

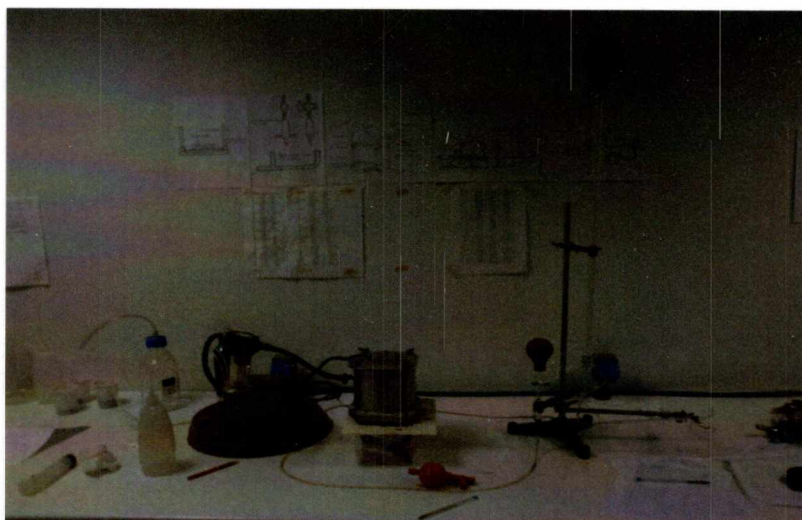
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ-
ΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

**Διευθύντρια: Μ. Σακελλαρίου- Μακραντωνάκη, Καθηγήτρια Π.Θ
Φοιτητής : Κουτσόπετρας Μάριος**



Τριμελής επιτροπή:

Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Η. Χαλκίδης, Λέκτορας

Δ. Καλφούντζος, Αν. Καθηγητής ΤΕΙ Λάρισας

ΠΤ-ΦΠΑΠ
2014
ΚΟΥ

ΒΟΛΟΣ 2014

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Αριθμ. Πρωτ. 466
Ημερομηνία 9-10-14



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 13878/1
Ημερ. Εισ.: 08/06/2015
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ-ΦΠΑΠ
2014
ΚΟΥ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Το θέμα της πτυχιακής αυτής εργασίας δόθηκε από την Καθηγήτρια του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και Διευθύντρια του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής, κ. Μ. Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη, την οποία και ευχαριστώ θερμά για την πολύτιμη βοήθεια της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της συγκεκριμένης εργασίας. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε έφτασε στο τέλος της με αρκετές δυσκολίες και πολύωρη απασχόληση, όχι μόνο λόγω των αναμενόμενων αλλά και των απρόβλεπτων προβλημάτων που πρόέκυψαν.

Επίσης, εκφράζω τις ευχαριστίες μου στην Δρ. Α. Αγγελάκη, φυσικό μέλος Ε.Δ.Ι.Π του Π.Θ για την πολύτιμη συμβολή της στο θεωρητικό μέρος της παρούσας πτυχιακής εργασίας, αλλά και κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, δεδομένου ότι ο προγραμματισμός της συσκευής της υστέρησης έγινε από την ίδια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
---------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ

1.1.....Γενικά.....	10
1.2..... Μηχανική σύσταση του εδάφους	10
1.2.1....Άμμος.....	13
1.2.2....ΐλύς.....	13
1.2.3....Άργιλος.....	13
1.3.....Σχέσεις μεταξύ μάζας και όγκου.....	14
1.3.1.....Πορώδες n	15
1.3.2.....Δείκτης κενών e	16
1.3.3....Περιεκτικότητα σε νερό ή υγρασία.....	16
1.3.3.1..Υγρασία κατά βάρος w	16
1.3.3.2..Υγρασία κατ' όγκο θ	16
1.3.4....Βαθμός κορεσμού S	17
1.3.5.....Αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού S_e	17
1.3.6.....Τριχοειδής πίεση P_c	17
1.3.7.....Επιφανειακή τάση σ	18
1.3.8.....Γωνία επαφής.....	18
1.3.9...Υδατοικανότητα-Σημείο μάρανσης.....	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

2.1.....Η κίνηση του νερού στο έδαφος.....	21
2.1.1...Το δυναμικό του εδαφικού νερού.....	22

2.1.2...Υδραυλικό φορτίο.....	23
2.2.....Νόμος Darcy.....	24
2.3.....Εξίσωση συνέχειας.....	26
2.4.....Εξίσωση κινήσεως.....	27
2.4.1...Εξίσωση ως προς θ	28
2.4.2...Εξίσωση ως προς Ψ	28
2.5.....Η κίνηση του νερού σε ακόρεστο έδαφος.....	29
2.6.....Μέθοδοι προσδιορισμού των χαρακτηριστικών καμπυλών της εδαφικής υγρασίας.....	31

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

3.1.....Σχέση πίεσης -περιεκτικότητας σε νερό.....	32
3.2.....Υστέρηση της σχέσης $\Psi(\theta)$	32
3.2.1...Ερμηνεία του φαινομένου της υστέρησης.....	35
3.2.2...Το φαινόμενο της υστέρησης σε διάφορους τύπους εδαφών.....	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1.....Συσκευή υστέρησης.....	37
4.1.1...Εξαγωγέας πιέσεων.....	38
4.1.2...Εξαρτήματα υστέρησης.....	39
4.1.2.1..Κορεστής ατμών.....	40
4.1.2.2..Ρυθμιστής θερμοκρασίας.....	40
4.1.2.3..Παγίδα αέρα.....	41
4.1.2.4..Σωλήνας συλλογής νερού.....	41
4.1.2.5..Διαβαθμισμένος σωλήνας.....	42
4.1.3.....Πηγή πεπιεσμένου αέρα.....	43

4.2.....	Προετοιμασία εδαφικού δείγματος.....	45
4.3.....	Μελέτη της υστέρησης.....	45
4.3.1....	Προετοιμασία της συσκευής.....	45
4.3.2....	Εφαρμογή πίεσης στον εξαγωγέα.....	48
4.3.3....	Απαραίτητες ρυθμίσεις πριν από κάθε μέτρηση.....	48
4.3.4....	Λήψη μετρήσεων.....	49
4.3.4.1..	Διαδικασία στράγγισης.....	49
4.3.4.2....	Διαδικασία διήθησης.....	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

5.1.....	Περιγραφή εδαφικών δειγμάτων.....	51
5.2.....	Μηχανική ανάλυση εδαφών.....	51
5.3.....	Υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού.....	51
5.4.....	Επεξεργασία μετρήσεων με συσκευή υστέρησης.....	53
5.5.....	Πειραματικός προσδιορισμός των χαρακτηριστικών καμπυλών στράγγισης - διήθησης.....	53

<u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	62
---------------------------	----

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	63
---------------------------	----

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το έδαφος αποτελεί το ανώτατο στρώμα του φλοιού της γης, δηλαδή το καλλιεργήσιμο επιφανειακό στρώμα και έχει πάχος 35 ως 50 εκατοστά. Το κάτω από το έδαφος στρώμα λέγεται υπέδαφος. Το υπέδαφος φτάνει στο 1,5 ως 2 μ. κάτω από την επιφάνεια ως εκεί δηλαδή που προχωρούν οι ρίζες των φυτών.

Το έδαφος προήλθε από την αποσάθρωση (διάβρωση) των πετρωμάτων της γήινης επιφάνειας. Η αποσάθρωση αυτή οφείλεται σε πολλές αιτίες: Στη θάλασσα, τη βροχή, τον ήλιο, το κρύο, τον αέρα, τα φυτά και τα ζώα. Το έδαφος, όταν δεν καλλιεργείται, εμπλουτίζεται ακατάπαυστα: Τα αυτοφυή φυτά (χόρτα, θάμνοι, δέντρα) το εμπλουτίζουν με συστατικά που παίρνουν απ' τον αέρα (άζωτο κλπ.) και με τα φύλλα τους και τους κορμούς τους, που όταν σαπίζουν, μεταβάλλονται σε θρεπτικά συστατικά για τα νέα φυτά.

Το έδαφος μπορεί να θεωρηθεί ένα σύνθετο σύστημα μέσα στο οποίο αναπτύσσεται και δρα ένα πλήθος μικροοργανισμών και ταυτόχρονα αποτελεί μέσο συγκράτησης των φυτών, μέσο διακίνησης του νερού και είναι αποθήκη θρεπτικών στοιχείων και νερού από την οποία τα φυτά αντλούν τα απαραίτητα στοιχεία και την απαραίτητη, για την ανάπτυξη τους, υγρασία.

Το υπόγειο νερό χωρίζεται κατά την έννοια της κατακόρυφης διεύθυνσης σε δυο περιοχές:

- Η πρώτη περιοχή καλείται ζώνη κορεσμού. Στην περιοχή αυτή όλοι οι πόροι του εδάφους είναι γεμάτοι με νερό και η κίνηση του νερού μέσα στη ζώνη κορεσμού ονομάζεται **κορεσμένη ροή**.
- Η δεύτερη περιοχή καλείται ζώνη αερισμού και οι πόροι της είναι γεμάτοι με νερό, αέρα και υδρατμούς. Εκτείνεται από τη φρεατική στάθμη μέχρι την επιφάνεια του εδάφους και συνίσταται από τρεις υποζώνες: α) Την ζώνη του εδαφικού νερού, στην οποία και αναπτύσσεται το ριζικό σύστημα των φυτών, β) Την ενδιάμεση ζώνη και γ) Την τριχοειδή ζώνη, στην οποία οι πόροι είναι κορεσμένοι με νερό, αλλά η πίεση του εδαφικού νερού είναι αρνητική. Η κίνηση του νερού μέσα στη ζώνη αερισμού ονομάζεται **ακόρεστη ροή**. Η ακόρεστη ροή σχετίζεται άμεσα με την επιστήμη της γεωπονίας για τον

προσδιορισμό της κατανάλωσης του νερού των καλλιεργειών και τη βελτίωση των δικτύων άρδευσης ή στράγγισης.

Σημαντικά στοιχεία για τη μελέτη της κίνησης του νερού σε ακόρεστο έδαφος είναι οι **υδροδυναμικές παράμετροι**, μερικές από τις οποίες είναι υδραυλική αγωγιμότητα, η εδαφική υγρασία και η πίεση του νερού των πόρων του εδάφους. Η χαρακτηριστική καμπύλη περιγράφει τη σχέση μεταξύ της υγρασίας (θ) του εδάφους και των πιέσεων (ψ) του εδαφικού νερού, ενώ η υδραυλική αγωγιμότητα αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία κινείται το νερό μέσα στο έδαφος.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός των χαρακτηριστικών καμπυλών του εδάφους και η παρατήρηση του φαινομένου της υστέρησης. Τα πειράματα διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Τμήματος Γεωπονίας στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Συγκεκριμένα, στο πειραματικό μέρος χρησιμοποιήθηκαν δύο εδαφικά δείγματα που ελήφθησαν από το Αγρόκτημα του Π.Θ και προσδιορίστηκαν πειραματικά οι χαρακτηριστικές καμπύλες στράγγισης – διήθησης. Έχοντας ως στόχο την καλύτερη κατανόηση της πτυχιακής εργασίας η ύλη ταξινομήθηκε ως εξής:

- Στο πρώτο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι βασικές σχέσεις ανάμεσα στο έδαφος και το νερό.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η κίνηση του νερού στο έδαφος και οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται.
- Στο τρίτο κεφάλαιο αναφέρονται οι σχέσεις πίεση-περιεκτικότητα σε νερό, το φαινόμενο της υστέρησης σε διάφορους τύπους εδαφών καθώς και η γενική ερμηνεία του φαινομένου της υστέρησης.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η συσκευή της υστέρησης (Volumetric Porous Plate Extractor) με τα εξαρτήματα που την απαρτίζουν και ο τρόπος λήψεως των μετρήσεων, ώστε να προσδιοριστούν οι καμπύλες στράγγισης-διήθησης των εδαφικών δειγμάτων.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και οι χαρακτηριστικές καμπύλες των δύο εδαφικών δειγμάτων και στη συνέχεια τα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΣΧΕΣΕΙΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΝΕΡΟΥ

1.1 Γενικά

Η μελέτη των σχέσεων μεταξύ εδάφους και νερού έχει μεγάλη σημασία στην επιστήμη της Γεωπονίας. Θα πρέπει να βλέπει κανείς τη γη σαν μια δεξαμενή τροφοδοσίας των φυτών με νερό και να δημιουργεί με την άρδευση τις καλύτερες συνθήκες, για να δώσει στα φυτά το νερό, που είναι απαραίτητο.

Είναι λοιπόν απαραίτητη η γνώση της συστάσεως του εδάφους και των φυσικών του ιδιοτήτων (μηχανική σύσταση, πορώδες, ικανότητα συγκρατήσεως νερού, διηθητικότητα κ.τ.λ.), για την κατανόηση της μεθόδου άρδευσης και στράγγισης. Η κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος, η αλατότητα και η αλκαλικότητα των εδαφών, η κίνηση και η συγκέντρωση των διαλυτών αλάτων είναι παράγοντες, που η μελέτη και η κατανόηση τους εξαρτώνται από τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους.

Σε ότι αφορά την ποσότητα του νερού, που υπάρχει μέσα στο έδαφος, έχει αποδειχτεί ότι η ανάπτυξη των καλλιεργειών έχει άμεση σχέση με το ποσοστό της εδαφικής υγρασίας. Μεγάλες ποσότητες νερού καθυστερούν ή παρεμποδίζουν την ανάπτυξη των φυτών, ενώ μικρές ποσότητες νερού μπορούν να προκαλέσουν αναστολή της ανάπτυξης τους.

1.2 Μηχανική σύσταση του εδάφους

Το μέγεθος των σωματιδίων ενός εδάφους μπορεί να μεταβάλλεται αισθητά. Ορισμένα είναι αρκετά μεγάλα και είναι ορατά με το μάτι, ενώ άλλα είναι πολύ μικρά και έχουν κολλοειδείς ιδιότητες.

Η δομή του εδάφους περιγράφει τις σχετικές αναλογίες των διαφόρων μεγεθών των σωματιδίων ενός εδάφους. Η παραδοσιακή μέθοδος, για να χαρακτηριστεί το έδαφος με βάση το μέγεθος των σωματιδίων του, οδηγεί στην ταξινόμηση στις παρακάτω κατηγορίες :

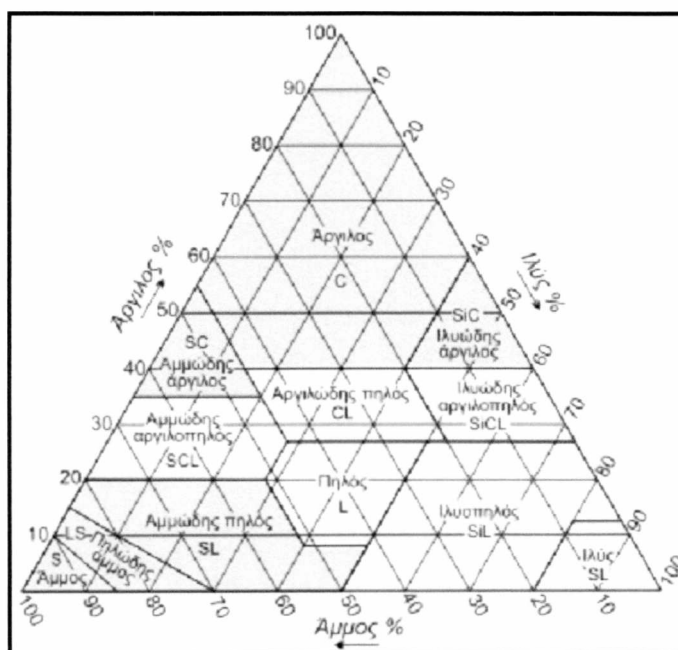
- Άμμος
- Ιλύς
- Άργιλος

Υπάρχουν διάφορα συστήματα κατάταξης των εδαφών, από τα οποία τα κυριότερα είναι το Ενιαίο Σύστημα Κατάταξης (USCS-Unified Soil Classification System), το οποίο είναι αποδεκτό ως προδιαγραφή από την Αμερικανική Εταιρεία Ελέγχου των Υλικών (ASTM-American Society for Testing Materials) και το σύστημα της Αμερικανικής Ένωσης των Οδοποιών (AASHTO-American Association of State Highway and Transportation Officials).

Γενικές Ομάδες	Κατά AASHTO Διαστάσεις κόκκων σε mm	Κατά ASTM Διαστάσεις κόκκων σε mm
Άμμος	2.00-0.075	4.75-0.075
Ίλύς	0.075-0.002	<0.075
Άργιλος	<0.002	

Σχήμα 1.1 Γενικές ομάδες εδαφών συναρτήσει του μεγέθους του κόκκου

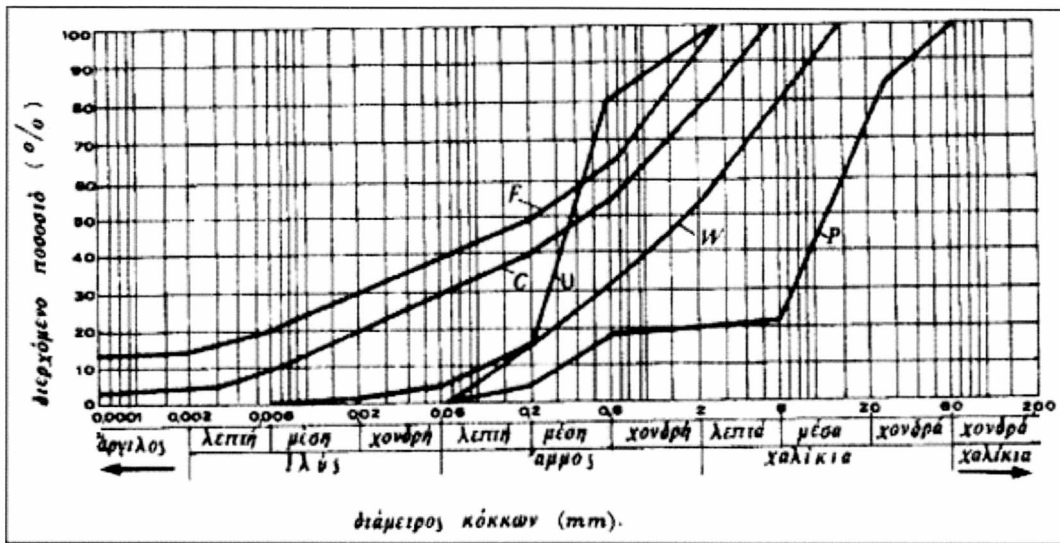
Η πληρέστερη ταξινόμηση του εδάφους επιτυγχάνεται με βάση το λόγο της μάζας των τριών αυτών ομάδων. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2 δίνονται διαφορετικά ονόματα στα εδάφη, που αποτελούνται από ορισμένα ποσοστά αναλογίας σε άμμο, ιλύ και άργιλο.



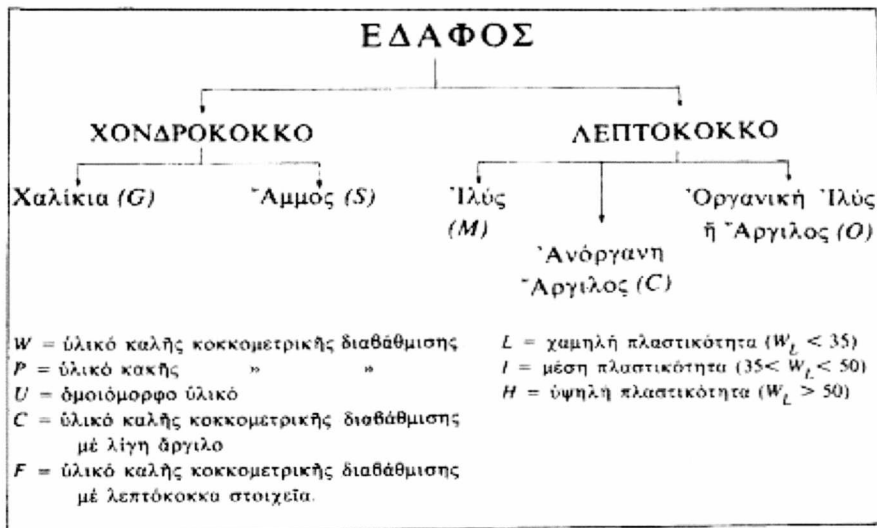
Σχήμα 1.2 Διάγραμμα κατατάξεως των εδαφών.

Μια καλύτερη μέθοδος χαρακτηρισμού της μηχανικής σύστασης του εδάφους είναι αυτή που δείχνει τη συνεχή κατανομή της διαστάσεως των σωματιδίων όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3. Οι διάφορες καμπύλες ονομάζονται κοκκομετρικές καμπύλες. Ορισμένα εδάφη όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4 χαρακτηρίζονται ως καλής κοκκομετρικής διαβάθμισης, γιατί περιέχουν όλη την κλίμακα των διαμέτρων των σωματιδίων σε μεγάλη έκταση, ενώ άλλα κακής κοκκομετρικής διαβάθμισης γιατί κυριαρχούνται από μια μικρή ομάδα διαμέτρων σωματιδίων. (Τασομήνη Ευαγγελία-Τζιούφα Χριστίνα, Νοέμβριος 2007)

Ταξινόμηση εδαφών κατά Casagrande



Σχήμα 1.3 Κοκκομετρικές καμπύλες εδαφών



Σχήμα 1.4 Χαρακτηρισμός κοκκομετρικής διαβάθμισης

1.2.1 Άμμος

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

1.2.2 Ιλύς

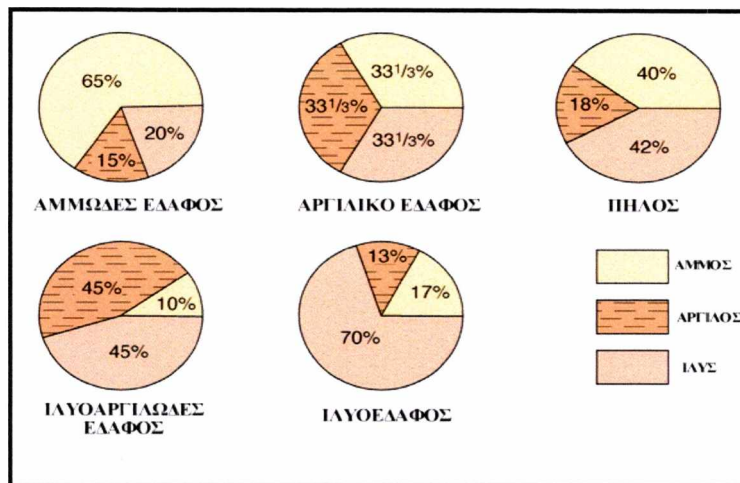
Τα χονδρότερα σωματίδια της ιλύος είναι όμοια με τα λεπτότερα της άμμου όσον αφορά την εκτεθειμένη στον αέρα επιφάνεια και επομένως συμμετέχει ελάχιστα στη χημική δραστηριότητα του εδάφους. Τα λεπτότερα όμως σωματίδια έχουν κάποια συμμετοχή, ιδίως όταν βρίσκονται σε αρκετή ποσότητα. Η ιλύς μπορεί να συγκρατήσει αξιόλογα ποσοστά νερού για αρκετό διάστημα.

1.2.3 Άργιλος

Η άργιλος περιλαμβάνει τα λεπτότερα σωματίδια του εδάφους και έχει μεγάλη εκτεθειμένη επιφάνεια ανά γραμμάριο μάζας. Δεδομένου ότι μεγάλο μέρος της υγρασίας του εδάφους συγκρατείται σαν μεμβράνη γύρω από τα εδαφικά τεμάχια της αργίλου, η ποσότητα της αργίλου έχει μεγάλη επίδραση στη συγκράτηση του νερού από το έδαφος.

Επιπλέον, μερικά διαθέσιμα θρεπτικά συστατικά συγκρατούνται στην επιφάνεια των αργιλικών σωματιδίων. Έτσι η άργιλος ενεργεί σαν αποθήκη θρεπτικών στοιχείων και νερού για τα φυτά. Η άργιλος συνιστάται από διάφορα είδη ορυκτών, συνήθως όμως σε κάθε έδαφος κυριαρχεί μια ομάδα ορυκτών της αργίλου.

Η υφή ενός εδάφους αναφέρεται στην κοκκομετρία των υλικών και στις αναλογίες άμμου, ιλύος και αργίλου που συνθέτουν το έδαφος. Έτσι τα εδάφη με βάση την υφή τους χωρίζονται σε αμμώδη, ιλοσεδάφη, ιλοαργιλώδη και αργιλικά. Στον προσδιορισμό της υφής του εδάφους τα μεγαλύτερα της άμμου κλάσματα (χάλικες, κροκάλες κλπ.) δεν λαμβάνονται υπόψη εξαιτίας της αδυναμίας τους να συμβάλουν στις διεργασίες σχηματισμού του εδάφους. (Τασομήνη Ευαγγελία-Τζιούφα Χριστίνα, Νοέμβριος 2007)

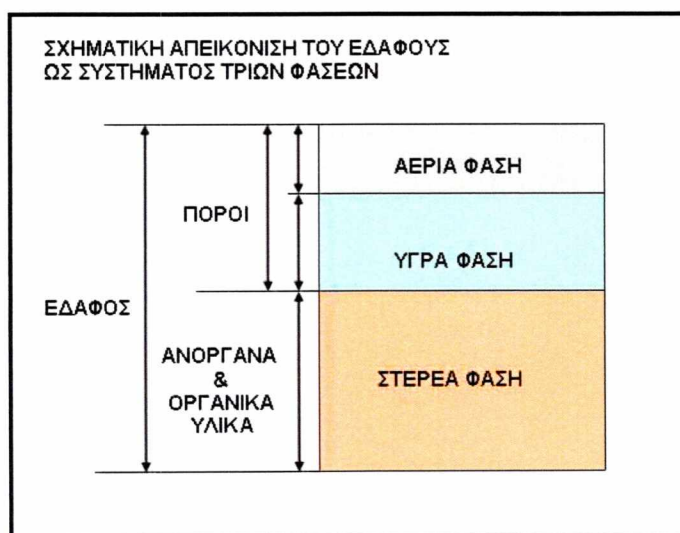


Σχήμα 1.5 Κυκλικά διαγράμματα ποσοστών άμμου, ιλύος και αργίλου σε πέντε τύπους εδαφών.

1.3 Σχέσεις μεταξύ όγκου και μάζας

Στο σχήμα 1.5 δίνεται μια σχηματική διάταξη ενός εδαφικού δείγματος. Στο δείγμα αυτό οι φάσεις είναι χωρισμένες σε τρία τμήματα:

- Κάτω τμήμα, στερεά φάση
- Μεσαίο τμήμα, υγρή φάση
- Επάνω τμήμα, αέρια φάση



Σχήμα 1.5 Έδαφος χωρισμένο σε τρεις φάσεις.

Η στερεή φάση αποτελείται από τα σωματίδια του εδάφους και καλείται **στερεό μητρώο (solid matrix)**. Η υγρή φάση αποτελείται από το νερό και από τον αέρα του εδάφους.

Το τμήμα του εδάφους που αποτελείται από την υγρή και την αέρια φάση καλείται **χώρων των κενών ή χώρος των πόρων (void space or pore space)**.

Το σύνολο στερεής, υγρής και αέριας φάσης καλείται **πορώδες μέσο (porous medium)** και η ροή των ρευστών μέσα στο έδαφος καλείται ροή δια πορώδους μέσου.

Το έδαφος λοιπόν είναι ένα πορώδες μέσο και συνεπώς αποτελείται από ένα άπειρο πλήθος πόρων, οι περισσότεροι από τους οποίους αλληλοσυνδέονται και σχηματίζουν τον **αποτελεσματικό χώρο των πόρων (effective pore space)**. Σε αντίθεση με αυτούς, υπάρχουν πόροι που δεν αλληλοσυνδέονται η ακόμη και άλλοι που αλληλοσυνδέονται μεν, παρουσιάζουν όμως το ένα άκρο φραγμένο (**blind pores**) και έτσι δεν είναι αποτελεσματικοί, γιατί δεν μπορεί να γίνει ροή δια μέσου τέτοιων πόρων. (Μενέλαος Ε. Θεοχάρης, ΑΡΤΑ 2012)

1.3.1 Πορώδες n

Το πορώδες (n) ή ολικό πορώδες είναι ένα μέτρο των διακένων (πόρων, κενών, ρωγμών) που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων (Vκ) προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος /εδάφους (Vολ): $n=Vκ/Vολ$.

<u>Τύποι εδαφών</u>	<u>Πορώδες (%)</u>
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53
Ιλύς	34-61
Άργιλος	34-60

Σχήμα 1.6 Τιμές ολικού πορώδους

Το ενεργό πορώδες (Effective porosity) αναφέρεται στο ποσό των διακένων που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του υπόγειου νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Τα διάκενα που δεν συνεισφέρουν στη ροή αυτή καταλαμβάνονται από νερό συγκράτησης. Στους κοκκώδεις σχηματισμούς το ενεργό πορώδες κυμαίνεται από 0-3% (άργιλος) έως 20% (χαλίκια).

Το πορώδες χαρακτηρίζεται σαν πρωτογενές δηλ. το πορώδες που οφείλεται

στα διάκενα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια σχηματισμού του πετρώματος και σαν δευτερογενές δηλ. το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν λόγω τεκτονισμού, αποσάθρωσης, διάλυσης, δράσης του έμβιου κόσμου κ.ά. Το πρωτογενές πορώδες εξαρτάται από τη διάταξη, το μέγεθος και τη μορφή των κόκκων. (Μενέλαος Ε. Θεοχάρης, ΑΡΤΑ 2012)

1.3.2 Δείκτης κενών e

Ο δείκτης κενών χρησιμοποιείται κυρίως στην εδαφομηχανική, ενώ στις αρδεύσεις και στραγγίσεις προτιμούμε τη χρησιμοποίηση του πορώδους. Ο δείκτης κενών e συνδέεται με το πορώδες n με τη σχέση:

$$e = \frac{n}{n-1} \quad (1.1)$$

1.3.3 Περιεκτικότητα σε νερό ή υγρασία

Η περιεκτικότητα σε νερό ή υγρασία εκφράζεται, είτε σε σχέση με τη στερεά μάζα (υγρασία κατά βάρος w), είτε σε σχέση με τον ολικό όγκο του εδαφικού δείγματος (υγρασία κατ' όγκο θ).

1.3.3.1 Υγρασία κατά βάρος w

Είναι η μάζα του νερού σε σχέση με τη μάζα των σωματιδίων του ξηρού εδάφους. Σαν ξηρό θεωρούμε το έδαφος που έχει αποξηρανθεί σε φούρνο και σε θερμοκρασία 105°C .

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (1.2)$$

1.3.3.2 Υγρασία κατ' όγκο θ

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_s + V_f} \quad (1.3)$$

Είναι ο όγκος του νερού σε σχέση με το συνολικό όγκο του εδαφικού δείγματος. Για αμμώδη εδάφη και σε κατάσταση κορεσμού έχουμε $\theta_s = 40-50\%$ όπου θ_s η υγρασία κορεσμού, ενώ για αργιλώδη εδάφη και σε κατάσταση κορεσμού το θ_s ξεπερνά πολλές φορές την τιμή του 60%.

1.3.4 Βαθμός κορεσμού S

Ο βαθμός κορεσμού εκφράζει τον όγκο του νερού μέσα στους πόρους του εδαφικού δείγματος σε ποσοστά %. Έτσι, για ένα ξηρό έδαφος έχουμε $S=0\%$, ενώ για ένα κορεσμένο έχουμε $S=100\%$.

$$S = \frac{V_w}{V_f} = \frac{V_w}{V_a + V_w} \quad (1.4)$$

1.3.5 Αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού Se

Η ποσότητα αυτή εισάγεται από την ανάγκη που προκαλεί η διαπίστωση, ότι δεν είναι δυνατόν να ξηρανθεί εντελώς ένα έδαφος ώστε η τιμή του S να φτάσει στο μηδέν.

Ο αποτελεσματικός βαθμός κορεσμού ορίζεται ως εξής:

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_r - \theta_s} \quad (1.5)$$

Όπου θ_s = περιεκτικότητα σε νερό κατά κορεσμό (**saturated water content**)

θ_r = υπολειπόμενη περιεκτικότητα σε νερό (**residual water content**)

1.3.6 Τριχοειδής πίεση Pc

Ορίζεται η διαφορά, σε κάθε σημείο του μέσου, μεταξύ της πίεσης του αέρα P_a και του νερού P_w :

$$P_c = P_a - P_w \quad (1.6)$$

Η τριχοειδής πίεση συνήθως εκφράζεται σε ύψος στήλης νερού h (cm) και δίνεται από τη σχέση:

$$h = \frac{P_c}{P_w \cdot g} \quad (1.7)$$

Όπου: P_w = πυκνότητα του νερού
 g = επιτάχυνση βαρύτητας.

Το h στην κορεσμένη ζώνη είναι θετικό, στην ελεύθερη επιφάνεια του υδροφόρου στρώματος μηδέν και στην ακόρεστη ζώνη αρνητικό.

1.3.7 Επιφανειακή τάση σ

Η **Επιφανειακή τάση** εμφανίζεται στις διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ των ρευστών, συνήθως μεταξύ ενός υγρού και ενός αερίου. Τα μόρια στην επιφάνεια των υγρών φέρονται ως μη δεκτικά εξωτερικών δυνάμεων, από υπερκείμενα μόρια, με συνέπεια να έλκονται μεταξύ τους και προς το εσωτερικό της υγρής μάζας, από δυνάμεις συνοχής. Συνέπεια αυτού είναι να δημιουργείται μια συνισταμένη δύναμη, τάση, που και ονομάζεται *επιφανειακή τάση*. Λαμβάνοντας υπόψη ότι για να αυξηθεί η επιφάνεια ενός υγρού απαιτείται ενέργεια διαφαίνεται ότι το πηλίκο της ενέργειας αυτής ανά μονάδα επιφάνειας είναι τελικά αυτό που ονομάζεται επιφανειακή τάση. (ΕΥΑΓΓΕΛΙΔΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2001)

1.3.8 Γωνία επαφής

Είναι η γωνία μεταξύ της επιφάνειας δυο ρευστών και του στερεού μέσου στο οποίο είναι τοποθετημένα. Όταν το υγρό προχωρεί πάνω στο στερεό καλείται γωνία διαβροχής και όταν αποσύρεται γωνία αποσύρσεως. Για το ίδιο υγρό η γωνία διαβροχής είναι μεγαλύτερη από τη γωνία αποσύρσεως. Η ιδιότητα αυτή καλείται αποτέλεσμα σταγόνας βροχής.

1.4 Υδατοικανότητα – Σημείο μάρανσης

Η διαθεσιμότητα του εδαφικού νερού αναφέρεται στην ικανότητα ενός εδάφους να διατηρεί το νερό διαθέσιμο για τις καλλιέργειες. Μετά από έντονες

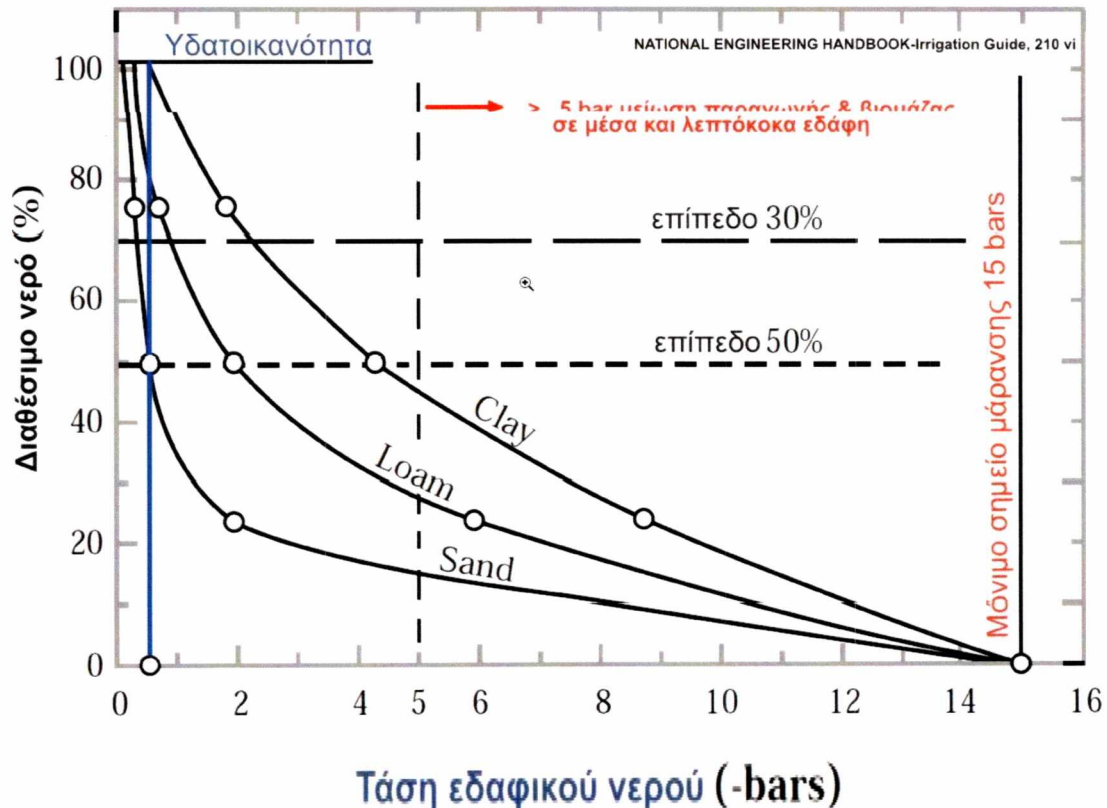
βροχοπτώσεις ή μετά από άρδευση, το χώμα θα στραγγίξει έως ότου επιτευχθεί η Υδατοϊκανότητα του.

Υδατοϊκανότητα FC (*Field Capacity*)

Είναι το ποσό νερού που συγκρατείται στο έδαφος ενάντια στις δυνάμεις βαρύτητας, δηλαδή με άλλα λόγια η Υδατοϊκανότητα χαρακτηρίζεται ως η υγρασιακή κατάσταση του εδάφους μετά από άρδευση (*post-irrigation*) ή μετά βροχόπτωση κατά την οποία η ελεύθερη αποστράγγιση (*free drainage*) έχει σταματήσει. Η τάση της εδαφικής υγρασίας στο σημείο αυτό είναι περίπου 0.1bar.

Μόνιμο σημείο Μάρανσης PWP (*Permanent Wilting Point*)

Το σημείο αυτό αναφέρεται στην υγρασιακή κατάσταση του εδάφους κατά την οποία τα φυτά μαραίνονται μόνιμα (μη αντιστρέψιμη κατάσταση για το φυτό). Η τάση της εδαφικής υγρασίας στο σημείο αυτό είναι περίπου 15 bar.



Σχήμα 1.7 Τυπικές καμπύλες διαθεσιμότητας νερού για Άργιλο, Πηλό και Άμμο

Ολική διαθέσιμη υγρασία (Available Soil Moisture) I_{ASM}

Είναι η ποσότητα νερού εκφρασμένη σε ύψος νερού που μια καλλιέργεια μπορεί να συγκρατήσει στη ζώνη του ριζοστρώματος της και το μέγεθός της εξαρτάται από τον τύπο εδάφους και του βάθους ριζοστρώματος.

$$I_{ASM} = (\Theta_{FC} - \Theta_{PWP}) \cdot D_r \quad (1.8)$$

Όπου I_{ASM} = διαθέσιμη υγρασία στο ριζόστρωμα [mm]

Θ_{FC} = η εδαφική υγρασία στο FC [cm³ /cm³]

Θ_{PWP} = η εδαφική υγρασία στο PWP [cm³ /cm³]

D_r = το βάθος του ριζοστρώματος [mm]

Η I_{ASM} δεν πρέπει να εξαντλείται πλήρως, προτού επανέλθουμε με άρδευση. Αυτό σημαίνει ότι μόνο ένα ποσοστό της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας Θ_{ASM} πρέπει να καταναλώνεται από τα φυτά για τις ανάγκες τους σε νερό και ένα ποσοστό αυτής να παραμένει στο έδαφος, όταν επανερχόμαστε με άρδευση. Το ποσοστό της διαθέσιμης υγρασίας, που πρέπει να παραμένει στο έδαφος, εξαρτάται από την καλλιέργεια, τον τύπο του εδάφους και από οικονομικά κριτήρια. (Μενέλαος Ε. Θεοχάρης, APTA 2012)

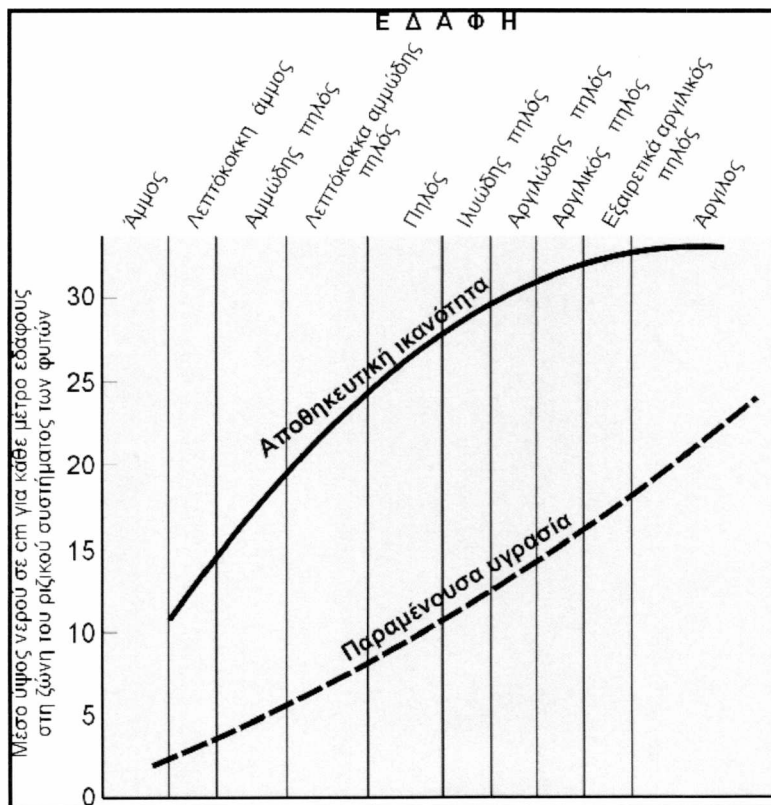
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

2.1 Η κίνηση του νερού στο έδαφος

Η κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος εξαρτάται από τη δύναμη που εφαρμόζεται σε κάθε στοιχειώδη όγκο νερού και από την αντίσταση στη ροή που προβάλλει το πορώδες. Επάνω σε κάθε στοιχειώδη όγκο νερού, δρουν ουσιαστικά δύο δυνάμεις: α) η δύναμη της βαρύτητας που ωθεί την πτώση του σε χαμηλότερο επίπεδο και β) η δύναμη που οφείλεται σε διαφορές υδροστατικής πίεσης και τείνει να προκαλέσει τη μετατόπιση του από περιοχές μεγαλύτερης σε περιοχές μικρότερης 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.



Σχήμα 2.1 Καμπύλη μεταβολής αποθηκευτικής ικανότητας και παραμένουσας υγρασίας νερού στο έδαφος για διάφορους τύπους εδαφών.

2.1.1 Το δυναμικό του εδαφικού νερού

Το εδαφικό νερό συγκρατείται στο έδαφος από δυνάμεις διαφορετικής προέλευσης η συμμετοχή των οποίων στη συγκράτηση του νερού εξαρτάται τόσο από την ποσότητα του νερού, όσο και από τις ιδιότητες της στερεής φάσης του εδάφους. Το αποτέλεσμα της δράσης αυτών των δυνάμεων μαζί με αυτή του πεδίου βαρύτητας, είναι η ενέργεια η οποία έχει το εδαφικό νερό η οποία εκφράζεται και ως δυναμικό του εδαφικού νερού.

Το νερό του εδάφους βρίσκεται σε διαρκή κίνηση. Λόγω του ότι κατά την κίνηση αυτή του νερού η ταχύτητα είναι συνήθως πολύ μικρή υποθέτουμε ότι η κινητική ενέργεια του εδαφικού νερού είναι αμελητέα. Επομένως, η κίνηση του νερού στο έδαφος προκαλείται από τις διαφορές της δυναμικής ενέργειας του από το ένα σημείο στο άλλο με τάση κίνησης προς τη διεύθυνση ελαττούμενης δυναμικής ενέργειας. Το δυναμικό του εδαφικού νερού ορίζεται ως το έργο το οποίο απαιτείται για την μετακίνηση ενός διακεκριμένου όγκου νερού από μια κατάσταση αναφοράς στη θέση που εξετάζεται αντιστρεπτά και ισόθερμα [Αντωνόπουλος 1999].

Στην ολική ενέργεια του εδαφικού νερού συνεισφέρουν ορισμένες δυνάμεις και δυναμικά πεδία. Συγκεκριμένα, τα δυναμικά πεδία και οι δυνάμεις αυτές οφείλονται στο βάρος του νερού, στην αλληλεπίδραση μεταξύ νερού και στερεής φάσης του εδάφους και στην υψομετρική διαφορά από ένα επίπεδο αναφοράς. Κάτω από την επίδραση των δυνάμεων αυτών το νερό μπορεί να κινηθεί προς διάφορες κατευθύνσεις. Ακόμη, το νερό κινείται ως αποτέλεσμα θερμοκρασιακών διαφορών, της παρουσίας διαλυμένων στο εδαφικό νερό συστατικών καθώς και της δράσης των ριζών των φυτών. Οι τρεις τελευταίες περιπτώσεις αποτελούν θερμικούς και χημικούς ενεργειακούς παράγοντες και παρόλο που στη φύση υπάρχουν τρόποι μετασχηματισμού τους σε μηχανική ενέργεια όπως πχ τα κυτταρικά τοιχώματα που αποτελούν ένα είδος ημιδιαπερατής μεμβράνης δεν θα μας απασχολήσουν περαιτέρω λόγω του ότι επικεντρωνόμαστε στη κίνηση του νερού στο πορώδες. Κάτω από τη συνδυασμένη επίδραση όλων των παραπάνω παραγόντων, το εδαφικό νερό βρίσκεται σε συνεχή κίνηση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της οποίας διαμορφώνονται κατά περίπτωση από την μορφή και την διάταξη των εδαφικών πόρων.

Προκειμένου να καθοριστεί η διεύθυνση της δύναμης που προκαλεί την κίνηση του εδαφικού νερού θα πρέπει να ποσοτικοποιηθεί το ολικό δυναμικό. Με τον όρο δυναμικό, στη μελέτη της ροής του εδαφικού νερού, εκφράζεται η ενέργεια του ανά μονάδα βάρους (L) ανά μονάδα μάζας (L^2T^{-2}) ή ανά μονάδα όγκου ($MT^{-2}L^{-1}$). Για υπολογισμούς η έκφραση του δυναμικού ως ενέργεια ανά μονάδα βάρους είναι πιο εύχρηστη γιατί επιτρέπει την έκφραση του δυναμικού βαρύτητας σε μονάδες μήκους και μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από την υψομετρική διαφορά σε σχέση με ένα επίπεδο, αναφοράς. Τα διάφορα πεδία

που επιδρούν πάνω στο εδαφικό νερό δημιουργούν το δυναμικό βαρύτητας Ψ_g , το δυναμικό υδροστατικής πίεσης Ψ_p και το οσμωτικό δυναμικό Ψ_o . Το ολικό δυναμικό του εδαφικού νερού Ψ εκφράζεται ως το άθροισμα των επιμέρους δυναμικών από τη σχέση :

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_o \quad (2.1)$$

(Παναγιωτόπουλος Κ. Π, 1985)

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 τη σχέση:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_g \quad (2.2)$$

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 δε ανά μονάδα βάρους γράφεται :

$$\Psi_g = \pm Z \quad (2.3)$$

Όπου: $+Z$ = άξονας θετικός κατευθυνόμενος προς τα πάνω.

$-Z$ = άξονας θετικός κατευθυνόμενος προς τα κάτω.

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

$$\Psi_p = h \quad (2.4)$$

Στην ακόρεστη ζώνη η τιμή του h είναι αρνητική και καλείται μύζηση. Επομένως:

$$H = h \pm Z = \Psi_T \quad (2.5)$$

Όπου H είναι το υδραυλικό φορτίο (**hydraulic head**).

(Παναγιωτόπουλος Κ. Π, 1985)

2.2 Νόμος Darcy

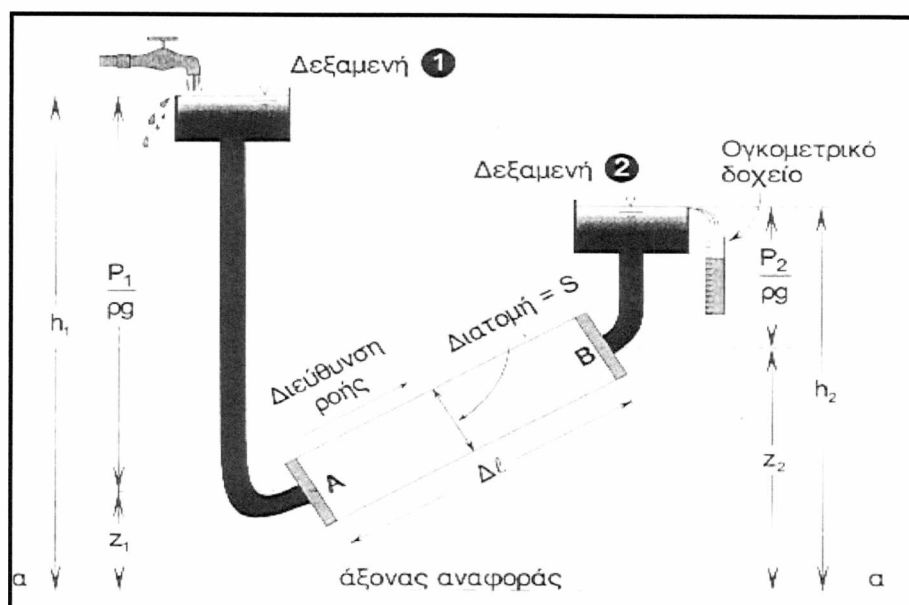
Οι γενικές εξισώσεις κίνησης των ρευστών, δηλ. οι εξισώσεις Navier-Stokes, δεν παρουσιάζουν κανένα ενδιαφέρον στη μικροκλίμακα του διάκενου, γιατί εξαιτίας του πολύπλοκου σχήματος των ορίων, είναι αδύνατη η επίλυση ακόμα και των στοιχειωδέστερων περιπτώσεων ροής. Φαίνεται λοιπόν αναγκαία η αντικατάσταση της πολύπλοκης μορφής της πραγματικής επιφάνειας των διάκενων με μια άλλη συμβατική μορφή, που η αναλυτική εξίσωσή της επιτρέπει την ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης στις συνήθεις απλές περιπτώσεις.

Η μακροσκοπική εξέταση των προβλημάτων της υπόγειας υδραυλικής επιτυγχάνεται με τον εμπειρικό νόμο του Darcy, που διατυπώθηκε το 1854 και αποτελεί το θεμελιώδη νόμο κίνησης της υπόγειας υδραυλικής. Για τη διατύπωση αυτού του νόμου ο Darcy έκανε ένα σύνολο πειραμάτων με τη συσκευή που φαίνεται στο σχήμα 4.1. Σ' αυτήν, ανάμεσα από τις δύο δεξαμενές, υπήρχε ένας σωλήνας με εμβαδόν διατομής S γεμάτος με πορώδες υλικό, κορεσμένο με νερό.

Εξαιτίας της υψομετρικής διαφοράς που υπήρχε στις στάθμες του νερού στις δύο δεξαμενές, το νερό κινούνταν κατά τη διεύθυνση που φαίνεται στο σχήμα. Ένα ογκομετρικό δοχείο μετά τον εκχειλιστή της δεύτερης δεξαμενής, χρησίμευε για τη μέτρηση της παροχής, Q , που περνούσε μέσα από το πορώδες υλικό.

Ο Darcy εκτελώντας πολλά πειράματα διαπίστωσε ότι η παροχή Q είναι ανάλογη προς:

- α. Την επιφάνεια S
- β. Τη διαφορά φορτίου $h_1 - h_2$
- γ. Το αντίστροφο του μήκους Δl του πορώδους υλικού
- δ. Ένα συντελεστή αναλογίας, K , ο οποίος ονομάζεται υδραυλική αγωγιμότητα και εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους υλικού όσο και από τα χαρακτηριστικά του κινούμενου ρευστού, και έχει διαστάσεις ταχύτητας.



Σχήμα 2.2 Η πειραματική συσκευή του Darcy

Μαθηματικά ο νόμος του Darcy διατυπώθηκε ως εξής:

$$Q = -KS \frac{(h_2 - h_1)}{\Delta_l} \quad (2.6)$$

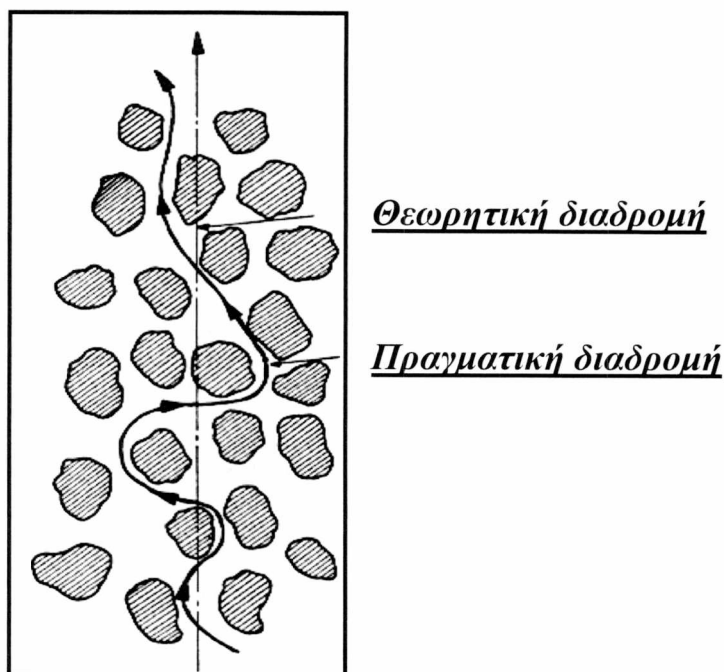
Από τη σχέση (2.6) προκύπτει:

$$Q = -KS \frac{\left(Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} - Z_1 - \frac{P_1}{\gamma} \right)}{\Delta_l} = -\frac{KS}{\Delta_l} \left((Z_2 - Z_1) + \frac{P_2 - P_1}{P \cdot g} \right) = -\frac{KS}{\Delta_l} \left(\frac{P_2 - P_1}{P \cdot g} - \Delta_l \cdot \eta \mu \phi \right) = -KS \left(\frac{P_2 - P_1}{Pg\Delta_l} - \eta \mu \phi \right) \quad (2.7)$$

Ο λόγος $\frac{Q}{S} = V$, που είναι η παροχή ανά μονάδα επιφάνειας, έχει διαστάσεις ταχύτητας LT^{-1} και ονομάζεται **ταχύτητα Darcy ή ταχύτητα διαστάλαξης** (seepage velocity). Το αρνητικό πρόσημο των παραπάνω εξισώσεων δείχνει ότι η ροή λαμβάνει χώρα κατά την έννοια των ελαττωμένων πιεζομετρικών φορτίων. Η ταχύτητα διαστάλαξης δεν παριστάνει την πραγματική ταχύτητα με την οποία κινείται το νερό στο πορώδες υλικό, αλλά είναι μια υποθετική, που ορίζεται από την παροχή που περνά από μια διατομή.

Η πραγματική ταχύτητα μεταβάλλεται ακανόνιστα στη μικροκλίμακα των πόρων και ο νόμος του Darcy, ως μακροσκοπικός νόμος, δεν μπορεί να την περιγράψει. Σχηματική παράσταση της πραγματικής και της θεωρητικής διαδρομής του νερού μέσα στο έδαφος παρουσιάζεται στο *σχήμα 2.3*.

Εάν η πραγματική μέση ταχύτητα δια μέσου των πόρων είναι V_{π} , τότε η πραγματική διατομή που συμμετέχει στην κίνηση είναι: $S_{\pi} = S \cdot n_e$, όπου n_e είναι το ενεργό (ή αποτελεσματικό) πορώδες του εδάφους δηλαδή το ποσοστό του πορώδους που περικλείει όλους τους πόρους που μετέχουν στην κίνηση. (Γεώργιος Ν. Στεφανής, Αθήνα 2008)



Σχήμα 2.3 Πραγματική και θεωρητική διαδρομή του νερού μέσα στο έδαφος.

2.3 Εξίσωση συνέχειας

Η εξίσωση της συνέχειας αποτελεί για τα ρευστά τη μαθηματική διαφορική έκφραση της αρχής της συνέχειας, που με τη σειρά της εκφράζει το νόμο διατήρησης της μάζας. Η εξίσωση της συνέχειας μπορεί να γραφεί με διάφορες μορφές ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο σύστημα συντεταγμένων και με τον τύπο της ροής.

Για ροή σταθερή σε ακόρεστο πορώδες μέσο, η εξίσωση συνέχειας γράφεται:

$$\frac{\partial}{\partial t} (p_w \theta) = -\text{div}(p_w \bar{q}) \quad (2.8)$$

Όπου ρ_w η πυκνότητα του νερού, θ η περιεκτικότητα σε νερό κατ' όγκο, q η ταχύτητα Darcy και t ο χρόνος.

Για ασυμπίεστο υγρό και ροή ασταθή, μονοδιάστατη και κατακόρυφη η εξίσωση (2.8) διατυπώνεται ως εξής :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial z} \quad (2.9)$$

2.4 Εξίσωση κίνησης

Οι εξισώσεις της κίνησης των ρευστών βασίζονται στο δεύτερο νόμο του Νεύτωνα:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (2.9)$$

Στην περίπτωση της κίνησης των ρευστών η συνισταμένη δύναμη \mathbf{F} αποτελείται από τις σωματικές και επιφανειακές δυνάμεις. Οι σωματικές ή δυνάμεις δυναμικού οφείλονται στην επίδραση διάφορων 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 λόγω του ιξώδους, οι οποίες ενεργούν παράλληλα προς τα όρια της επιφάνειας. Στην περίπτωση των τέλειων ρευστών οι δυνάμεις τριβής παραλείπονται. (Τερζίδης Γ.Α., Παπαζαφειρίου Ζ.Γ., 1994)

Η εξίσωση κίνησης για ασυμπίεστα υγρά προκύπτει από το συνδυασμό της εξίσωσης Darcy και της εξίσωσης της συνέχειας και δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div} \left(K(\theta) \vec{\text{grad}} H \right) \quad (2.10)$$

Για μονοδιάστατη κατακόρυφη ροή η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (2.11)$$

Όπως φαίνεται από την εξίσωση (2.11) δυο είναι οι μεταβλητές που επηρεάζουν την κίνηση:

- Η περιεκτικότητα σε νερό θ
- Το υδραυλικό φορτίο H , που συνδέονται μεταξύ τους από τη σχέση :

$$H = -\Psi(\theta) - Z$$

2.4.1 Εξίσωση κίνησης ως προς θ

Αν στην εξίσωση (2.11) εισαχθεί ο συντελεστής διάχυσης : $D(\theta) = -K(\theta) \frac{d\Psi}{d\theta}$ τότε προκύπτει:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial Z} - K(\theta) \right) \quad (2.12)$$

Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή σαν εξίσωση τύπου Fokker-Planck και δεν επιτρέπει την περιγραφή της ροής σε κορεσμένη ζώνη όπου η υγρασία παίρνει την τιμή κορεσμού θ για την οποία ο συντελεστής διάχυσης απειρίζεται. Γι' αυτό συνήθως κατά την επίλυση της εξίσωσης η μεγαλύτερη τιμή της υγρασίας δεν φθάνει στην τιμή θ_s .

2.4.2 Εξίσωση κίνησης ως προς Ψ

Αν στην εξίσωση (2.11) εισαχθεί ο όρος : $C(\Psi) = \frac{\partial \theta}{\partial h} = -\frac{\partial \theta}{\partial \Psi}$ ο οποίος καλείται ειδική υδραυλική χωρητικότητα του ακόρεστου μέσου, προκύπτει :

$$C(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(K(\Psi) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial Z} + 1 \right) \right) \quad (2.13)$$

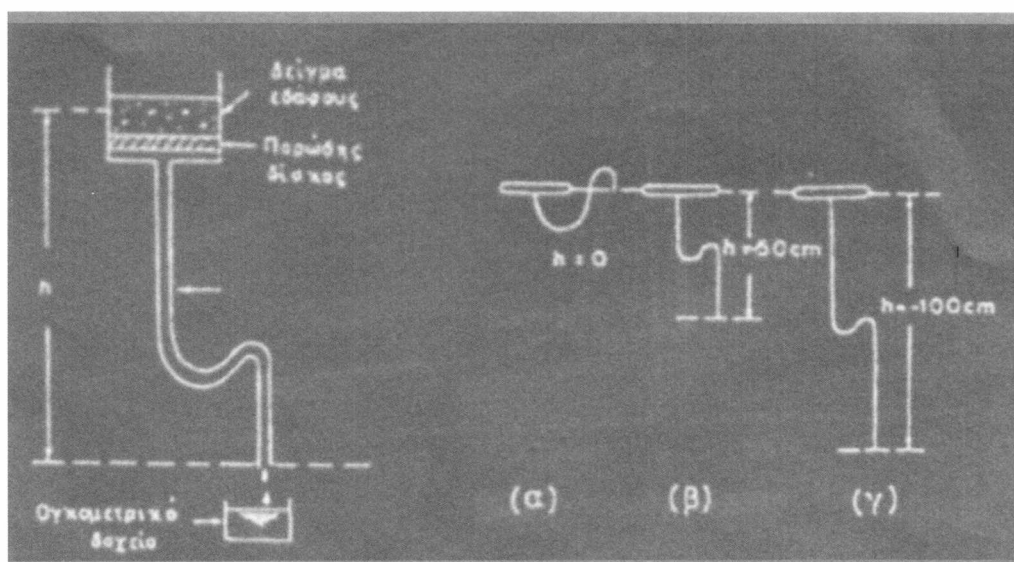
Η εξίσωση (2.13) είναι γνωστή ως εξίσωση τύπου Richards και έχει το προνόμιο να περιγράφει τη ροή και σε κορεσμένη ζώνη. (Στεργιοπούλου Σταυρούλα, Βόλος 2000)

2.5 Η κίνηση του νερού σε ακόρεστο έδαφος

Το τμήμα του εδάφους, 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 πίεσης που χρειάζεται για την απομάκρυνση του νερού από τους εδαφικούς πόρους.

Αν ένα έδαφος αρχικά κορεσμένο με νερό αφεθεί 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 (δύναμη) συγκρατήσεως κατά κύριο λόγο εξαρτάται:

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



Σχήμα 2.4 Συσκευή εφαρμογής αρνητικών πιέσεων σε δείγματα εδάφους.

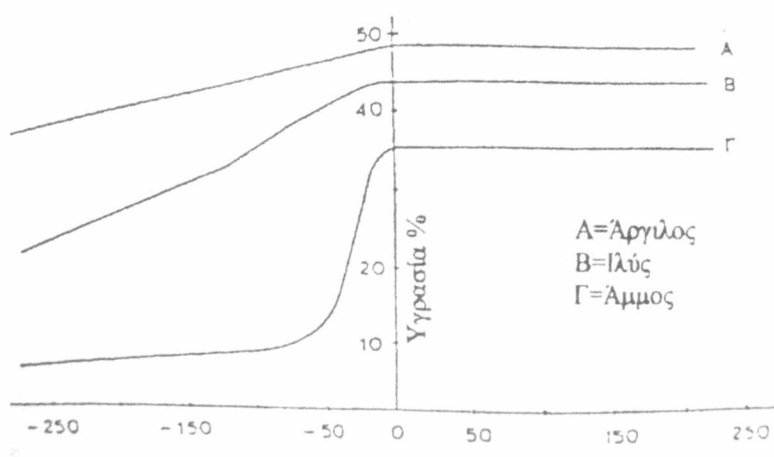
Στο εργαστήριο, αρνητικές πιέσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε δείγματα εδάφους με τη συσκευή που φαίνεται στο σχήμα (2.4). Η συσκευή αποτελείται από ένα κυλινδρικό δοχείο που πάνω στον πυθμένα του τοποθετείται ένας πορώδης δίσκος με πολύ μικρούς πόρους. Κάτω από το δίσκο, στον πυθμένα του

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.

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, δίνονται στο σχήμα (2.5).

Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, όταν η πίεση είναι θετική η εδαφική υγρασία παραμένει αμετάβλητη στο επίπεδο κορεσμού. Για το λόγο αυτό στα διαγράμματα παραλείπονται οι θετικές πιέσεις. Επίσης παραλείπεται και το αρνητικό πρόσημο, (αφού αυτό θεωρείται αυτονόητο), τοποθετώντας στον αντίστοιχο άξονα του διαγράμματος την απόλυτη τιμή της πίεσης $|-h| = \Psi$ η οποία ονομάζεται Μύζηση.



Πίεση εδαφικής υγρασίας

Σχήμα 2.5 Καμπύλες μεταβολής της εδαφικής υγρασίας σε σχέση με την αρνητική πίεση (χαρακτηριστικές καμπύλες)

Αν εξετάσουμε τις καμπύλες του σχήματος (2.5) 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 σ' αυτή την περιοχή των πιέσεων χάνουν πολύ λιγότερο νερό. Γενικά, μπορεί να ειπωθεί 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.(Στεργιοπούλου Σταυρούλα, Βόλος 2000)

2.6 Μέθοδοι προσδιορισμού των χαρακτηριστικών καμπυλών της εδαφικής υγρασίας.

Συνοπτικά να αναφέρουμε ότι υπάρχουν μέθοδοι προσδιορισμού χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας στο εργαστήριο και τον αγρό. Στο εργαστήριο την χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας την προσδιορίζουμε με μια από τις παρακάτω μεθόδους η με συνδυασμό αυτών.

- Μέθοδος Haines
- Μέθοδος στήλης με ισορροπία με σταθερή στάθμη ελεύθερου ύδατος.
- Μέθοδος στήλης με διάφραγμα πίεσης
- Συσκευή Richards
- Μέθοδος της σχετικής υγρασίας
- Μέθοδος του σημείου πήξης του ύδατος του εδάφους

Αντίστοιχα οι μέθοδοι προσδιορισμού χαρακτηριστικών καμπυλών εδαφικής υγρασίας στον αγρό είναι οι εξής:

- Τασίμετρα
- Πορώδη σώματα
- Μέθοδος νετρονίων
- Μέθοδος TDR
- Μέθοδος της ηλεκτρικής αντιστάσεως
- Μέθοδος FDR

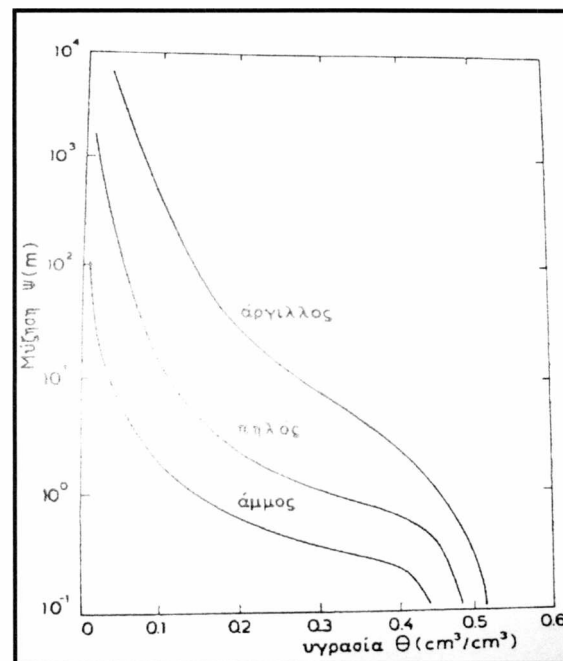
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

3.1 Σχέσεις πίεσης-περιεκτικότητας σε νερό

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι μεταβλητές της μύζησης και της υγρασίας είναι πολύ στενά συνδεδεμένες μεταξύ τους. Όσο λιγότερο νερό υπάρχει στο έδαφος τόσο μεγαλύτερη είναι η μύζηση με την οποία αυτό συγκρατείται και αντίστροφα.

Η καμπύλη της περιεκτικότητας σε νερό σε συνάρτηση με τη μύζηση ονομάζεται **χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας του εδάφους**. Η χαρακτηριστική καμπύλη διαφέρει για κάθε τύπο εδάφους.



Σχήμα 3.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες για αμμώδες, πηλώδες και αργιλώδες έδαφος.

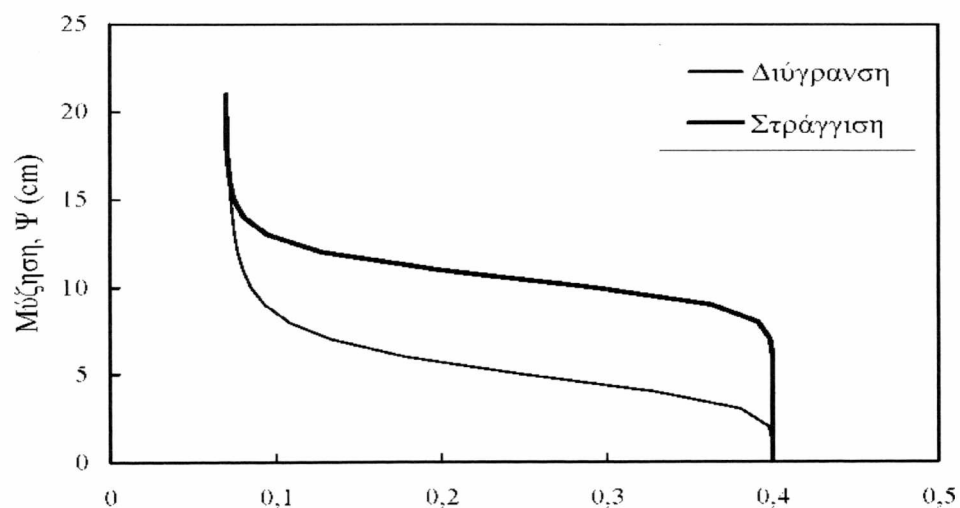
3.2 Υστέρηση της σχέσης $\Psi(\theta)$

Το επιφανειακό έδαφος στη φυσική του κατάσταση κατά κανόνα είναι ακόρεστο, δηλαδή περιέχει στους πόρους του αέρα και νερό. Καθώς το νερό

απομακρύνεται, ή προστίθεται στο έδαφος, το δυναμικό του εδαφικού νερού συνεχώς μεταβάλλεται. Ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο από κάθε άλλον τις δυνάμεις με τις οποίες το εδαφικό νερό συγκρατείται από το έδαφος είναι η μηχανική σύσταση του εδάφους. Η μηχανική σύσταση εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το πορώδες, το μέγεθος των πόρων, το σχήμα και την αρχιτεκτονική τους. Έτσι, μόνον η τιμή της υγρασίας (θ) για εδάφη που έχουν διαφορετική μηχανική σύσταση, είναι ανεπαρκής για την εξαγωγή συγκριτικών συμπερασμάτων. Διαφορετική μηχανική σύσταση σημαίνει διαφορετική δύναμη συγκράτησης του εδαφικού νερού από το έδαφος, δηλαδή διαφορετική μύζηση. Όταν η τιμή της μύζησης αυξάνει, αυξάνουν οι δυνάμεις συγκράτησης του εδαφικού νερού, δηλαδή μειώνεται η εδαφική υγρασία.

Για τη μελέτη της σχέσης που υπάρχει ανάμεσα στη μύζηση και στην ποσότητα του εδαφικού νερού σε όλο το εύρος της εδαφικής υγρασίας, προσδιορίζεται πειραματικά μια καμπύλη, η οποία ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη συγκράτησης του εδαφικού νερού ή και χαρακτηριστική καμπύλη του εδάφους. Ζεύγη τιμών υγρασίας - μύζησης (θ_i, Ψ_i) τοποθετούνται σε ένα σύστημα ορθογωνίων συντεταγμένων και δίνουν μια σιγμοειδούς μορφής, ομαλή και συνεχή καμπύλη, η οποία είναι διαφορετική για κάθε τύπο εδάφους.

Η χαρακτηριστική καμπύλη συγκράτησης του εδαφικού νερού μπορεί να σχηματιστεί, εάν ένα κορεσμένο έδαφος υποβληθεί σε προοδευτική μείωση της υγρασίας του, οπότε έχουμε την καμπύλη στράγγισης ή στην αντίθετη περίπτωση, εάν ένα ακόρεστο έδαφος υποβληθεί σε προοδευτική διύγρανση, οπότε έχουμε την καμπύλη διήθησης. Η καμπύλη στράγγισης και η καμπύλη διήθησης δεν ταυτίζονται, το οποίο σημαίνει ότι η σχέση υγρασίας-πίεσης δεν είναι μονοσήμαντη. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί το φαινόμενο της υστέρησης.



Σχήμα 3.2 Χαρακτηριστική καμπύλη συγκράτησης του εδαφικού νερού.

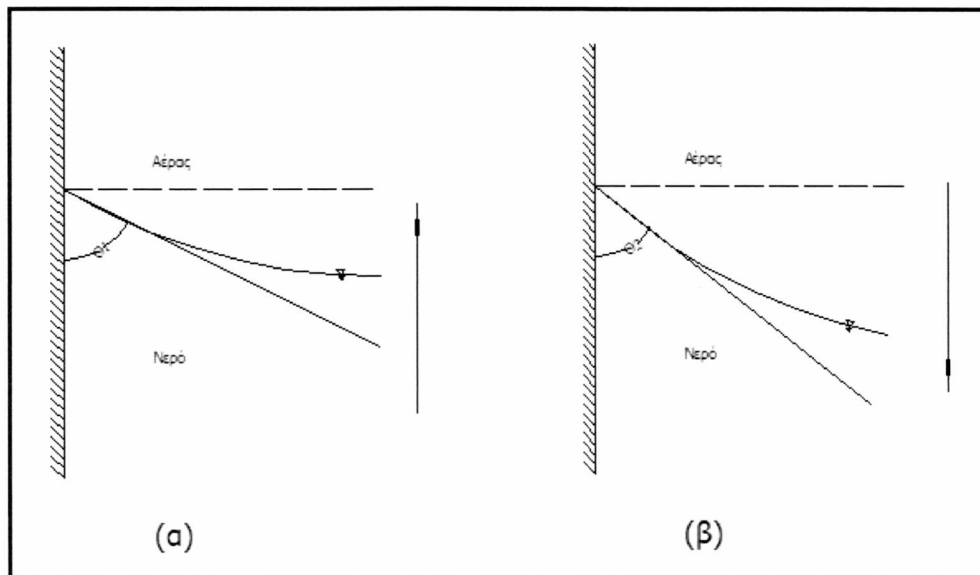
Το φαινόμενο της υστέρησης αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης από πολλούς ερευνητές όπως: Everret et al (1952, 1954a, 1954b, 1955), Poulouvassilis (1962, 1970), Philip (1964), Poulouvassilis and Tzimas (1975), Poulouvassilis and El-Ghamry (1977), Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη και Τζιμόπουλος (1985), Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη (1986), Αραμπατζής (1996) κ.α. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ο Haines (1930), ύστερα από πειράματα σε πορώδη μέσα με σταθερό πορώδες, έδειξε για πρώτη φορά ότι η σχέση μεταξύ περιεκτικότητας υγρασίας και μύζησης δεν είναι μονοσήμαντη.

Η υστέρηση αποτελεί ένα φαινόμενο που εμφανίζεται σε ορισμένα φυσικά μέσα όπως οι φερομαγνήτες, οι κρύσταλλοι, τα κράματα, τα πορώδη μέσα κ.λπ. Το φυσικό αυτό φαινόμενο εμφανίζεται κατά τη διάρκεια ορισμένων διαδικασιών που εξελίσσονται στα μέσα αυτά, μεταξύ δύο μεταβλητών του συστήματος X και Y , όπου $Y=Y(X)$, και οι οποίες περιγράφουν την κατάσταση ισορροπίας στο σύστημα, η δε σχέση αυτή δεν είναι μονοσήμαντη, αλλά σε μία τιμή της μεταβλητής X είναι δυνατόν να αντιστοιχούν άπειρες τιμές της Y . Έτσι, για παράδειγμα η χαρακτηριστική καμπύλη της υγρασίας ενός εδάφους περιγράφει την κατάσταση ισορροπίας, που υπάρχει ανάμεσα στην αρνητική πίεση του νερού των πόρων Ψ και στην περιεχόμενη υγρασία θ σε μη κορεσμένο έδαφος. Η σχέση αυτή $\Psi(\theta)$ δεν είναι μονοσήμαντη, αλλά παρουσιάζει υστέρηση, δηλαδή η χαρακτηριστική καμπύλη παρουσιάζει άλλη πορεία κατά τη διάρκεια μιας διύγρανσης και άλλη πορεία κατά τη διάρκεια μιας στράγγισης, και η τιμή της αρνητικής πίεσης του νερού των πόρων είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια μιας στράγγισης παρά κατά τη διάρκεια μιας διύγρανσης για την ίδια υγρασία. Για το φαινόμενο αυτό ο Haines θεώρησε υπεύθυνη την αρχιτεκτονική του πορώδους και τη διαφορετική γωνία επαφής κατά τη διύγρανση από τη στράγγιση. Σε γενικές γραμμές, το πορώδες μπορεί να θεωρηθεί ότι διαμορφώνεται από σχετικά μεγάλες κοιλότητες (διευρύνσεις), που αλληλεπικοινωνούν μεταξύ τους με λεπτά ανοίγματα (στενώσεις). Κατά τη φάση της ξήρανσης, η πίεση που πρέπει να εφαρμοστεί για το άδειασμα ενός πόρου, καθορίζεται από την ακτίνα της στένωσης, ενώ κατά τη φάση της διύγρανσης, η πίεση που κάνει τον πόρο να γεμίσει, καθορίζεται από την ακτίνα διεύρυνσης. Έτσι, απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια, για να αποσπάσουμε νερό από το έδαφος παρά για να το προσθέσουμε και το φαινόμενο είναι μη αντιστρεπτό. Η υγρασία λοιπόν σε μια δεδομένη μύζηση είναι μεγαλύτερη κατά τη στράγγιση απ' ό τι κατά τη διύγρανση. (Haines, 1930,)

3.2.1 Ερμηνεία του φαινομένου της υστέρησης

Το φαινόμενο της υστέρησης επηρεάζει τις χαρακτηριστικές συναρτήσεις του εδάφους $\theta(h)$ και $K(h)$ σε αντίθεση με την συνάρτηση $K(\theta)$ που δεν επηρεάζεται. Αυτό αποδεικνύεται πειραματικά. Επομένως, η πρώτη παρατήρηση στο ότι η μεταβλητή h (ύψος τριχοειδούς πίεσης) είναι εκείνη που «ευθύνεται» για το φαινόμενο αυτό. Πράγματι, έχοντας κατά νου την εξίσωση του Laplace, μπορούν να αναφερθούν οι εξής λόγοι που προκαλούν την υστέρηση:

- Η ανομοιόμορφη κατανομή των πόρων του πορώδους μέσου (εδάφους).
- Η διαφορετική γωνία επαφής του νερού στους κόκκους του εδαφικού μητρώου κατά τη στράγγιση και τη διήθηση,
- Ο εγκλωβισμός αέρα κατά την πορεία στράγγισης- διήθησης (Torpp, G., 1969,)



Σχήμα 3.3 (α). Γωνία διαβροχής θ_1 κατά τη διήθηση (β). Γωνία απόσυρσης κατά τη στράγγιση θ_2 .

3.2.2 Το φαινόμενο της υστέρησης σε διάφορους τύπους εδαφών

Η υστέρηση στη σχέση $\theta-h$, που αποτελεί ένα φυσικό φαινόμενο παρατηρείται κυρίως σε χοντρόκοκκα εδάφη και αυτό επειδή τα καθαρά αμμώδη εδάφη έχουν κατ' εξοχήν σταθερό πορώδες.

Στα καθαρά αργιλικά εδάφη είναι γνωστό ότι το πορώδες μεταβάλλεται ανάλογα με την υγρασία που περιέχουν. Στα εδάφη αυτά παρατηρείται συρρίκνωση κατά τη φάση της ξηράνσεως και διόγκωση κατά τη φάση της υγράνσεως. Η απώλεια νερού συνοδεύεται από ισοδύναμη μείωση του όγκου του εδάφους και αντίστροφα έτσι που, σε ιδανικά συστελλόμενα και διαστελλόμενα εδάφη, η σχέση μεταξύ περιεχόμενης υγρασίας και αρνητικής πίεσεως είναι μονοτιμική. Όμως, και στην περίπτωση των εδαφών αυτών, πειράματα έδειξαν ότι κατά τον πρώτο κύκλο υγράνσεως-ξηράνσεως η σχέση δεν είναι απόλυτα αντιστρεπτή γιατί κατά την ξήρανση παρατηρούνται μη αντιστρεπτές αλλαγές στη διάταξη των σωματιδίων της αργίλου. Μετά τον πρώτο κύκλο δεν παρατηρούνται άλλες μη αντιστρεπτές μεταβολές και η καμπύλη $\theta-h$ μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση μη αντιστρεπτή.

Ανάμεσα στα εδάφη με σταθερό πορώδες (καθαρά αμμώδη εδάφη) και στα εδάφη με ιδανικά μεταβαλλόμενο πορώδες (καθαρά αργιλικά εδάφη) κατατάσσονται όλα τα υπόλοιπα που περιέχουν σε μικρό ή μεγάλο βαθμό άργιλο και χούμο. Η άργιλος και ο χούμος επηρεάζουν τη δομή των εδαφών με τη δημιουργία συσσωματωμάτων που δεν είναι πολύ σταθερά. Για το λόγο αυτό, η υστέρησή τους δεν έχει διεξοδικά μελετηθεί. Συμπεραίνεται όμως ότι θα πρέπει να συμπεριφέρονται με κάποιο ενδιάμεσο τρόπο, ανάλογα με το βαθμό αντιστρεψιμότητας της δομικής διατάξεως των συσσωματωμάτων τους.

Μια συγκεκριμένη περιεκτικότητα σε νερό ενός εδάφους μπορεί να επιτευχθεί ακολουθώντας διάφορες διαδρομές υστερήσεως που ο αριθμός τους είναι θεωρητικά άπειρος. Η κατανομή μιας ποσότητας νερού στο έδαφος, που καθορίζει μια ορισμένη εδαφική υγρασία, συνδέεται άμεσα με τη συγκεκριμένη σειρά μεταβολών της πίεσεως που οδήγησε στη συγκράτησή του και διαφέρει από οποιαδήποτε άλλη κατανομή της ίδιας ποσότητας νερού που κατέληξε να βρίσκεται στο έδαφος μετά από διαφορετική σειρά μεταβολών της πίεσεως. Οι μεγαλύτερες διαφορές στην κατανομή του νερού παρατηρούνται όταν η ίδια εδαφική υγρασία έχει επιτευχθεί ακολουθώντας τις οριακές καμπύλες υστέρησης. (Γεώργιος Ν. Στεφανής, Αθήνα 2008)

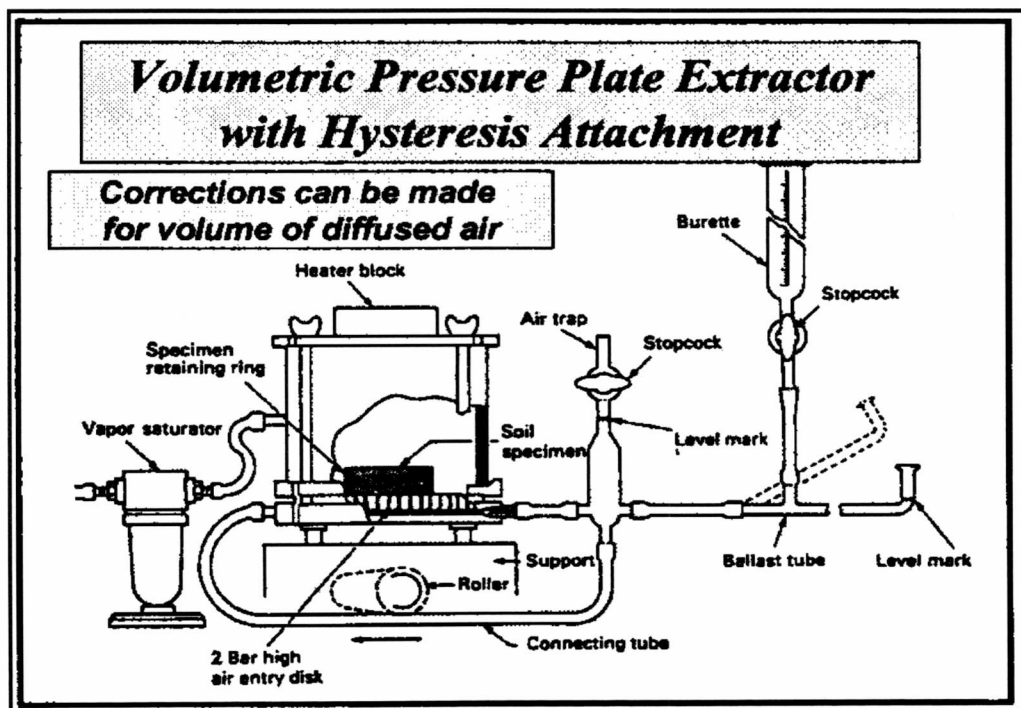
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για το πειραματικό μέρος της εργασίας καταναλώθηκε πολύς χρόνος και κόπος αφενός για την εκμάθηση του σωστού χειρισμού της συσκευής της υστέρησης, η λειτουργία της οποίας ήταν πολύπλοκη, και αφετέρου για την επίτευξη της ισορροπίας στα εδαφικά δείγματα κάθε φορά που αυξανόταν ή μειωνόταν η πίεση, ώστε να πάρουμε τις μετρήσεις. Είναι γνωστά σε όλους τους ερευνητές που εκπονούν πειραματικές εργασίες, τα προβλήματα τα οποία προκύπτουν κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής τους. Πολλές φορές επιβάλλεται η επανάληψή τους, η οποία καταναλώνει περισσότερο χρόνο από εκείνον που έχει προγραμματιστεί εξ' αρχής.

4.1 Συσκευή Υστέρησης

Για τον προσδιορισμό του βρόχου της υστέρησης της εδαφικής υγρασίας και των διερευνητικών καμπυλών χρησιμοποιήθηκε η συσκευή *Volumetric Porous Plate Extractor*.



Σχήμα 4.1 Συσκευής υστέρησης

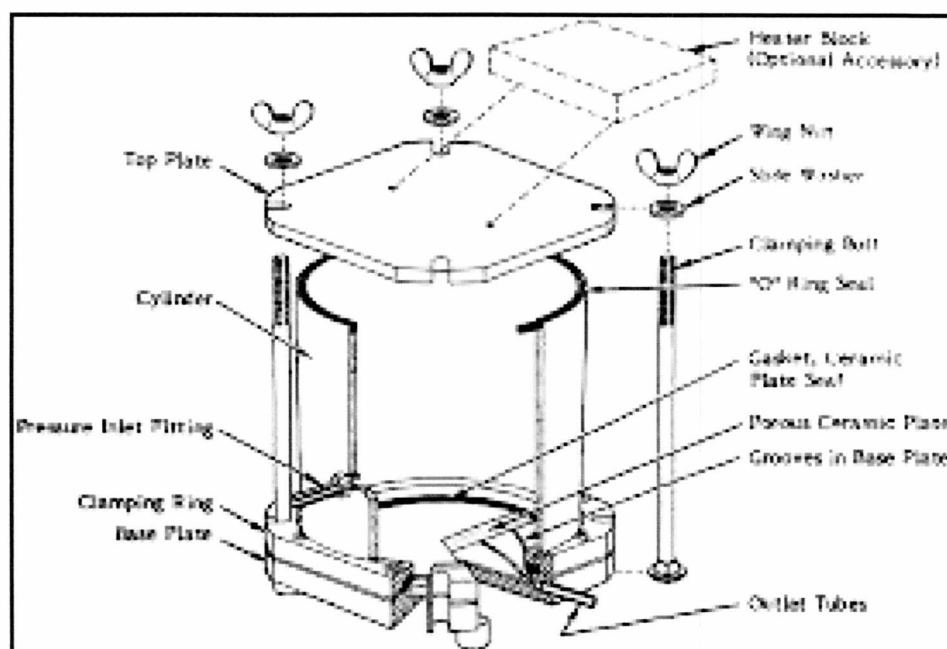
Η συσκευή της υστέρησης περιλαμβάνει τα εξής εξαρτήματα:

- ❖ Εξαγωγή πιέσεων
- ❖ Κορεστή ατμών (*Vapor Saturator*)
- ❖ Ρυθμιστή θερμοκρασίας (*Heater Block*)
- ❖ Παγίδα αέρος (*Air Trap*)
- ❖ Σωλήνα συλλογής νερού (*Ballast Tube*)
- ❖ Διαβαθμισμένο σωλήνα (*Burette*)
- ❖ Σωλήνα σύνδεσης (*Connecting tube*)
- ❖ Βάνες (*Stopcock*)

4.1.1 Εξαγωγέας πιέσεων (Volumetric Pressure Plate Extractor)

Το μοντέλο *Volumetric Pressure Plate Extractor* είναι ένας ακριβής **εξαγωγέας** σχεδιασμένος έτσι ώστε το τμήμα της εξωτερικής ροής των οργάνων να είναι σταθερό. Όταν ο εξαγωγέας χρησιμοποιείται σε σύνδεση με τα εξαρτήματα της Υστέρησης, καθιστά εφικτό τον προσδιορισμό της Υστέρησης σε διαταραγμένα ή αδιατάρακτα εδαφικά δείγματα. Ο εξαγωγέας σε σύνδεση με τα προσαρτήματα της Υστέρησης κάνει επίσης δυνατό το μέτρημα της τριχοειδούς αγωγιμότητας του εδάφους.

Στη βάση του εξαγωγέα τοποθετείται πορώδης κεραμικός δίσκος 2 bars, ο οποίος επιτρέπει την λειτουργία του εξαγωγέα σε κάθε πίεση ανάμεσα στα 0 και 2 bars. (Soil moisture equipment corp.,, January 1999)



Σχήμα 4.2 Εξαγωγέας πιέσεων

Ο εξαγωγέας πίεσεων αποτελείται από τα παρακάτω εξαρτήματα

- Ατσάλινη πλάκα (Top Plate)
- Κύλινδρος (Cylinder)
- Είσοδος πίεσης (Pressure Inlet Fitting)
- Δακτύλιος σύσφιξης (Clamping ring)
- Δίσκος βάσης (Base Plate)
- Ρυθμιστής θερμοκρασίας (Heater Block)
- Παξιμάδι (Wing Nut)
- Ροδέλα (Slide Washer)
- Σφικτήρες (Clamping Bolt)
- Ροδέλα σφραγίσματος (Ring Seal)
- Υποδοχή κεραμικού δίσκου (Gasket Ceramic Plate Steel)
- Πορώδης κεραμικός δίσκος (Porous Ceramic Plate)
- Αύλακες βάσης (Grooves in base plate)
- Σωλήνες εξόδου νερού (Outlet Tubes)

Ο κεραμικός πορώδης δίσκος έχει προσεκτικά και κατάλληλα προσαρμοστεί σε μια βάση κι έτσι υπάρχει ελάχιστος χώρος για παγιδευμένο αέρα. Πέντε συμμετρικά μηχανικά αυλάκια της βάσης μεταφέρουν την προς εκροή υγρασία από τον εξαγωγέα στους 2 σωλήνες εξόδου, που βρίσκονται σε αντίθετες θέσεις στη βάση.

Στον κύλινδρο του εξαγωγέα βρίσκεται προσαρμοσμένη η είσοδος πίεσης, η οποία εφοδιάζει τον εξαγωγέα κανονικά με πίεση. Ο κύλινδρος σφραγίζεται στη βάση και στην κορυφή όταν η ροδέλα σφραγίσματος προσαρμοστεί στις αυλακώσεις στη βάση του κυλίνδρου. (Soil moisture equipment corp., , January 1999)

4.1.2 Εξαρτήματα Υστέρησης

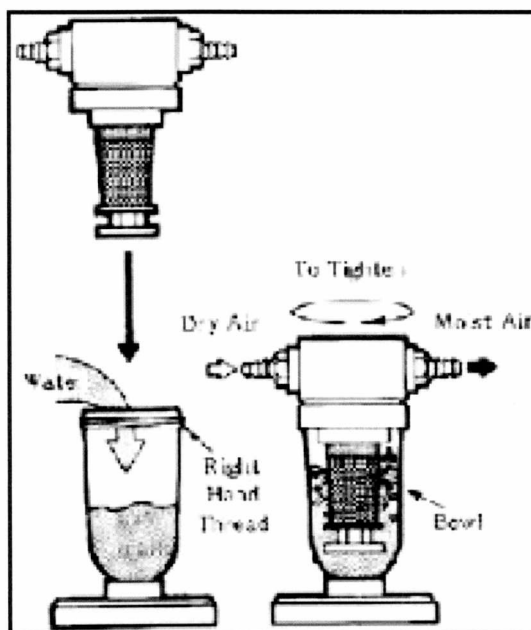
Τα εξαρτήματα Υστέρησης έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να λειτουργούν με τον Εξαγωγέα Πίεσεων. Σκοπός των εξαρτημάτων Υστέρησης είναι να κρατούν ακριβώς όλη την επιστρεφόμενη υγρασία από ένα δείγμα κατά τη διάρκεια της πορείας της εξαγωγής και να επιτρέπουν τη ροή προς τα πίσω της υγρασίας από το αποθηκευτικό πεδίο στο δείγμα, καθώς η πίεση της εξαγωγής μειώνεται. Τα προσαρτήματα ως εκ τούτου προμηθεύουν, κατά μια έννοια, την με ακρίβεια προσδιορισμένη μετακινούμενη υγρασία από ένα δείγμα, με προοδευτικά αυξανόμενη πίεση, για σύγκριση με την απορροφούμενη από το δείγμα υγρασία, καθώς η πίεση διαδοχικά μειώνεται. Αυτή η μέθοδος αντιστοιχεί στον ξηρό και

υγρό κύκλο που συμβαίνει στο έδαφος στον αγρό. Από τις πληροφορίες που αποκτούμε μπορούμε να σχεδιάσουμε τα αποτελέσματα της υστέρησης σε παντός είδους εδάφη.

4.1.2.1 Κορεστής ατμών (Vapor Saturator)

Ο αέρας εισάγεται δια μέσου του κορεστή ατμών (διαβροχέα). Πριν από τη χρήση το μπολ του διαβροχέα είναι ξεβιδωμένο από το καπάκι και γεμάτο κατά ένα μέρος με νερό (σχήμα 4.3).

Ο σκοπός του διαβροχέα είναι να υγραίνει τον εισερχόμενο αέρα, έτσι ώστε να μην υπάρχει ξηρό αποτέλεσμα στο δείγμα εδάφους που γίνεται το τεστ κι έτσι να αποφευχθούν τα λάθη στο μέτρημα του υδάτινου όγκου.



Σχήμα 4.3 Κορεστής ατμών

4.1.2.2 Ρυθμιστής θερμοκρασίας (Heater Block)

Δυο οπές στο κάλυμμα του εξαγωγέα χρησιμεύουν για να δεχθούν το ρυθμιστή θερμοκρασίας.

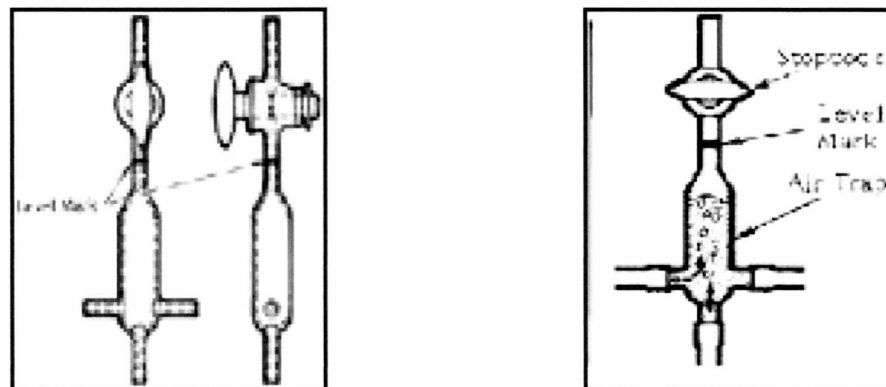
Σε μια έρευνα σε προβλήματα υστέρησης εδάφους, λάθη μπορεί να

προκύψουν από τη συμπυκνωμένη υγρασία στα εσωτερικά τοιχώματα του εξαγωγέα, η οποία οφείλεται στις διαφορετικές θερμοκρασίες ανάμεσα στο δείγμα εδάφους, στον εξαγωγέα και στα τοιχώματα του εξαγωγέα.

Αυτό μπορεί να αποφευχθεί κάνοντας το πείραμα σε εργαστήριο με ρυθμιζόμενη θερμοκρασία. Αν αυτό δεν είναι δυνατόν, μπορούμε να ανεβάσουμε το Heater Block, το οποίο λειτουργεί στα 12 Volts και εκβάλλει 3 Watt θερμότητας. Αυτή η μικρή πηγή θερμότητας διατηρεί τα τοιχώματα του εξαγωγέα σε ελαφρώς υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή του δείγματος και εξαλείφει τη συμπύκνωση υδρατμών στα εσωτερικά τοιχώματα. (Soil moisture equipment corp., 04/2005)

4.1.2.3 Παγίδα αέρα (Air Trap)

Η παγίδα αέρα (σχήμα 4.4) είναι ένα γυάλινο δοχείο για τη συλλογή του αέρα που ίσως περάσει δια μέσου του πορώδη κεραμικού δίσκου του εξαγωγέα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.



Σχήμα 4.4

Παγίδα αέρα

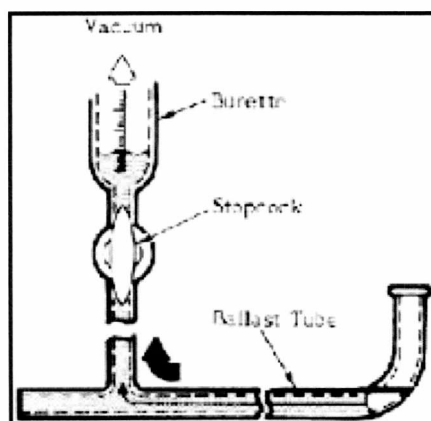
4.1.2.4 Σωλήνας συλλογής νερού (Ballast Tube)

Ο σωλήνας συλλογής νερού (σχήμα 4.5) είναι ένα γυάλινο οριζόντιο αποθηκευτικό πεδίο για το νερό που κινείται μέσα ή έξω από το εδαφικό δείγμα κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Επειδή ο σωλήνας συλλογής νερού είναι σε οριζόντια θέση, στην έξοδο της υγρασίας ή στην επαναφορά αυτής, δεν αλλάζει την υδραυλική πίεση που αναφορικά υφίσταται εντός του εδαφικού δείγματος κατά τη διάρκεια της εξαγωγής. Ο σωλήνας συλλογής νερού τοποθετείται ή στην κεντρική γραμμή του εδαφικού δείγματος ή στη γραμμή της βάσης του εδαφικού δείγματος. Η θέση αυτή εξαρτάται από τις απαιτήσεις της διαδρομής του πειράματος. Ένα level mark στο τέλος σχεδόν του σωλήνα συλλογής νερού προβάλλει ένα παραπεμπτικό σημείο για τη σωστή καταμέτρηση του όγκου του νερού. (Soil moisture equipment corp., 04/2005)

4.1.2.5 Διαβαθμισμένος σωλήνας (Burette)

Ο διαβαθμισμένος σωλήνας είναι ένα αποθηκευτικό δοχείο για νερό. Όταν οι καταμετρήσεις γίνονται και επέλθει ισορροπία, το ύψος του νερού μέσα στο διαβαθμισμένο σωλήνα δηλώνει ακριβώς το ποσό της μετακινούμενης υγρασίας από και προς το εδαφικό δείγμα

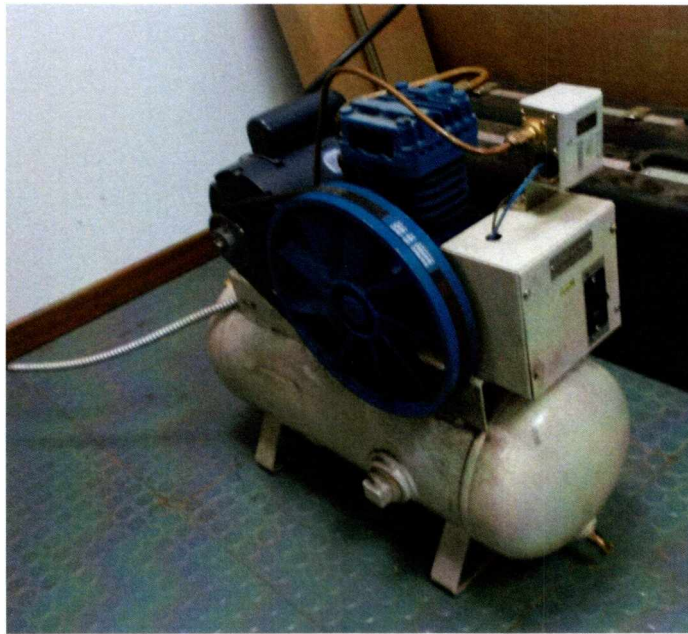


Σχήμα 4.5

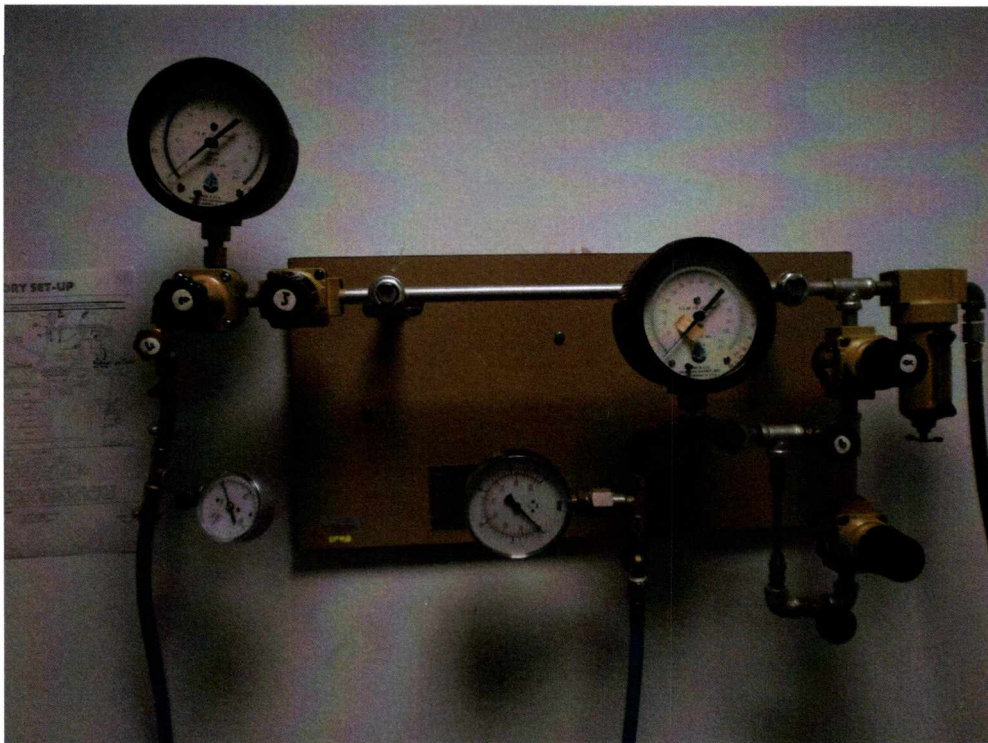
Διαβαθμισμένος σωλήνας

4.1.3 Πηγή πεπιεσμένου αέρα (Air pressure source)

Το όλο σύστημα που περιγράφηκε παραπάνω για να λειτουργήσει συνδέεται με ένα συμπιεστή αέρα (**Compressor Model 500 series**), ο οποίος διοχετεύει το σύστημα με πεπιεσμένο αέρα και ένα ρυθμιστή πιέσεων (**Manifold model 700-3**) με τη βοήθεια του οποίου επιτυγχάνεται ακρίβεια στην αυξομείωση των πιέσεων.



Εικόνα 4.1 Συμπιεστής αέρα



Εικόνα 4.2 Ρυθμιστής πιέσεων

4.2 Προετοιμασία του εδαφικού δείγματος

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, τα δείγματα του εδάφους τοποθετούνται επίπεδα, έτσι ώστε να έχουν καλή επαφή με τον κεραμικό δίσκο αφού έχουν προετοιμαστεί όπως περιγράφεται παρακάτω:

- I. Το έδαφος περνάει από κόσκινο με σκοπό να απομακρυνθούν χαλίκια και να μετατρέψουμε όλο το μείγμα σε κόκκους.
- II. Στη συνέχεια το έδαφος τοποθετείται στο φούρνο, στους 105 °C για 24 ώρες, έτσι ώστε να απομακρυνθεί όλη η περιεχόμενη υγρασία του.
- III. Τα εδαφικά δείγματα τοποθετούνται σε δακτύλιο συγκρατήσεως εδαφικού δείγματος (διαμέτρου 5,5cm και ύψους 1cm), έτσι ώστε να μπορούν να στηριχτούν πάνω στον κεραμικό δίσκο του εξαγωγέα, και ζυγίζονται.
- IV. Στη συνέχεια αφήνονται σε απιονισμένο νερό για τουλάχιστον 16 ώρες, έως ότου να κορεστούν πλήρως και ξαναζυγίζονται.
- V. Το εδαφικό δείγμα τοποθετείται στον ήδη κορεσμένο κεραμικό δίσκο του εξαγωγέα

4.3 Μελέτη της Υστέρησης

4.3.1 Προετοιμασία της συσκευής

Όταν το εδαφικό δείγμα τοποθετηθεί στον εξαγωγέα λαμβάνουν χώρα οι συνδέσεις στα διάφορα μέρη των εξαρτημάτων της υστέρησης.

Στη συνέχεια ο κύλινδρος και το πάνω τμήμα του εξαγωγέα βιδώνονται και προσθέτουμε νερό στα εξαρτήματα της υστέρησης για να γεμίσουν οι σωλήνες. Η στάθμη του νερού στην παγίδα του αέρα (Air Trap) πρέπει να είναι πάνω από το παραπεμπτικό σημείο (level mark). Το συμπλήρωμα του νερού γίνεται ευκολότερα αν προσθέσουμε νερό στο διαβαθμισμένο σωλήνα. Ανοίγοντας τη βάνα στην κορυφή της παγίδας αέρα και τη βάνα στη βάση του διαβαθμισμένου σωλήνα, το νερό ρέει μέσα στην παγίδα αέρα και στον σωλήνα σύνδεσης.

Πρέπει να φροντίσουμε να προσαρμοστεί ο σωλήνας συλλογής νερού κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μη ρέει νερό από την άκρη του κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του αρχικού γεμίσματος. Όταν το νερό φτάσει στο παραπεμπτικό

σημείο (level mark) της παγίδας αέρα , οι βάνες στη βάση του διαβαθμισμένου σωλήνα και στην κορυφή της παγίδας αέρα κλείνουν.

Πιέζοντας το σωλήνα συλλογής το νερό κυκλοφορεί κάτω από τον κεραμικό δίσκο μέσα στον εξαγωγέα. Διατρέχοντας τον κύλινδρο πάνω από το σωλήνα περισυλλογής, αντλούμε νερό από την παγίδα αέρα δια μέσου των αυλάκων στη βάση του εξαγωγέα. Έτσι αναγκάζονται να βγουν έξω οι φυσαλίδες αέρα και συσσωρεύονται στην παγίδα αέρα.

Ρυθμίζουμε το νερό στο παραπεμπτικό σημείο της παγίδας αέρα και στο παραπεμπτικό σημείο του διαβαθμισμένου σωλήνα. Κανονίζουμε το ύψος του σωλήνα συλλογής νερού έτσι ώστε να βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με την κορυφή της επιφάνειας του πορώδους κεραμικού δίσκου του εξαγωγέα.

Για να το κάνουμε αυτό, μπορεί να αναγκαστούμε να ανυψώσουμε τον εξαγωγέα τοποθετώντας τον πάνω σε ξύλινη εξέδρα ή σε άλλο υποστήριγμα. Οι εργασίες αυτές εκτελούνται με τον εξαγωγέα κλειστό.

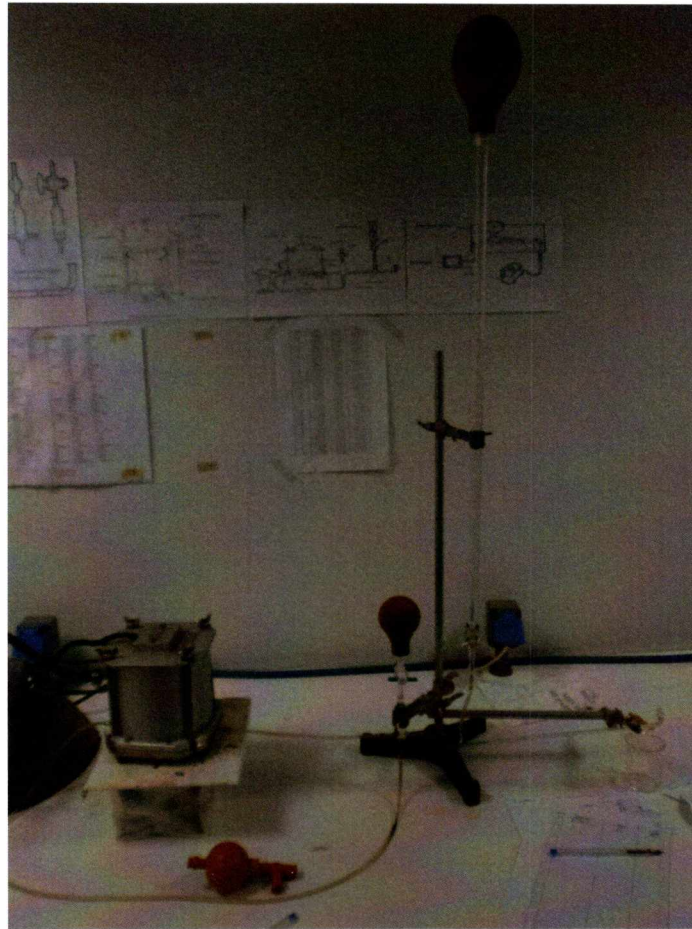
Το νερό που απομένει στον σωλήνα συλλογής πρέπει να μεταφερθεί πριν εφαρμόσουμε πίεση στον εξαγωγέα. Αυτό το επιτυγχάνουμε εφαρμόζοντας χαμηλό κενό στην κορυφή του διαβαθμισμένου σωλήνα.

Καθώς το κενό εφαρμόζεται στην κορυφή του διαβαθμισμένου σωλήνα, ανοίγουμε προσεκτικά τη βάνα στη βάση του, έως ότου ανέβει αρκετό νερό και στη συνέχεια η βάνα κλείνει και το κενό μετακινείται.

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη της συσκευής της Υστέρησης στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.



Εικόνα 4.3 Εξαγωγέας πιέσεων



Εικόνα 4.4 Συσσκευή υστέρησης συνδεδεμένη με διάφορα εξαρτήματα.

4.3.2 Εφαρμογή πίεσης στον εξαγωγέα

Αφού όλοι οι σωλήνες σύνδεσης της συσκευής γεμίσουν με νερό, εφαρμόζουμε χαμηλή πίεση στον εξαγωγέα με τη βοήθεια του συμπιεστή αέρα. Μόλις η πίεση εφαρμοστεί στον εξαγωγέα, η υγρασία αρχίζει να μετακινείται έξω από το δείγμα μέχρις ότου η πρώτη τιμή ισορροπίας επιτευχθεί. Καθώς η υγρασία μετακινείται, συσσωρεύεται στον σωλήνα συλλογής. Όταν ο σωλήνας συλλογής γεμίσει με νερό, οδηγούμε αυτό το νερό μέσα στο διαβαθμισμένο σωλήνα, ώστε να συνεχιστεί η προς τα έξω, από τον εξαγωγέα, ροή του νερού χωρίς απώλειες.

4.3.3 Απαραίτητες ρυθμίσεις πριν από κάθε μέτρηση

Πρώτα απομακρύνεται όλος ο συσσωρευμένος αέρας που βρίσκεται κάτω από τον κεραμικό δίσκο, ώστε να μην έχουμε λάθη στη μέτρηση του όγκου του νερού. Επίσης, η συσσώρευση του αέρα κάτω από τον κεραμικό δίσκο μπορεί να εμποδίζει την επαναπρόσληψη νερού από το δείγμα, σε πειράματα όπου η πίεση του αέρα μειώνεται μετά την επίτευξη της ισορροπίας.

Διατρέχοντας τον κύλινδρο πάνω από το σωλήνα περισυλλογής, απομακρύνεται ο συσσωρευμένος αέρας ο οποίος και συγκεντρώνεται στην παγίδα αέρα. Μετά ρυθμίζεται το νερό της παγίδας αέρα στο παραπεμπτικό σημείο. Αν το νερό στην παγίδα αέρα είναι κάτω από το παραπεμπτικό σημείο εφαρμόζεται κενό και προσεκτικά ανοίγουμε τη βάννα μέχρις ότου το νερό ανέβει στο κατάλληλο ύψος. Μετά κλείνει η βάννα και μετακινείται το κενό.

Το επίπεδο του νερού στο σωλήνα συλλογής πρέπει να είναι ρυθμισμένο στο παραπεμπτικό σημείο. Αν το επίπεδο του νερού είναι κάτω απ' αυτό, η βάννα του διαβαθμισμένου σωλήνα ανοίγει προσεκτικά για να επιτρέψει το νερό να φτάσει στο απαιτούμενο σημείο και στη συνέχεια κλείνουμε τη βάννα. Αν το επίπεδο του νερού είναι πάνω από το παραπεμπτικό σημείο, εφαρμόζουμε ένα μικρό κενό στην κορυφή του διαβαθμισμένου σωλήνα και έπειτα ανοίγουμε τη βάννα. Έτσι νερό απομακρύνεται από τον σωλήνα συλλογής και ρέει προς το διαβαθμισμένο σωλήνα. Όταν η στάθμη φτάσει στο κατάλληλο σημείο, η βάννα κλείνει και το κενό μετακινείται.

4.3.4 Λήψη μετρήσεων

4.3.4.1 Διαδικασία στράγγισης

Μετά την εισαγωγή της αρχικής τιμής όγκου στο διαβαθμισμένο σωλήνα, αυξάνουμε την πίεση στον εξαγωγέα. Καθώς η πίεση μέσα στον εξαγωγέα μεγαλώνει, νερό αρχίζει να ρέει από το δείγμα και συγκεντρώνεται στον σωλήνα συλλογής. Αρχικά η ροή είναι μέγιστη και έπειτα μικραίνει σταδιακά καθώς η ισορροπία πλησιάζει. Στην κατάσταση ισορροπίας δεν θα υπάρχει ροή νερού από τον εξαγωγέα.

Για ένα εδαφικό δείγμα ύψους 1cm, η ισορροπία σε όλους τους τύπους εδάφους θα επέλθει μέσα σε 48 ώρες. Μερικά εδάφη πλησιάζουν σε ισορροπία σε 18 με 20 ώρες. Γενικά, ο χρόνος που απαιτείται για να επέλθει ισορροπία είναι συνάρτηση του ύψους του εδαφικού δείγματος και των χαρακτηριστικών του εδάφους και είναι ανάλογος προς το τετράγωνο του ύψους του δείγματος.

Αφού διαβαστεί ο όγκος ισορροπίας στο διαβαθμισμένο σωλήνα, ανοίγει η βάννα και αντλείται νερό από το σωλήνα συλλογής μέσα στο διαβαθμισμένο σωλήνα ώστε να υπάρχει χώρος για τη συγκέντρωση του επιπλέον νερού.

Ξανά, μετά την ισορροπία στη νέα τιμή πίεσης καθώς φαίνεται από τη διακοπή της ροής του επιπλέον νερού μέσα στο σωλήνα συλλογής, το νερό διαμέσου του συστήματος εξωτερικής ροής διευθετείται πάνω στο κατάλληλο σημείο της παγίδας αέρα και του σωλήνα συλλογής όπως αναφέρθηκε νωρίτερα.

Μια νέα μέτρηση όγκου γίνεται στο διαβαθμισμένο σωλήνα και καταγράφεται. Η αλλαγή του όγκου, όπως φαίνεται από τις δύο διαδοχικές μετρήσεις, δηλώνει ακριβώς ίο ποσό της υγρασίας που μετακινήθηκε από το εδαφικό δείγμα μεταξύ των δύο τιμών ισορροπίας για δυο διαφορετικές τιμές πίεσης που εφαρμόστηκαν στο εδαφικό δείγμα μέσα στον εξαγωγέα.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται σε αυξανόμενες τιμές πίεσης μέχρις ότου η επιθυμητή περιοχή πιέσεων να καλυφθεί.

4.3.4.2 Διαδικασία διήθησης

Η αντίστροφη διαδικασία μπορεί τώρα να εκτελεστεί. Σ' αυτήν την περίπτωση, η πίεση μέσα στον εξαγωγέα μειώνεται. Όταν η πίεση του εξαγωγέα μειώνεται, νερό αρχίζει να ρέει από το σωλήνα συλλογής προς το δείγμα. Όταν η μετακίνηση νερού σταματήσει, μια νέα ισορροπία στην χαμηλότερη πίεση έχει επέλθει.

Κατά τη διάρκεια της επιστροφής της υγρασίας μέσα στο δείγμα, μπορεί να χρειαστεί περισσότερο νερό απ' αυτό που είναι αποθηκευμένο στο σωλήνα συλλογής. Για να προστεθεί νερό στο σωλήνα συλλογής, απλά ανοίγει η βάννα του διαβαθμισμένου σωλήνα.

Όταν επέλθει ισορροπία, πάλι ρυθμίζεται το νερό στο παραπεμπτικό σημείο της παγίδας αέρα και του σωλήνα συλλογής νερού, όπως περιγράφηκε νωρίτερα. Αφού το επίπεδο του νερού ρυθμιστεί στα δύο αυτά σημεία, ο όγκος στο διαβαθμισμένο σωλήνα διαβάζεται και καταγράφεται. Η μείωση του όγκου του νερού μέσα στο διαβαθμισμένο σωλήνα είναι μια ακριβής μέτρηση του νερού που έχει επιστρέψει πίσω στο δείγμα σαν αποτέλεσμα της μείωσης της πίεσης μέσα στον εξαγωγέα.

Στο κλείσιμο της διαδρομής μετά την τελευταία τιμή ισορροπίας που επιτεύχθηκε η πίεση στον εξαγωγέα ελευθερώνεται και ανοίγει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

5.1 Περιγραφή εδαφικών δειγμάτων

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δυο δείγματα εδαφών, με σκοπό τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών τους καμπυλών και του βρόχου της υστέρησης. Τα δείγματα αυτά ελήφθησαν από την περιοχή του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Συγκεκριμένη, το δείγμα K19 1 ελήφθη από βάθος μεταξύ 0cm και 30cm ενώ το δείγμα K19 2 ελήφθη από το ίδιο σημείο σε βάθος 30cm έως 60cm.

5.2 Μηχανική ανάλυση εδαφών

Σύμφωνα με τη μηχανική ανάλυση των δύο δειγμάτων εδάφους προέκυψε ότι το έδαφος ήταν αμμώδης πηλός.

- I. Εδαφικό δείγμα **K19 1 (0-30)**
Αμμώδης πηλός: 73% Άμμος, 13% Ιλύς, 14% Άργιλος

- II. Εδαφικό δείγμα **K19 2 (30-60)**
Αμμώδης πηλός: 74% Άμμος, 13% Ιλύς, 13% Άργιλος

5.3 Υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού

Η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού ενός εδάφους μπορεί να προσδιοριστεί στο εργαστήριο με δύο μεθόδους :

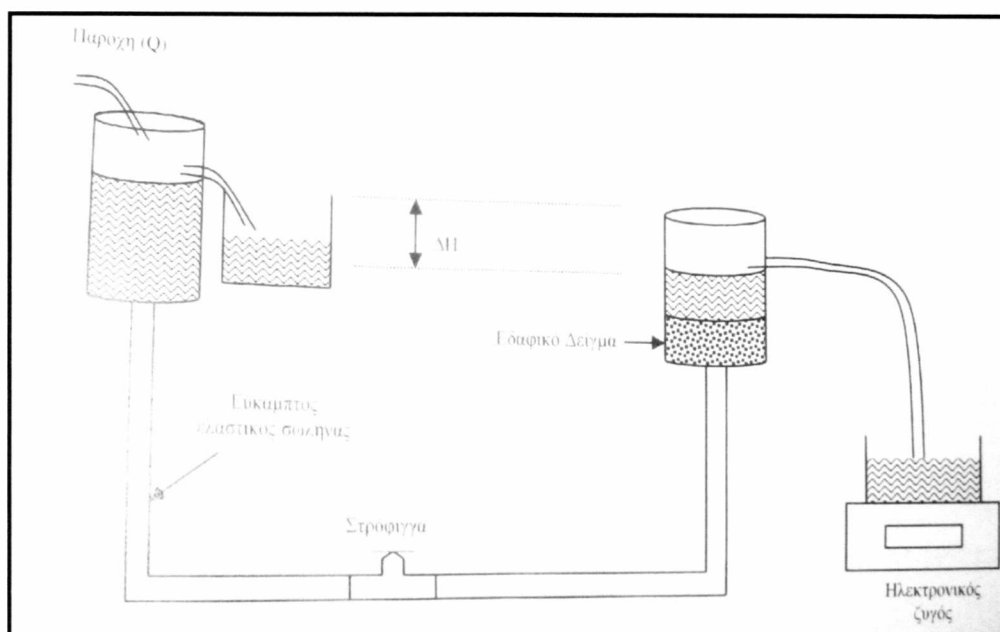
1) Μέθοδος σταθερού φορτίου

και

2) Μέθοδος μεταβλητού φορτίου .

Η υδραυλική αγωγιμότητα κορεσμού (K_s) των παραπάνω εδαφών προσδιορίστηκε στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Τμήματος Γεωπονίας του Π.Θ., με την μέθοδο του σταθερού φορτίου.

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, το φορτίο είναι σταθερό και ίσο με ΔH .



Σχήμα 5.1 Διάταξη μέτρησης υδραυλικής αγωγιμότητας σε κορεσμένο εδαφικό δείγμα με τη μέθοδο του σταθερού φορτίου.

Μετράμε τον όγκο του νερού που έχει συλλεχθεί στο ογκομετρικό δοχείο σε χρόνο t . Αν $A = \pi d^2/4$ είναι η διατομή του κυλινδρικού δείγματος και L το ύψος του τότε με βάση το τύπο του Darcy, θα είναι:

$$Q = \frac{V}{t} = K_s \cdot A \frac{\Delta H}{L} \Rightarrow K_s = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot \Delta H} \quad (5.1)$$

Για το πρώτο εδαφικό δείγμα βρέθηκε : $K_s=0.97 \text{ cm/min}$

Ενώ για το δεύτερο εδαφικό δείγμα βρέθηκε : $K_s = 0.99 \text{ cm/min}$

5.4 Επεξεργασία μετρήσεων

Για να γίνουν οι καμπύλες στράγγισης και διήθησης του εδαφικού δείγματος καθώς και να απεικονιστεί ο βρόχος υστέρησης ήταν αναγκαίο να γίνουν κάποιιοι υπολογισμοί.

Έτσι υπολογίστηκε η υγρασία επί τις % **κατά βάρος** και επί τις % **κατ' όγκο** που κάθε φορά περιείχε το εδαφικό δείγμα.

Η υγρασία % κατά βάρος υπολογίστηκε από τον εξής τύπο:

$$\Theta_s = \left[\frac{(\text{βαρος .υγρου .εδαφους} - \text{βαρος .ξηρου .εδαφους})}{\text{βαρος .ξηρου .εδαφους}} \right] \cdot 100 \%$$

Και η υγρασία % κατ' όγκο υπολογίστηκε ως εξής:

$\Theta_s = \text{υγρασία \% κατά βάρος} \cdot \text{φαινόμενο ειδικό βάρος.}$

5.5 Πειραματικός προσδιορισμός των χαρακτηριστικών καμπυλών στράγγισης – διήθησης.

Στα δύο εδαφικά δείγματα έγινε ο εργαστηριακός προσδιορισμός του οριακού βρόχου της υστέρησης, αφού προηγουμένως υπολογίστηκε η υγρασία κορεσμού τους. Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν οι καμπύλες στράγγισης και διήθησης των δύο δειγμάτων.

Για το δείγμα K19 1 μετρήθηκε: μάζα ξηρού εδάφους $m_{\xi\eta\rho}(g)=22,78$
μάζα κορεσμένου εδάφους $m_{\kappa\omicron\rho}(g)=33,55$
 $\Theta_s (\kappa.ο) = 0,47278 (47,3 \%)$

Για το δείγμα K19 2 μετρήθηκε: μάζα ξηρού εδάφους $m_{\xi\eta\rho}(g)=22,78$
 μάζα κορεσμένου εδάφους $m_{\kappa\omicron\rho}(g)=33,11$
 θ ς (κ.ο)= 0,45347 (45,3%)

K19 1 (0-30 cm) 1 ^η ΣΤΡΑΓΓΙΣΗ								
α/α	Ψ(bar)	Όγκος νερού Burette V (ml)	Νερό που στραγγίζει Vj (ml)	Vi-	Νερό που περιέχει το έδαφος Vκορ-Vξηρ (ml)	Vi-Vj (ml)	θ %	Ψ(bar)
1	0	28		0	10,77	0	47,3	0
2	0,04	25		3	7,77	3	47,3	0,04
3	0,06	23,6		1,4	6,37	1,4	45,9	0,06
4	0,08	22,7		0,9	5,47	0,9	45	0,08
5	0,1	22,5		0,2	5,27	0,2	44,8	0,1
6	0,12	22		0,5	4,77	0,5	44,3	0,12
7	0,14	21,9		0,1	4,67	0,1	44,2	0,14
8	0,16	21,9		0	4,67	0	44,2	0,16
9	0,22	21,7		0,2	4,47	0,2	44	0,22
10	0,3	21,4		0,3	4,17	0,3	43,7	0,3
11	0,4	21,4		0	4,17	0	43,7	0,4
12	0,4	21,4		0	4,17	0	43,7	0,4
13	0,51	21,3		0,1	4,07	0,1	43,6	0,51
14	0,51	21,3		0	4,07	0	43,6	0,51
15	0,51	21,2		0,1	3,97	0,1	43,5	0,51
16	0,6	21,1		0,1	3,87	0,1	43,4	0,6
17	0,7	21		0,1	3,77	0,1	43,3	0,7
18	0,8	21		0	3,77	0	43,3	0,8
19	1	21		0	3,77	0	43,3	1
20	1	21		0	3,77	0	43,3	1

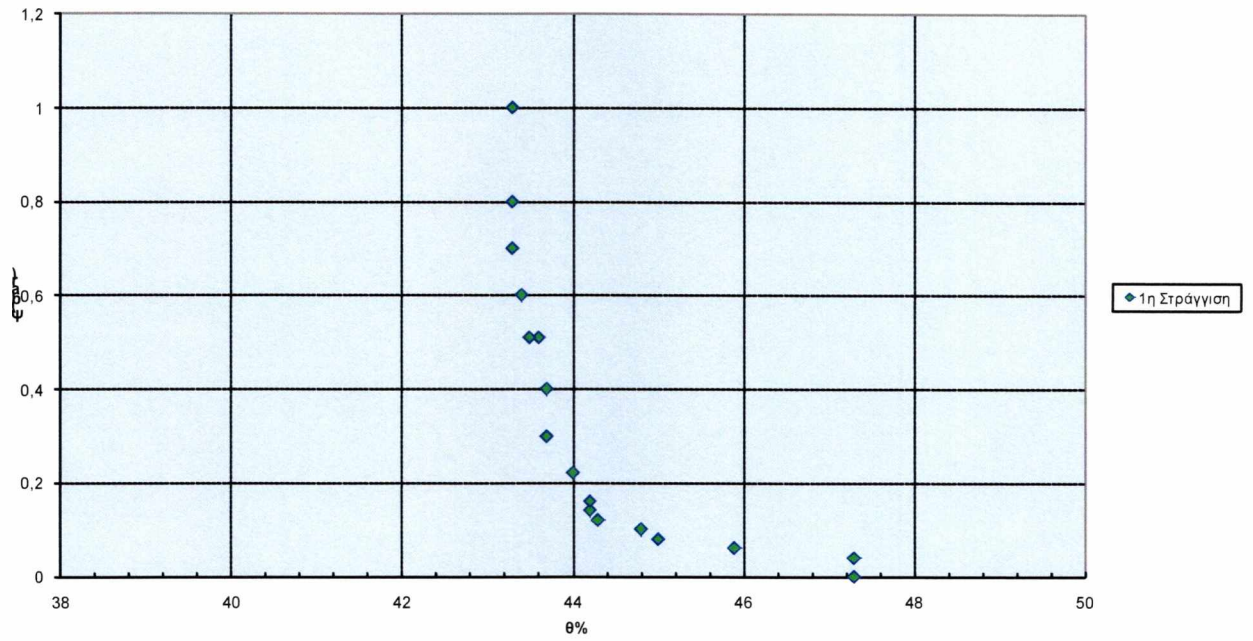
1η Στράγγιση

Κ19 1 (0- 30cm) 2 ^η ΔΙΗΘΗΣΗ							
α/α	Ψ(bar)	Όγκος νερού Burette V (ml)	Νερό που διηθείται Vj-Vi (ml)	Νερό που περιέχει το έδαφος Vκορ-Vξηρ (ml)	Vj-Vi (ml)	θ %	Ψ(bar)
1	1	15,2	0	0	0	43,3	1
2	0,8	15,2	0	0	0	43,3	0,8
3	0,7	15,2	0	0	0	43,3	0,7
4	0,5	15,2	0	0	0	43,3	0,5
5	0,4	15,2	0	0	0	43,3	0,4
6	0,3	15,2	0	0	0	43,3	0,3
7	0,22	15,3	0,1	0,1	0,1	43,4	0,22
8	0,14	15,5	0,2	0,3	0,2	43,6	0,14
9	0,12	15,8	0,3	0,6	0,3	43,9	0,12
10	0,08	15,9	0,1	0,7	0,1	44	0,08
11	0,07	16	0,1	0,8	0,1	44,1	0,07
12	0,06	16	0	0,8	0	44,1	0,06
13	0,05	16,2	0,2	1	0,2	44,3	0,05
14	0,04	16,5	0,3	1,3	0,3	44,6	0,04
15	0,035	16,8	0,3	1,6	0,3	44,9	0,035
17	0,025	17,9	0,9	2,7	0,9	46	0,025
18	0,02	18,8	0,9	3,6	0,9	46,9	0,02
19	0,01	18,8	0	3,6	0	46,9	0,01
20	0	18,8	0	3,6	0	46,9	0

2η Διήθηση

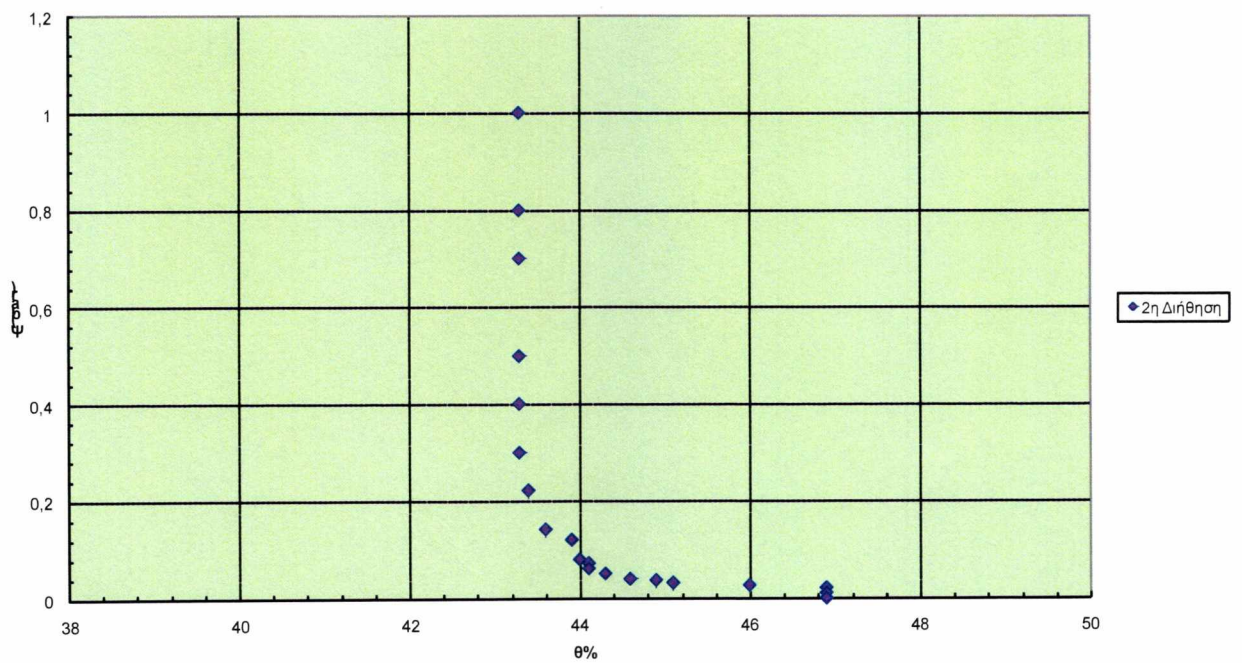
Δείγμα K19 1

Χαρακτηριστική καμπύλη 1ης στράγγισης



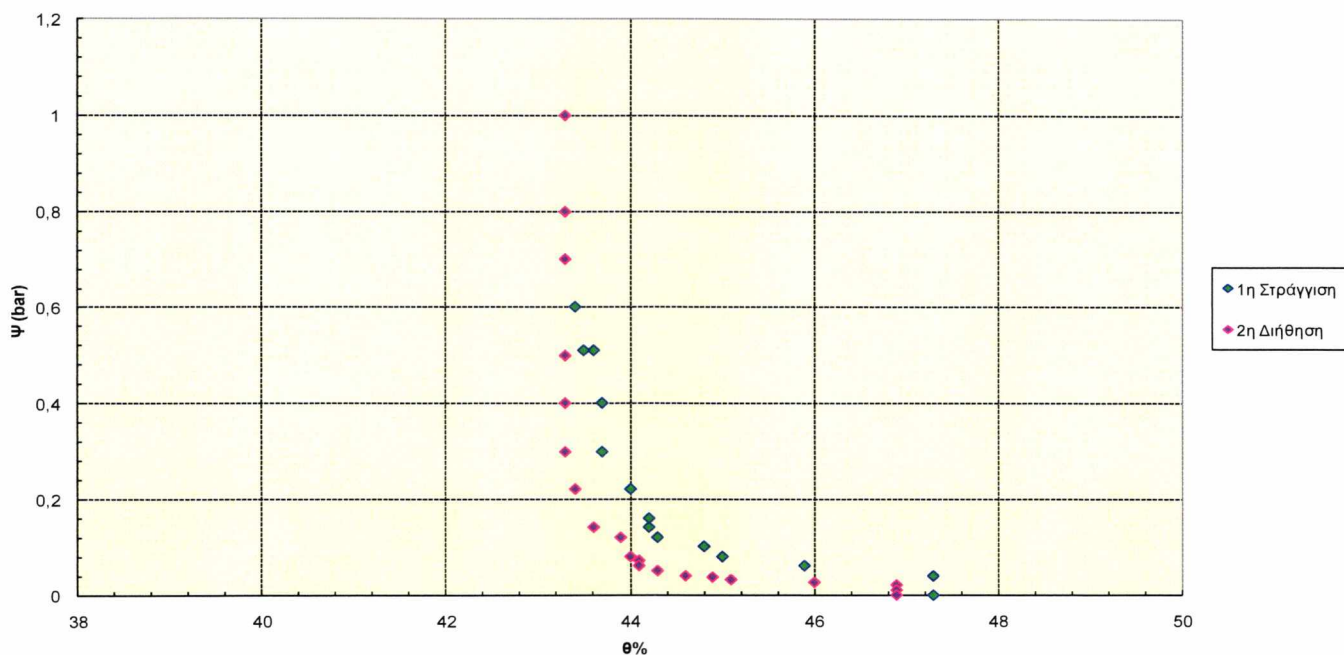
Δείγμα K19 1

Χαρακτηριστική καμπύλη 2ης Διήθησης



Δείγμα K19 1

K19 (0-30 cm) 1η Στράγγιση-2η Διήθηση



Από τις πειραματικές μετρήσεις εξήχθησαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του πρώτου εδαφικού δείγματος, για την 1^η στράγγιση και 2^η διήθηση, όπου παρατηρείται η μη μονοσήμαντη σχέση της μύζησης (απόλυτη τιμή πίεσης) με την υγρασία $\Psi(\theta)$, η οποία οδηγεί στο φαινόμενο της υστέρησης (Αγγελάκη, 2004)

Το εύρος τιμών υγρασίας στο έδαφος αυτό, κυμαίνεται από περίπου 43,2 που είναι η υπολειπόμενη σε αυτό υγρασία, έως σχεδόν 47,3 που είναι η υγρασία κορεσμού. Επίσης παρατηρείται εγκλωβισμός αέρα στο έδαφος ο όγκος του οποίου είναι περίπου 0,4. (ο εγκλωβισμός αέρα υπολογίζεται αναιρώντας τις τιμές υγρασίας για πίεση $\Psi=0$).

Παρατηρείται βρόχος υστέρησης, το εύρος του οποίου εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τύπου εδάφους.

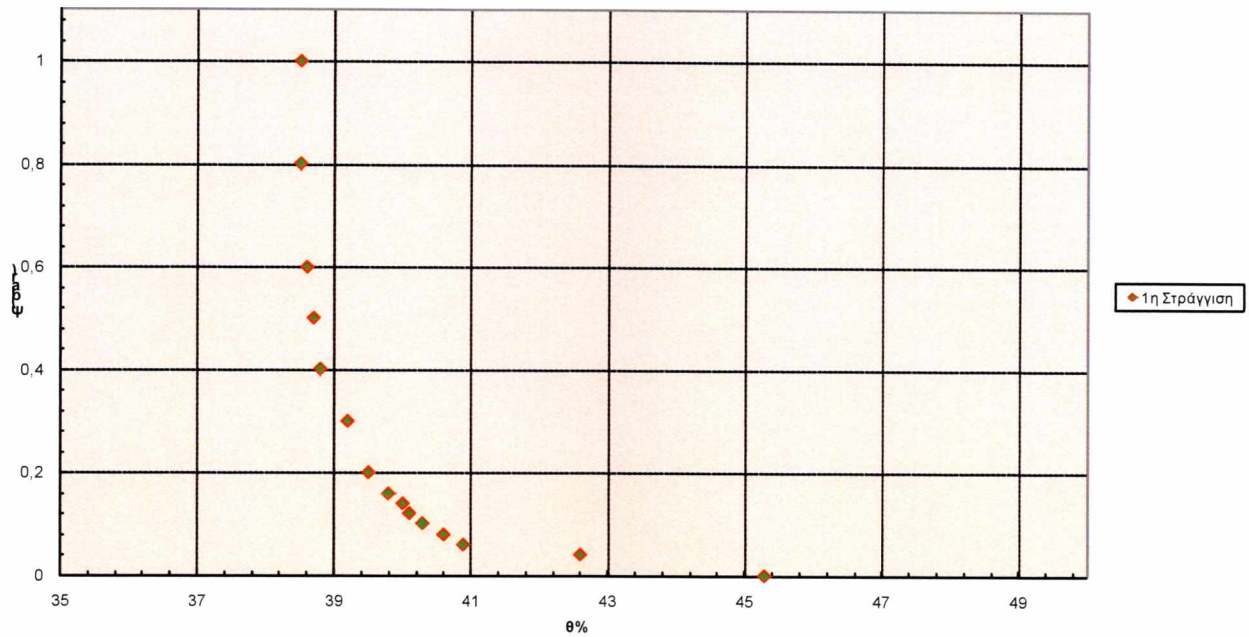
Κ19 2 (30-60cm) 1 ^η ΣΤΡΑΓΓΙΣΗ							
α/α	Ψ(bar)	Όγκος νερού Burette V (ml)	Νερό που στραγγίζει Vi-Vj (ml)	Νερό που περιέχει το έδαφος Vκορ-Vξηρ (ml)	Vi-Vj (ml)	θ %	Ψ(bar)
1	0	23,8	0	10,33	0	45,3	0
2	0,04	21,1	2,7	7,63	2,7	42,6	0,04
3	0,06	19,4	1,7	5,93	1,7	40,9	0,06
4	0,08	19,1	0,3	5,63	0,3	40,6	0,08
5	0,1	18,8	0,3	5,33	0,3	40,3	0,1
6	0,12	18,6	0,2	5,13	0,2	40,1	0,12
7	0,14	18,5	0,1	5,03	0,1	40	0,14
8	0,16	18,3	0,2	4,83	0,2	39,8	0,16
9	0,2	18	0,3	4,53	0,3	39,5	0,2
10	0,3	17,7	0,3	4,23	0,3	39,2	0,3
11	0,4	17,3	0,4	3,83	0,4	38,8	0,4
12	0,5	17,2	0,1	3,73	0,1	38,7	0,5
13	0,6	17,1	0,1	3,63	0,1	38,6	0,6
14	0,8	17	0,1	3,53	0,1	38,5	0,8
15	1	17	0	3,53	0	38,5	1

Κ19 2 (30-60 cm) 2^η ΔΙΗΘΗΣΗ

α/α	Ψ(bar)	Όγκος νερού Burette V (ml)	Νερό που διηθείται Vj-Vi (ml)	Νερό που περιέχει το έδαφος Vκορ-Vξηρ (ml)	Vj-Vi (ml)	θ %	Ψ(bar)
1	1	17	0	0	0	38,5	1
2	0,8	17,1	0,1	0,1	0,1	38,6	0,8
3	0,6	17,1	0	0,1	0	38,6	0,6
4	0,5	17,15	0,05	0,15	0,05	38,65	0,5
5	0,4	17,2	0,05	0,2	0,05	38,7	0,4
6	0,3	17,2	0	0,2	0	38,7	0,3
7	0,2	17,4	0,2	0,4	0,2	38,9	0,2
8	0,16	17,6	0,2	0,6	0,2	39,1	0,16
9	0,14	17,8	0,2	0,8	0,2	39,3	0,14
10	0,12	18	0,2	1	0,2	39,5	0,12
11	0,1	18,2	0,2	1,2	0,2	39,7	0,1
12	0,08	18,3	0,1	1,3	0,1	39,8	0,08
13	0,06	18,7	0,4	1,7	0,4	40,2	0,06
14	0,04	18,9	0,2	1,9	0,2	40,4	0,04
15	0,01	20,1	1,2	3,1	1,2	41,6	0,01

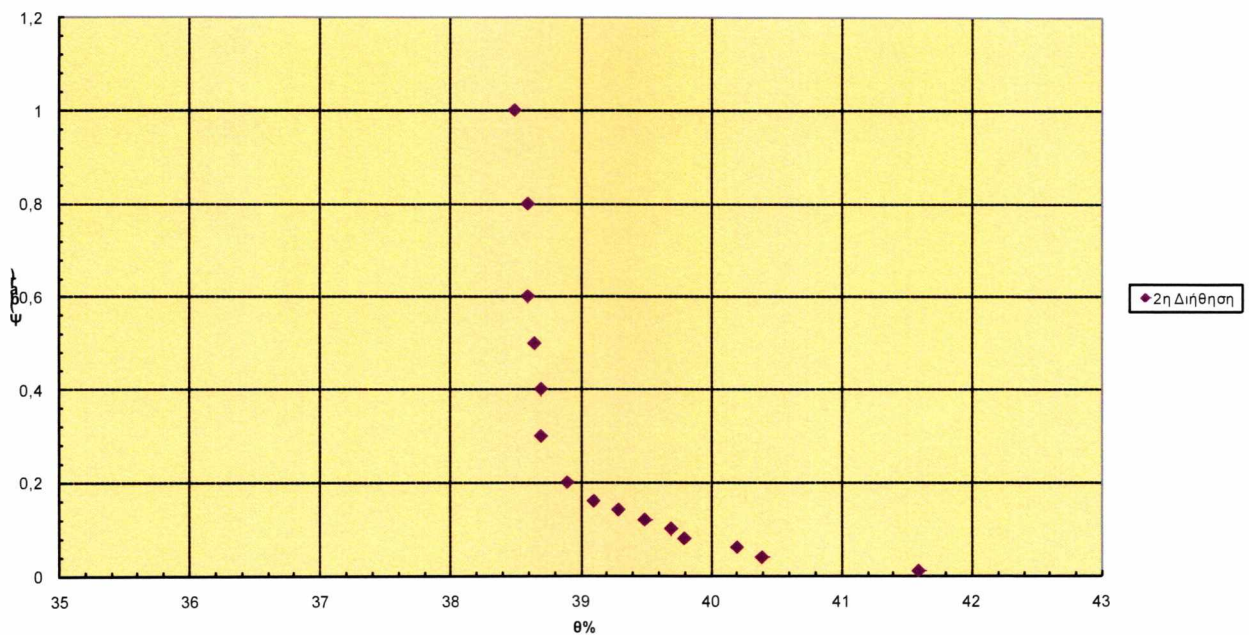
Δείγμα Κ19 2

Κ19 2 (30-60 cm) 1η Στράγγιση



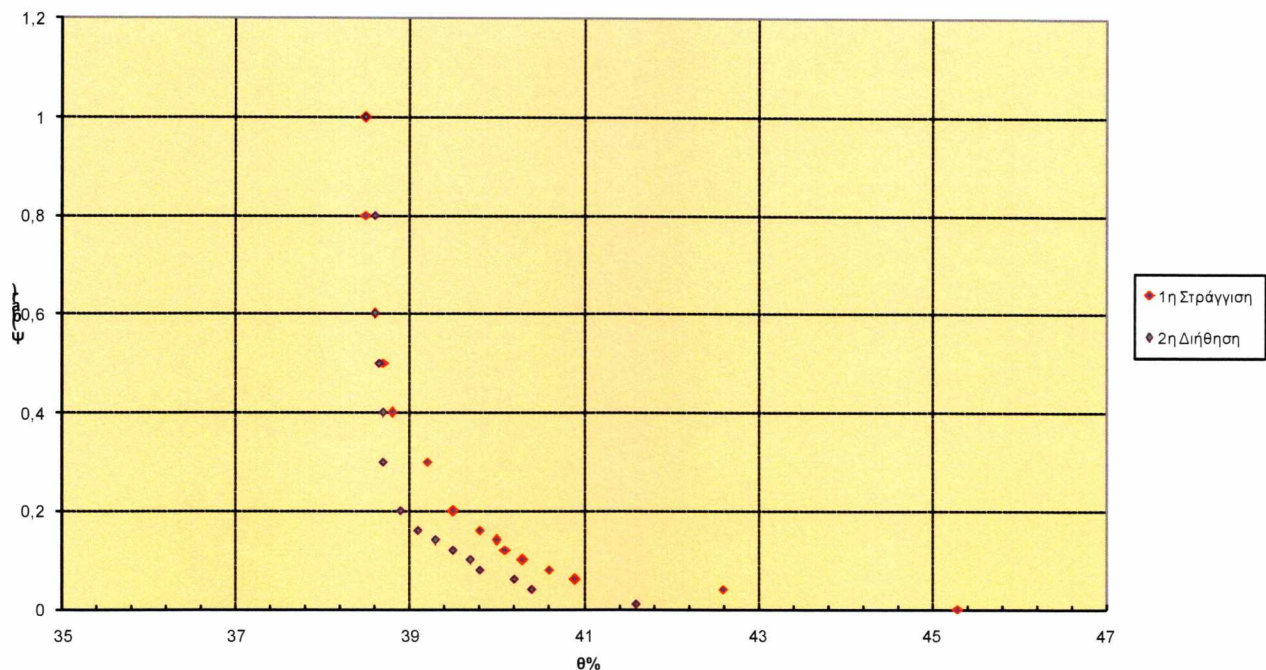
Δείγμα Κ19 2

Κ19 2 (30-60 cm) 2η Διήθηση



Δείγμα K19 2

K19 2 (30-60 cm) 1η Στράγγιση-2η Διήθηση



Από τις πειραματικές μετρήσεις εξήχθησαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες του δευτέρου εδαφικού δείγματος, για την 1^η στράγγιση και 2^η διήθηση, όπου όπως και στο 1^ο δείγμα παρατηρείται η μη μονοσήμαντη σχέση της μύζησης με την υγρασία $\Psi(\theta)$.

Το εύρος τιμών υγρασίας στο έδαφος αυτό, κυμαίνεται από 38,5 που είναι υπολειπόμενη σε αυτό υγρασία έως σχεδόν 45,3 που είναι περίπου η υγρασία κορεσμού. Επίσης παρατηρείται εγκλωβισμός αέρα στο έδαφος ο όγκος του οποίου είναι 3,7 περίπου.

Παρατηρείται και πάλι βρόχος υστέρησης το εύρος του οποίου εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του συγκεκριμένου τύπου εδάφους.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της εργασίας ήταν ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών καμπυλών εδάφους της περιοχής του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες του εδάφους αποτελούν το **αποτύπωμα** του εδάφους, καθώς δείχνουν τον τρόπο συμπεριφοράς του εδάφους υπό συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης.

Οι καμπύλες υγρασίας-πίεσης ή χαρακτηριστικές καμπύλες του εδάφους σχεδιάζονται για να εκτιμηθεί η ποσότητα νερού που μπορεί να συγκρατήσει ένα δείγμα εδάφους κάτω από διαφορετικές τάσεις και το οποίο είναι χρήσιμο για την ανάπτυξη των φυτών. Ακόμη αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό των υδροδυναμικών παραμέτρων του εδάφους. Κάθε τύπος εδάφους παρουσιάζει ξεχωριστή συμπεριφορά και έχει τη δική του χαρακτηριστική καμπύλη, η οποία εξαρτάται τόσο από τη διάμετρο των πόρων, όσο και την κατανομή αυτών μέσα στο έδαφος.

Εφαρμόζοντας διαφορετικές πιέσεις σε κορεσμένο έδαφος εξήχθη αρχικά η καμπύλη 1^{ης} στράγγισης, χρησιμοποιώντας τις τιμές πίεσης και υγρασίας. Στη συνέχεια με σταδιακή μείωση της πίεσης επετεύχθη η διύγρυνση του εδάφους. Από τα ζεύγη τιμών (Ψ, θ) σχεδιάστηκε η καμπύλη 2^{ης} διήθησης. Τοποθετώντας την καμπύλη της 1^{ης} στράγγισης και 2^{ης} διήθησης στο ίδιο διάγραμμα, παρατηρήθηκε και επιβεβαιώθηκε πειραματικά η μη μονοσήμαντη σχέση μεταξύ πίεσης και εδαφικής υγρασίας, δηλαδή του φαινομένου της υστέρησης και για τα δύο εδαφικά δείγματα.

Ο βρόχος της υστέρησης αποδεικνύει ότι κατά την στράγγιση ενός εδάφους η ποσότητα του νερού που αποβάλλεται είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα του νερού που προσλαμβάνει το έδαφος κατά την διήθηση και αυτό είναι περισσότερο εμφανές στα αμμώδη εδάφη, επειδή το μεγαλύτερο ποσοστό των πόρων τους έχει μεγάλη διάμετρο.

Η παραπάνω πειραματική διαδικασία παρ' ότι χρονοβόρα οδηγεί στην **αυτοποίηση** του εδάφους μέσω των πειραματικών χαρακτηριστικών καμπυλών. Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν αποτελούν βασικά και χρήσιμα εργαλεία για την διερεύνηση της κίνησης του νερού στο έδαφος και της μελέτης των υδροδυναμικών παραμέτρων του εδάφους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1)** Childs, E, 1969, An Introduction to the physical basis of soil water phenomena, New York.
- 2)** Dane, J.H. and Wieranga, 1975, Effects of hysteresis on the prediction of infiltration, redistribution and drainage of water in a layered soil.
- 3)** Dasberg, S. and Dalton, 1985, Field measurements of soil water content and bulk electrical conductivity with Time Domain Reflectometry
- 4)** Haines, 1930 , Studies in the physical properties of soils. The hysteresis effect in capillary properties and the modes of moisture distribution.
- 5)** Mualem, Y., 1973, Modified Approach to capillary Hysteresis based on a similarity hypothesis.
- 6)** Mualem Y., 1984 A modified dependent-domain theory of hysteresis.
- 7)** Philip, 1964, Similarity hypothesis for capillary hysteresis in porous materials.
- 8)** Poulouvasilis, 1962, Hysteresis of pore water: An application of the concept of independent domains.
- 9)** Soil moisture equipment corp., 04/2005, Volumetric Pressure Plate Extractor and Hysteresis Attachments.
- 10)** Soil moisture equipment corp., , January 1999, 1276 Vapor Saturator.
- 11)** Topp, G., 1969, Soil water hysteresis measured in a sandy loam and compared with the hysteretic domain model.
- 12)** Αγγελάκη 2004, Διερεύνηση των υδροδυναμικών παραμέτρων σε ακόρεστη ροή με πειραματικές μεθόδους και μαθηματικά μοντέλα.
- 13)** Γεώργιος Ν .Στεφανής, Αθήνα 2008, Προσδιορισμός καμπυλών μύζησης - εδαφικής υγρασίας σε εργαστηριακές συσκευές *Sandbox*.

14) ΕΥΑΓΓΕΛΙΔΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2001, ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΡΟΗΣ-ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΣΕ ΑΚΟΡΕΣΤΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ. ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΡΟΗΣ.

15) Μενέλαος Ε. Θεοχάρης, ΑΡΤΑ 2012, ΣΤΡΑΓΓΙΣΕΙΣ

16) Παναγιωτόπουλος Κ. Π, 1985, Εδαφοφυσική, Θεσσαλονίκη.

17) Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου, ΜΑΡΤΙΟΣ 2007, ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ.

18) Παπαζαφειρίου Γ. Ζ. , 1984, Αρχές και πρακτική των αρδεύσεων, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

19) Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Μ.,1983, Φαινόμενα υστέρησης σε ακόρεστα εδάφη, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής.

20) Σακελλαρίου- Μακραντωνάκη Μ., Οκτώβριος 1987, Επίδραση των οριακών χαρακτηριστικών καμπυλών στράγγισης- διήθησης σε προβλήματα άρδευσης.

21) Στεργιοπούλου Σταυρούλα, Βόλος 2000, Πειραματικός προσδιορισμός του φαινομένου της υστέρησης και πρόβλεψη με το μοντέλο Muallem.

22) Τασομήνη Ευαγγελία-Τζιούφα Χριστίνα, Νοέμβριος 2007, "ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ-ΥΛΙΚΑ ΟΔΟΣΤΡΩΣΙΑΣ-ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ".

23) Τερζίδης Γ.Α., Παπαζαφειρίου Ζ.Γ.,1994, Γεωργική Υδραυλική, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

24) Τζιμόπουλος Χ., 1981, Γεωργική Υδραυλική: Εξατμισοδιαπνοή- Διηθητικότητα- Ατομικά δίκτυα.

25) Τζιμόπουλος Χ., 1983, Στραγγίσεις - Υδραυλική Φρεάτων, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000123185