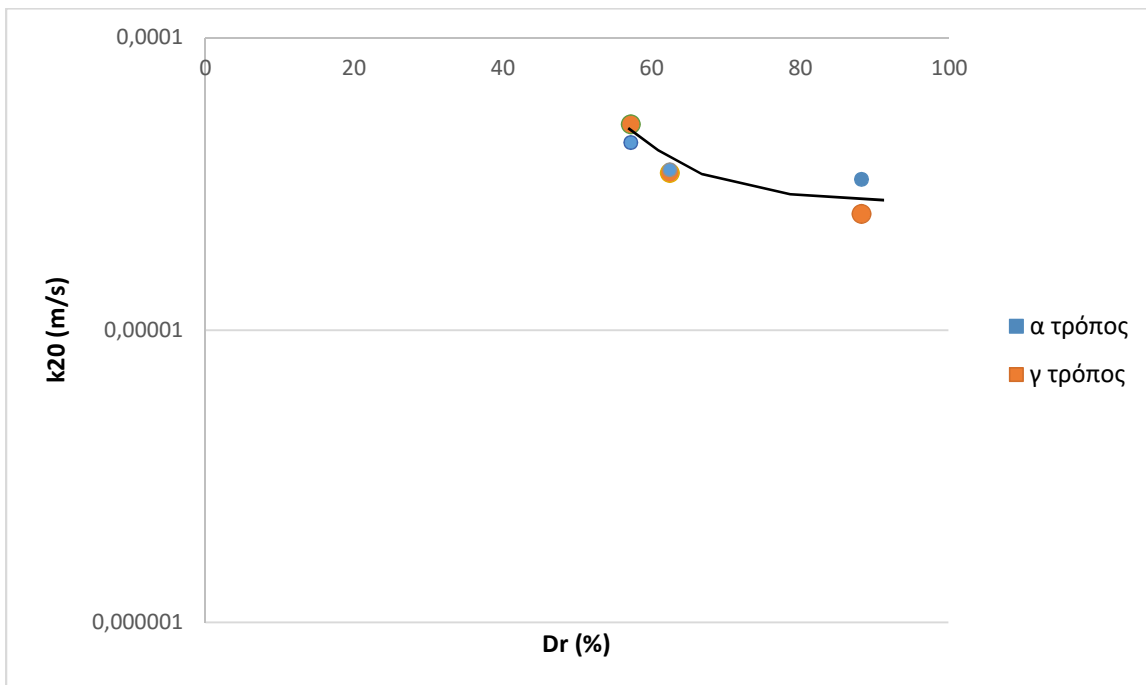
Ο συντελεστής διαπερατότητας, k_{20} , της καθαρής άμμου M31 προσδιορίστηκε με δοκιμές σταθερού υδραυλικού φορτίου ίσος με $3.55 \times 10^{-4} m/s$ και 3.64×10^{-4} με τον τρόπο (α) και (β) αντίστοιχα (Μαρτίδης και Λώλος, 2019). Ο συντελεστής διαπερατότητας, k_{20} , της ιλυώδους άμμου (M31+D6) που προσδιορίστηκε στα πλαίσια της παρούσης διπλωματικής είναι μικρότερος κατά μία τάξη μεγέθους. Το αποτέλεσμα είναι το αναμενόμενο λόγω της ιλύος.

Πίνακας 7.1 Τιμές συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , για κάθε υδραυλική βαθμίδα για το σύνολο των δοκιμών

Dr (%)	i	k_{20} (m/s) με τον τρόπο (α)	k_{20} (m/s) με τον τρόπο (β)	k_{20} (m/s) με τον τρόπο (γ)
88	3,665274	4,27404E-05	2,51553E-05	2,51553E-05
	3,944712	2,43315E-05	2,48988E-05	2,48988E-05
	5,531291	2,43634E-05	2,52755E-05	2,52755E-05
	5,944333	2,47721E-05	2,4915E-05	2,52267E-05
	5,758302	4,79123E-05	2,41903E-05	3,42441E-05
62	1.764841	3,48441E-05	3,61929E-05	3,61929E-05
	2.813085	3,58919E-05	3,47171E-05	3,47171E-05
57	2.945456	4,55328E-05	4,68584E-05	4,68584E-05
	1.766455	2,74421E-05	4,57303E-05	4,57303E-05
	1.589601	4,57428E-05	4,66659E-05	4,66659E-05
	0.387247	5,59134E-05	7,2162E-05	5,97744E-05
	0.159451	4,45887E-05	5,35619E-05	5,35619E-05
M.O.		3.78396E-05	3.83603E-05	3.7192E-05



Σχήμα 7.1 Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , με την υδραυλική κλίση, i , για όλες τις δοκιμές



Σχήμα 7.2 Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας, k_{20} , (μέσοι όροι) με τη σχετική πυκνότητα, Dr

Βιβλιογραφία

- [1] Βράννα, Α. (2016), Εργαστηριακή Μελέτη της Μονοτονικής και Ανακυκλικής Συμπεριφοράς Βελτιωμένων Ρευστοποιήσιμων Εδαφών Τόμος 1, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.
- [2] Καββαδάς, Μ., (2005), Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδοση Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- [3] Καλλιόγλου, Π. (2015), Εδαφομηχανική 2 Σημειώσεις μαθημάτων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος.
- [4] Καλλιόγλου Π., (2016), Πειραματική Εδαφομηχανική Σημειώσεις μαθημάτων, Π.Θ., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, Βόλος.
- [5] Κούκης Χ. Γ., Σαμπατακάκης ΣΤ. Ν, (2002), Τεχνική Γεωλογία, Εκδόσεις ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ
- [6] Κουλαουζίδου, Κ. (2016), Η Επίδραση των Λεπτόκοκκων στη Διατμητική Αντοχή Άμμου, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Βόλος.
- [7] Κωστόπουλος, Σ. (2005), Πειραματική Γεωτεχνική Μηχανική, Εκδόσεις ΙΩΝ.
- [8] Μαρτίδης, Α., Λώλος, Γ. (2019), Διαπερατότητα Καθαρών Άμμων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος
- [9] Λουπασάκης, Κ. (2014), Τεχνική Γεωλογία 1 Σημειώσεις μαθημάτων, Ε.Μ.Π., Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας - Υδρογεωλογίας, Αθήνα.
- [10] Τίκα, Θ. (2006), Σημειώσεις Εδαφομηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
- [11] Barnes, G.E. (2005), Εδαφομηχανική Αρχές και Εφαρμογές, Εκδόσεις ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ.
- [12] ASTM D 422-63 (1998), Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA
- [13] ASTM D2434-68 (2006) Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) (Withdrawn 2015)
- [14] ASTM Standard D698 (2007), Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM International, West Conshohocken, PA
- [15] Bertram, G. E. (1940), An experimental investigation of protective filters, Harvard University, Graduate School of Engineering, Soil Mechanics Series 7

- [16] BS 1377-2 (1990), Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Classification Tests, British Standards Institution
- [17] BS 1377-4 (1990), Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Compaction-related Tests, British Standards Institution.
- [18] Carman, P. C. (1956), "Flow of gases through porous media", Butterworths Scientific
- [19] Carman, P.C. (1938), "Fluid flow through a granular bed", Transaction of the Institution of Chemical Engineers
- [20] Chapuis, R.P. (2004), "Predicting the Saturated Hydraulic Conductivity of Sand and Gravel Using Effective Diameter and Void Ratio", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 41
- [21] Cheng, C. & Chen, X. (2007), "Evaluation of methods for determination of hydraulic properties in an aquifer-aquitard system hydrologically connected to river", Hydrogeology Journal, Vol. 15
- [22] Darcy, H. (1856), Les fontaines publique de la ville de Dijon, Dalmont, Paris
- [23] Dewitt, W.M. (1950), A Field Method of Determining Permeability, The Rice Institute, Houston Texas
- [24] Geotechdata.info (2008), Geotechnical testing methods
- [25] Hansbo, S. (1960), Consolidation of Clay, with Special Reference to Influence of Vertical Sand Drains, Sweden
- [26] Hazen, A. (1982), Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration, 24th Annual Report, Massachusetts State Board of Health, Boston, MA, USA
146
- [27] Head, K.H., & Epps, R. J., (2006), Manual of Soil Laboratory Testing: Volume 2 - Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests (Volume 2), Whittles Publishing.
- [28] Kaye , G. W. C. & Laby, T. H., (1973), Tables of Physical and Chemical Constants (14th edition), Longman, London
- [29] Kozeny, J. (1927), Über kapillare Leitung des Wassers in Boden, Ber, Wien Akad
- [30] Lambe, T. W. & Whitman, R. V. (1979), Soil Mechanics, S.I. Version, Wiley, New York
- [31] Lane, K. S. & Washburn, D. E. (1946), Capillarity tests by capillarimeter and soil filled tubes, Proc. Highw, Res. Board, Vol. 26 Publications, London
- [32] Taylor, D. W. (1948), Fundamentals of Soil Mechanics, Chapman & Hall, London
- [33] Terzaghi, C. (1925), "Principles of soil mechanics: III. Determination of permeability of clay", Engineering News Records, Vol. 95

[34] Terzaghi, K. & Peck, R. B. (1967), Soil Mechanics in Engineering Practice, Wiley, New York