



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**Σχολή Γεωπονικών Επιστημών**

**Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού Περιβάλλοντος**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΕ  
ΟΜΑΔΑ ΕΛΑΦΩΝ**

**Λαχανάς Αντώνιος**

**Βόλος 2019**

## **ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

- 1.** Δημήρκου Ανθούλα, Καθηγήτρια Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με γνωστικό αντικείμενο «Εδαφολογία με έμφαση στη Χημεία Εδάφους».
- 2.** Αντωνιάδης Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με γνωστικό αντικείμενο «Εφαρμοσμένη Εδαφολογία».
- 3.** Παπανικολάου Χρήστος, Διδάσκων Π.Δ. 407/80 Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με γνωστικό αντικείμενο «Αρδεύσεις».

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>5</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	
<b>ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΕΛΑΦΟΣ</b>	<b>6</b>
1.1. Υφή και δομή του εδάφους	7
1.2. Ιδιότητες	9
1.3. Ταξινόμηση εδαφικών υλικών	10
1.3.1. Ταξινόμηση χονδρόκοκκων υλικών μέσω της κοκκομετρικής δοκιμής	11
1.3.2. Ταξινόμηση λεπτόκοκκων υλικών μέσω του χάρτη πλαστικότητας “Casagrande”	12
1.3.3. Ταξινόμηση εδαφών κατά ASTM	13
1.3.4. Πίνακες ταξινόμησης κατά ASTM	14
1.4. Ενεργό μέγεθος - Συντελεστής ομοιομορφίας	21
1.5. Συντελεστής καμπυλότητας	22
1.6. Αξιολόγηση της κοκκομετρικής καμπύλης	22
1.6.1. Καλά διαβαθμισμένο έδαφος	22
1.6.2. Έδαφος κακής διαβάθμισης	23
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	
<b>ΣΧΕΣΕΙΣ ΝΕΡΟΥ-ΕΛΑΦΟΥΣ</b>	<b>25</b>
2.1. Η κίνηση του νερού στο έδαφος	26
2.1.1. Το δυναμικό του εδαφικού νερού	26
2.1.2. Υδραυλικό φορτίο	27
2.2. Υδατοπερατότητα (K) – Διηθητικότητα (i)	27
2.3. Νόμος Darcy	29
2.4. Εξίσωση συνεχείας	31
2.5. Εξίσωση κινήσεως	32
2.5.1. Εξίσωση ως προς $\theta$	33
2.5.2. Εξίσωση ως προς $\Psi$	33
2.6. Η κίνηση του νερού σε ακόρεστο έδαφος	33
2.7. Η υδραυλική αγωγιμότητα σε ακόρεστα εδάφη	37
2.8. Συντελεστής διάχυσης	38
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	
<b>ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ</b>	<b>41</b>

3.1. Γενικά	42
3.2. Κοκκομετρική ανάλυση	42
3.3. Πειραματικές συσκευές	43
3.4. Μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού των εδαφικών δειγμάτων	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	
<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b>	<b>48</b>
4.1. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης	49
4.2. Αποτελέσματα της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού των εδαφικών Δειγμάτων	65
4.3. Συμπεράσματα	69
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>71</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έδαφος μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα σύνθετο σύστημα, που ταυτόχρονα είναι μια αποθήκη θρεπτικών στοιχείων, ένα περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσεται και δρα πλήθος μικροοργανισμών, ένα μέσο στήριξης των φυτών, ένα μέσο διακίνησης του νερού προς όλες τις κατευθύνσεις και μια αποθήκη νερού από την οποία τα φυτά αντλούν την απαραίτητη, για την ανάπτυξή τους, υγρασία.

Τα περισσότερα εδάφη αποτελούνται από διάφορες στρώσεις, σαν αποτέλεσμα της διεργασίας σχηματισμού τους. Ο τρόπος εναλλαγής των στρώσεων αυτών, καθώς και το είδος των υλικών από τα οποία αποτελούνται επηρεάζουν τόσο την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών, όσο και την κίνηση, ανακατανομή και αποθήκευση του νερού.

Το υπόγειο (αποθηκευμένο) νερό μπορεί να χωριστεί σε δύο περιοχές:

- Η πρώτη περιοχή καλείται ζώνη κορεσμού. Μέσα σ' αυτή την περιοχή όλοι οι πόροι του εδάφους είναι γεμάτοι με νερό. Η ροή του νερού μέσα σ' αυτή τη ζώνη καλείται κορεσμένη ροή.
- Η δεύτερη περιοχή καλείται ζώνη αερισμού, βρίσκεται πάνω από τη ζώνη κορεσμού και εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Οι πόροι της περιοχής αυτής είναι γεμάτοι με νερό, αέρα και υδρατμούς. Η ροή του νερού μέσα στη ζώνη αερισμού καλείται ακόρεστη ροή.

Η ακόρεστη ροή ενδιαφέρει πολλούς κλάδους της επιστήμης, όπως την Υδρολογία, την Γεωπονία, την Εδαφομηχανική κ.λ.π.

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής είναι ο προσδιορισμός υδραυλικών παραμέτρων ομάδας αμμωδών εδαφών.

Στο Κεφάλαιο 1 της πτυχιακής εργασίας γίνεται λόγος για τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται στην υφή και τη δομή καθώς και στην μηχανική σύσταση του εδάφους.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται η κίνηση του νερού στο έδαφος. Γίνεται λόγος για το Νόμο Darcy, την κίνηση του νερού και την υδραυλική αγωγιμότητα στο ακόρεστο έδαφος.

Το Κεφάλαιο 3 περιγράφει την πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε και δίνονται τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα των μετρήσεων.

Τέλος, πραγματοποιείται συζήτηση και σχολιασμός επί των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν, καθώς και παράθεση των συμπερασμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1  
ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

## 1.1. Υφή και δομή του εδάφους

Βασικά φυσικά χαρακτηριστικά ενός εδάφους είναι η υφή και η δομή. Εδαφική υφή είναι η ποσοστιαία αναλογία των διαφόρου μεγέθους ορυκτών σωματιδίων που απαρτίζουν το έδαφος. Εδαφική δομή είναι ο τρόπος διατάξεως των σωματιδίων αυτών για το σχηματισμό ομάδων ή συσσωματωμάτων. Η εδαφική υφή και δομή, σε συνδυασμό, ρυθμίζουν σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο εφοδιασμού και διακίνησης του νερού στο έδαφος (Παπαζαφειρίου, 1984).

Η εδαφική υφή μας πληροφορεί πάνω στο κυρίαρχο μέγεθος ή στη σειρά των μεγεθών των σωματιδίων του εδάφους με ένα τρόπο ποιοτικό και ποσοτικό. Ποιοτικά πληροφορούμαστε όταν ψηλαφίσουμε ένα έδαφος, εάν πρόκειται για χονδρόκοκκο ή λεπτόκοκκο. Ποσοτικά η εδαφική υφή περιγράφει τις σχετικές αναλογίες των διαφόρων μεγεθών των σωματιδίων ενός δεδομένου εδάφους. Η παραδοσιακή μέθοδος, για να χαρακτηριστεί το μέγεθος των εδαφικών σωματιδίων, συνίσταται στο να διαιρέσουμε τα σωματίδια σε τρεις ομάδες μεγεθών:

-άμμος,

-τύς

-άργιλος.

Ο προσδιορισμός της κατανομής του μεγέθους των σωματιδίων (κόκκων) ονομάζεται μηχανική ανάλυση ή κοκκομετρική ανάλυση.

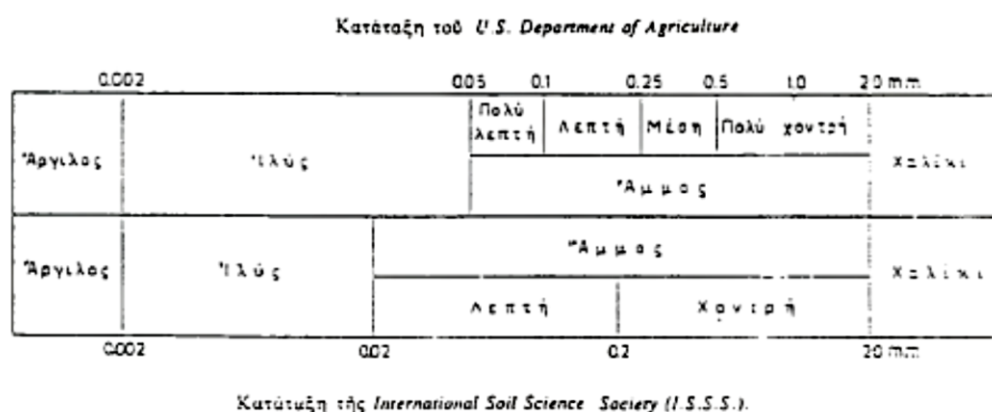
Εδαφικά σωματίδια χαρακτηρίζονται τα στερεά που έχουν διάμετρο  $\leq 2\text{mm}$ . Ο διαχωρισμός των σωματιδίων σε ομάδες μεγέθους πραγματοποιείται γενικά με κόσκινα μέχρι μια διάμετρο κόκκων περίπου  $0.05\text{mm}$ . Για λεπτότερα υλικά χρησιμοποιείται η μέθοδος της καθιζήσεως, η οποία στηρίζεται στην ισορροπία που υπάρχει μεταξύ της αντιστάσεως τριβής ενός σωματιδίου που πέφτει μέσα σε νερό και της δράσεως της βαρύτητας.

Στον Πίνακα 1.1 δίνονται αναλυτικά οι κατηγορίες των σωματιδίων αυτών και τα φυσικά τους χαρακτηριστικά σύμφωνα με το USDA Handbook 18 (1951).

**Πίνακας 1.1.** Κατηγορίες των σωματιδίων και τα φυσικά χαρακτηριστικά τους.

Χαρακτηρισμός σωματιδίων	Διάμετρος κόκκων mm	Αριθμός κόκκων ανά gr	Επιφάνεια κόκκων cm <sup>2</sup> /gr
Άμμος	2,00-0,05		
Πολύ χονδρή	2,00-1,00	90	11
Χονδρή	1,00-0,50	720	23
Ενδιάμεση	0,50-0,25	5700	45
Λεπτή	0,25-0,10	46000	91
Πολύ λεπτή	0,10-0,05	722000	227
Ίλύς	0,05-0,002	5776000	454
Αργίλος	<0,002	90261000	8000000

Στο παρακάτω Σχήμα 1.1 δίνεται το διάγραμμα κατατάξεως των εδαφών σύμφωνα με το U.S.Department of Agriculture και την I.S.S.S..



**Σχήμα 1.1.** Κατάταξη των σωματιδίων του εδάφους σύμφωνα με τη διάμετρό τους.

Η δομή αναφέρεται στη συσσωμάτωση των πρωτογενών εδαφικών σωματιδίων σε σύνθετα συμπλέγματα, τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους με επιφάνειες μικρής συνοχής.

Η δομή αποτελεί έναν από τους βασικότερους παράγοντες που καθορίζουν την γονιμότητα του εδάφους, διότι έχει σχέση με την ικανότητα του να συγκρατεί το νερό και να επιτρέπει συγχρόνως την αποστράγγισή του, την ανάπτυξη των ριζών και την ελεύθερη κίνηση του αέρα.

Η δομή ενός εδάφους μπορεί να είναι ομοιόμορφη σε όλο το βάθος του ή να διαφέρει από ορίζοντα σε ορίζοντα, με συνηθέστερη τη δεύτερη περίπτωση. Σε σχέση με τη δομή, κατά το USDA Agricultural Information Handbook (1959), τα εδάφη ταξινομούνται σε έξι βασικούς τύπους ήτοι:



1. Ελαφρά μονόκοκκα
2. Βαριά μονόκοκκα
3. Κυβικής μορφής
4. Πλακώδη
5. Κοκκώδη
6. Πρισματικά.

Τα ελαφρά μονόκοκκα εδάφη απαρτίζονται από σωματίδια με ομοιόμορφους κόκκους της τάξεως της άμμου, στερούνται δομής και επιτρέπουν την εύκολη διείσδυση και διακίνηση του νερού. Τα βαριά μονόκοκκα απαρτίζονται από κόκκους της τάξεως της αργίλου, δεν έχουν δομή και μοιάζουν με συμπαγή άμορφη μάζα. Το νερό κινείται μέσα στα εδάφη αυτά πολύ δύσκολα. Ανάμεσα στους δύο ακραίους αυτούς τύπους δομής βρίσκονται οι άλλοι τέσσερις. Στα κυβικής μορφής εδάφη οι κόκκοι σχηματίζουν συσσωματώματα που έχουν μορφή κύβων και επιτρέπουν καλή διακίνηση του νερού. Τα πλακώδη αποτελούνται από πλατιά και λεπτά συσσωματώματα στα οποία η πλευρική κίνηση του νερού γίνεται εύκολα σε αντίθεση με την κατακόρυφη που γίνεται με δυσκολία. Στα πρισματικά εδάφη τα συσσωματώματα έχουν τη μορφή πρισμάτων με μακρύ τον κατακόρυφο άξονά τους και παρουσιάζουν εύκολη διείσδυση και κατακόρυφη κίνηση του νερού. Τέλος, τα κοκκώδη απαρτίζονται από σφαιρικά συσσωματώματα και επιτρέπουν καλή κίνηση του νερού προς όλες τις κατευθύνσεις. Αντίθετα από την υφή, που πρακτικά είναι αδύνατο να μεταβληθεί, η δομή του εδάφους, στην επιφανειακή του κυρίως στρώση, μπορεί να αλλάξει με διάφορες επεμβάσεις (Παπαζαφειρίου, 1984).

## 1.2. Ιδιότητες

### α) της Άμμου

Τα σωματίδια της άμμου έχουν ελάχιστη ειδική επιφάνεια ανά μονάδα βάρους και κατά συνέπεια, επιδρούν ελάχιστα στις χημικές και φυσικές δραστηριότητες του εδάφους. Η παρουσία της άμμου αυξάνει το μέγεθος των διαστημάτων μεταξύ των εδαφικών κόκκων και διευκολύνει την κίνηση του νερού.

### β) της Ιλύος

Τα χονδρότερα σωματίδια της ιλύος είναι όμοια με τα λεπτότερα σωματίδια της άμμου όσο αφορά την ειδική επιφάνεια και επομένως συμμετέχουν ελάχιστα στη χημική

δραστηριότητα του εδάφους. Τα λεπτότερα όμως σωματίδια έχουν κάποια συμμετοχή ιδίως όταν βρίσκονται σε αρκετή ποσότητα. Η ιλύς μπορεί να συγκρατήσει αξιόλογα ποσοστά νερού για αρκετό διάστημα.

γ) της Αργίλου

Η άργιλος περιλαμβάνει τα λεπτότερα σωματίδια του εδάφους και έχει μεγάλη ειδική επιφάνεια ανά γραμμάριο μάζας.

Δεδομένου ότι, μεγάλο μέρος της υγρασίας του εδάφους συγκρατείται σαν μεμβράνη γύρω από τα εδαφικά σωματίδια της αργίλου, η ποσότητα της αργίλου στο έδαφος έχει μεγάλη επίδραση στη συγκράτηση του νερού.

Επιπλέον, μερικά διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά συγκρατούνται στην επιφάνεια των αργιλικών σωματιδίων. Έτσι, η άργιλος ενεργεί σαν αποθήκη για θρεπτικά στοιχεία του νερού.

Η άργιλος αποτελείται από διάφορα είδη ορυκτών, συνήθως όμως σε κάθε έδαφος κυριαρχεί μια ομάδα ορυκτών της αργίλου.

### **1.3. Ταξινόμηση εδαφικών υλικών**

Η διαδικασία της ταξινόμησης των εδαφικών υλικών είναι από τις σημαντικότερες διαδικασίες της γεωτεχνικής έρευνας. Το έδαφος είναι ένα υλικό που δεν έχει προδιαγεγραμμένες ιδιότητες. Σε αντίθεση με τα υλικά που χρησιμοποιούμε στις κατασκευές τα οποία είναι προϊόντα βιομηχανικής - ελεγχόμενης επεξεργασίας, τα γεωτεχνικά υλικά χρησιμοποιούνται όπως τα βρίσκουμε στο φυσικό τους περιβάλλον, ενδεχομένως έχοντας υποστεί απλές κατεργασίες (όπως θραύση αδρανών υλικών) όταν χρησιμοποιούνται ως υλικά «χτισίματος» επιχωμάτων και φραγμάτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως δεν επεμβαίνουμε στις ιδιότητές τους και είναι οι περιπτώσεις όπου τα γεωτεχνικά υλικά είναι τελικός φορέας των κατασκευών μας (π.χ. έδαφος θεμελιώσεων, έδαφος σηράγγων) (Σακελλαρίου, 2003).

Στον τομέα των αρδεύσεων στην κατεύθυνση του σκοπού ελαχιστοποίησης των απωλειών βαθιάς διήθησης και επιφανειακής απορροής θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η υφή του εδάφους γιατί επηρεάζει γενικώς την κίνηση του νερού στο έδαφος και άρα συντελεί στην εμφάνιση είτε επιφανειακής απορροής είτε βαθιάς διήθησης και η δομή του εδάφους καθώς εδάφη δεδομένης κοκκομετρικής σύστασης, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, τη κατεργασία που έχουν υποστεί, τη παρουσία νατρίου ή άλλων αλάτων, μπορεί να έχουν «ανοιχτή» δομή ή να είναι πιο «σφιχτά», ή να

εμφανίσουν ρωγμές, στοιχεία που επηρεάζουν την κίνηση του νερού. Ιδιάζουσα περίπτωση αποτελούν εδάφη που διαστέλλονται όταν διαβρέχονται, με αποτέλεσμα να κλείνουν οι πόροι τους και να καθίστανται σχεδόν αδιαπέραστα στο νερό, ενώ κατά κανόνα είναι τα ίδια εδάφη που, όταν ξηραίνονται, σχηματίζουν ρωγμές, οι οποίες επιτρέπουν ταχύτατη διείσδυση του νερού (τέτοια εδάφη έχουν υψηλές τιμές αρχικής διηθητικότητας, η οποία κατά την άρδευση μειώνεται απότομα σε πολύ χαμηλές τιμές βασικής διηθητικότητας) (ΥΑ, 2015).

Για τους παραπάνω λόγους είναι σημαντικό να ταξινομούμε κάποιο εδαφικό υλικό σε κάποια από τις γνωστές κατηγορίες, ώστε να έχουμε μία πρώτη εικόνα για τις ιδιότητες και την συμπεριφορά του. Επιπλέον, η ταξινόμηση δίνει την ονοματολογία των υλικών (ουσιαστικά «βαπτίζει» το εδαφικό δείγμα) ώστε να είναι ευκολότερη η επικοινωνία μεταξύ των ειδικών επιστημόνων που ασχολούνται με την γεωτεχνική (Γεωλόγοι και μηχανικοί) (Σακελλαρίου, 2003).

Η πλήρης διαδικασία της εδαφικής ταξινόμησης γίνεται κατόπιν εργαστηριακών δοκιμών. Εφαρμόζοντας την κοκκομετρική ανάλυση και τον εργαστηριακό προσδιορισμό των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας μπορεί να ταξινομηθεί η πλειονότητα των εδαφικών δειγμάτων (απαιτούνται κάποιες επιπλέον δοκιμές για την ταξινόμηση των οργανικών εδαφών) βάσει κάποιων κανόνων που θα αναφερθούν στην συνέχεια (Σακελλαρίου, 2003).

### **1.3.1. Ταξινόμηση χονδρόκοκκων υλικών μέσω της κοκκομετρικής δοκιμής**

Το κόσκινο Νο200 χρησιμοποιείται ως το διαχωριστικό όριο μεταξύ των χονδρόκοκκων υλικών (χαλίκια - άμμος) και των λεπτόκοκκων (ίλυς - άργιλος). Ένα εδαφικό δείγμα όπου ποσοστό μικρότερο από 50% συγκρατείται από το Νο200 (διέρχεται ποσοστό άνω του 50%) χαρακτηρίζεται ως συνεκτικό έδαφος (ιλυώδες - αργιλώδες). Ωστόσο ένα υλικό όπου ποσοστό μεγαλύτερο από 50% συγκρατείται από το Νο200 χαρακτηρίζεται κοκκώδες και η σημαντικότερο δοκιμή ταξινόμησης θα είναι η κοκκομετρική. Ειδικότερα όταν το ποσοστό των διερχόμενων από το Νο200 είναι μικρότερο από 12% ή καλύτερα από το 5%, το εδαφικό δείγμα μπορεί να ταξινομηθεί μόνο με διενέργεια κοκκομετρικής δοκιμής.

Χρησιμοποιώντας 3 μόνο χαρακτηριστικά κόσκινα μπορεί να γίνει μία αρχική κατάταξη του δείγματος σε χαλίκια, άμμο ή ίλυς-άργιλο ως εξής:

- Το υλικό που συγκρατείται από το φίλτρο Νο4 (47.5 mm) είναι τα χαλίκια.

- Το υλικό που συγκρατείται μεταξύ των φίλτρων No4 (47.5 mm) και No200 είναι η άμμος.
- Το υλικό που διέρχεται του φίλτρου No200 είναι ιλύς-άργιλος.

Εφόσον το υλικό που διέρχεται του φίλτρου No200 είναι μικρότερο από 50% και το ποσοστιαίο υλικό των χαλικιών είναι μεγαλύτερο από το ποσοστιαίο υλικό της άμμου, τότε έχουμε Χαλίκια. Στην αντίθετη περίπτωση (ποσοστό άμμου > ποσοστό χαλικιών) έχουμε Άμμο. Ανάλογα με τις προσμίξεις του υλικού μπορούμε να μιλάμε π.χ. για Ιλυώδης άμμος ή άμμος με άργιλο ή χαλίκια με ιλύς και άμμο κλπ. (ταξινόμηση κατά ASTM).

Επιπλέον μέσω των μεγεθών της κοκκομετρικής καμπύλης  $C_u$  και  $C_c$ , μπορούμε να χαρακτηρίζουμε το υλικό σαν καλής ή κακής διαβάθμισης. Εάν το λεπτόκοκκο υλικό (διερχόμενο του No200) είναι μεγαλύτερο από 5% θα πρέπει η ταξινόμηση για να είναι πλήρης να συμπληρώνεται με τα αποτελέσματα της κατάταξης λεπτόκοκκων σύμφωνα με τον χάρτη του Casagrande (Σακελλαρίου, 2003).

### **1.3.2. Ταξινόμηση λεπτόκοκκων υλικών μέσω του χάρτη πλαστικότητας “Casagrande”**

Η ταξινόμηση των λεπτόκοκκων υλικών θα γίνεται με χρήση του χάρτη πλαστικότητας “Casagrande”. Με την μεθοδολογία αυτή είναι δυνατή η ταξινόμηση των συνεκτικών εδαφών (με διερχόμενο από το No200 άνω του 50%) καθώς και η ακριβέστερη ταξινόμηση μη συνεκτικών εδαφών όπου το διερχόμενο από το No200 είναι άνω του 5%.

Προκειμένου να γίνει η ταξινόμηση με χρήση του χάρτη πλαστικότητας, προσδιορίζονται τα όρια Atterberg του διερχόμενου του φίλτρου No40. Σχεδιάζεται το χαρακτηριστικό σημείο (LL, PI) στον χάρτη πλαστικότητας και ανάλογα την περιοχή που βρίσκεται, ταξινομείται το λεπτόκοκκο υλικό σε κάποια από τις κατηγορίες που έχει ο χάρτης. Τα σημεία κάτω της γραμμής «A» χαρακτηρίζουν κάποιο ιλυώδες υλικό ενώ τα σημεία μεταξύ της γραμμής «A» και της γραμμής «U» χαρακτηρίζουν κάποιο αργιλώδες υλικό.

Η ονοματολογία που ακολουθείται είναι η παρακάτω:

CL: Ισχνή άργιλος.

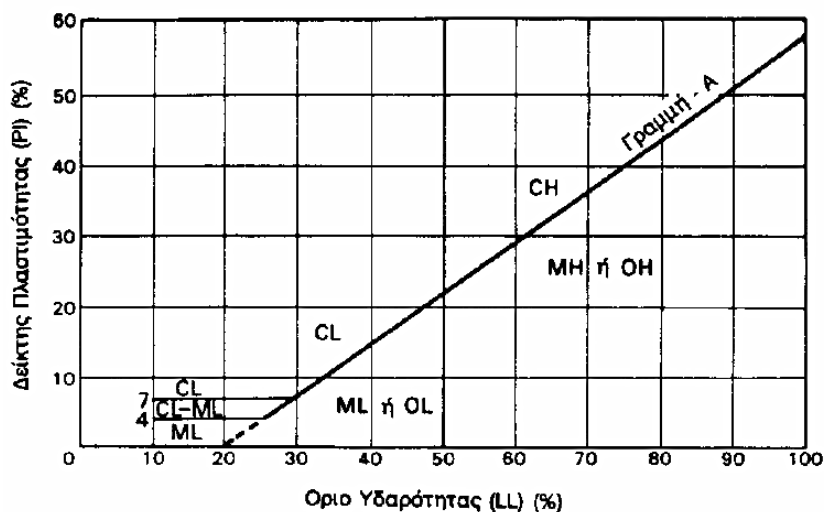
ML: Ιλύς.

CL-ML: Ιλυώδης άργιλος.

CH: Παχιά άργιλος.

MH: Ελαστική ιλύς.

OH – OL: Οργανική ιλύς ή άργιλος (Σακελλαρίου, 2003).



Διάγραμμα 1.1. Χάρτης πλαστικότητας Casagrande.

### 1.3.3. Ταξινόμηση εδαφών κατά ASTM

Η ταξινόμηση των εδαφών κατά ASTM είναι μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία ταξινόμησης των εδαφικών υλικών και στηρίζεται σε εργαστηριακές δοκιμές. Βασίζεται στην χρήση πινάκων κατάταξης όπου ο μελετητής προσπαθεί να ταυτοποιήσει τις ιδιότητες του υλικού με κάποια κατηγορία. Οι απαραίτητες δοκιμές για την ταξινόμηση είναι οι παρακάτω:

- Κοκκομετρική δοκιμή. Χρησιμοποιείται η βασική σειρά των κόσκινων ώστε να μπορούν να διαχωριστούν τα ποσοστά χαλικιών, άμμου και λεπτόκοκκων καθώς και προσδιορισμός με σχετική ακρίβεια των μεγεθών της κοκκομετρικής καμπύλης ( $C_c$ ,  $C_u$ ).
- Προσδιορισμός των ορίων Atterberg του λεπτόκοκκου κλάσματος (διερχόμενου του No40).
- Προσδιορισμός του ποσοστού των οργανικών με χημικές μεθόδους.
- Στην περίπτωση οργανικών, προσδιορισμός του λόγου  $LL_{αποξηρ. σε φούρνο} / LL_{μη αποξηραμένο}$ . Εάν αυτός ο λόγος είναι μικρότερος από 0,75 θα γίνεται ταξινόμηση

οργανικών υλικών αν όχι θα ακολουθείται η συνήθης ταξινόμηση για μη οργανικά.

Η ταξινόμηση των εδαφικών δειγμάτων διευκολύνεται όταν χρησιμοποιείται κατάλληλο λογισμικό (πρόγραμμα) ηλεκτρονικού υπολογιστή. Μάλιστα, έχουν αναπτυχθεί λογισμικά ταξινόμησης που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη (έμπειρα συστήματα - νευρωνικά δίκτυα) (Σακελλαρίου, 2003).

### 1.3.4. Πίνακες ταξινόμησης κατά ASTM

Πίνακας 1.2. Κύριες κατηγορίες εδαφών, ονοματολογία.

ΚΥΡΙΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ		ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ
ΧΟΝΔΡΟΚΟΚΚΑ ΕΛΛΑΦΗ	ΧΑΛΙΚΙΑ (λιγότερο από 50% του χονδρόκοκκου διέρχεται από κόσκινο Νο4)	GW	Χαλίκι καλά διαβαθμισμένο με μίγμα άμμου-χαλικιού. Λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
		GP	Χαλίκι κακής διαβάθμισης με μίγμα άμμου-χαλικιού. Λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
		GM	Χαλίκια ιλυώδη, μίγμα χαλικιών, άμμου και ιλύος.
		GC	Ιλυώδης άργιλος, μίγμα χαλικιών, άμμου και αργίλου.
	ΑΜΜΟΣ (πάνω από 50% του χονδρόκοκκου διέρχεται από κόσκινο Νο4)	SW	Άμμος καλά διαβαθμισμένη με χαλίκια, λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
		SP	Άμμος κακής διαβάθμισης με χαλίκια, λίγα ή καθόλου λεπτόκοκκα.
		SM	Ιλυώδης Άμμος.
		SC	Αργιλώδης Άμμος.
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΑ ΕΛΛΑΦΗ	ΙΛΥΣ ΚΑΙ ΑΡΓΙΛΟΣ Όριο υδαρότητας 50% ή μικρότερο	ML	Ανόργανη ιλύς, λεπτόκοκκη άμμος, ιλυώδης ή αργιλώδης λεπτόκοκκη άμμος.
		CL	Ανόργανη άργιλος μικρής ή μέσης πλαστιμότητας, χαλικιώδης άργιλος, αμμώδης άργιλος, ιλυώδης άργιλος, ισχνή άργιλος.
		OL	Οργανική ιλύς και οργανική ιλυώδης άργιλος χαμηλής πλαστιμότητας.
	ΙΛΥΣ ΚΑΙ ΑΡΓΙΛΟΣ Όριο υδαρότητας μεγαλύτερο του 50%	MH	Ανόργανη ιλύς, μαρμαρυγιακά ή λεπτόκοκκα αμμώδη ή ιλυώδη εδάφη, ελαστική ιλύς.
		CH	Ανόργανη άργιλος μεγάλης πλαστιμότητας, παχιά άργιλος.
		OH	Οργανική άργιλος με μέση ως μεγάλη πλαστιμότητα.
ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΕΛΑΦΗ		PT	Χούμος, τύρφη και άλλα έντονα οργανικά εδάφη.

Πίνακας 1.3. Συνεκτικά εδάφη - συγκροτούμενο από Νο 200 (D = 0,074 mm) < 50% , LL < 50.

ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ		ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ			ΟΝΟΜΑΣΙΑ		
			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ No 200		ΑΜΜΟΣ – ΧΑΛΙΚΙΑ			
LL<50	PI > 7 Και σημεία επάνω στη ή επάνω από τη γραμμή «Α»	CL	< 30%	< 15% συγκρ. Νο 200	-	Ισχνή άργιλος		
				15-29% συγκρατ. Νο 200	% άμμου > % χαλικιών	Ισχνή άργιλος με άμμο		
					% άμμου < % χαλικιών	Ισχνή άργιλος με χαλίκια		
			≥ 30%	% άμμου > % χαλικιών	< 15% χαλίκια	Αμμώδης ισχνή άργιλος		
					≥ 15% χαλίκια	Αμμώδης ισχνή άργιλος με χαλίκια		
				% άμμου < % χαλικιών	<15% άμμος	Χαλικώδης ισχνή άργιλος		
	4 < PI < 7 Και σημεία επάνω στη ή επάνω από τη γραμμή «Α»	CL - ML	< 30%	<15% συγκρ. Νο 200	-	Ιλυώδης άργιλος		
				15-29% συγκρατ. Νο 200	% άμμου > % χαλίκια	Ιλυώδης άργιλος με άμμο		
					% άμμου < % χαλίκια	Ιλυώδης άργιλος με χαλίκια		
			≥ 30%	% άμμου > % χαλικιών	< 15% χαλίκια	Αμμώδης- Ιλυώδης άργιλος		
					≥ 15% χαλίκια	Αμμώδης – Ιλυώδης άργιλος με χαλίκια		
				% άμμου < % χαλικιών	< 15% άμμος	Χαλικώδης – Ιλυώδης άργιλος		
			PI < 4 Η σημεία κάτω από τη γραμμή «Α»	ML	< 30%	< 15% συγκρ. Νο 200	-	Ιλύς
						15-29% συγκρατ. Νο 200	% άμμου > % χαλίκια	Ιλύς με άμμο
							% άμμου < % χαλίκια	Ιλύς με χαλίκια
≥ 30%	% άμμου > % χαλικιών	< 15% χαλίκια			Αμμώδης ιλύς			
		≥ 15% χαλίκια			Αμμώδης ιλύς με χαλίκια			
	% άμμου < % χαλικιών	< 15% άμμος			Χαλικώδης ιλύς			
			≥ 15% άμμος	Χαλικώδης ιλύς με άμμο				

Πίνακας 1.4. Συνεκτικά εδάφη - συγκροτούμενο από Νο 200 (D = 0,074 mm) < 50% , LL > 50.

ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ		ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ			ΟΝΟΜΑΣΙΑ
			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ No 200		ΑΜΜΟΣ - ΧΑΛΙΚΙΑ	
LL ≥ 50	Σημεία επάνω στη ή επάνω από τη γραμμή «Α»	CH	< 30%	< 15% συγκρ. Νο 200	-	Παχιά άργιλος
				15 – 29% συγκρατ. Νο 200	% άμμου > % χαλικιών	Παχιά άργιλος με άμμο
			≥ 30%	% άμμου > % χαλικιών	< 15% χαλίκια	Αμμώδης παχιά άργιλος
					≥ 15 % χαλίκια	Αμμώδης παχιά άργιλος με χαλίκια
				% άμμου < % χαλικιών	< 15% άμμος	Χαλικώδης παχιά άργιλος
					≥ 15% άμμος	Χαλικώδης παχιά άργιλος με άμμο
	Σημεία κάτω από τη γραμμή «Α»	MH	< 30%	< 15% συγκρ. Νο 200	-	Ελαστική ιλύς
				15 – 29% συγκρατ. Νο 200	% άμμου > % χαλικιών	Ελαστική ιλύς με άμμο
			≥ 30%	% άμμου > % χαλικιών	< 15% χαλίκια	Αμμώδης ελαστική ιλύς
					≥ 15% χαλίκια	Αμμώδης ελαστική ιλύς με χαλίκια
% άμμου < % χαλικιών	< 15% άμμος	Χαλικώδης ελαστική ιλύς				
	≥ 15% άμμος	Χαλικώδης ελαστική ιλύς με άμμο				



Πίνακας 1.5. Κοκκώδη εδάφη (χαλίκια>άμμος) - συγκροτούμενο από Νο 200 (D=0,074 mm) > 50%.

ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ			ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ	ΣΥΜΒΟ- ΛΙΣΜΟΣ	ΑΜΜΟΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ
ΧΑΛΙΚΙΑ	ΔΙΕΡΧΟΜ.	ΟΜΟΙΟ- ΜΟΡΦΙΑ				
% άμμου< %χαλικιών	No 200 <5%	$C_u \geq 4$ και $1 \leq C_c \leq 3$		GW	<15%	Χαλίκια καλά διαβαθμισμένα
					≥15%	Χαλίκια καλά διαβαθμισμένα με άμμο
		$C_u < 4$ και / ή $C_c < 1$ ή $C_c > 3$		GP	<15%	Χαλίκια κακής διαβάθμισης
					≥15%	Χαλίκια κακής διαβάθμισης με άμμο
	No 200 5÷12%	$C_u \geq 4$ και $1 \leq C_c \leq 3$	ML ή MH	GW – GM	<15%	Χαλίκια καλά διαβαθμισμένα με ιλύ
			CL, CH ή (CL – ML)	GW – GC	<15%	Χαλίκια καλά διαβαθμισμένα με άργιλο (ή ιλυώδη άργιλο)
		$C_u < 4$ και / ή $C_c < 1$ ή $C_c > 3$	ML ή MH	GP – GM	≥15%	Χαλίκια καλά διαβαθμισμένα με ιλύ και άμμο
					<15%	Χαλίκια κακής διαβάθμισης με ιλύ
			CL, CH ή (CL – ML)	GP – GC	<15%	Χαλίκια κακής διαβάθμισης με άργιλο (ή ιλυώδη άργιλο)
					≥15%	Χαλίκια κακής διαβάθμισης με άργιλο (ή ιλυώδη άργιλο) και άμμο
	No 200 >12%		ML ή MH	GM	<15%	Ιλυώδη χαλίκια
					≥15%	Ιλυώδη χαλίκια με άμμο
		CL ή CH	GC	<15%	Αργιλώδη χαλίκια	
				≥15%	Αργιλώδη χαλίκια με άμμο	
		CL - ML	GC - GM	<15%	Ιλυοαργιλώδη χαλίκια	
≥15%				Ιλυοαργιλώδη χαλίκια με άμμο		

Πίνακας 1.6. Κοκκώδη εδάφη (άμμος > χαλίκια) - συγκροτούμενο από Νο 200 (D=0,074 mm) > 50%.

ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ			ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ	ΣΥΜΒΟ- ΛΙΣΜΟΣ	ΧΑΛΙΚΕΣ	ΟΝΟΜΑΣΙΑ
ΑΜΜΟΣ	ΔΙΕΡΧΟΜ.	ΟΜΟΙΟ- ΜΟΡΦΙΑ				
% άμμου > %χαλικιών	No 200 <5%	$C_u \geq 6$ και $1 \leq C_c \leq 3$		SW	<15%	Άμμος καλά διαβαθμισμένη
					$\geq 15\%$	Άμμος καλά διαβαθμισμένη με χαλίκια
		$C_u < 6$ και / ή $C_c < 1$ ή $C_c > 3$		SP	<15%	Άμμος κακής διαβάθμισης
					$\geq 15\%$	Άμμος κακής διαβάθμισης με χαλίκια
	No 200 5÷12%	$C_u \geq 6$ και $1 \leq C_c \leq 3$ (1*)	ML ή MH	SW – SM	<15%	Άμμος καλά διαβαθμισμένη με ιλύ
					$\geq 15\%$	Άμμος καλά διαβαθμισμένη με ιλύ και χαλίκια
			CL, CH ή (CL – ML)	SW – SC	<15%	Άμμος καλά διαβαθμισμένη με άργιλο (ή ιλυώδη άργιλο)
					$\geq 15\%$	Άμμος καλά διαβαθμισμένη με άργιλο (ή ιλυώδη άργιλο) και χαλίκια
		$C_u < 6$ και / ή $C_c < 1$ ή $C_c > 3$ (1*)	ML ή MH	SP – SM	<15%	Άμμος κακής διαβάθμισης με ιλύ
					$\geq 15\%$	Άμμος κακής διαβάθμισης με ιλύ και χαλίκια
			CL, CH ή (CL – ML)	SP – SC	<15%	Άμμος κακής διαβάθμισης με άργιλο (ή ιλυώδη άργιλο)
					$\geq 15\%$	Άμμος κακής διαβάθμισης με άργιλο (ή ιλυώδη άργιλο) και χαλίκια
	No 200 >12%		ML ή MH	SM	<15%	Ιλυώδης άμμος
					$\geq 15\%$	Ιλυώδης άμμος με χαλίκια
			CL ή CH	SC	<15%	Αργιλώδης άμμος
					$\geq 15\%$	Αργιλώδης άμμος με χαλίκια
CL - ML			SC - SM	<15%	Ιλοαργιλώδης άμμος	
				$\geq 15\%$	Ιλοαργιλώδης άμμος με χαλίκια	

**Πίνακας 1.7.** Οργανικά (συνεκτικά) εδάφη - συγκροτούμενο από Νο 200 (D = 0,074 mm) < 50% , LL < 50 και (LL<sub>αποξηραμένο σε φούρνο</sub>/LL<sub>μη αποξηραμένο</sub>) < 0,75.

ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ		ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ			ΟΝΟΜΑΣΙΑ
			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ No 200		ΑΜΜΟΣ - ΧΑΛΙΚΙΑ	
LL<50	PI ≥ 4 Και σημεία επάνω στη ή επάνω από τη γραμμή «Α»	OL	< 30%	< 15% συγκρ. Νο 200		Οργανική άργιλος
				15 – 29% συγκρατ. Νο 200	% άμμου > % χαλικιών	Οργανική άργιλος με άμμο
			≥ 30%	% άμμου > % χαλικιών	< 15% χαλίκια	Αμμώδης οργανική άργιλος
				% άμμου < % χαλικιών	≥ 15 % χαλίκια	Αμμώδης οργανική άργιλος με χαλίκια
				% άμμου < % χαλικιών	< 15% άμμος	Χαλικώδης οργανική άργιλος
					≥ 15% άμμος	Χαλικώδης οργανική άργιλος με άμμο
	PI < 4 Ή σημεία κάτω από τη γραμμή «Α»	OL	< 30%	< 15% συγκρ. Νο 200		Οργανική ιλύς
				15 – 29% συγκρατ. Νο 200	% άμμου > % χαλικιών	Οργανική ιλύς με άμμο
			≥ 30%	% άμμου > % χαλικιών	< 15% χαλίκια	Αμμώδης οργανική ιλύς
				% άμμου < % χαλικιών	≥ 15% χαλίκια	Αμμώδης οργανική ιλύς με χαλίκια
% άμμου < % χαλικιών	< 15% άμμος	Χαλικώδης οργανική ιλύς				
	≥ 15% άμμος	Χαλικώδης οργανική ιλύς με άμμο				

**Πίνακας 1.8.** Οργανικά (συνεκτικά) εδάφη - συγκροτούμενο από Νο 200 (D = 0,074 mm) < 50% , LL > 50 και (LL<sub>αποξηραμένο σε φούρνο</sub>/LL<sub>μη αποξηραμένο</sub>) < 0,75.

ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑ		ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΑ			ΟΝΟΜΑΣΙΑ
			ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ No 200		ΑΜΜΟΣ - ΧΑΛΙΚΙΑ	
LL ≥ 50	Σημεία επάνω στη ή επάνω από τη γραμμή «A»	OH	< 30%	< 15% συγκρ. Νο 200		Οργανική άργιλος
				15 – 29% συγκρατ. Νο 200	% άμμου > % χαλικιών	Οργανική άργιλος με άμμο
					% άμμου < % χαλικιών	Οργανική άργιλος με χαλίκια
			≥ 30%	% άμμου > % χαλικιών	< 15% χαλίκια	Αμμώδης οργανική άργιλος
					≥ 15 % χαλίκια	Αμμώδης οργανική άργιλος με χαλίκια
				% άμμου < % χαλικιών	< 15% άμμος	Χαλικώδης οργανική άργιλος
	≥ 15% άμμος	Χαλικώδης οργανική άργιλος με άμμο				
	Σημεία κάτω από τη γραμμή «A»	OH	< 30%	< 15% συγκρ. Νο 200		Οργανική ιλύς
				15 – 29% συγκρατ. Νο 200	% άμμου > % χαλικιών	Οργανική ιλύς με άμμο
					% άμμου < % χαλικιών	Οργανική ιλύς με χαλίκια
≥ 30%			% άμμου > % χαλικιών	< 15% χαλίκια	Αμμώδης οργανική ιλύς	
				≥ 15% χαλίκια	Αμμώδης οργανική ιλύς με χαλίκια	
			% άμμου < % χαλικιών	< 15% άμμος	Χαλικώδης οργανική ιλύς	
≥ 15% άμμος	Χαλικώδης οργανική ιλύς με άμμο					

#### 1.4. Ενεργό μέγεθος - Συντελεστής ομοιομορφίας

Η γενικότερη έκφραση της διαβάθμισης των εδαφών εκφράζεται με δύο όρους με το ενεργό μέγεθος και το συντελεστή ομοιομορφίας.

Το ενεργό μέγεθος των κόκκων ( $D_{10}$ ) ορίζεται ως η μέγιστη διάμετρος από την οποία διέρχεται το 10% κατά βάρος εδαφικών κόκκων και συνδέεται με την ευκολία που περνάει το νερό από το έδαφος. Το  $D$  αναφέρεται στο μέγεθος του κόκκου, τη φαινομενική μέση διάμετρο των κόκκων του εδάφους και ο δείκτης 10 δηλώνει το ποσοστό που είναι μικρότερο.

Μία ένδειξη για το εύρος του μεγέθους των κόκκων μας δίνεται από τον συντελεστή ομοιομορφίας, που είναι ο λόγος που λαμβάνεται με την διαίρεση της μέγιστης διαμέτρου του 60% διερχόμενου κατά βάρος εδαφικών κόκκων προς το ενεργό μέγεθος και δίνεται από την παρακάτω σχέση (Hazen):

$$C_u = D_{60}/D_{10} \quad [1.1]$$

Μεγάλη τιμή του συντελεστή  $C_u$  δηλώνει ότι τα  $D_{10}$  και  $D_{60}$  διαφέρουν αισθητά. Δεν μας δίνει πληροφορίες για τυχόν χάσματα στη διαβάθμιση όπως όταν απουσιάζει ή υπάρχει σε μικρές ποσότητες το ποσοστό ενός μεγέθους. Μεγάλη τιμή του συντελεστή ομοιομορφίας δείχνει ότι τα μεγέθη των κόκκων είναι καλά κατανεμημένα από τους μικρότερους κόκκους προς τους μεγαλύτερους κόκκους και δίνει μία γενική εικόνα του μεγίστου μεγέθους κόκκων. Το έδαφος με συντελεστή ομοιομορφίας 1 αποτελείται από κόκκους της ίδιας διαμέτρου ενώ όταν ο συντελεστής ομοιομορφίας παίρνει την τιμή 300 το έδαφος δείχνει καλή διαβάθμιση και έχει μέγιστο μέγεθος κόκκων 25.4 mm. Εδάφη που έχουν τιμές  $C_u$  μικρότερους 4 ή 5 καλούνται ομοιόμορφα και αυτά με τιμές  $C_u$  μεγαλύτερες του 10 καλούνται καλώς διαβαθμισμένα.

Μικρή τιμή του ενεργού μεγέθους δείχνει ότι το έδαφος περιέχει σημαντικό ποσοστό λεπτών κόκκων.

Στα μικτά εδάφη, το ενεργό μέρος αποτελεί το λεπτομερές κλάσμα (κολλοειδής άργιλος) ενώ το υπόλοιπο είναι γενικά αδρανές υλικό.

Σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά ASTM, αν το ποσοστό που διέρχεται από το φίλτρο No200 είναι άνω του 12%, δεν μπορεί να προσδιοριστεί το  $D_{10}$ , κατά συνέπεια ούτε τα  $C_u$  και  $C_c$ . Σε αυτήν την περίπτωση, η ταξινόμηση δεν λαμβάνει υπόψη τα παραπάνω μεγέθη. Για διερχόμενο του No200 μεταξύ 10 και 12% και αν δεν υπάρχουν αποτελέσματα υδραυλικής δοκιμής με αραιόμετρο (δοκιμή η οποία συνιστάται για

διερχόμενο του Νο200 άνω του 5%), ως  $D_{10}$  θα λαμβάνεται η διάσταση του Νο200 (0.075 mm) (Σακελλαρίου, 2003).

### 1.5. Συντελεστής καμπυλότητας

Ο συντελεστής καμπυλότητας ( $C_c$ ) είναι ένα μέτρο του σχήματος της καμπύλης ανάμεσα στα χαρακτηριστικά μεγέθη  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  και  $D_{60}$  και δίνεται από τον τύπο:

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} * D_{60}) \quad [1.2]$$

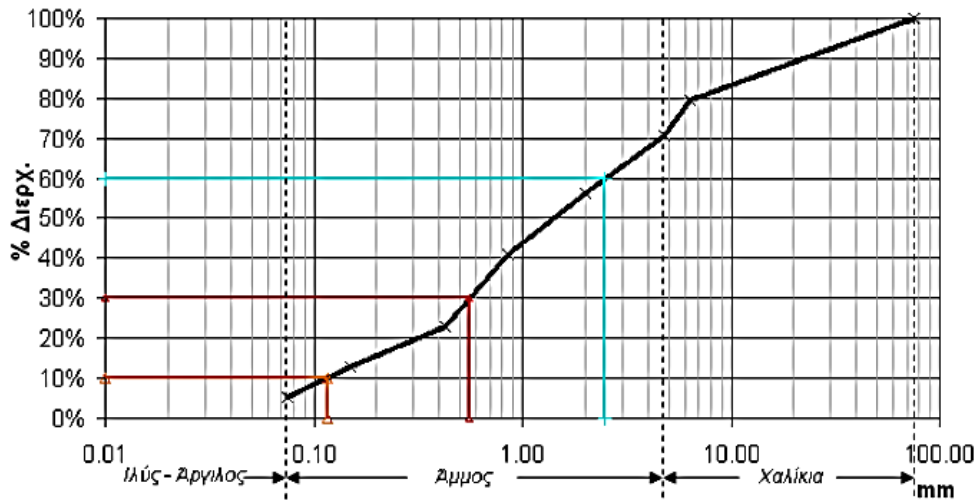
Τιμές του  $C_c$  διάφορες του 1, υποδηλώνουν ότι λείπουν κάποια μεγέθη κόκκων ανάμεσα σε αυτά τα όρια. Τα  $D_{15}$  και  $D_{85}$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της καταλληλότητας ενός εδάφους για σχεδιασμό φίλτρου σε χωμάτινο φράγμα ή σε υδρογεωτρήσεις (Σακελλαρίου, 2003).

### 1.6. Αξιολόγηση της κοκκομετρικής καμπύλης

1. Καμπύλη με ισχυρή κλίση δείχνει ότι οι κόκκοι του εδάφους είναι περίπου του ίδιου μεγέθους και άρα αυτό χαρακτηρίζεται ως ομοιόμορφο.
2. Καμπύλη ομαλής κλίσης δείχνει ευρεία σειρά μεγέθους των κόκκων και το έδαφος χαρακτηρίζεται σαν καλά διαβαθμισμένο.
3. Όταν η καμπύλη παρουσιάζει τμήματα διάφορης καμπυλότητας, το έδαφος χαρακτηρίζεται ως μίγμα δύο ή περισσότερων ομοιόμορφων υλικών (Σακελλαρίου, 2003).

#### 1.6.1. Καλά διαβαθμισμένο έδαφος

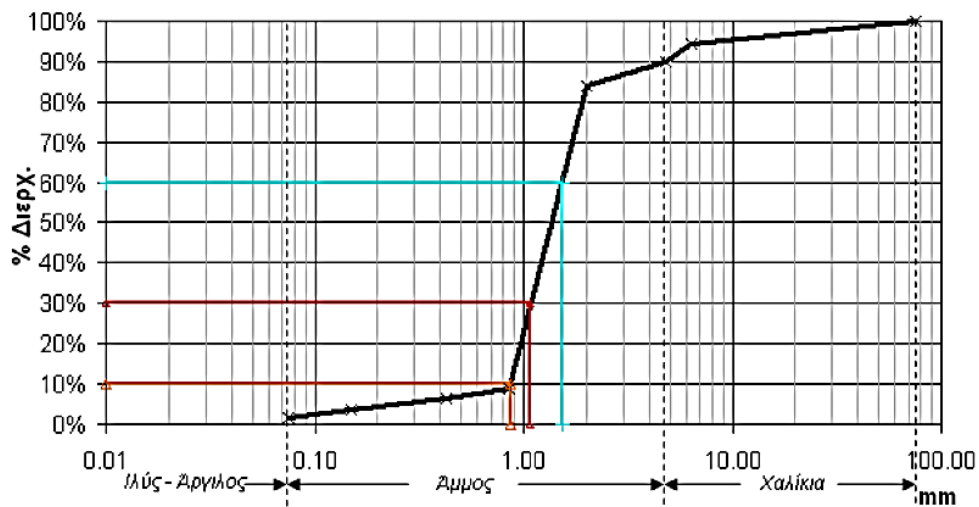
Ένα καλά διαβαθμισμένο έδαφος, είναι σχετικά σταθερό, ανθίσταται στη φθορά και τη διάβρωση, μπορεί να συμπυκνωθεί καλά και να αποκτήσει μεγάλη πυκνότητα με αποτέλεσμα να αναπτύσσει μεγάλη αντοχή στη διάτμηση και φέρουσα ικανότητα. Οι καλές ιδιότητες του υλικού προέρχονται από το γεγονός πως τα κενά μεταξύ των κόκκων συμπληρώνονται από κόκκους μικρότερης διαμέτρου. Στην συνέχεια τα κενά μεταξύ των κόκκων μικρότερης διαμέτρου συμπληρώνονται από κόκκους ακόμα μικρότερης διαμέτρου, κλπ. Η κοκκομετρική καμπύλη έχει «σιγμοειδή» μορφή με γραμμικό το κύριο σκέλος (Σακελλαρίου, 2003).



Διάγραμμα 1.2. Άμμος καλής διαβάθμισης με χαλίκια και άργιλο ( $C_u = 21.4$ ,  $C_c = 1.1$ ).

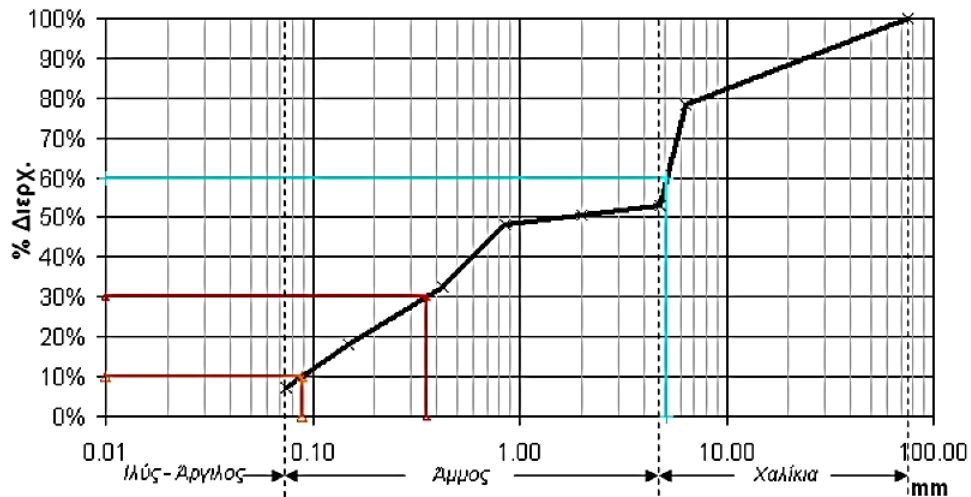
### 1.6.2. Έδαφος κακής διαβάθμισης

Ένα έδαφος όπου επικρατεί μία συγκεκριμένη διάσταση ή απουσιάζει μία γκάμα διαστάσεων είναι κακής διαβάθμισης. Ένα έδαφος όπου θα επικρατεί μία συγκεκριμένη διάσταση και δεν έχει επαρκής ποσότητα λεπτομερούς κλάσματος για να πληρώσει τα κενά μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων, δεν είναι δεκτικό συμπύκνωσης, θα έχει ανοικτή πορώδη δομή και ευκολότερη μετακίνηση των κόκκων και μικρότερη φέρουσα ικανότητα. Η κοκκομετρική καμπύλη ενός τέτοιου εδάφους θα παρουσιάζει ένα κατακόρυφο σκέλος (Διάγραμμα 1.3) (Σακελλαρίου, 2003).



Διάγραμμα 1.3. Άμμος κακής διαβάθμισης ( $C_u=1.8$ ,  $C_c=0.9$ ). Κυριαρχεί το υλικό με διάμετρο 0.85 mm (μέγιστη συγκράτηση υλικού στο κόσκινο No20).

Ένα έδαφος όπου απουσιάζει μία γκάμα διαστάσεων είναι επίσης κακής διαβάθμισης. Εκτός των προβλημάτων που οφείλονται στην κακή συμπύκνωση, το έδαφος αυτό είναι ευαίσθητο στην διέλευση του νερού, το οποίο συμπαρασύρει τους κόκκους λεπτότερης διαμέτρου και έτσι δημιουργούνται κενά με δυσμενείς επιπτώσεις στις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους. Η κοκκομετρική καμπύλη ενός τέτοιου εδάφους θα παρουσιάζει ένα οριζόντιο σκέλος (Διάγραμμα 1.4) (Σακελλαρίου, 2003).



**Διάγραμμα 1.4.** Χαλίκια με άμμο, κακής διαβάθμισης ( $C_u=57.3$ ,  $C_c=0.3$ ). Απουσιάζουν τα μεγέθη κόκκων μεταξύ 4.75 mm και 0.85 mm. (δεν συγκρατείται υλικό στα κόσκινα Νο10 και Νο20).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2  
ΣΧΕΣΕΙΣ ΝΕΡΟΥ-ΕΔΑΦΟΥΣ

## 2.1. Η κίνηση του νερού στο έδαφος

Η κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος εξαρτάται από την δύναμη που εφαρμόζεται σε κάθε στοιχειώδη όγκο νερού και από την αντίσταση στη ροή που προβάλλει το πορώδες μέσο. Επάνω σε κάθε στοιχειώδη όγκο νερού, δρουν ουσιαστικά δυο δυνάμεις: α) η δύναμη της βαρύτητας που ωθεί την πτώση του στοιχείου σε χαμηλότερο επίπεδο και β) η δύναμη που οφείλεται σε διαφορές υδροστατικής πίεσης και τείνει να προκαλέσει τη μετατόπιση του στοιχείου από περιοχές μεγάλης σε περιοχές μικρής πίεσης. Μετακίνηση του νερού μπορούν επίσης να προκαλέσουν και άλλοι φυσικοί παράγοντες όπως είναι οι διαφορές συγκέντρωσης του εδαφικού διαλύματος και οι διαφορές θερμοκρασίας του (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 1986).

### 2.1.1. Το δυναμικό του εδαφικού νερού

Στο εδαφικό νερό ασκούνται ορισμένες δυνάμεις, οι οποίες συγκρατούν το έδαφος. Οι δυνάμεις αυτές οφείλονται κατά κύριο λόγο στην ύπαρξη των διαχωριστικών επιφανειών υγρού - στερεού και υγρού αερίου. Ταυτόχρονα όμως, το εδαφικό νερό βρίσκεται και υπό την επίδραση ορισμένων δυναμικών πεδίων. Οι δυνάμεις αυτές και τα δυναμικά πεδία οφείλονται : α) στο βάρος του νερού, β) στην αλληλεπίδραση του νερού με τη στερεή φάση του εδάφους, γ) στην παρουσία διαλυτών αλάτων και ουσιών και δ) στην υψομετρική διαφορά από ένα αυθαίρετο επίπεδο αναφοράς.

Επειδή η ταχύτητα του νερού μέσα στο έδαφος είναι μικρή, η κινητική του ενέργεια θεωρείται αμελητέα. Απομένει λοιπόν η δυναμική του ενέργεια. Το νερό έχει την τάση να κινείται προς την κατεύθυνση της ελαττούμενης δυναμικής ενέργειας. Έτσι, εισάγεται η έννοια της δυναμικής ενέργειας του νερού του εδάφους ως προς ένα σύστημα αναφοράς, που οφείλεται στην ειδική θέση την οποία αυτό κατέχει και στην εσωτερική του κατάσταση και η οποία καλείται δυναμικό  $\Phi$  του νερού του εδάφους (Hillel, 1980).

Το ολικό δυναμικό του νερού θεωρείται σαν άθροισμα των επιμέρους δυναμικών

$$\Phi_t = \Phi_g + \Phi_p + \Phi_o + \dots \quad [2.1]$$

όπου  $\Phi_t$  είναι το ολικό δυναμικό,  $\Phi_g$  είναι το δυναμικό βαρύτητας,  $\Phi_p$  είναι το δυναμικό πίεσεως,  $\Phi_o$  είναι το οσμωτικό δυναμικό.

### 2.1.2. Υδραυλικό φορτίο

Εάν ληφθούν υπόψη μόνο τα δυναμικά πίεσεως και βαρύτητας τα οποία ουσιαστικά συμβάλλουν στην κίνηση του νερού το ολικό δυναμικό του νερού δίνεται από την σχέση:

$$\Phi_t = \Phi_g + \Phi_p \quad [2.2]$$

Το δυναμικό της βαρύτητας του εδαφικού νερού προσδιορίζεται σε κάθε σημείο του από το υψόμετρο θέσεως του σημείου αυτού ως προς ένα επίπεδο αναφοράς που εκλέγεται αυθαίρετα και έτσι ώστε να είναι πάντα θετικό. Εκφρασμένο ανά μονάδα βάρους γράφεται:

$$\Phi_g = \pm Z \quad [2.3]$$

όπου +Z είναι ο άξονας θετικός κατευθυνόμενος προς τα πάνω και -Z είναι ο άξονας θετικός κατευθυνόμενος προς τα κάτω. Καλείται και ύψος θέσης (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 1986).

Το δυναμικό πίεσεως μετριέται σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση που παίρνεται ίση με το μηδέν. Εκφρασμένο ανά μονάδα βάρους γράφεται:

$$\Phi_p = h \quad [2.4]$$

και καλείται και ύψος πίεσης (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 2003). Στην ακόρεστη ζώνη η τιμή του h είναι αρνητική, καλείται μύζηση και συμβολίζεται με Ψ. Επομένως:

$$H = h \pm Z = \Phi_t \quad [2.5]$$

όπου H είναι το υδραυλικό φορτίο (Ευαγγελίδης, 2001).

### 2.2. Υδατοπερατότητα (K) - Διηθητικότητα (i)

Εάν πάρουμε ένα δείγμα εδάφους και το κατακλύσουμε με νερό διατηρώντας σταθερό το ύψος του νερού πάνω από αυτό, θα παρατηρήσουμε ότι το νερό, όταν εισέλθει στο έδαφος, γεμίζει σιγά σιγά τους πόρους του διώχνοντας τον αέρα που ήταν μέσα σ' αυτούς. Όταν όλοι οι πόροι του εδάφους γεμίσουν με νερό, τότε λέμε ότι το έδαφος βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού ή απλά ότι είναι κορεσμένο σε νερό. Η εκδίωξη του αέρα είναι τελειότερη όταν το δείγμα διατρέχεται από τα κάτω προς τα πάνω, γιατί έτσι αποφεύγεται ο εγκλωβισμός αέρα μέσα σε θύλακες, πράγμα που μπορεί να συμβεί όταν η διαβροχή γίνεται από τα πάνω προς τα κάτω. Η ιδιότητα του εδάφους η οποία χαρακτηρίζει την ευκολία ή τη δυσκολία εκκινήσεως του νερού μέσα από τη μάζα του

είναι η υδατοπερατότητα. Παρατηρώντας την εξέλιξη του παραπάνω φαινομένου στο χρόνο διαπιστώνουμε ότι η διείσδυση του νερού στο έδαφος γίνεται στην αρχή με σχετικά πολύ μεγάλη ταχύτητα, η οποία μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, για να αποκτήσει, στην πράξη, σε κάποια χρονική στιγμή, σταθερή τιμή. Το φαινόμενο της διεισδύσεως του νερού στο έδαφος μέσα από την επιφάνειά του το ονομάζουμε διήθηση. Η σταθερή τιμή που αποκτά τελικά η ταχύτητα διηθήσεως λέγεται βασική ή τελική διηθητικότητα (*i*) και εκφράζεται συνήθως σε χιλιοστά νερού ανά ώρα (mm/h) (Καρακατσούλη, 1997).

Οι έννοιες «τελική διηθητικότητα και συντελεστής υδατοπερατότητας» έχουν βασική σημασία στις αρδεύσεις και στις στραγγίσεις, γιατί επιτρέπουν την κατάλληλη εκλογή και διαστασιολόγηση του αρδευτικού ή του στραγγιστικού συστήματος ώστε να περιορισθούν στο ελάχιστο οι απώλειες νερού. Οι απώλειες προέρχονται από απορροές που μπορεί να εμφανισθούν στην επιφάνεια του εδάφους όταν το νερό που εφαρμόζεται για την άρδευση του αγρού είναι περισσότερο από αυτό που μπορεί να απορροφήσει το έδαφος, ή από βαθιά διήθηση του νερού σε εδαφικά στρώματα που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος από το βάθος του κυρίου ριζικού συστήματος των φυτών με συνέπεια να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά απ' αυτό (Καρακατσούλη, 1997). Ανάλογα με την τιμή της ταχύτητας διηθήσεως, που αυξάνεται όσο προχωρούμε από τα βαριά προς τα ελαφρά εδάφη, η διηθητικότητα σε cm/h διακρίνεται στις κατηγορίες που φαίνονται στον Πίνακα 2.1 (Καρακατσούλη, 1997).

**Πίνακας 2.1.** Διάκριση διηθητικότητας σε cm/h.

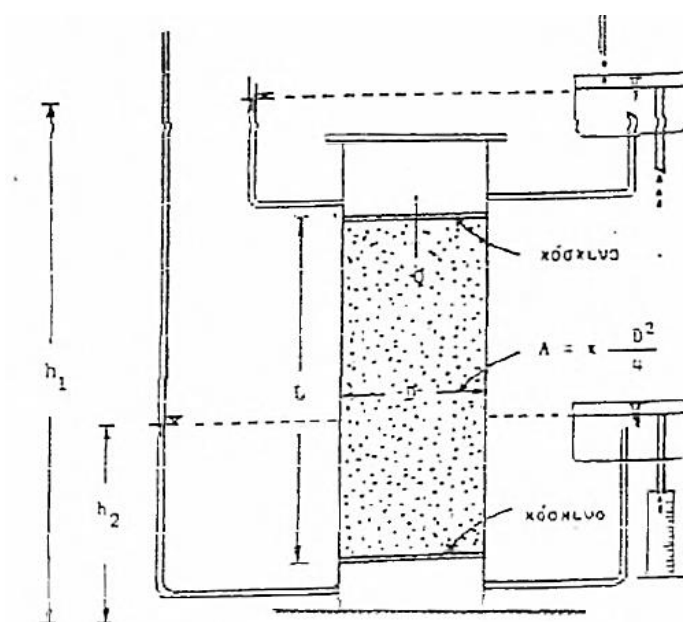
<b>Κατηγορία</b>	<b>i (cm/h)</b>
<b>Πολύ αργή</b>	0,12
<b>Αργή</b>	0,12 έως 0,50
<b>Σχετικά αργή</b>	0,50 έως 2,0
<b>Μέτρια</b>	2,0 έως 6,35
<b>Σχετικά γρήγορη</b>	6,35 έως 12,70
<b>Γρήγορη</b>	12,70 έως 25,0
<b>Πολύ γρήγορη</b>	25,0 και πάνω

### 2.3. Νόμος Darcy

Μια πρώτη προσπάθεια για την εξήγηση του μηχανισμού κινήσεως του νερού στο έδαφος έγινε από τον Poiseuille που θεώρησε το έδαφος σαν μια δέσμη από παράλληλους τριχοειδείς σωλήνες. Η ορθότητα αυτής της παραδοχής είναι πολύ σχετική γιατί το έδαφος στη φυσική του κατάσταση είναι ένα σύνολο από συνεχείς και ασυνεχείς πόρους με διαφορετικές διαστάσεις και σχήματα. Οι πόροι αυτοί άλλοτε συνδέονται μεταξύ τους με τρόπο που δίνουν μια συνεχή δίοδο στο νερό και στον αέρα και άλλοτε δεν οδηγούν πουθενά εμποδίζοντας κάθε κίνηση. Γενικά, ο μηχανισμός κινήσεως του εδαφικού νερού είναι αρκετά πολύπλοκος και δεν μπορεί να απλοποιηθεί σε βαθμό που να θεωρείται ισοδύναμος με τη ροή σε μια δέσμη παράλληλων τριχοειδών σωλήνων.

Το 1856 ο Γάλλος μηχανικός Hemy Darcy δημοσίευσε μια πειραματική εργασία πάνω στη ροή του νερού δια μέσου ομογενούς κορεσμένης άμμου. Από τα πειράματά του ο Darcy συμπεράνε ότι η παροχή  $Q$ , που περνά μέσα από την επιφάνεια  $A$  της συσκευής (Σχήμα 2.1) είναι ανάλογη προς:

1. Την επιφάνεια  $A$ .
2. Την διαφορά φορτίου  $h_1-h_2$ .
3. Το αντίστροφο του μήκους  $L$ .
4. Ένα συντελεστή αναλογίας  $K$  που ονομάζεται υδραυλική αγωγιμότητα ή υδατοπερατότητα.



Σχήμα 2.1. Πειραματική συσκευή του Darcy.

Έτσι η μαθηματική διατύπωση του τύπου του Darcy είναι:

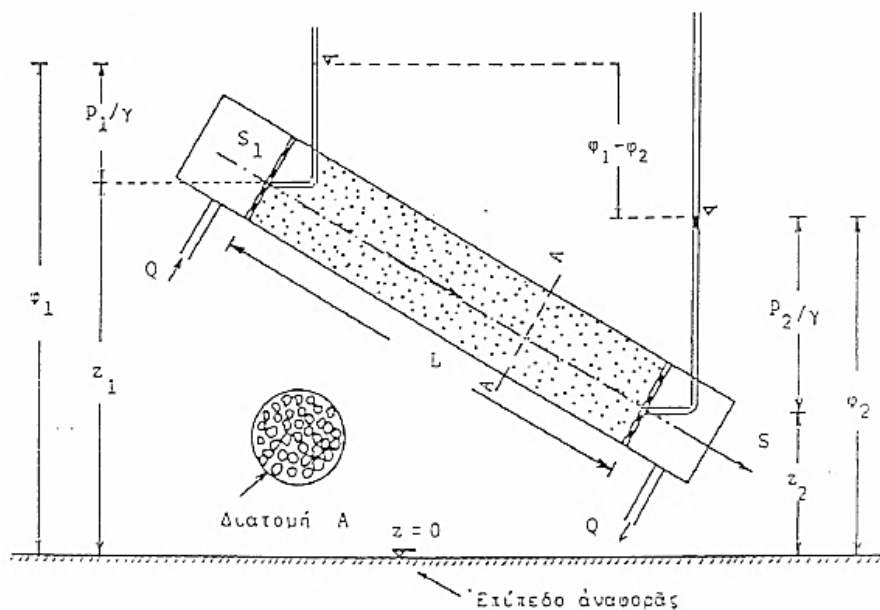
$$Q = \frac{KA(h_1-h_2)}{L} = \frac{KA(h_2-h_1)}{L} \quad [2.6]$$

Εάν καλέσουμε το λόγο  $(h_2-h_1)/L$  υδραυλική κλίση  $i$  και το λόγο  $(Q/A)$  ταχύτητα Darcy ή ειδική παροχή  $q$ , δηλαδή παροχή ανά μονάδα επιφανείας, ο τύπος του Darcy γίνεται:

$$q = -Ki \quad [2.7]$$

Μπορούμε να επεκτείνουμε το νόμο του Darcy και για ροές διά μέσου μιας κεκλιμένης στήλης με ομογενές υλικό (Σχήμα 2.2), οπότε έχουμε:

$$Q = -KA(\varphi_2 - \varphi_1)/L \quad [2.8]$$



Σχήμα 2.2. Κεκλιμένη στήλη άμμου ( $\gamma=pg$ ).

Σε αυτή την περίπτωση το δυναμικό ή υδραυλικό φορτίο  $\varphi_i$  είναι:

$$\varphi_i = z_i + p_i/(pg) \quad [2.9]$$

και  $\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1$  είναι η απώλεια ενέργειας που οφείλεται στις τριβές που δημιουργούνται διά μέσου του πορώδους μέσου. Βέβαια η ολική μηχανική ενέργεια περικλείει έναν όρο κινητικής ενέργειας. Εν τούτοις, ο όρος αυτός είναι τόσο μικρός ως προς το υδραυλικό φορτίο, ώστε σε όλα τα προβλήματα διά πορώδους μέσου παραλείπεται.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 έχουμε  $(p_1/\gamma) < (p_2/\gamma)$  και όμως η ροή δημιουργείται προς τη διεύθυνση της αυξανόμενης πίεσης, αλλά του μειωμένου φορτίου γιατί είναι  $\varphi_1 > \varphi_2$ .

Για μια στήλη οριζόντια έχουμε  $z_1 = z_2$  και

$$Q = KA(p_1 - p_2)/\gamma L \quad [2.10]$$

ενώ για στήλη κατακόρυφη έχουμε  $\varphi_1=z_1+p_1/\rho g$ ,  $\varphi_2=z_2+p_2/\rho g$ ,  $L=z_1-z_2$  και

$$Q = \frac{KA(\varphi_1-\varphi_2)}{L} = KA\left[\frac{p_1-p_2}{\rho gL} + 1\right] \quad [2.11]$$

Εάν τώρα θεωρήσουμε την πραγματική μέση ταχύτητα  $V$  διά μέσου των πόρων, τότε η πραγματική διατομή που συμμετέχει στην κίνηση είναι:  $A'=A \cdot n$  ( $n$ =το πορώδες) και η παροχή  $Q$  είναι ίση με:

$$Q = V \cdot A' = V \cdot A \cdot n$$

ή

$$q = \frac{Q}{A} = V \cdot n \rightarrow V = q/n \quad [2.12]$$

Επομένως, η πραγματική μέση ταχύτητα των πόρων  $V$  συνδέεται με την ειδική παροχή  $q$  με τη σχέση (2.12). Πολλές φορές, όταν το έδαφος σαν πορώδες μέσο περικλείει πολλούς πόρους νεκρούς, που δεν συμμετέχουν δηλαδή στην κίνηση του νερού, ορίζουμε ένα άλλο πορώδες  $n_e$ , το καλούμενο αποτελεσματικό πορώδες ( $n_e < n$ ), που περικλείει όλους τους ενεργούς πόρους και η σχέση (2.12) γίνεται:

$$V = q/n_e \quad [2.13]$$

Εάν τώρα θέσουμε στη σχέση (2.8)  $\Delta\varphi=\varphi_2-\varphi_1$  και  $L= s_2-s_1= \Delta s$  και  $q_s=(Q/A)$ , η σχέση αυτή γίνεται:

$$q_s = -K \cdot \lim \frac{\Delta\varphi}{\Delta s} = -K \frac{d\varphi}{ds} = -K \cdot i \quad [2.14]$$

Ο νόμος του Darcy που προήλθε από τα πειράματά του για μονοδιάστατη ροή μπορεί να γενικευθεί και σε τρισδιάστατη ροή με τη μορφή

$$\vec{q} = -K \overrightarrow{\text{grad}}_{\varphi} \quad [2.15]$$

όπου  $\vec{q}$  είναι το διάνυσμα ειδική παροχή με συνιστώσες  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_z$  και  $\overrightarrow{\text{grad}}_{\varphi}$  είναι η υδραυλική κλίση που ορίζεται ως εξής:

$$\overrightarrow{\text{grad}}_{\varphi} = \frac{\partial\varphi}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y} \cdot \vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z} \cdot \vec{k} \quad [2.16]$$

σε ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (Τζιμόπουλος, 1997).

#### 2.4. Εξίσωση συνεχείας

Η εξίσωση συνεχείας αποτελεί για τα ρευστά τη μαθηματική διαφορική έκφραση της αρχής της συνέχειας, που με τη σειρά της εκφράζει το νόμο της διατήρησης της μάζας: «η μάζα ενός ρευστού δεν δημιουργείται ούτε καταστρέφεται». Η εξίσωση συνεχείας μπορεί να γραφεί με διάφορες μορφές ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο

σύστημα συντεταγμένων και με τον τύπο της ροής. Για ασταθή ροή σε ακόρεστο πορώδες μέσο, η εξίσωση συνεχείας γράφεται:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_w \theta) = -\text{div}(\rho_w \vec{q}) \quad [2.17]$$

όπου  $\rho_w$ , η πυκνότητα του νερού ( $M \cdot L^{-3}$ ),  $\theta$  η περιεκτικότητα σε νερό κατ' όγκο ( $L^3 \cdot L^{-3}$ ),  $q$  η ταχύτητα Darcy ( $L \cdot T^{-1}$ ) και  $t$  ο χρόνος (T).

Για ασυμπίεστο υγρό και ροή ασταθή μονοδιάστατη κατακόρυφη η εξίσωση (2.17) γράφεται:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad [2.18]$$

(Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 1986).

## 2.5. Εξίσωση κινήσεως

Οι εξισώσεις της κινήσεως των ρευστών βασίζονται στο δεύτερο νόμο του Νεύτωνα: «Η συνισταμένη  $F$  των δυνάμεων που ενεργούν πάνω σε ένα υλικό σώμα ισούται με το γινόμενο της μάζας  $m$  του σώματος επί την επιτάχυνση του  $a$ ».

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad [2.19]$$

Στην περίπτωση της κινήσεως των ρευστών η συνισταμένη δύναμη  $F$  αποτελείται από τις σωματικές και τις επιφανειακές δυνάμεις. Οι σωματικές οφείλονται στην επενέργεια των διαφόρων πεδίων δυναμικού, όπως το πεδίο της βαρύτητας ή το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Οι δυνάμεις αυτές ενεργούν πάνω στο κέντρο βάρους του σώματος. Οι επιφανειακές δυνάμεις ενεργούν πάνω στην επιφάνεια του σώματος και περιλαμβάνουν τις δυνάμεις πίεσεως, οι οποίες ενεργούν κάθετα προς τα όρια της επιφάνειας και τις δυνάμεις τριβής ή διατμητικές δυνάμεις, λόγω του ιξώδους, οι οποίες ενεργούν παράλληλα προς τα όρια της επιφάνειας. Στην περίπτωση των τέλειων ρευστών οι δυνάμεις τριβής παραλείπονται.

Η εξίσωση κίνησης για ασυμπίεστα υγρά προκύπτει από τον συνδυασμό της δυναμικής εξίσωσης (εξίσωση Darcy) και της συνεχείας και δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(K(\theta) \overrightarrow{\text{grad}H}) \quad [2.20]$$

Για μονοδιάστατη κατακόρυφη ροή η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad [2.21]$$

Όπως φαίνεται από την εξίσωση (2.21), δυο είναι οι μεταβλητές που επηρεάζουν την κίνηση : α) η περιεκτικότητα σε νερό  $\theta$  και β) το υδραυλικό φορτίο  $H$ , που συνδέονται



μεταξύ τους, όπως είναι γνωστό, από τη σχέση:  $H = -\Psi(\theta) - Z$  (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 1986).

### 2.5.1. Εξίσωση ως προς $\theta$

Αν στην εξίσωση (2.21) εισαχθεί ο συντελεστής διάχυσης:

$$D(\theta) = -K(\theta) \frac{d\Psi}{d\theta} \quad [2.22]$$

τότε προκύπτει:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} - K(\theta) \right) \quad [2.23]$$

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή σαν εξίσωση τύπου Fokker-Plank και δεν επιτρέπει την περιγραφή της ροής σε κορεσμένη ζώνη, όπου η υγρασία παίρνει την τιμή κορεσμού  $\theta$  για την οποία ο συντελεστής διάχυσης απειρίζεται (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 1986).

### 2.5.2. Εξίσωση ως προς $\Psi$

Αν στην εξίσωση (2.21) εισαχθεί ο όρος:

$$C(\theta) = \frac{d\theta}{dh} = -\frac{d\theta}{d\Psi} \quad [2.24]$$

ο οποίος καλείται ειδική υδραυλική χωρητικότητα του ακόρεστου μέσου, τότε προκύπτει:

$$C(\Psi) \frac{\partial\Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(\Psi) \left( \frac{\partial\Psi}{\partial z} + 1 \right) \right) \quad [2.25]$$

Η εξίσωση (2.25), γνωστή ως εξίσωση τύπου Richards, έχει το προνόμιο να περιγράφει τη ροή και σε κορεσμένη ζώνη και άρει τους περιορισμούς επίλυσης που εμφανίζει η εξίσωση (2.23) (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 1986).

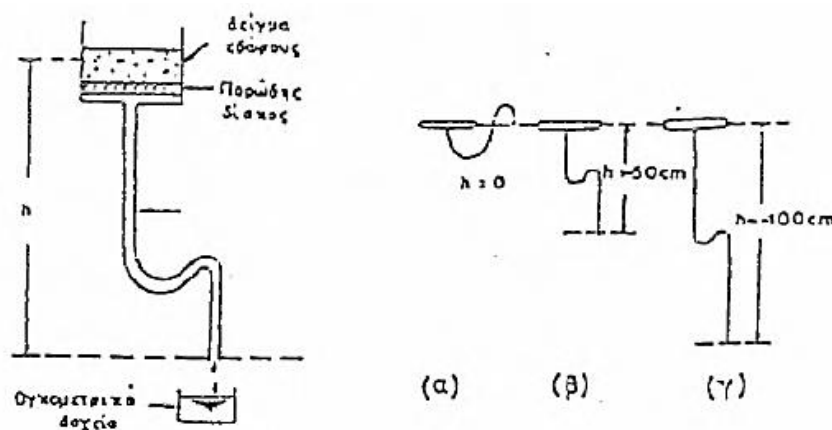
## 2.6. Η κίνηση του νερού σε ακόρεστο έδαφος

Το επιφανειακό έδαφος, όπου αναπτύσσεται το ριζικό σύστημα των φυτών, είναι κατά κανόνα ακόρεστο, περιέχει δηλαδή στους πόρους του νερό και αέρα. Στην περίπτωση αυτή η εδαφική υγρασία βρίσκεται κάτω από αρνητική πίεση που μπορεί να θεωρηθεί ίση και αντίθετη με τη δύναμη που χρειάζεται για την απομάκρυνση του νερού από τους εδαφικούς πόρους.

Αν ένα έδαφος αρχικά κορεσμένο με νερό αφηθεί να στραγγίσει, πρώτα αδειάζουν οι πόροι με τη μεγαλύτερη διάμετρο και ακολουθούν αυτοί με τη μικρότερη. Όσο λιγότερο νερό μένει στο έδαφος τόσο πιο ισχυρά συγκρατείται. Αυτή η ικανότητα συγκρατήσεως κατά κύριο λόγο εξαρτάται:

- από το μέγεθος, το σχήμα και την κατανομή των εδαφικών πόρων
- από τη γωνία επαφής του νερού με τα εδαφομόρια που περιβάλλουν τους πόρους
- από την επιφανειακή τάση.

Στο εργαστήριο, αρνητικές πιέσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε δείγματα εδάφους με τη συσκευή που φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Η συσκευή αποτελείται από ένα κυλινδρικό δοχείο που πάνω στον πυθμένα του τοποθετείται ένας πορώδης δίσκος με πολύ μικρούς πόρους. Κάτω από το δίσκο, στον πυθμένα του κυλίνδρου προσαρμόζεται ένας εύκαμπτος σωλήνας με μικρή διάμετρο. Πάνω στο δίσκο τοποθετείται το δείγμα του εδάφους, το οποίο αρχικά είναι κορεσμένο με νερό. Ο εύκαμπτος σωλήνας είναι επίσης γεμάτος με νερό και το ελεύθερο άκρο του βρίσκεται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο με το δείγμα (Τζιμόπουλος, 1997).

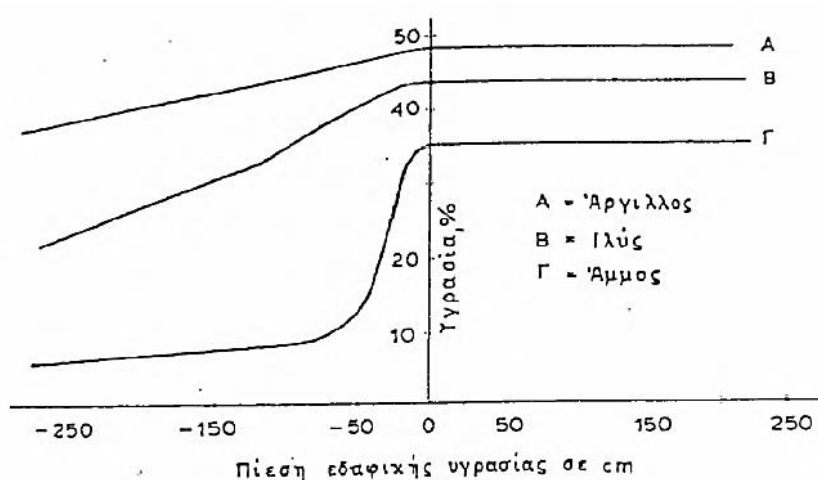


Σχήμα 2.3. Συσκευή εφαρμογής αρνητικών πιέσεων σε δείγματα εδάφους.

Στη θέση αυτή, που φαίνεται στην περίπτωση (α) στο Σχήμα 2.3, στο σύστημα δεν παρατηρείται καμία κίνηση νερού. Αν το ελεύθερο άκρο του σωλήνα υποβιβαστεί σε κάποια προκαθορισμένη θέση (πχ. 50cm στην περίπτωση (β) στο Σχήμα 2.3), νερό θα αρχίσει να εκρέει από το ελεύθερο άκρο του σωλήνα γιατί η υδραυλική κλίση του συστήματος δεν είναι τώρα μηδενική όπως στην περίπτωση (α). Η εκροή θα συνεχιστεί μέχρι να αποκατασταθεί νέα ισορροπία, μέχρι δηλαδή η υδραυλική κλίση μηδενιστεί

και πάλι. Το δείγμα του εδάφους δεν είναι πλέον κορεσμένο και έχει αναπτυχθεί αρνητική πίεση που είναι ίση με την απόσταση του άκρου του σωλήνα από το εδαφικό δείγμα. Η ίδια διαδικασία, με διαδοχικούς υποβιβασμούς, μπορεί να εφαρμοστεί για τη δημιουργία όποιων άλλων αρνητικών πιέσεων έχουν αποφασιστεί.

Αν για κάθε αρνητική πίεση προσδιορίζεται ταυτόχρονα και η υγρασία του δείγματος, οι παρατηρήσεις αυτές μπορούν να μετατραπούν σε καμπύλες που συνδέουν την υγρασία με την αρνητική πίεση. Τέτοιες καμπύλες, για τρία διαφορετικά εδάφη, φαίνονται στο Διάγραμμα 2.4. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, όταν η πίεση είναι θετική η εδαφική υγρασία παραμένει αμετάβλητη στο επίπεδο κορεσμού.

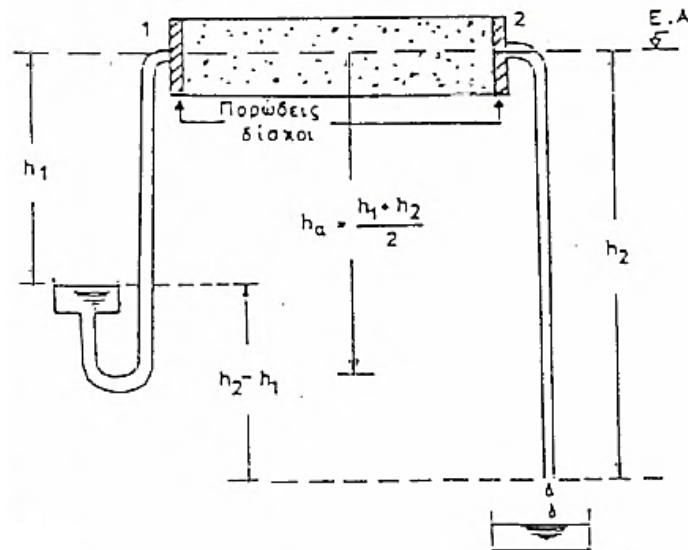


**Διάγραμμα 2.4.** Καμπύλες μεταβολής της εδαφικής υγρασίας σε σχέση με την αρνητική πίεση (χαρακτηριστικές καμπύλες).

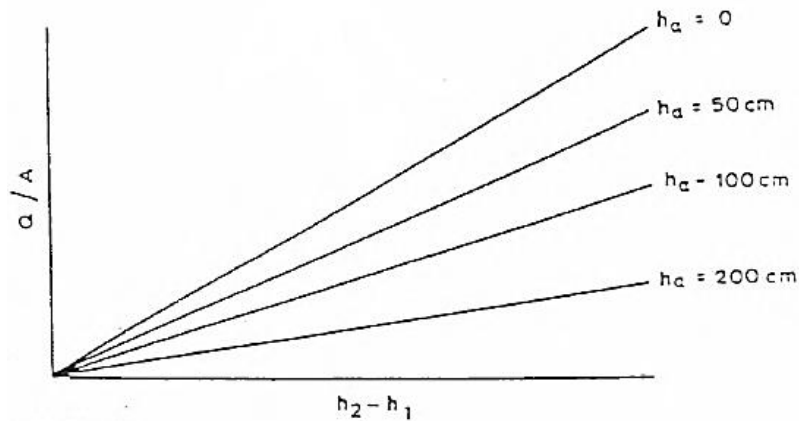
Για τον λόγο αυτό στα διαγράμματα παραλείπονται οι θετικές πιέσεις. Επίσης παραλείπεται και το αρνητικό πρόσημο, αφού αυτό θεωρείται αυτονόητο. Αν εξετάσουμε τις καμπύλες του Διαγράμματος 2.4 παρατηρούμε ότι τα ελαφρά εδάφη χάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό της υγρασίας τους κάτω από αρνητικές πιέσεις 20-50cm επειδή έχουν πολλούς πόρους με μεγάλη διάμετρο. Τα μέσα και βαριά εδάφη σε αυτή την περιοχή των πιέσεων χάνουν πολύ λιγότερο νερό. Γενικά, μπορεί να λεχθεί ότι κάθε τύπος εδάφους παρουσιάζει ξεχωριστή συμπεριφορά και έχει τη δική του καμπύλη. Οι καμπύλες αυτές που συνδέουν εδαφική υγρασία και αρνητική πίεση λέγονται χαρακτηριστικές καμπύλες της εδαφικής υγρασίας και έχουν πολύ μεγάλη σημασία στις αρδεύσεις.

Ας εξετάσουμε μια οριζόντια στήλη εδάφους όπου η εδαφική υγρασία είναι κάτω από αρνητικές πιέσεις, όπως φαίνεται παραστατικά στο Σχήμα 2.5. Στο σχήμα αυτό, το

ύψος πίεσεως στο αριστερό άκρο της στήλης είναι  $-h_1$  και στο δεξιό  $-h_2$ , όπου  $h_2 > h_1$ . Η ταχύτητα με την οποία το νερό κινείται μέσα στη στήλη, αν το μέσο ύψος πίεσεως  $h_a = (h_1 + h_2)/2$  είναι σταθερό, γίνεται τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά  $h_2 - h_1$ . Το  $h_a$  μπορεί να κρατιέται σταθερό αν το  $h_2$  ελαττώνεται κατά το ίδιο μέγεθος που αυξάνεται το  $h_1$  και αντίστροφα. Η σχέση ανάμεσα στη παροχή της στήλης  $Q$  και τις διαφορές  $h_2 - h_1$  για σταθερό  $h_a$  βρέθηκε ότι είναι γραμμική. Στο Διάγραμμα 2.6 δίνονται τέτοιες σχέσεις διαγραμματικά για τις διάφορες τιμές του  $h_a$  που δείχνουν ότι η κλίση των γραμμών μικραίνει όσο το  $h_a$  μεγαλώνει. Η ελάττωση αυτή της κλίσεως υποδηλώνει ότι πρόσθετοι πόροι του εδάφους έχουν χάσει το νερό τους. Οι κλίσεις των γραμμών του Διαγράμματος 2.6 αντιπροσωπεύουν τις τριχοειδείς αγωγιμότητες του εδάφους για διάφορα επίπεδα εδαφικής υγρασίας ή αρνητικής πίεσεως.



Σχήμα 2.5. Οριζόντια ακόρεστη εδαφική στήλη.



Διάγραμμα 2.6. Καμπύλες που δείχνουν τη σχέση ανάμεσα στην παροχή, το μέσο αρνητικό ύψος ( $h_a$ ) και τη διαφορά  $h_2 - h_1$ .

Η τριχοειδής αγωγιμότητα σε αντιδιαστολή προς την υδραυλική, συμβολίζεται σαν  $K(\theta)$  ή  $K(h)$  για να φανεί ότι αυτή δεν είναι σταθερή αλλά συνάρτηση της εδαφικής υγρασίας ή της αρνητικής πίεσεως (Τζιμόπουλος, 1997).

## 2.7. Η υδραυλική αγωγιμότητα σε ακόρεστα εδάφη

Τα ακόρεστα εδάφη έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν νερό, αλλά όχι στον ίδιο βαθμό με τα κορεσμένα. Η ικανότητα ενός ακόρεστου εδάφους να μεταφέρει νερό υπολογίζεται μέσω της αγωγιμότητάς του. Ο όρος τριχοειδής αγωγιμότητα χρησιμοποιείται σε αναφορά με το ακόρεστο έδαφος.

Η αγωγιμότητα ενός ακόρεστου εδάφους μπορεί να μετρηθεί με δύο τεχνικές: της σταθερής και της ασταθής κατάστασης. Η μέθοδος της σταθερής κατάστασης περιλαμβάνει την εγκατάσταση ενός συστήματος ροής στο οποίο η περιεκτικότητα σε νερό, η τάση και η ροή δεν μεταβάλλονται με το χρόνο. Στη μέθοδο ασταθούς κατάστασης αυτές οι ποσότητες αλλάζουν με το χρόνο.

Η αγωγιμότητα του ακόρεστου εδάφους εξαρτάται από τη γεωμετρία του νερού μέσα στη δομή του εδάφους. Καθώς η περιεκτικότητα του νερού μειώνεται από τον κορεσμό, οι μεγάλοι πόροι στραγγίζουν πρώτοι. Μπορεί επίσης να υπάρξει μια αύξηση της τυρβώδους ροής στο έδαφος, και αλλαγές στις ιδιότητες του νερού. Αυτοί, και ίσως και άλλοι παράγοντες συμβάλλουν σε μια ραγδαία μείωση της αγωγιμότητας με μια μείωση της ποσότητας του νερού. Η αγωγιμότητα μπορεί να μειωθεί κατά 1/100 ή 1/1000 της τιμής της στον κορεσμό, όταν η περιεκτικότητα σε νερό μειώνεται στο 1/3 atm επί τοις εκατό.

Η ροή του νερού σ' ένα συγκεκριμένο σημείο, σ' ένα ακόρεστο έδαφος μπορεί να δοθεί από το γινόμενο της αγωγιμότητας σ' εκείνο το σημείο και της υδραυλικής κλίσης:

$$v = -K(\theta)\nabla H \quad [2.26]$$

όπου  $v$  είναι ο όγκος της ροής του νερού, ή η ταχύτητα ροής. Είναι, δηλαδή, ο όγκος του νερού που περνά κάθετα ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους στη μονάδα του χρόνου.

Η αγωγιμότητα  $K(\theta)$  είναι συνάρτηση της περιεκτικότητας σε υγρασία  $\theta$  (Richards, 1931). Η δύναμη εκφράζεται ως αρνητική τιμή της κλίσης του υδραυλικού φορτίου  $H$ . Το υδραυλικό φορτίο του νερού σ' ένα ακόρεστο έδαφος είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας του νερού μέσα στον ανοικτό βραχίονα ενός σχήματος  $V$  μανομέτρου. Ο άλλος βραχίονας του μανομέτρου συνδέεται με μια διαπερατή πορώδη κάψα που έρχεται σε επαφή με το έδαφος. Η εξίσωση (2.26) είναι μια επέκταση του

νόμου του Darcy σε ακόρεστο έδαφος και θεωρείται ως μια λογική πρώτη προσέγγιση της ροής.

Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι γενικά μεγαλύτερη στα χονδρόκοκκα εδάφη από ότι στα λεπτόκοκκα. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται μερικές τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας για ορισμένες κατηγορίες εδαφών (Τζιμόπουλος, 1997).

**Πίνακας 2.1.** Υδραυλική αγωγιμότητα για διάφορους τύπους εδαφών (Τζιμόπουλος, 1997).

Τύπος Εδάφους	K (cm/s)	K (cm/s)	Μέση τιμή του K (cm/s)
Χαλίκια	$(0,3 - 31,2) \cdot 10^{-1}$	0,03 - 3,12	$4,03 \cdot 10^{-1}$
Λεπτή άμμος	$(0,2 - 189) \cdot 10^{-4}$	0,00002 – 0,0189	$2,88 \cdot 10^{-3}$
Μέση άμμος	$(0,9 - 567) \cdot 10^{-4}$	0,00009 – 0,0567	$1,42 \cdot 10^{-2}$
Χονδρή άμμος	$(0,9 - 6610) \cdot 10^{-4}$	0,00009 – 0,661	$5,2 \cdot 10^{-2}$
Ίλύς	$(0,09 - 7090) \cdot 10^{-7}$	0,000000009 – 0,000709	$2,83 \cdot 10^{-5}$
Άργιλος	$(0,1 - 47) \cdot 10^{-8}$	0,000000001 – 0,00000047	$9 \cdot 10^{-8}$

Η υδραυλική αγωγιμότητα ή υδατοπερατότητα επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως ο βαθμός συμπύκνωσης του υλικού. Εν γένει η συμπύκνωση και η δόνηση κάποιου κοκκώδους υλικού, έχει ως αποτέλεσμα το «κλείσιμο» των κενών και την μείωση της υδατοπερατότητας. Ωστόσο ο κρίσιμος παράγοντας για την υδατοπερατότητα ενός εδαφικού σχηματισμού, είναι το λεπτόκοκκο κλάσμα που περιέχει. Είναι επίσης προφανές πως εξαρτάται και από την κοκκομετρική διαβάθμιση. Μία σχέση που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της διαπερατότητα ενός σχηματισμού σύμφωνα με την κοκκομετρία είναι η παρακάτω:

$$K (cm/s) = 100 * D_{10}^2 \quad [2.27]$$

όπου  $D_{10}$ , το ενεργό μέγεθος όπως προκύπτει από την κοκκομετρική καμπύλη εκφρασμένο σε cm. Η σχέση είναι προσεγγιστική και δίνει μία τάξη μεγέθους για τον συντελεστή υδατοπερατότητας (Σακελλαρίου, 2003).

## 2.8. Συντελεστής διάχυσης

Ο συντελεστής διάχυσης του νερού, σαν συνάρτηση της περιεκτικότητας σε νερό ή του ύψους (φορτίου) πίεσης, εμφανίζεται στις εξισώσεις ροής σε ακόρεστα εδάφη. Η

συνάρτηση του συντελεστή διάχυσης απαιτείται μερικές φορές στην ανάλυση της ασταθούς ακόρεστης ροής.

Η θεωρία του συντελεστή διάχυσης του εδαφικού νερού προκύπτει από τον συνδυασμό του νόμου του Darcy με την εξίσωση συνεχείας για την διατήρηση της μάζας. Η εξίσωση που προκύπτει είναι:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla[K(\theta)\nabla H] \quad [2.28]$$

όπου  $\theta$  είναι ο όγκος του νερού που περιέχεται,  $t$  ο χρόνος,  $H$  το υδραυλικό φορτίο και  $K(\theta)$  η συνάρτηση της αγωγιμότητας. Η εξίσωση (2.28) μπορεί να γραφεί με την μορφή:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla[K(\theta)\nabla H] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad [2.29]$$

όπου  $H$  είναι το φορτίο και  $Z$  ο κάθετος άξονας στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Υποθέτοντας ότι υπάρχει μονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ του  $H$  και του  $\theta$ , επιτρέπει κάποιον να γράψει την εξίσωση (2.29) ως εξής:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla[D(\theta)\nabla \theta] + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad [2.30]$$

όπου η συνάρτηση του συντελεστή διάχυσης του νερού  $D(\theta)$  ορίζεται ως:

$$D(\theta) = K(\theta) \cdot \frac{dh}{d\theta} = K(\theta)/C(\theta) \quad [2.31]$$

Η συνάρτηση  $C(\theta)$  ή  $d\theta/dh$  είναι η ειδική αγωγιμότητα. Ο λόγος της αγωγιμότητας προς την ειδική αγωγιμότητα ονομάζεται συντελεστής διάχυσης του εδαφικού νερού.

Η μέθοδος εκροής βασίζεται στη μέτρηση του όγκου του νερού που εκρέει από ένα δείγμα που βρίσκεται στο θάλαμο πίεσης σε συνάρτηση με το χρόνο. Μια πλάκα εδάφους πάνω στη πορώδη πλάκα ή στη μεμβράνη έρχεται σε ισορροπία με την πίεση που διοχετεύεται μέσα στο θάλαμο. Η πίεση αυξάνεται σταδιακά και ο όγκος του νερού που εκρέει καταγράφεται. Ο συντελεστής διάχυσης παίρνεται από μια ανάλυση του όγκου εκροής ως προς την καμπύλη του χρόνου.

Αν η επίδραση της βαρύτητας είναι αμελητέα και η ροή είναι μονοδιάστατη η εξίσωση (2.31) γίνεται:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial x} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad [2.32]$$

Αν υποθέσουμε ότι η αγωγιμότητα  $K(\theta)$  και η ειδική αγωγιμότητα  $C(\theta)$  είναι σταθερές, στην περιοχή των αλλαγών της περιεκτικότητας σε νερό που συμβαίνουν κατά την διάρκεια μιας δεδομένης εκροής, τότε η εξίσωση της ροής γράφεται:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = D(\theta^2 h / \partial x^2) \quad [2.33]$$

η οποία είναι γραμμικής μορφής της εξίσωσης διάχυσης. Η αγωγιμότητα μπορεί να μετρηθεί με την μέθοδο σταθερής ροής και η ειδική αγωγιμότητα μπορεί να προσδιοριστεί από τις μετρήσεις της σχέσης της περιεκτικότητας σε νερό και του φορτίου πίεσης. Η αγωγιμότητα και η ειδική αγωγιμότητα μπορούν να συνδυαστούν χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.33) για τον προσδιορισμό του συντελεστή διάχυσης (Τζιμόπουλος, 1997).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3  
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

### 3.1. Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε. Η διαδικασία συνοπτικά έχει ως εξής:

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν 13 εδαφικά δείγματα τα οποία προέρχονταν από ποταμίσια άμμο. Αρχικά, απομακρύνθηκαν τα ξένα υλικά (π.χ. ρίζες, ξύλα) και έπειτα πραγματοποιήθηκε ξήρανση των δειγμάτων στον εργαστηριακό φούρνο (Εικόνες 3.1 και 3.2) στους 105°C για 24 ώρες. Ακολούθως, αφέθηκαν να αποκτήσουν θερμοκρασία δωματίου. Οι τυχόν σβώλοι που παρέμειναν μετά την ξήρανση, θρυμματίστηκαν με γουδί μέσα σε κατάλληλο δοχείο από πορσελάνη. Αμέσως μετά έγινε κοκκομετρική ανάλυση στο εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Π.Θ. με τη χρήση κόσκινων (Εικόνες 3.4 και 3.5). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού των εδαφών (με τη μέθοδο του σταθερού φορτίου).

### 3.2. Κοκκομετρική ανάλυση

Κοκκομετρική ανάλυση όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι η διαδικασία κατά την οποία προσδιορίζεται η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων (κόκκων) και το ποσοστό τους επί του ολικού βάρους του εδαφικού δείγματος. Κατά τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται ειδικό μηχάνημα κοσκινίσματος (Εικόνα 3.4), στο οποίο τοποθετούνται κόσκινα διαφόρων διατομών.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η παρακάτω:

1. Επιλέγουμε 500-1000g δείγματος το οποίο έχει ψηθεί και ξηραθεί. Προσέχουμε ώστε το δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό. Το βάρος του δείγματος μπορεί να μεταβληθεί σύμφωνα με την μέγιστη διάσταση των κόκκων του δείγματος. Οι προδιαγραφές των δοκιμών καθορίζουν το ελάχιστο βάρος του δείγματος ώστε τα αποτελέσματα της δοκιμής να είναι αντιπροσωπευτικά για το έδαφος.
2. Ζυγίζουμε το ξηρό ψημένο δείγμα και το περνάμε μέσα από μία σειρά κόσκινων ξεκινώντας από πάνω με το μεγαλύτερο της σειράς και τελειώνοντας προς τα κάτω με το μικρότερο.
3. Τοποθετούμε την σειρά των κόσκινων σε ένα ηλεκτρομαγνητικό δονητή (οριζόντιες και κατακόρυφες κινήσεις) για 5 με 10 λεπτά ανάλογα με την δυσκολία που εμπεριέχει η ποσότητα του υλικού.

4. Αφαιρούμε τα δείγματα από τη συσκευή, ζυγίζουμε τα κόσκινα για να βρούμε το συγκρατούμενο υλικό. Αθροίζουμε αυτά τα βάρη και συγκρίνουμε με το τελικό με το αρχικό βάρος μετά το ψήσιμο. Εντοπίζουμε τυχόν απώλειες δείγματος. Αν παρατηρήσουμε έλλειψη δείγματος μεγαλύτερη από 2% η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί.
5. Στη συνέχεια υπολογίζουμε το ποσοστό του εδαφικού δείγματος το οποίο συγκρατείται από κάθε κόσκινο από τη σχέση:

$$ΠΒα * D = 100 * (Βα / ΣΒα) \quad [3.1]$$

6. όπου D: η διάμετρος των οπών του κοσκίνου (mm),  
 ΠΒα: το ποσοστό του εδαφικού δείγματος, που συγκρατείται στο κόσκινο,  
 Βα: το βάρος της ποσότητας του εδαφικού δείγματος, που συγκρατήθηκε από το κόσκινο (g),  
 ΣΒα: το συνολικό βάρος του χρησιμοποιούμενου εδαφικού δείγματος.
7. Τέλος, η κοκκομετρική σύσταση παριστάνεται με μια αθροιστική καμπύλη κατανομής του μεγέθους των εδαφικών τεμαχιδίων σε ημιλογαριθμική κλίμακα όπου στον οριζόντιο (λογαριθμικό) άξονα τοποθετείται το μέγεθος των κόκκων και στον κατακόρυφο το ποσοστό των διερχομένων. Αν το ποσοστό των διερχομένων από το κόσκινο Νο200 είναι μεγαλύτερο από 12% συνιστάται η διενέργεια της υδραυλικής δοκιμής. Για την σχεδίαση της κοκκομετρικής καμπύλης, χρησιμοποιείται ένα λογισμικό φύλλων υπολογισμών (όπως το Microsoft Excel).

Η καμπύλη που παίρνουμε από την παραπάνω διαδικασία είναι ικανοποιητική για να προβλέψουμε τη συμπεριφορά μη συνεκτικών εδαφών καθώς και για την ταξινόμηση των εδαφών.

### 3.3. Πειραματικές συσκευές

Α) Ψηφιακός ζυγός Adam Equipment, ακριβείας δύο δεκαδικών ψηφίων.



Εικόνα 3.1. Ψηφιακός ζυγός (φωτ. Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, ΠΘ).

Β) Εργαστηριακός φούρνος Termaks για την ξήρανση των εδαφικών δειγμάτων, με αυτόματη διακοπή λειτουργίας με την πάροδο 24 ωρών και ρύθμιση θερμοκρασίας από 0-220°C.



Εικόνες 3.2 και 3.3. Εργαστηριακός φούρνος (φωτ. Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, ΠΘ).

Γ) Συσκευή κοσκίνισματος του εδάφους Octagon 2000 μαζί με κόσκινα της εταιρείας Endecotts τύπου MK-1, κατασκευασμένα από πεπλεγμένο σύρμα, τετραγωνικών ανοιγμάτων των οποίων το μέγεθος κυμαίνεται από 2,000mm έως και 0,053mm.

Μία σειρά κοσκίνων αποτελείται από διατομές 2,000 mm, 1,000 mm, 0,500 mm, 0,25 mm, 0,125 mm, 0,106 mm, 0,063 mm και 0,053 mm. Το άνοιγμα των κοσκίνων στη συσκευή διπλασιάζεται από το κατώτερο στο ανώτερο ώστε να έχουμε απεικόνιση στο ημιλογαριθμικό διάγραμμα σε ίσες αποστάσεις.

Για απλοποίηση της διαδικασίας, επιτρέπεται κάποια από τα κόσκινα να παραληφθούν. Κάτι τέτοιο είναι αποδεκτό αφού η αυστηρή ακολουθία διπλασιασμού του μεγέθους δεν επηρεάζει την καμπύλη κατανομής και εξακολουθεί να διασφαλίζεται η στατιστική αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

**Πίνακας 3.1.** Αντιστοιχία ενεργού μεγέθους κόκκων και διαμέτρου κόσκινου (Σακελλαρίου, 2003).

Ενεργό Μέγεθος Κόκκων (Dx)	Διάμετρος Κόσκινου (mm)
10	2,0
20	0,85
30	0,84
40	0,425
50	0,30
60	0,25
100	0,150
200	0,075

Η συσκευή διαθέτει χρονοδιακόπτη για την επιλογή του χρόνου κοσκνίσματος. Χρησιμοποιήθηκε στις κοκκομετρικές αναλύσεις όπως και στην ομογενοποίηση των εδαφικών δειγμάτων.



**Εικόνα 3.4.** Διάταξη συσκευής κοσκνίσματος με έξι κόσκινα διαφορετικών οπών (φωτ. Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, ΠΘ).



**Εικόνα 3.5.** Κόσκινα διάφορων διατομών.

### 3.4. Μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού των εδαφικών δειγμάτων

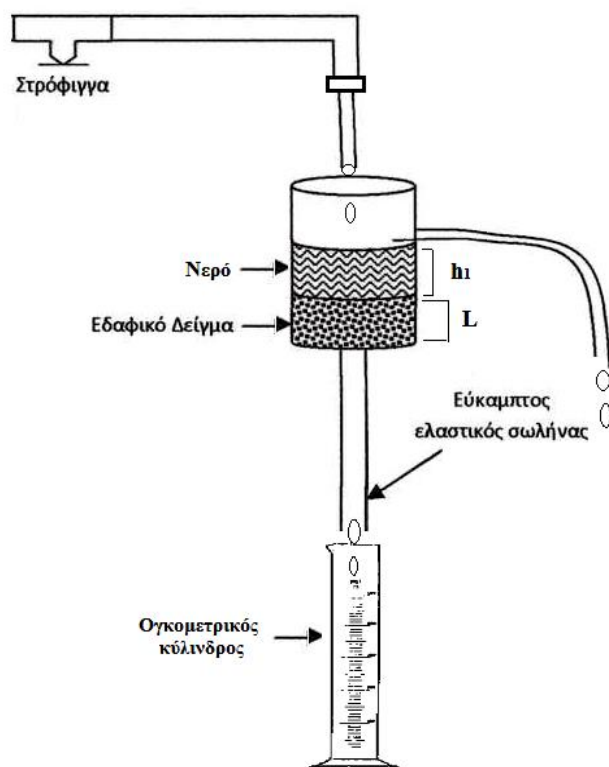
Η μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού των εδαφικών δειγμάτων έγινε με τη μέθοδο σταθερού φορτίου (συσκευή Darcy) και η οποία ορίζεται από τη σχέση:

$$Q = K_s A \Delta H L^{-1} \quad [3.4]$$

όπου  $Q$  είναι η παροχή νερού που ισούται με  $V/t$  ( $V$  είναι ο όγκος νερού που διέρχεται από το εδαφικό δείγμα και  $t$  είναι ο χρόνος),  $A$  είναι η επιφάνεια του εδαφικού δείγματος,  $\Delta H$  είναι η διαφορά φορτίου,  $L$  είναι το ύψος του εδαφικού δείγματος και  $K_s$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού. Από τη σχέση (3.4) προκύπτει:

$$K_s = \frac{VL}{tA\Delta H} \quad [3.5]$$

Επειδή η πυκνότητα του νερού είναι  $1 \text{ g/cm}^3$ , προκύπτει ότι οι μετρήσεις της μάζας νερού ισοδυναμούν με μετρήσεις όγκου.



Σχήμα 3.1. Διάταξη μέτρησης της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού με τη μέθοδο σταθερού φορτίου (φωτ. Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, ΠΘ).



**Εικόνα 3.6.** Συσκευή Darcy σταθερού φορτίου (φωτ. Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, ΠΘ).

Η γενική αρχή λειτουργίας της διάταξης του Σχήματος 3.1 είναι η εξής: νερό παροχετεύεται στο πάνω μέρος του δοχείου που περιέχει το έδαφος. Η στάθμη του νερού στο δοχείο διατηρείται σταθερή λόγω απορροής του πλεονάζοντος νερού μέσω ενός εύκαμπτου σωλήνα, ενώ το νερό που διηθείται καταλήγει σε ογκομετρικό κύλινδρο έως ότου σταθεροποιηθεί ο ρυθμός ροής του εκκρέοντος νερού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

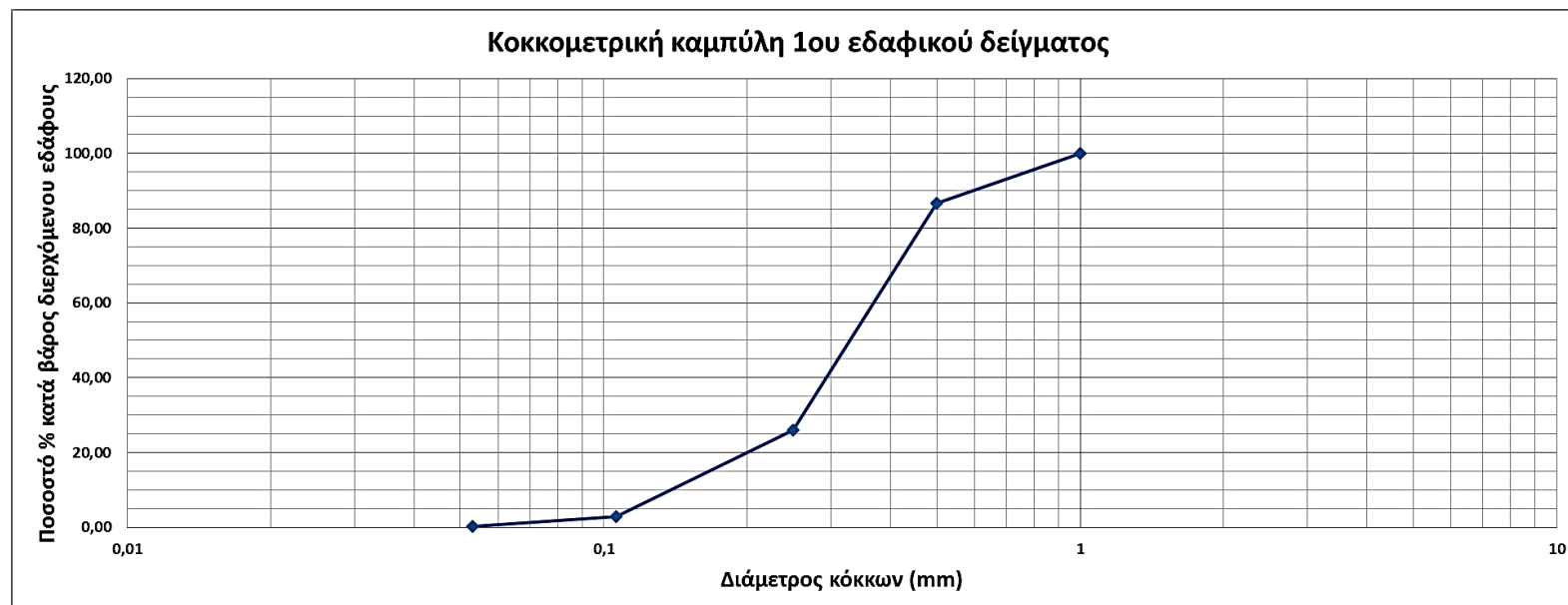


#### **4.1. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης**

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της εξίσωσης (3.1) όπου υπολογίστηκε αρχικά το ποσοστό του εδάφους που διήλθε από τα κόσκινα. Τα ποσοστά της δεξιάς στήλης (ποσοστό % κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων), προκύπτουν, αφαιρώντας διαδοχικά από το συνολικό % ποσοστό του εδάφους, το επί τοις εκατό (%) κατά βάρος ποσοστό των συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχίων. Παρατίθενται επίσης οι κοκκομετρικές καμπύλες όλων των εδαφικών δειγμάτων.

**Πίνακας 4.1.** Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 1<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

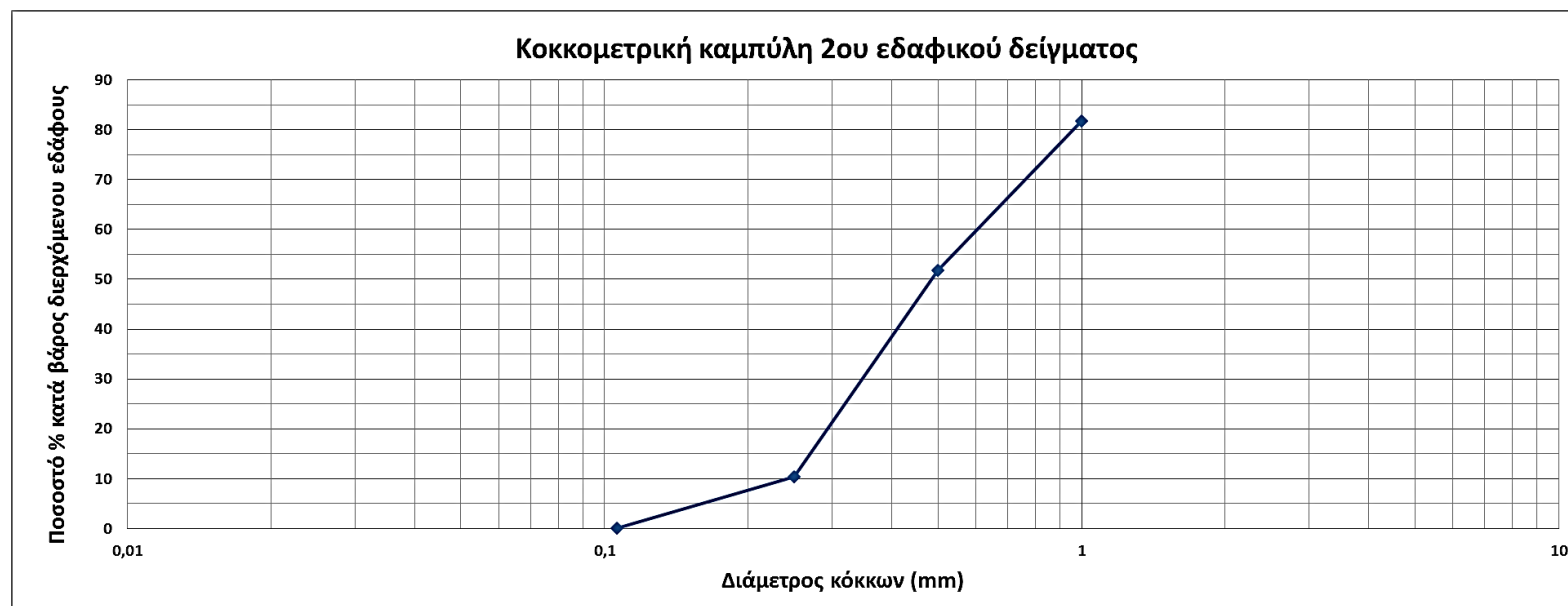
1 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	361,74	361,74	0	0	100,00
2	0,5	415,67	318,77	96,90	13,41	86,59
3	0,25	733,41	295,48	437,93	60,61	25,98
4	0,106	447,09	279,45	167,64	23,20	2,77
5	0,053	304,21	286,46	17,75	2,46	0,32
6	0	247,53	245,25	2,28	0,32	0
				<b>722,50</b>	<b>100</b>	



**Διάγραμμα 4.1.** Κοκκομετρική καμπύλη 1<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

**Πίνακας 4.2.** Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 2<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

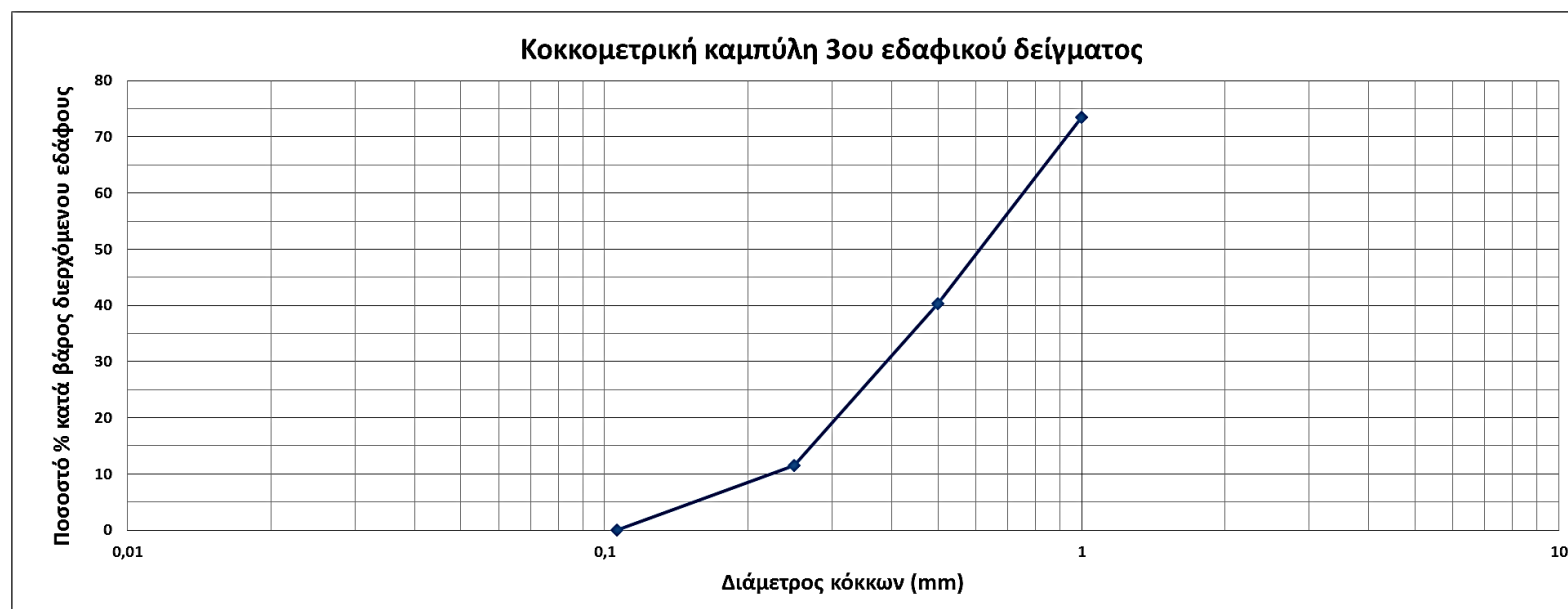
2 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	499,2	357,67	141,53	18,27	81,73
2	0,5	548	316,7	231,30	29,86	51,86
3	0,25	614,83	293,58	321,25	41,48	10,38
4	0,106	359,53	279,12	80,41	10,38	0
				<b>774,49</b>	<b>100</b>	



**Διάγραμμα 4.2.** Κοκκομετρική καμπύλη 2<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

Πίνακας 4.3. Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 3<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

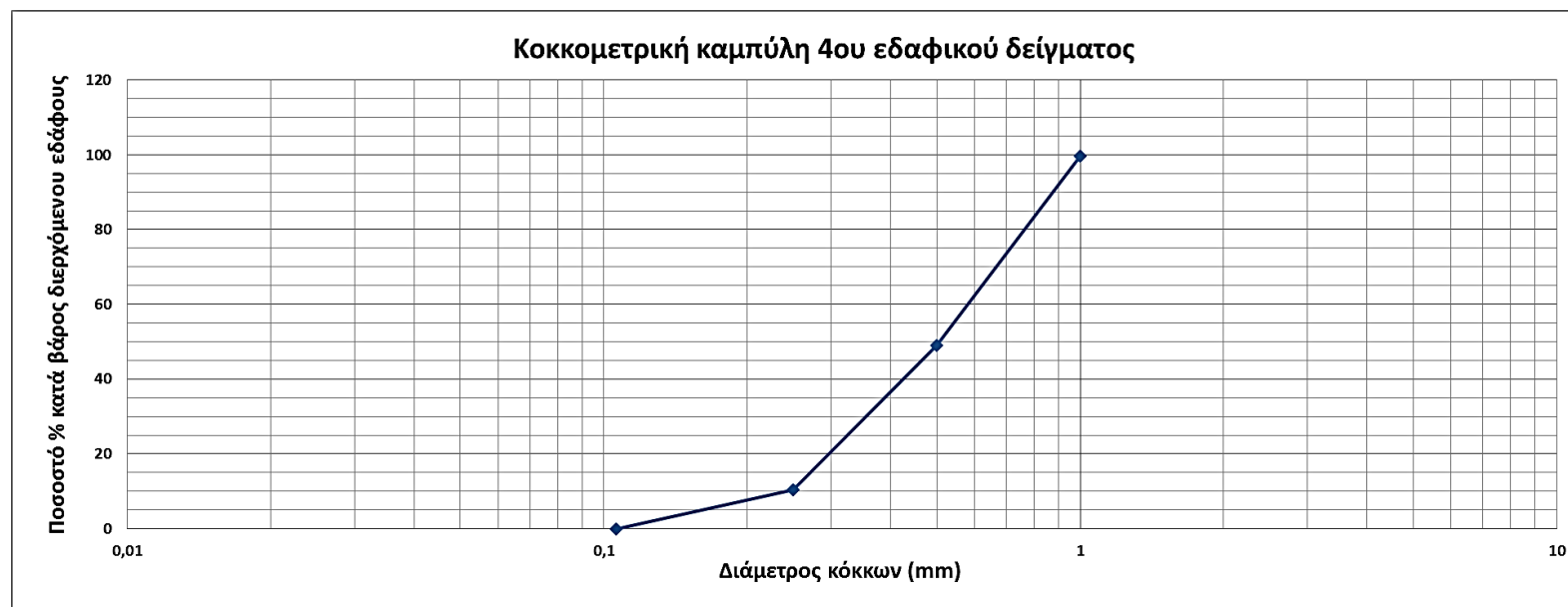
3 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	541,8	357,67	184,13	26,45	73,55
2	0,5	547,81	316,7	231,11	33,20	40,35
3	0,25	494,45	293,58	200,87	28,86	11,49
4	0,106	359,1	279,12	79,98	11,49	0
				<b>696,09</b>	<b>100</b>	



Διάγραμμα 4.3. Κοκκομετρική καμπύλη 3<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

**Πίνακας 4.4.** Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 4<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

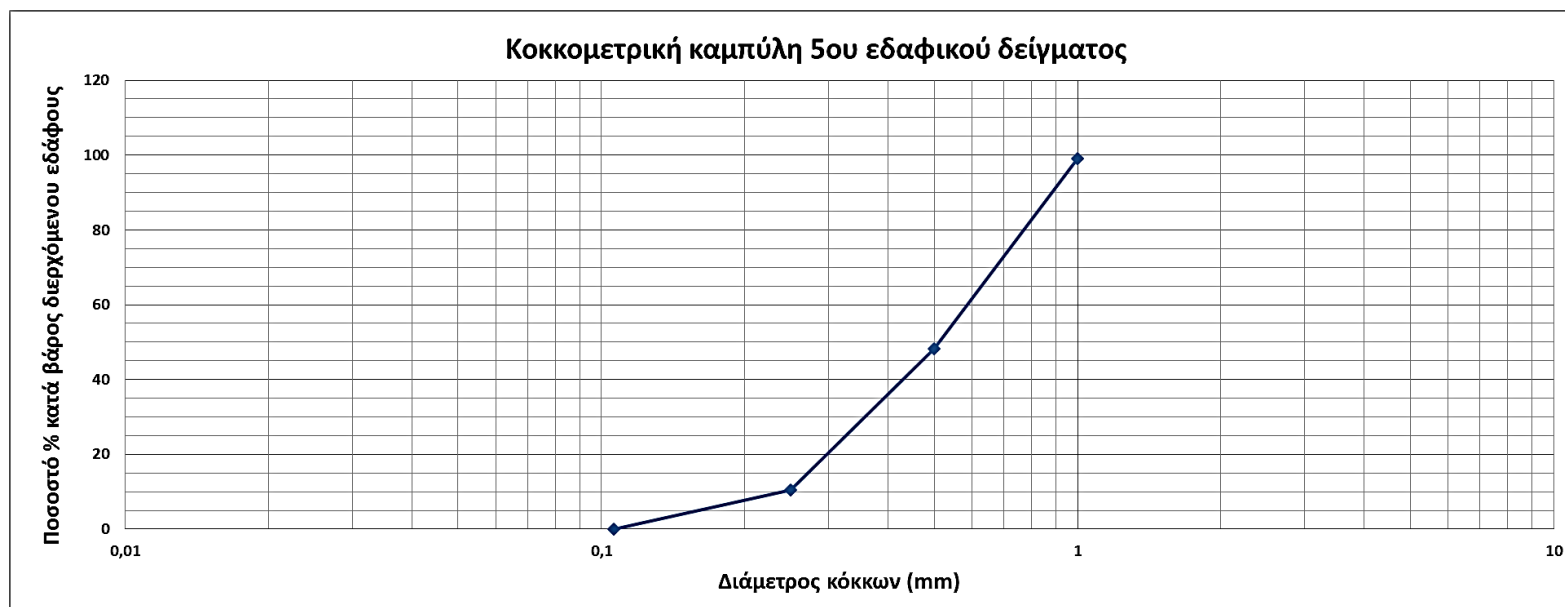
4 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	361,68	357,79	3,89	0,39	99,61
2	0,5	815,86	316,04	499,82	50,56	49,05
3	0,25	676,27	293,32	382,95	38,74	10,31
4	0,106	380,52	278,59	101,93	10,31	0
				<b>988,59</b>	<b>100</b>	



**Διάγραμμα 4.4.** Κοκκομετρική καμπύλη 4<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

Πίνακας 4.5. Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 5<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

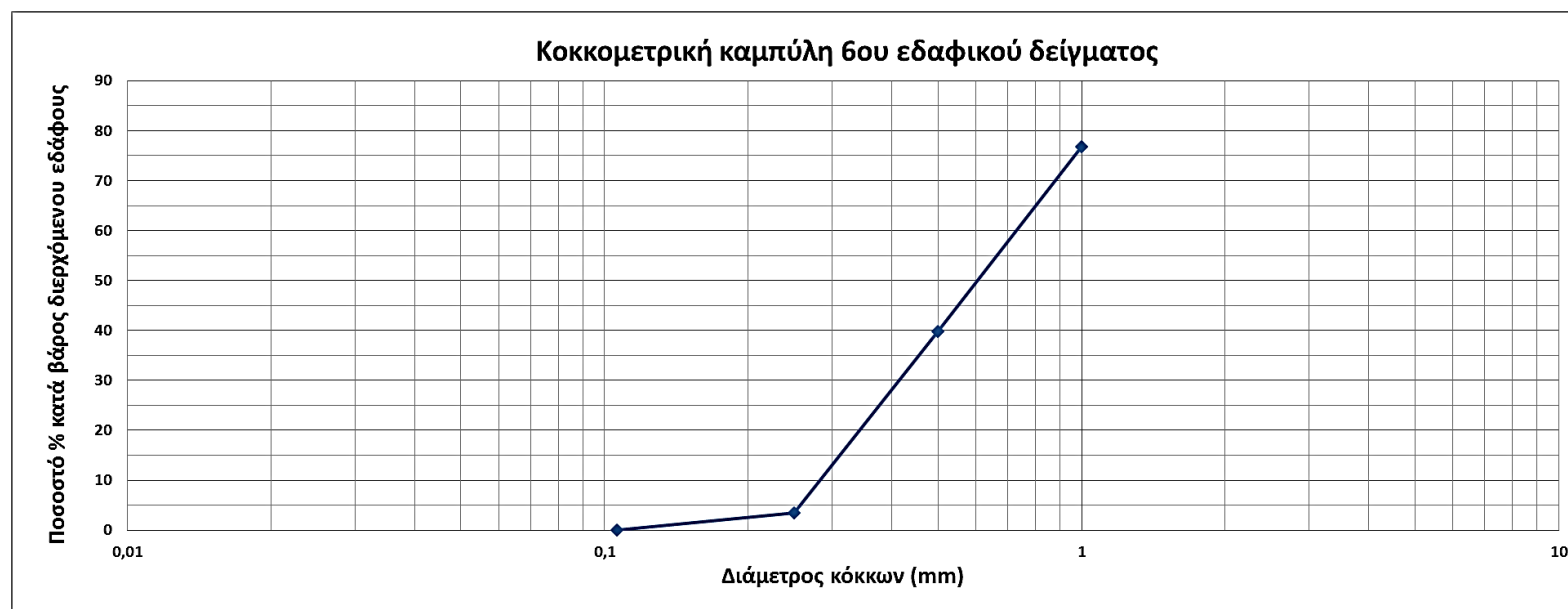
5 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	365,98	357,79	8,19	0,83	99,17
2	0,5	819,79	316,04	503,75	50,93	48,24
3	0,25	667,81	293,32	374,49	37,86	10,37
4	0,106	381,2	278,59	102,61	10,37	0
				<b>989,04</b>	<b>100</b>	



Διάγραμμα 4.5. Κοκκομετρική καμπύλη 5<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

**Πίνακας 4.6.** Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 6<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

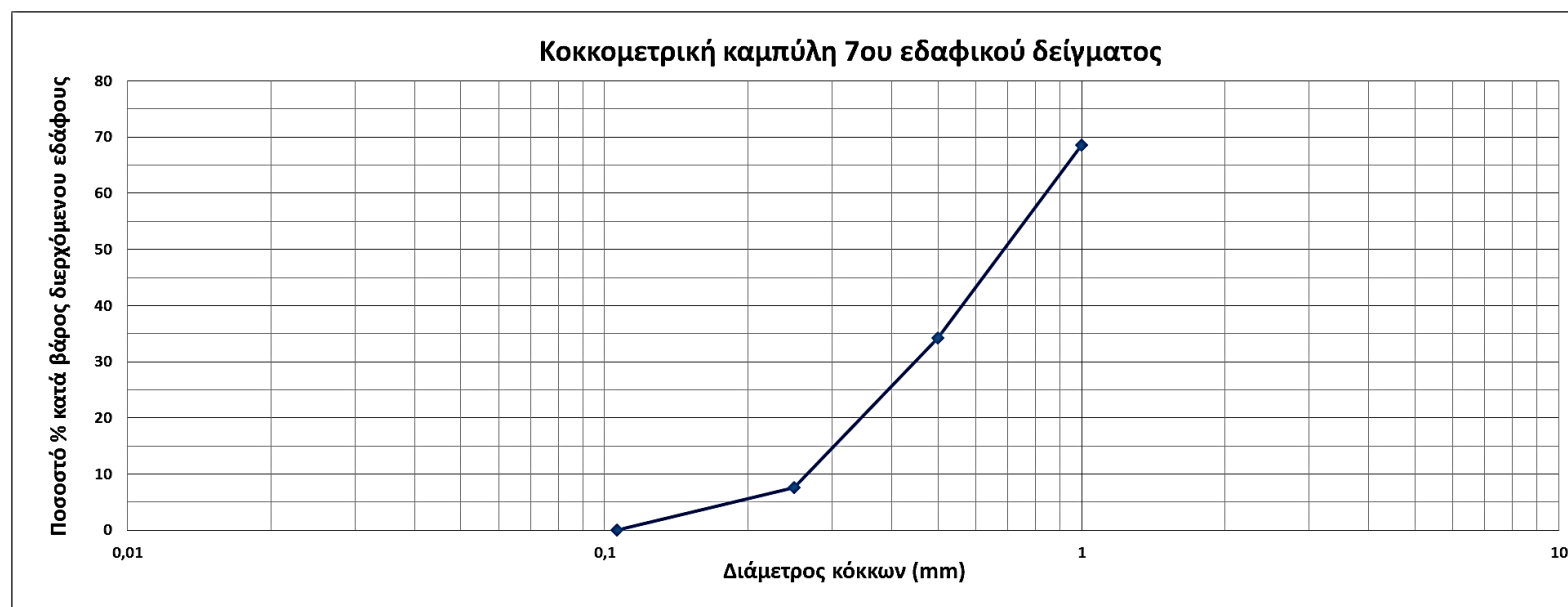
6 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	587,98	357,67	230,31	23,17	76,83
2	0,5	685,35	316,70	368,65	37,09	39,74
3	0,25	654,05	293,58	360,47	36,27	3,47
4	0,106	313,58	279,12	34,46	3,47	0
				<b>993,89</b>	<b>100</b>	



**Διάγραμμα 4.6.** Κοκκομετρική καμπύλη 6<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

Πίνακας 4.7. Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 7<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

7 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	556,08	356,98	199,10	31,41	68,59
2	0,5	532,96	315,44	217,52	34,31	34,28
3	0,25	462,04	292,57	169,47	26,73	7,55
4	0,106	325,82	277,95	47,87	7,55	0
				<b>633,96</b>	<b>100</b>	

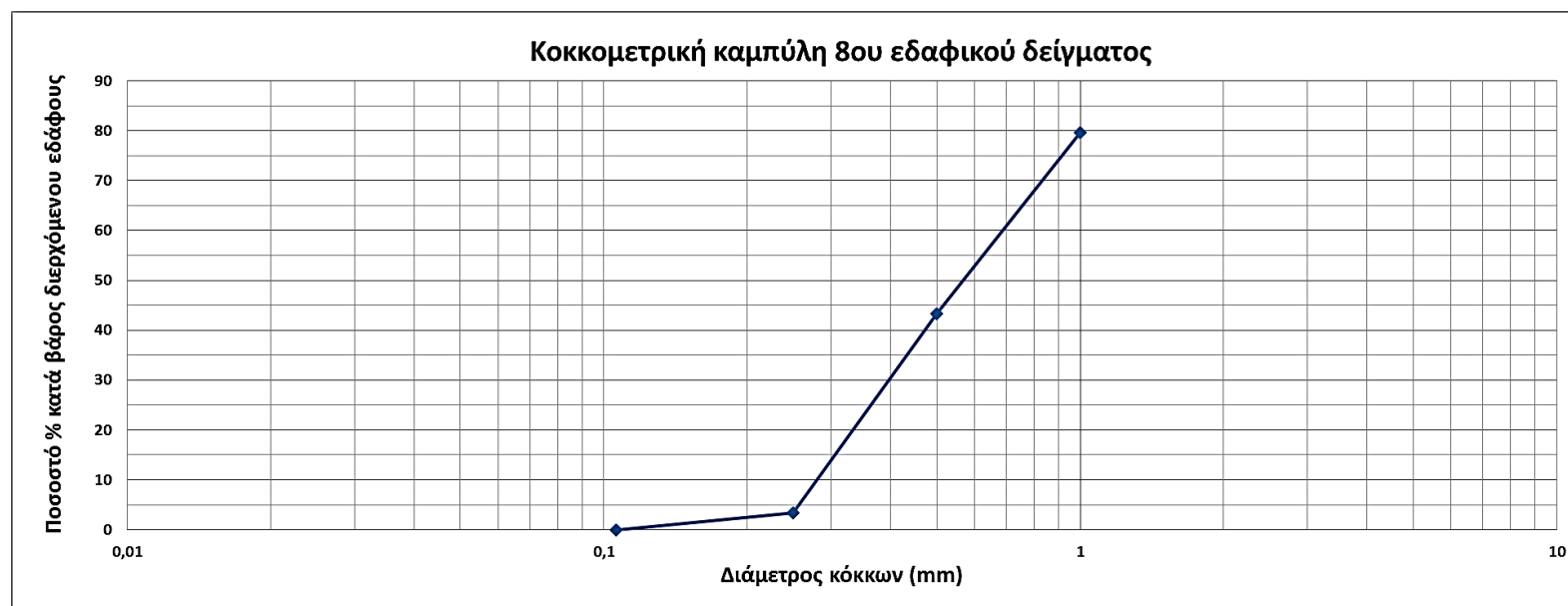


Διάγραμμα 4.7. Κοκκομετρική καμπύλη 7<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.



**Πίνακας 4.8.** Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 8<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

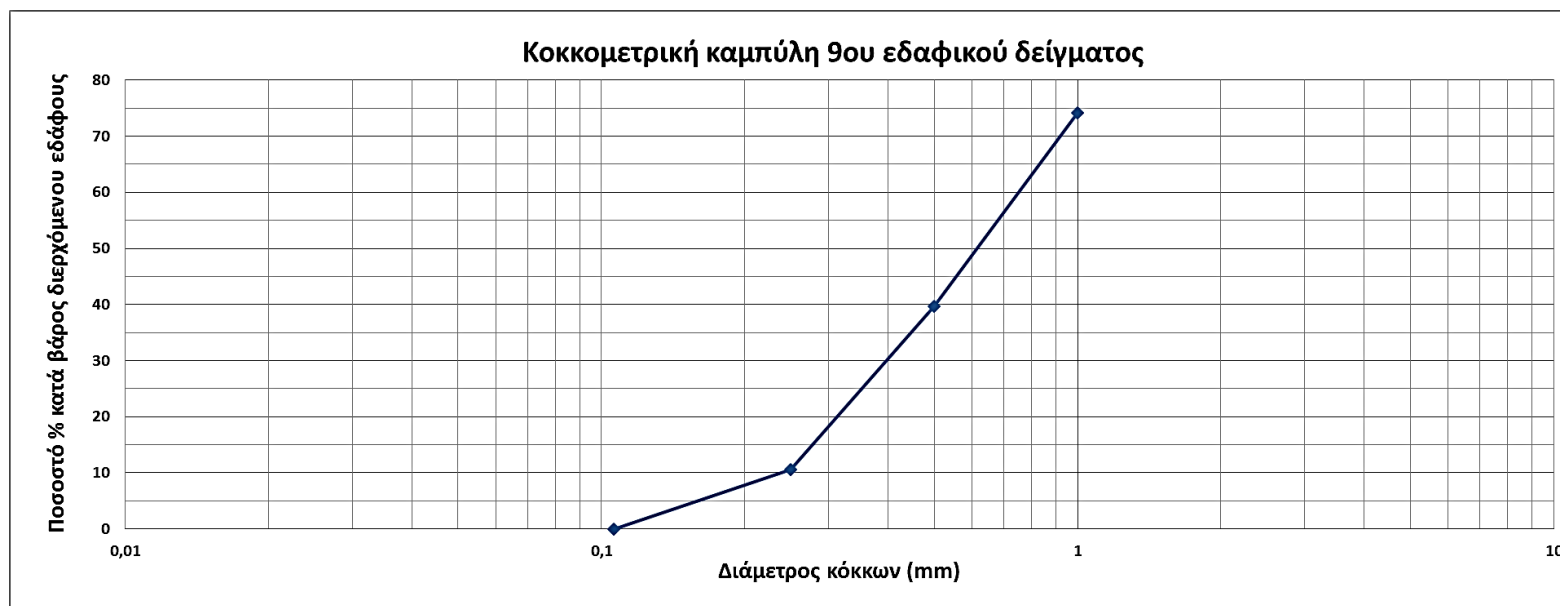
8 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	561,35	357,67	203,68	20,38	79,62
2	0,5	679,14	316,70	362,44	36,27	43,34
3	0,25	693,65	293,58	400,07	40,04	3,31
4	0,106	312,17	279,12	33,05	3,31	0
				<b>999,24</b>	<b>100</b>	



**Διάγραμμα 4.8.** Κοκκομετρική καμπύλη 8<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

**Πίνακας 4.9.** Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 9<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

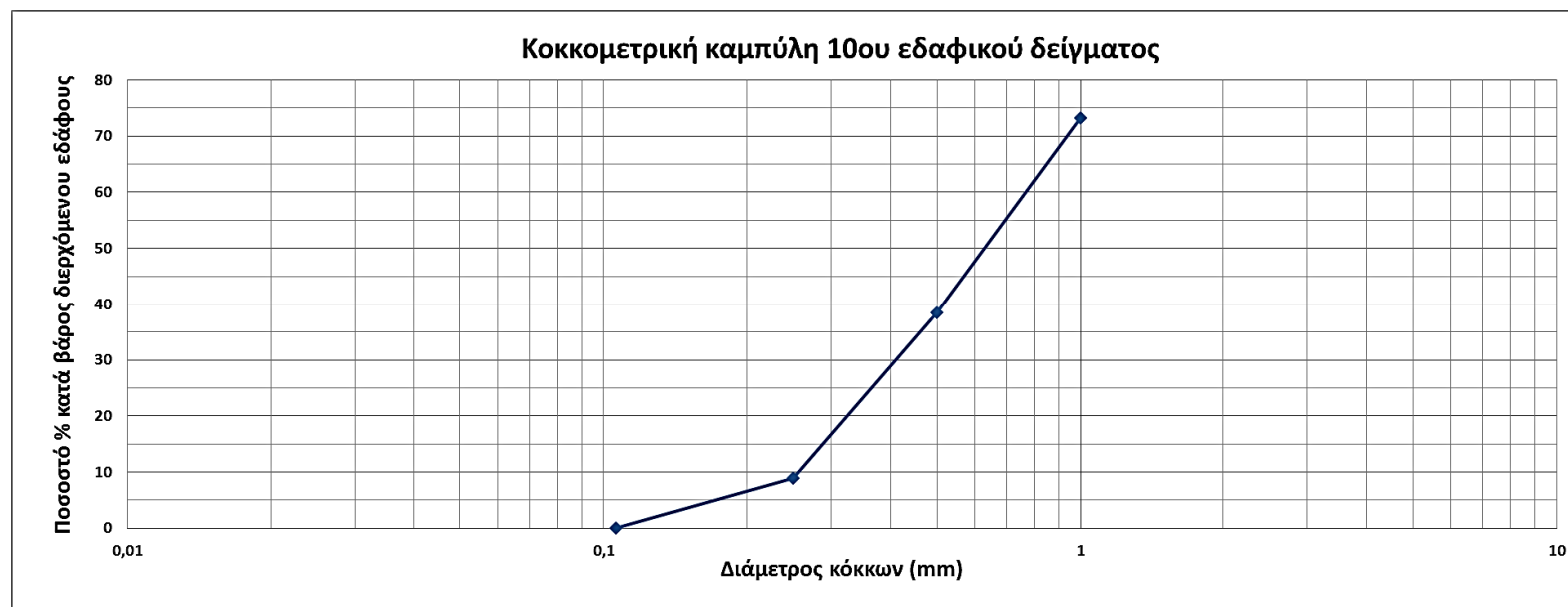
9 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	541,25	357,67	183,58	25,81	74,19
2	0,5	562,08	316,70	245,38	34,50	39,69
3	0,25	500,42	293,58	206,84	29,08	10,61
4	0,106	354,56	279,12	75,44	10,61	0
				<b>711,24</b>	<b>100</b>	



**Διάγραμμα 4.9.** Κοκκομετρική καμπύλη 9<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

**Πίνακας 4.10.** Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 10<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

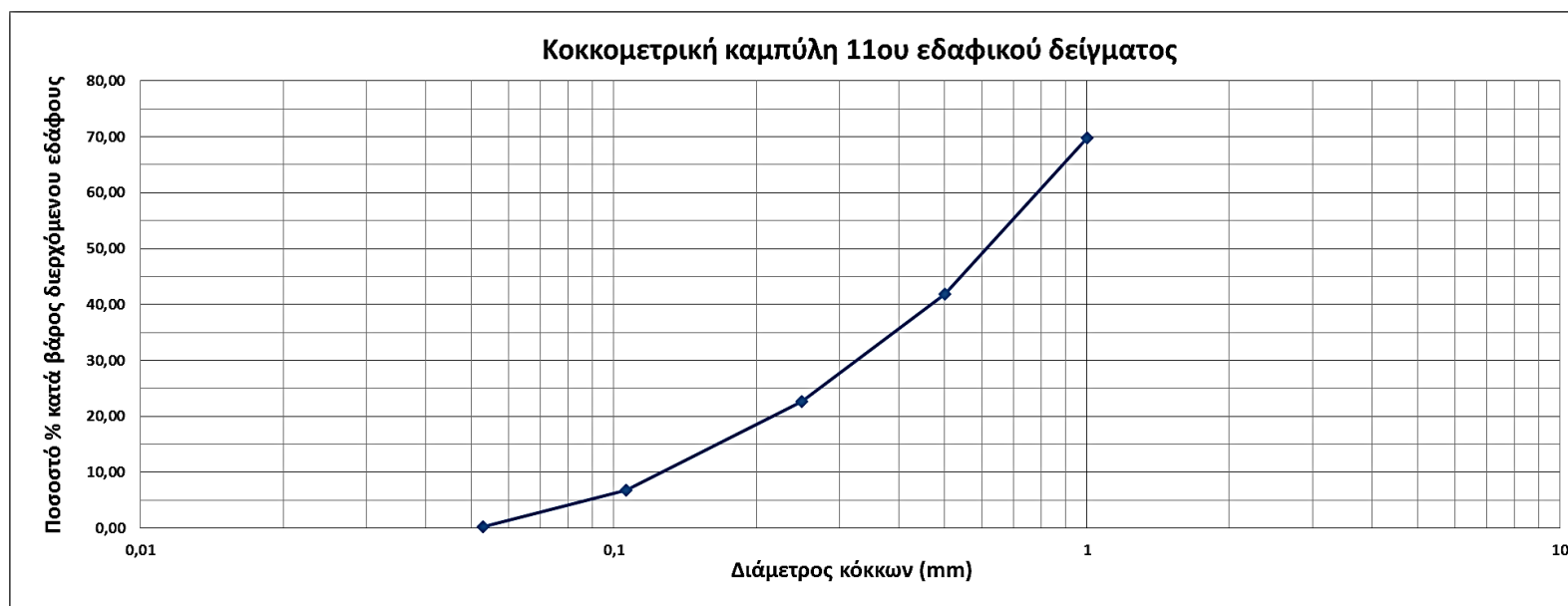
10 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	731,53	357,67	373,86	26,74	73,26
2	0,5	803,70	316,70	487	34,83	38,43
3	0,25	706,09	293,58	412,51	29,50	8,92
4	0,106	403,90	279,12	124,78	8,92	0
				<b>1398,15</b>	<b>100</b>	



**Διάγραμμα 4.10.** Κοκκομετρική καμπύλη 10<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

**Πίνακας 4.11.** Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 11<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

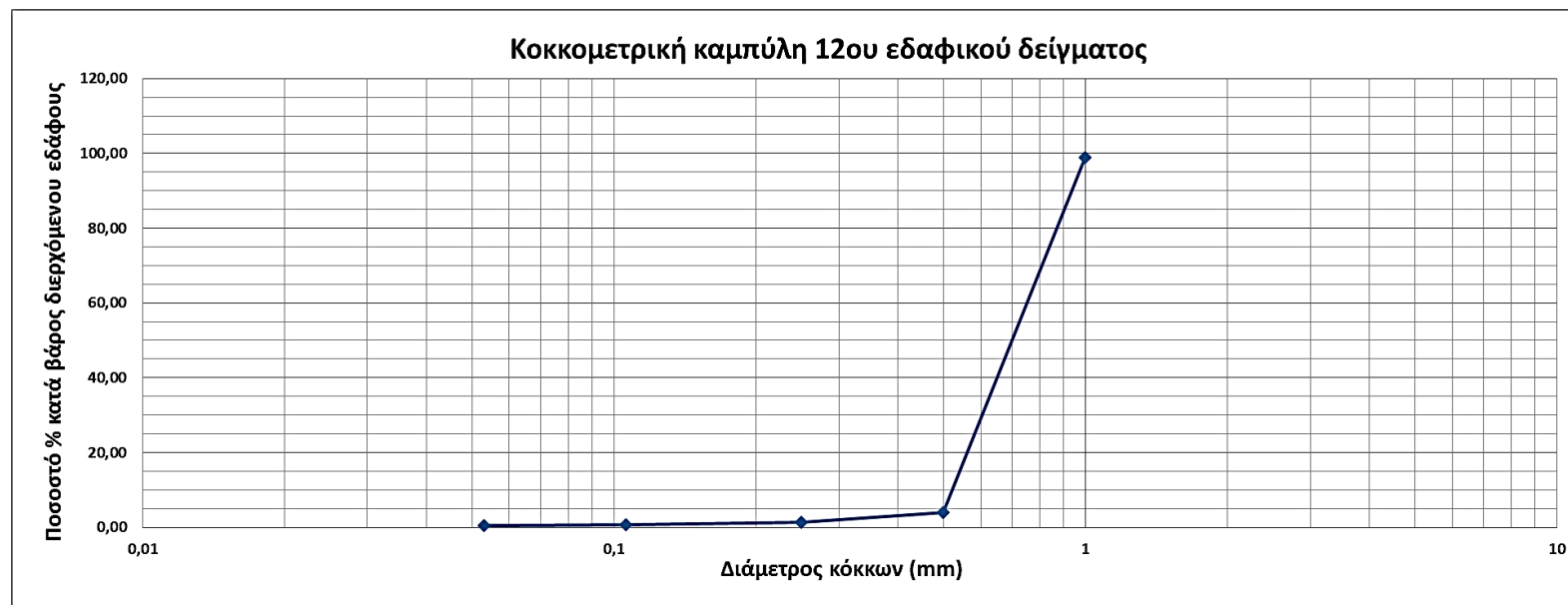
11 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκροτούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	543,74	361,74	182	30,16	69,84
2	0,5	487,73	318,77	168,96	28,00	41,85
3	0,25	410,92	295,48	115,44	19,13	22,72
4	0,106	375,30	279,45	95,85	15,88	6,84
5	0,053	326,50	286,46	40,04	6,63	0,20
6	0	246,46	245,25	1,21	0,20	0
				<b>603,5</b>	100	



**Διάγραμμα 4.11.** Κοκκομετρική καμπύλη 11<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

**Πίνακας 4.12.** Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 12<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

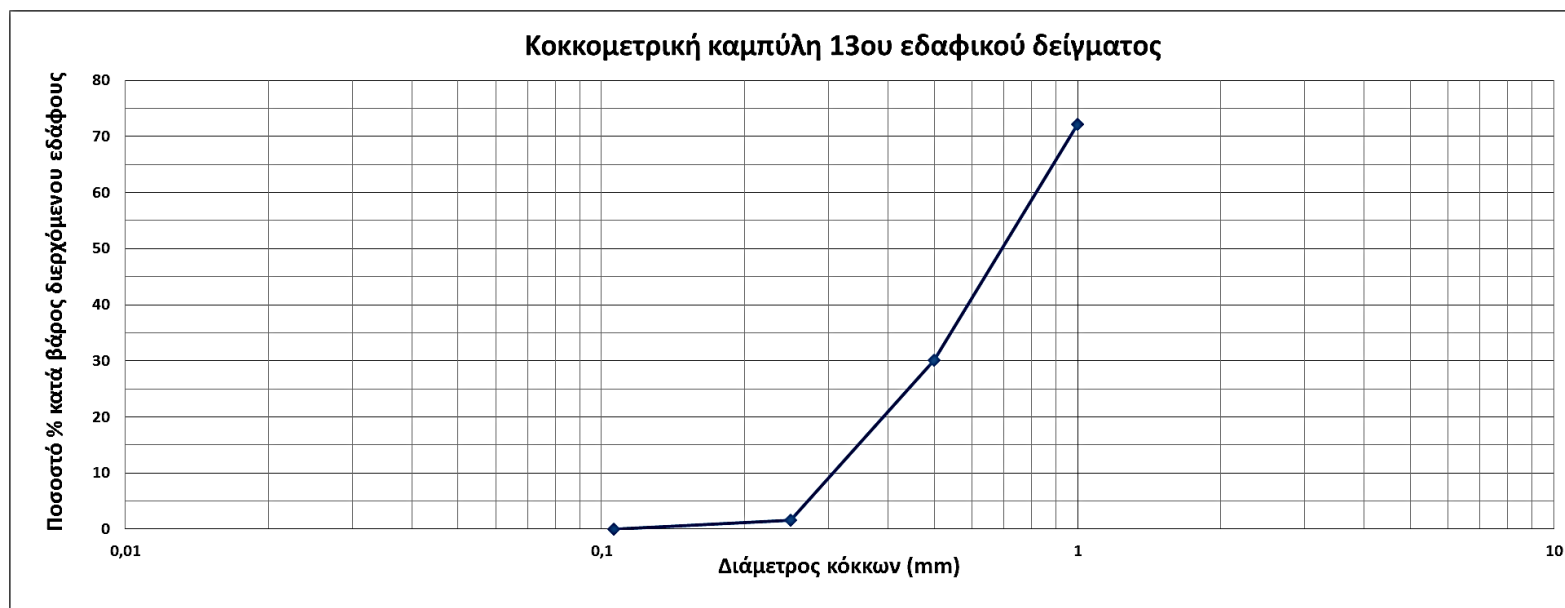
12 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	367,95	361,74	6,21	1,03	98,97
2	0,5	889,48	318,77	570,71	95,05	3,92
3	0,25	311,59	295,48	16,11	2,68	1,23
4	0,106	282,30	279,45	2,85	0,47	0,76
5	0,053	288,51	286,46	2,05	0,34	0,42
6	0	247,76	245,25	2,51	0,42	0
				<b>600,44</b>	100	



**Διάγραμμα 4.12.** Κοκκομετρική καμπύλη 12<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

**Πίνακας 4.13.** Κατανομή μεγέθους εδαφικών τεμαχιδίων 13<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

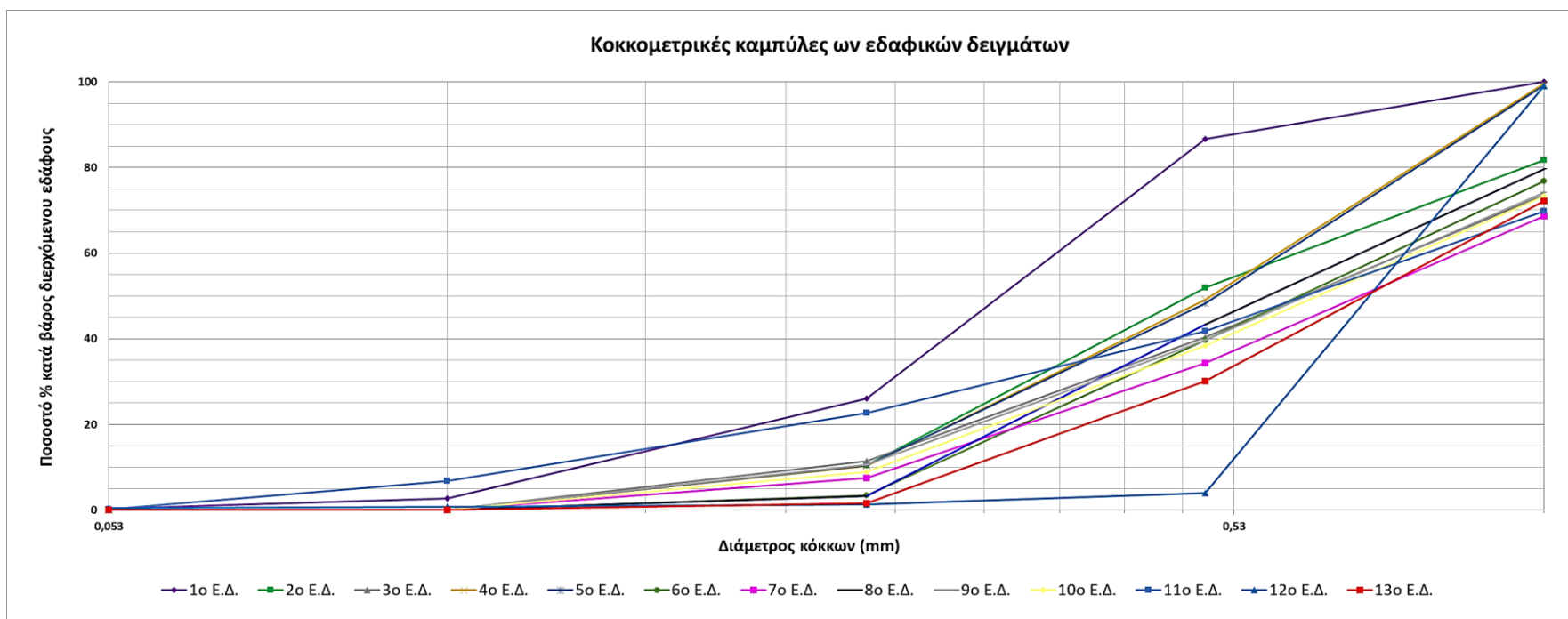
13 <sup>ο</sup>						
a/a	D κόσκινου (mm)	Κλάσμα εδάφους μεικτό (μαζί με κόσκινο) (g)	Βάρος κόσκινου (g)	Καθαρό βάρος (άθροισμα-βάρος κοσκίνου) (g)	Ποσοστό κατά βάρος συγκρατούμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(Δκ)%	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%
1	1	912,90	357,67	555,23	27,85	72,15
2	0,5	1155,39	316,70	838,69	42,07	30,08
3	0,25	860,68	293,58	567,10	28,44	1,64
4	0,106	311,85	279,12	32,73	1,64	0
				<b>1993,75</b>	<b>100</b>	



**Διάγραμμα 4.13.** Κοκκομετρική καμπύλη 13<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος.

**Πίνακας 4.14.** Συγκεντρωτικός πίνακας του ποσοστού % κατά βάρος διερχόμενου εδάφους όλων των εδαφικών δειγμάτων.

		Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων Πβα(διερχ)%												
a/a	D κόσκινου (mm)	1ο Ε.Δ.	2ο Ε.Δ.	3ο Ε.Δ.	4ο Ε.Δ.	5ο Ε.Δ.	6ο Ε.Δ.	7ο Ε.Δ.	8ο Ε.Δ.	9ο Ε.Δ.	10ο Ε.Δ.	11ο Ε.Δ.	12ο Ε.Δ.	13ο Ε.Δ.
1	1	100	81,73	73,55	99,61	99,17	76,83	68,59	79,62	74,19	73,26	69,84	98,97	72,15
2	0,5	86,59	51,86	40,35	49,05	48,24	39,74	34,28	43,34	39,69	38,43	41,85	3,92	30,08
3	0,25	25,98	10,38	11,49	10,31	10,37	3,47	7,55	3,31	10,61	8,92	22,72	1,23	1,64
4	0,106	2,77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,84	0,76	0
5	0,053	0,32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,42	0



**Διάγραμμα 4.14.** Κοκκομετρικές καμπύλες όλων των εδαφικών δειγμάτων.

Όλα τα διαγράμματα των κοκκομετρικών καμπυλών παρουσιάζονται σε ημιλογαριθμική κλίμακα με βάση το 10 ώστε να έχουμε καλύτερη απεικόνιση.

Η κοκκομετρική διαβάθμιση έδειξε ότι πρόκειται για πολύ χονδρόκκοκους σχηματισμούς εδαφών που γενικά επικρατεί το μέγεθος της άμμου, με ποσοστά του συγκεκριμένου κλάσματος που κυμαίνονται από 68,59-100%. Ποσοστά πολύ λεπτόκκοκης άμμου που κυμαίνονται από 0,2-0,42% παρατηρούνται στο 1<sup>ο</sup>, στο 11<sup>ο</sup> και στο 12<sup>ο</sup> δείγμα εδάφους.

Στον Πίνακα 4.15 δίνονται οι συντελεστές ομοιομορφίας και καμπυλότητας ή διαβάθμισης των εδαφικών δειγμάτων του πειράματος.

**Πίνακας 4.15.** Συντελεστές ομοιομορφίας και διαβαθμίσεως των εδαφικών δειγμάτων.

<b>Εδαφικό Δείγμα</b>	<b>Cu</b>	<b>Cc</b>
<b>1<sup>ο</sup></b>	9,4	9,4
<b>2<sup>ο</sup></b>	6,2	0,2
<b>3<sup>ο</sup></b>	5,2	0,2
<b>4<sup>ο</sup></b>	5,9	0,2
<b>5<sup>ο</sup></b>	5,9	0,2
<b>6<sup>ο</sup></b>	12,4	0,1
<b>7<sup>ο</sup></b>	5,5	0,1
<b>8<sup>ο</sup></b>	14,1	0,1
<b>9<sup>ο</sup></b>	5,0	0,2
<b>10<sup>ο</sup></b>	5,3	0,2
<b>11<sup>ο</sup></b>	10,2	1,8
<b>12<sup>ο</sup></b>	1	1
<b>13<sup>ο</sup></b>	19,3	0

Από τον Πίνακα 4.15 παρατηρούμε ότι το 12<sup>ο</sup> εδαφικό δείγμα αποτελείται από κόκκους ίδιας διαμέτρου καθώς ο συντελεστής ομοιομορφίας είναι ίσος με 1.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 1.6 όλα τα εδαφικά δείγματα είναι κακώς διαβαθμισμένα (SP-άμμος κακής διαβάθμισης) (δεν είναι δεκτικά συμπίκνωσης, έχουν ανοιχτή πορώδη δομή, ευκολότερη μετακίνηση των κόκκων και μικρότερη φέρουσα ικανότητα), εκτός του 11<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος που είναι καλά διαβαθμισμένο (SW-άμμος καλά



διαβαθμισμένη) καθώς  $C_u=10,2 > 6$  και  $1 < C_c=1,8 < 3$  (αντιστέκεται στη φθορά και τη διάβρωση, αναπτύσσει μεγάλη φέρουσα ικανότητα και αντοχή στη διάτμηση)

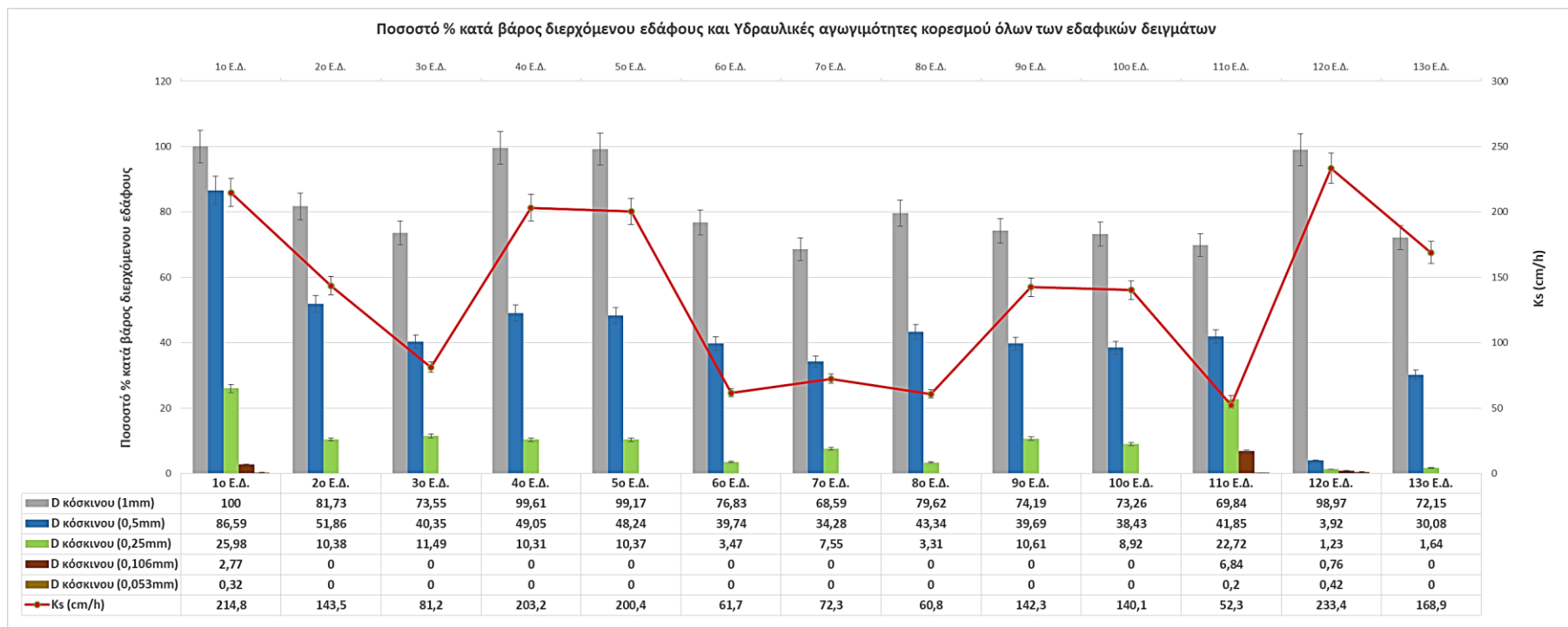
#### 4.2. Αποτελέσματα της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού των εδαφικών δειγμάτων

Οι υδραυλικές αγωγιμότητες κορεσμού των εδαφικών δειγμάτων του πειράματος φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 4.16.** Υδραυλικές αγωγιμότητες κορεσμού των εδαφικών δειγμάτων.

Δείγμα εδάφους	$K_s$ (cm/min)	$K_s$ (cm/s)	$K_s$ (cm/s)	$K_s$ (cm/h)	Τύπος εδάφους
1ο	3,58	0,0596	$5,96 \cdot 10^{-2}$	214,8	Χονδρή Άμμος
2ο	2,39	0,0398	$3,98 \cdot 10^{-2}$	143,5	Μέση Άμμος
3ο	1,35	0,0225	$2,25 \cdot 10^{-2}$	81,2	Μέση Άμμος
4ο	3,39	0,0565	$5,65 \cdot 10^{-2}$	203,2	Μέση Άμμος
5ο	3,34	0,0556	$5,56 \cdot 10^{-2}$	200,4	Μέση Άμμος
6ο	1,03	0,0172	$1,72 \cdot 10^{-2}$	61,7	Λεπτή Άμμος
7ο	1,2	0,02	$2 \cdot 10^{-2}$	72,3	Μέση Άμμος
8ο	1,01	0,0168	$1,68 \cdot 10^{-2}$	60,8	Λεπτή Άμμος
9ο	2,37	0,0395	$3,95 \cdot 10^{-2}$	142,3	Μέση Άμμος
10ο	2,33	0,0388	$3,88 \cdot 10^{-2}$	140,1	Μέση Άμμος
11ο	0,87	0,0145	$1,45 \cdot 10^{-2}$	52,3	Λεπτή Άμμος
12ο	3,89	0,0648	$6,48 \cdot 10^{-2}$	233,4	Χονδρή Άμμος
13ο	2,81	0,0468	$4,68 \cdot 10^{-2}$	168,9	Μέση Άμμος

Παρατηρείται επίσης στην 6<sup>η</sup> στήλη του Πίνακα 4.16 ο προσδιορισμός του τύπου εδάφους των εδαφικών δειγμάτων σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1.



**Διάγραμμα 4.15.** Ποσοστό % κατά βάρος διερχόμενου εδάφους και υδραυλικές αγωγιμότητες κορεσμού όλων των εδαφικών δειγμάτων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα των κοκκομετρικών καμπυλών όλων των εδαφικών δειγμάτων (Διάγραμμα 4.14) και τον πίνακα των υδραυλικών αγωγιμοτήτων κορεσμού όλων επίσης των εδαφικών δειγμάτων (Πίνακας 4.16) παρατηρούμε στο Διάγραμμα 4.15 πως η υδραυλική αγωγιμότητα αυξάνεται όσο προχωρούμε από τα βαριά προς τα ελαφρά αμμώδη εδάφη.

Για παράδειγμα παρατηρούμε πως στο 12<sup>ο</sup> εδαφικό δείγμα που έχει ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων 98,97% από το κόσκινο 1mm, 3,92% από το κόσκινο 0,5m, 1,23% από το κόσκινο 0,25mm, 0,76% από το κόσκινο 0,106mm και 0,42% από το κόσκινο 0,053mm, έχει την υψηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού ( $K_s = 233,4$  cm/h) καθώς είναι και το πιο ελαφρύ αμμώδες εδαφικό δείγμα. Σε αντίθεση με το 11<sup>ο</sup> εδαφικό δείγμα που έχει ποσοστό κατά βάρος διερχόμενων εδαφικών τεμαχιδίων 68,94% από το κόσκινο 1mm, 41,85% από το κόσκινο 0,5m, 22,72% από το κόσκινο 0,25mm, 6,84% από το κόσκινο 0,106mm και 0,2% από το κόσκινο 0,053mm, έχει την υψηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού ( $K_s = 52,3$  cm/h) καθώς είναι και το πιο βαρύ αμμώδες εδαφικό δείγμα.

Πρακτικά επειδή η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους ( $K_s$ ) ισούται με την τελική διηθητικότητα, την τελική τιμή διήθησης (i) (Παπαζαφειρίου, 1999), συμπεραίνουμε πως έχουμε πολύ γρήγορες διηθητικότητες καθώς τα εδαφικά δείγματα είναι αμμώδη σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1.

Η κοκκομετρική καμπύλη φαίνεται να έχει άμεση σχέση με την τιμή του  $K_s$ .

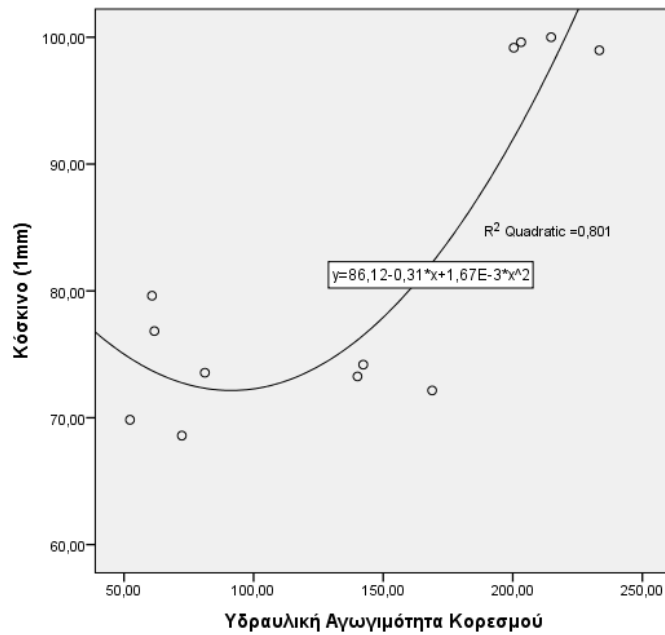
Με τη βοήθεια του προγράμματος SPSS (IBM SPSS Statistics 23) διερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού ( $K_s$ ) και των ποσοστών % κατά βάρος διερχόμενου εδάφους των κοσκίων όλων των εδαφικών δειγμάτων.

**Πίνακας 4.17.** Αποτελέσματα ανάλυσης συσχέτισης υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού και ποσοστού % κατά βάρος διερχόμενου εδάφους του κόσκινου με διάμετρο 1mm.

		Υδραυλική Αγωγιμότητα Κορεσμού	Κόσκινο (1mm)
Υδραυλική Αγωγιμότητα Κορεσμού	Pearson Correlation	1	,802**
	Sig. (2-tailed)		,001
	N	13	13
Κόσκινο (1mm)	Pearson Correlation	,802**	1
	Sig. (2-tailed)	,001	
	N	13	13

\*\* . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

**Διάγραμμα 4.16.** Γραμμική συσχέτιση υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού και ποσοστού % κατά βάρος διερχόμενου εδάφους του κόσκινου με διάμετρο 1mm.



**Πίνακας 4.18.** Αποτελέσματα ανάλυσης συσχέτισης υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού και ποσοστού % κατά βάρος διερχόμενου εδάφους του κόσκινου με διάμετρο 0,5mm.

**Correlations**

		Υδραυλική Αγωγιμότητα Κορεσμού	Κόσκινο (0.5 mm)
Υδραυλική Αγωγιμότητα Κορεσμού	Pearson Correlation	1	,071
	Sig. (2-tailed)		,818
	N	13	13
Κόσκινο (0.5mm)	Pearson Correlation	,071	1
	Sig. (2-tailed)	,818	
	N	13	13

**Πίνακας 4.19.** Αποτελέσματα ανάλυσης συσχέτισης υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού και ποσοστού % κατά βάρος διερχόμενου εδάφους του κόσκινου με διάμετρο 0,25mm.

**Correlations**

		Υδραυλική Αγωγιμότητα Κορεσμού	Κόσκινο (0.25 mm)
Υδραυλική Αγωγιμότητα Κορεσμού	Pearson Correlation	1	,030
	Sig. (2-tailed)		,922
	N	13	13
Κόσκινο (0.25mm)	Pearson Correlation	,030	1
	Sig. (2-tailed)	,922	
	N	13	13

Παρατηρήθηκε ότι υπάρχει πολύ ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού ( $K_s$ ) και του ποσοστού % κατά βάρος διερχόμενου εδάφους του κόσκινου με διάμετρο 1mm ( $r=0,802$  και  $p=0,001$ ) σε επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας 5%.

Για τα ποσοστά % κατά βάρος των υπόλοιπων κοσκίνων που χρησιμοποιήθηκαν δεν βρέθηκε να υπάρχει κάποια συσχέτιση με τις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού ( $K_s$ ).

### **4.3. Συμπεράσματα**

Ο κύριος σκοπός της παρούσας πτυχιακής διατριβής ήταν ο προσδιορισμός υδραυλικών παραμέτρων ομάδας αμμωδών εδαφών.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Πραγματοποιήθηκαν πειράματα υπολογισμού της κοκκομετρικής σύστασης και της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού ( $K_s$ ) κάθε εδάφους με τη μέθοδο σταθερού φορτίου.

Η κοκκομετρική ανάλυση θεωρείται διεθνώς η καταλληλότερη εργαστηριακή δοκιμή για την μηχανική κατάταξη των εδαφών. Η καταλληλότητα ή μη εδαφών για θεμελιώσεις, έργα οδοποιίας και λοιπά συγκοινωνιακά έργα (σιδηροδρομικά δίκτυα, αεροδρόμια), κατασκευή φραγμάτων και αναχωμάτων, επιχωμάτων, κλπ., εξαρτάται από την κοκκομετρική ανάλυση, δηλαδή, τον προσδιορισμό της σχετικής συμμετοχής κάθε κλάσματος στο δείγμα.

Στον τομέα των αρδεύσεων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η δομή και η υφή του εδάφους καθώς επηρεάζει την κίνηση του νερού στο έδαφος και συντελεί στην εμφάνιση είτε επιφανειακής απορροής είτε βαθιάς διήθησης. Επομένως, η γνώση της δομής και της υφής συντελεί στον έλεγχο της ομοιομορφίας της άρδευσης, της δόσης άρδευσης, της παροχής του αντλητικού συστήματος και της διάρκειας άρδευσης (για αποφυγή επιφανειακής απορροής) καθώς και στην επιλογή του κατάλληλου συστήματος άρδευσης.

Γενικότερα, οι πληροφορίες που παίρνουμε από την κοκκομετρική ανάλυση μπορούν να μας διευκολύνουν στο να προβλέψουμε την συμπεριφορά εδαφών, όσον αφορά την

αντοχή και παραμόρφωση, την κίνηση του υπόγειου νερού (διήθηση), την απόκριση σε παγετό.

Η κοκκομετρική ανάλυση έδειξε ότι όλα τα εδαφικά δείγματα είχαν χονδρόκοκκους σχηματισμούς με ποσοστά κλάσματος άμμου που κυμαινόταν από 68,59-100%. Επομένως η κίνηση του νερού προς τα πάνω σε αυτά τα εδαφικά δείγματα είναι οριακή. Στο σύνολό τους τα εδαφικά δείγματα βρέθηκαν να είναι κακώς διαβαθμισμένα εκτός του 11<sup>ου</sup> εδαφικού δείγματος που ήταν καλώς διαβαθμισμένο.

Η μέτρηση της  $K_s$  με την συσκευή Darcy για δείγματα εδαφών είναι απόλυτα αξιόπιστη και μπορεί να μας παρέχει πληροφορίες για την σύστασή τους.

Οι μετρήσεις με την συσκευή Darcy στο εργαστήριο θα πρέπει να διεξάγονται με δικό τους κύκλωμα νερού, του οποίου τα χαρακτηριστικά θα μπορούν να ελέγχονται πλήρως.

Η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού ( $K_s$ ) ήταν μεγαλύτερη στα ελαφριάς συστάσεως εδαφικά δείγματα απ' ότι στα βαριάς συστάσεως.

Από τη διερεύνηση της συσχέτισης (συντελεστής Pearson) μεταξύ των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας κορεσμού ( $K_s$ ) και των ποσοστών % κατά βάρος διερχόμενου εδάφους των κοσκίνων παρατηρήθηκε πως υπάρχει πολύ ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ της κοκκομετρικής σύστασης και του κοσκίνου διαμέτρου 1mm, σε επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας 5%.

Τα παραπάνω πειράματα είναι χρονοβόρα και απαιτούν λεπτομερή και προσεκτικό σχεδιασμό και διαχείριση. Αν για οποιοδήποτε λόγο διαταραχθεί η διεξαγωγή τους μπορεί να προκληθεί καθυστέρηση εβδομάδων της πειραματικής διαδικασίας ή επανάληψή τους εξ' αρχής.

Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν και οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν στην παρούσα πτυχιακή εργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία για την περαιτέρω διερεύνηση των υδροδυναμικών παραμέτρων των συγκεκριμένων εδαφών, καθώς και σε μελέτες άρδευσης και στράγγισης, καθώς επίσης και στην πρόβλεψη της κίνησης του νερού στο έδαφος. Από την εισαγωγή των υδροδυναμικών παραμέτρων σε μαθηματικά μοντέλα εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη μελέτη των προβλημάτων άρδευσης. Όλα τα παραπάνω αποτελούν σημαντικά πειραματικά δεδομένα για περαιτέρω έρευνα στο πεδίο της ακόρεστης ροής.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Darcy, H. (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris, pp.590.
- Hillel, D. (1980). Fundamentals of soil physics. Academic Press, New York, N.Y., pp. 413.
- Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous medium. Physics, vol. 1:318-333.
- Ευαγγελίδης, Χ. (2001). Ανάλυση του φαινομένου ροής - συγκέντρωσης σε ακόρεστη κατάσταση με πειραματικές και θεωρητικές διαδικασίες. Περίπτωση οριζόντιας ροής. Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ..
- Καρακατσούλη, Π.Γ. (1997). Αρδεύσεις Στραγγίσεις και Προστασία Εδαφών. Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου, Αθήνα.
- Παπαζαφειρίου, Ζ. (1984). Αρχές και Πρακτική των Αρδεύσεων. Θεσσαλονίκη.
- Παπαζαφειρίου, Ζ. (1999). Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Σακελλαρίου, Μ. (2003). Εργαστηριακές Δοκιμές Εδαφομηχανικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ. (1986). Επίδραση των υδροδυναμικών παραμέτρων διήθησης - στράγγισης σε προβλήματα αρδεύσεων. Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ..
- Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Μ. (2003). Σημειώσεις Γενικής Υδραυλικής & Στοιχείων Υδρολογίας. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος.
- Τζιμόπουλος, Χ. (1997). Στραγγίσεις-Υδραυλική φρεάτων. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Υπουργική Απόφαση (2015). Άρθρο 08: Ορθές γεωργικές πρακτικές για την άρδευση επηρεάζουσα τη νιτρορύπανση. Αθήνα.