



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Δ. ΠΟΛΛΑΛΗΣ

Msc ΓΕΩΠΟΝΟΣ ΓΠΑ

**Αναλυτική, πειραματική και αριθμητική προσομοίωση
του φαινομένου της διήθησης σε μία και πολλές
διαστάσεις. Το αντίστροφο πρόβλημα – Εφαρμογή στις
Αρδεύσεις και την Υδρολογία**

Επιβλέπων Καθηγητής: Ι.Δ. Βαλιάντζας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΘΗΝΑ 2011

ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ

**Αναλυτική, πειραματική και αριθμητική προσομοίωση
του φαινομένου της διήθησης σε μία και πολλές
διαστάσεις. Το αντίστροφο πρόβλημα – Εφαρμογή στις
Αρδεύσεις και την Υδρολογία**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ Δ. ΠΟΛΛΑΛΗΣ

Εισηγητής : Ι.Δ. Βαλιάντζας

Εξεταστική Επιτροπή:

Ι.Δ. Βαλιάντζας

Ν. Δέρκας

Ε. Βαβουλίδου

Π. Κερκίδης

Β. Αντωνόπουλος

Σ. Ελμαλόγλου

Γ. Κάργας

ΑΘΗΝΑ 2011

ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΓΕΝΕΙΑ ΜΟΥ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής, θέλω να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της.

Αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Ιωάννη Βαλιάντζα για την ανάθεση του θέματος της διατριβής και για την ουσιαστική συμβολή του και ολοπρόθυμη καθοδήγησή του, χωρίς τα οποία η παρούσα διατριβή δε θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί.

Ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή του Γ.Π.Α κ. Νικόλαο Δέρκα και την Ερευνήτρια Β' του Ινστιτούτου Εδαφολογίας Αθηνών (ΕΘΙΑΓΕ) κ. Ευαγγελία Βαβουλίδου για την συμμετοχή τους στη τριμελή εισηγητική επιτροπή, τη καθοδήγησή τους και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν, καθώς και την Επίκουρο Καθηγήτρια κ. Αλεξάνδρα Μπούμπουκα-Σασσάλου (πρώην μέλος της τριμελούς εισηγητικής επιτροπής λόγω συνταξιοδότησης).

Ευχαριστώ θερμά την Ερευνήτρια Β' κ. Ευαγγελία Βαβουλίδου για την ουσιαστική οικονομική βοήθεια που μου παρείχε μέσω της συνεργασίας μας στο ερευνητικό πρόγραμμα «FOOTPRINT».

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και στα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής: Πέτρο Κερκίδη (Καθηγητής του Γ.Π.Α), Σταμάτη Ελμαλόγλου (Καθηγητής του Γ.Π.Α), Βασίλειο Αντωνόπουλο (Καθηγητής της Γεωπονικής Σχολής του Α.Π.Θ) και Γεώργιο Κάργα (Επίκουρος Καθηγητής του Γ.Π.Α).

Ευχαριστώ το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών για την οικονομική ενίσχυση που μου παρείχε.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τη κ. Παρασκευή Λόντρα (Διδάκτωρ του Γ.Π.Α) και το κ. Κωνσταντίνο Σούλη (Διδάκτωρ του Γ.Π.Α) για την αμέριστη συμπαράστασή τους σε όλα τα επίπεδα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής.

Το πιο μεγάλο ευχαριστώ απ' όλα το αφιερώνω δικαιωματικά στην οικογένειά μου, η οποία ήταν πάντα δίπλα μου και με ανέχθηκε όλο αυτό το χρονικό διάστημα...

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	9
Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος	11
1.2 Στόχοι της διατριβής – Προτάσεις	12
1.3 Πρωτοτυπία	14
Κεφάλαιο 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	15
2.1 Γενικά	15
2.2 Κυλινδρικά διηθητόμετρα (μονός - διπλός κύλινδρος)	15
2.3 Η εξίσωση του Kostiakov και η προέκτασή της	19
2.4 Χρήση αριθμητικών μοντέλων διήθησης	22
Κεφάλαιο 3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	25
3.1 Η εξίσωση διήθησης γραμμικής μορφής	25
3.2 Ανάλυση του φαινομένου της διήθησης με κυλινδρικά διηθητόμετρα	28
3.2.1 Διάταξη διπλού κυλίνδρου	28
3.2.2 Διάταξη μονού κυλίνδρου	33
3.2.3 Αριθμητικά δεδομένα διήθησης κυλινδρικών διηθητόμετρων (μονός – διπλός κύλινδρος)	36
3.2.4 Αριθμητικά δεδομένα οριζόντιας και κατακόρυφης διήθησης	41
3.2.5 Πειραματικά δεδομένα διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων	42
3.3 Σύνδεση της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov με την απορροφητικότητα S	52
3.3.1 Γενική μεθοδολογία	52
3.3.2 Μεταβολή της απορροφητικότητας S συναρτήσει των οριακών συνθηκών	55
3.3.3 Μεταβολή της απορροφητικότητας S συναρτήσει των αρχικών συνθηκών	56
3.3.4 Μεταβολή της απορροφητικότητας S συναρτήσει των αρχικών και οριακών συνθηκών	57
3.3.5 Μεταβολή της παραμέτρου κ συναρτήσει των αρχικών και οριακών συνθηκών	57

3.3.6 Διαδικασία διόρθωσης της παραμέτρου κ	57
3.3.7 Επικύρωση της προτεινόμενης μεθόδου – Αριθμητικά δεδομένα διήθησης	58
3.4 Διερεύνηση αξιοπιστίας αποτελεσμάτων αριθμητικών μοντέλων διήθησης	60
3.4.1 Γενικά.....	60
3.4.2 Αριθμητικά – Αναλυτικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης.....	60
Κεφάλαιο 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	64
4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων κυλινδρικών διηθητόμετρων (μονός–διπλός κύλινδρος).....	64
4.1.1 Αριθμητικά δεδομένα διάταξης διπλού κυλίνδρου	64
4.1.2 Αριθμητικά δεδομένα διάταξης μονού κυλίνδρου	70
4.1.3 Πειραματικά δεδομένα διάταξης διπλού κυλίνδρου	72
4.2 Διόρθωση της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov για μεταβολή των αρχικών και οριακών συνθηκών διήθησης.	81
4.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων αριθμητικών μοντέλων διήθησης - επιλογή βέλτιστου χωρικού βήματος	100
Κεφάλαιο 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	109
5.1 Συμπεράσματα	109
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	112

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται με τα εξής τρία θέματα:

1. Την ανάλυση του φαινομένου της διήθησης σε δύο διαστάσεις με αξονική συμμετρία και η απλοποίησή του με θεωρητικές παραδοχές με σκοπό την εύρεση μίας απλής μεθόδου ταυτοποίησης των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους εφαρμόσιμης στην πράξη σε διάφορα προβλήματα ρουτίνας. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο προτείνεται μια νέα μέθοδος ταυτοποίησης της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό K_s και της απορροφητικότητας S από δεδομένα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων μικρών διαστάσεων υπό το καθεστώς σταθερού φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους. Η μέθοδος που προτείνεται βασίζεται στη χρήση μίας πρόσφατα προτεινόμενης εξίσωσης μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης του εδαφικού νερού (Valiantzas, 2010) καθώς και στην εκμετάλλευση των δεδομένων αθροιστικής διήθησης όχι μόνο από τον εσωτερικό αλλά και από τον εξωτερικό κύλινδρο. Τα αριθμητικά και πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η προτεινόμενη μέθοδος προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους K_s και S παρέχει αρκετά καλές εκτιμήσεις για τις δύο αυτές υδραυλικές παραμέτρους και έχει αποδεκτή ακρίβεια σφάλματος εκτίμησης τους.

2. Την εφαρμογή της διήθησης στις αρδεύσεις με σκοπό την ανάλυση και τον σχεδιασμό επιφανειακών συστημάτων άρδευσης. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο πραγματοποιείται διερεύνηση της μεταβολής των παραμέτρων της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον συναρτήσει των αρχικών και οριακών συνθηκών της διήθησης και προτείνεται μια απλοποιημένη μεθοδολογία προσδιορισμού της παραμέτρου k της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον για διάφορες αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία διόρθωσης απαιτεί τη γνώση μόνο των τιμών αναφοράς των παραμέτρων α , κ και f_0 της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον που αντιπροσωπεύουν ένα συγκεκριμένο γεγονός επιφανειακής άρδευσης. Η μέθοδος που προτείνεται βασίζεται στην σύνδεση της παραμέτρου k με την απορροφητικότητα S που προκύπτει από την σύνδεση της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον με την

κλασσική δι-παραμετρική εξίσωση διήθησης του Philip. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η γενική απόδοση της προτεινόμενης μεθόδου είναι ικανοποιητική.

3. Την ορθή χρήση αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης του φαινομένου της διήθησης. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο προτείνεται μία απλή και συνάμα γρήγορη μέθοδος με την οποία εντοπίζονται με γραφικό τρόπο και τελικώς ελαχιστοποιούνται πιθανές αριθμητικές αδυναμίες-προβλήματα επίλυσης του αριθμητικού προβλήματος σε μοντέλα διήθησης. Η γενικότερη προσέγγιση του προβλήματος βασίζεται στο ότι μία πρόσφατα προτεινόμενη γραμμικοποιημένη εξίσωση μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης (Valiantzas, 2010) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα επιπρόσθετο κριτήριο προκειμένου να εντοπίζονται εύκολα αλλά και γρήγορα πιθανή αριθμητική αδυναμία αλλά και λάθη αριθμητικών μοντέλων διήθησης που σχετίζονται με την επίλυση του αριθμητικού προβλήματος και τελικώς να επιλέγεται η βέλτιστη χωρική διακριτοποίηση (spatial discretization) με σκοπό την απόκτηση όσο το δυνατόν αξιόπιστων αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Λέξεις κλειδιά: διήθηση, κυλινδρικά διηθητόμετρα, το αντίστροφο πρόβλημα, επιφανειακές αρδεύσεις, αριθμητικά μοντέλα διήθησης.

ABSTRACT

This thesis deals with the following three issues:

1. A new method for the determination of S and K_s using double ring cumulative infiltration data of small diameter under constant head is proposed. The infiltration time necessary for the wetting front to reach the bottom edge of the cylinders can be determined graphically by visual observation of cumulative double ring infiltration data, for both inner and outer cylinder, expressed in the form of a recently proposed 1D linearized infiltration equation (Valiantzas, 2010). After that, S and K_s can be estimated by fitting the same equation on the double ring cumulative infiltration data until the specific time it was graphically found. After the theoretical analysis, the proposed method was tested using numerical double ring infiltration data (HYDRUS-2D/3D) and the results indicated that the proposed method provides parameter estimates for S and K_s of acceptable accuracy for the selected soils that cover a range of soil hydraulic spectrum. The proposed method was also tested using experimental double ring infiltration data derived by a controlled double ring experiment in laboratory condition for a soil-sand mixture.

2. The extended Kostiakov equation is intensively used in surface irrigation applications. Traditionally, the extended Kostiakov infiltration formula is calibrated for specific field conditions. However, there is a dependence of the extended Kostiakov coefficients on both initial and boundary conditions. In this paper, a new simplified methodology is developed to account extended Kostiakov κ variation for these effects. The purely empirical extended Kostiakov equation is transformed to a form of a modified version of the classical Philip two-term equation. This modification relates a physical parameter, the soil sorptivity S , with the purely empirical coefficient κ of the extended Kostiakov formula. Then, the variation of the sorptivity S for various water levels and initial water contents is given theoretically by a simple algebraic equation. The proposed correction was compared with numerical infiltration data with varying initial (water content) and

boundary conditions (ponding depth) for two contrasting soils. Results indicate that the corrected infiltration curves converge well with the simulated ones.

3. Recently, Valiantzas (2010) proposed a new two-parameter vertical infiltration equation that can be transformed to a linearized-form equation which essentially states that the shape of the cumulative infiltration data, when they were presented in the form of (I^2/τ) versus I , is linear. In this paper, the presentation of the numerical data to the Valiantzas linearized-form equation is proposed as an additional criterion to detect easily and rapidly possible errors of the numerical solutions and eventually to choose the best spatial and time discretization parameters for a simulated infiltration event that are used as setup parameters to the numerical infiltration models. Numerical data and analytical solutions were used to validate the proposed method.

Keywords: infiltration, ring infiltrometers, the inverse problem, surface irrigation, soil infiltration models.

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Με τον όρο διήθηση εννοούμε την είσοδο του νερού μέσα στην εδαφική μάζα από την επιφάνεια του εδάφους και την κίνησή του μέσα σε αυτή. Πρόκειται για μία πολύπλοκη φυσική διαδικασία τα χαρακτηριστικά της οποίας πολύ δύσκολα γίνονται γνωστά με ακρίβεια στις αρδευόμενες εκτάσεις γης.

Τα τελευταία εκατό χρόνια έχει γίνει συστηματική έρευνα του φαινομένου της διήθησης και έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός θεωρητικών μοντέλων διήθησης στις εξισώσεις των οποίων υπεισέρχονται παράμετροι, μεταξύ άλλων, που έχουν φυσική έννοια και παίζουν καθοριστικό ρόλο στο φαινόμενο της διήθησης, όπως η απορροφητικότητα S (Sorptivity), η υδραυλική αγωγιμότητα στο κορεσμό K_s , οι αρχικές και οριακές συνθήκες (π.χ. Green-Ampt, 1911; Philip, 1957b; Parlange, 1982; Swartzendruber, 1987; Haverkamp, 1990; Barry, 1995). Η χρήση όμως τέτοιου είδους θεωρητικών μοντέλων σε πρακτικές εφαρμογές είναι δύσκολη λόγω των πολλών παραμέτρων τους (μη μοναδικότητα και μη σύγκλιση του αντίστροφου προβλήματος) και της μεταβλητότητας τους αλλά και της ετερογένειας και ανομοιογένειας των εδαφών. Έτσι, στα πλαίσια μιας μηχανιστικής προσέγγισης του φαινομένου της διήθησης, οι μηχανικοί από τη μία στην υδρολογία καταφεύγουν σε προσεγγιστικές μεθόδους εκτίμησης των υδρολογικών ελλειμμάτων (μέθοδος SCS-CN) χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η φυσική του φαινομένου της διήθησης, από την άλλη στις αρδεύσεις καταφεύγουν στη χρήση της αμιγούς εμπειρικής εξίσωσης του Kostiaikov (1932) παρά την διαφορετικότητα στην εξέλιξη του φαινομένου της διήθησης στα διάφορα συστήματα άρδευσης (σε μία ή πολλές διαστάσεις) και την μεταβλητότητα των δύο εμπειρικών παραμέτρων της (Clausnitzer et al., 1998). Τα τελευταία χρόνια γίνεται μία προσπάθεια να συνδεθεί το επιστημονικό υπόβαθρο στο κομμάτι της διήθησης με την πρακτική εφαρμογή.

1.2 Στόχοι της διατριβής – Προτάσεις

1^{ος} Στόχος: Η ανάλυση του φαινομένου της διήθησης σε δύο διαστάσεις με αξονική συμμετρία και η απλοποίησή του με θεωρητικές παραδοχές με σκοπό την εύρεση μίας απλής μεθόδου ταυτοποίησης των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους εφαρμόσιμης στην πράξη σε διάφορα προβλήματα ρουτίνας. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο προτείνεται μια νέα μέθοδος ταυτοποίησης της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό K_s και της απορροφητικότητας S από δεδομένα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων μικρών διαστάσεων υπό το καθεστώς σταθερού φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους. Η μέθοδος που προτείνεται βασίζεται στη χρήση μίας πρόσφατα προτεινόμενης εξίσωσης μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης του εδαφικού νερού (Valiantzas, 2010) καθώς και στην εκμετάλλευση των δεδομένων αθροιστικής διήθησης όχι μόνο από τον εσωτερικό αλλά και από τον εξωτερικό κύλινδρο. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων, τόσο από τον εσωτερικό όσο και από τον εξωτερικό κύλινδρο, μετασχηματίζονται στη μορφή της προαναφερθείσας εξίσωσης διήθησης με σκοπό να εντοπιστεί με γραφικό τρόπο ο χρόνος που χρειάζεται το μέτωπο διαβροχής να φτάσει στο κάτω χείλος των κυλίνδρων από την έναρξη ενός πειράματος διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων. Εν συνεχεία η προσαρμογή της προαναφερθείσας εξίσωσης διήθησης πάνω στα δεδομένα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων μέχρι τον χρόνο που εντοπίστηκε γραφικά στο προηγούμενο στάδιο, μας δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους K_s και S . Μετά την θεωρητική ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθόδου ακολουθεί η επαλήθευσή της χρησιμοποιώντας αφενός “εικονικά” δεδομένα διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων που προκύπτουν από αριθμητικές προσομοιώσεις δισδιάστατης ακόρεστης ροής με αξονική συμμετρία, αφετέρου πειραματικά δεδομένα διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων που προέρχονται από ένα ελεγχόμενο πείραμα διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων που διεξήχθη στο εργαστήριο του Γ.Π.Α.

2^{ος} Στόχος: Η εφαρμογή της διήθησης στις αρδεύσεις με σκοπό την ανάλυση και τον σχεδιασμό επιφανειακών συστημάτων άρδευσης. Η εξέλιξη του φαινομένου της διήθησης του εδαφικού νερού αποτελεί βασικό παράγοντα για την ανάλυση, το σχεδιασμό και την αποδοτικότητα των συστημάτων επιφανειακής άρδευσης. Για τον

ορθό σχεδιασμό και λειτουργία ενός συστήματος επιφανειακής άρδευσης απαιτείται η καμπύλη της αθροιστικής διήθητικότητας. Στις επιφανειακές αρδεύσεις χρησιμοποιείται κατά κόρον μία αμιγώς εμπειρική εξίσωση διήθησης, η εξίσωση του Kostiaκον (1932) ή η προέκτασή της (γνωστή ως εξίσωση Lewis-Kostiaκον). Οι τιμές όμως των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην εξίσωση του Kostiaκον ή την προέκτασή της δεν παραμένουν οι ίδιες όταν μεταβάλλονται οι αρχικές και οριακές συνθήκες που επικρατούν στον αγρό μεταξύ δύο ή περισσότερων γεγονότων επιφανειακής άρδευσης. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο πραγματοποιείται διερεύνηση της μεταβολής των παραμέτρων της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον συναρτήσει των αρχικών και οριακών συνθηκών της διήθησης και προτείνεται μια απλοποιημένη μεθοδολογία προσδιορισμού της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον για διάφορες αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία διόρθωσης απαιτεί τη γνώση μόνο των τιμών αναφοράς των παραμέτρων α , κ και f_0 της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον που αντιπροσωπεύουν ένα συγκεκριμένο γεγονός επιφανειακής άρδευσης. Η μέθοδος που προτείνεται βασίζεται στη σύνδεση της παραμέτρου κ με την απορροφητικότητα S που προκύπτει από την σύνδεση της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον με την κλασσική δι-παραμετρική εξίσωση διήθησης του Philip. Μετά την θεωρητική ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθόδου ακολουθεί η επαλήθευσή της χρησιμοποιώντας “εικονικά” δεδομένα διήθησης που προκύπτουν από αριθμητικές προσομοιώσεις μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης.

3^{ος} Στόχος: Η όσο το δυνατόν ορθή και ακριβής χρήση αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης του φαινομένου της διήθησης. Τα αριθμητικά δεδομένα διήθησης που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση των δύο παραπάνω στόχων της παρούσας διατριβής, τόσο στην περίπτωση των κυλινδρικών διηθητόμετρων όσο και στην περίπτωση της μονοδιάστατης κίνησης του εδαφικού νερού (οριζόντια ή κατακόρυφη), προέρχονται από το ευρέως διαδεδομένο αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της κίνησης του εδαφικού νερού HYDRUS. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο προτείνεται μία απλή και συνάμα γρήγορη μέθοδος με την οποία εντοπίζονται με γραφικό τρόπο και τελικώς ελαχιστοποιούνται πιθανές αριθμητικές αδυναμίες-προβλήματα επίλυσης του αριθμητικού προβλήματος σε μοντέλα διήθησης. Η γενικότερη προσέγγιση του

προβλήματος βασίζεται στο ότι μία πρόσφατα προτεινόμενη γραμμικοποιημένη εξίσωση μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης (Valiantzas, 2010) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα επιπρόσθετο κριτήριο προκειμένου να εντοπίζονται εύκολα αλλά και γρήγορα πιθανή αριθμητική αδυναμία αλλά και λάθη αριθμητικών μοντέλων διήθησης που σχετίζονται με την επίλυση του αριθμητικού προβλήματος και τελικώς να επιλέγεται η βέλτιστη χωρική διακριτοποίηση (spatial discretization) με σκοπό την απόκτηση όσο το δυνατόν αξιόπιστων αριθμητικών αποτελεσμάτων.

1.3 Πρωτοτυπία

Η πρωτοτυπία της διατριβής επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι τα αποτελέσματα που προέρχονται από τους τρεις παραπάνω στόχους της παρούσας έρευνας έχουν δημοσιευτεί ή έχουν υποβληθεί για δημοσίευση σε έγκριτα διεθνή περιοδικά:

Valiantzas, J.D., Pollalis, E.D., Soulis, K.X., and Londra, P.A., 2011. Rapid graphical detection of weakness problems in numerical simulation models using a linearized form equation. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, 137:524–529.

Valiantzas, J.D., Pollalis, E.D., Soulis, K., Londra, P.A. “Modified form of the extended Kostiaikov equation including various initial and boundary conditions”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE. Volume: 135, Issue: 4, Pages: 450-458. Published: JUL-AUG 2009.

Pollalis, E.D., Valiantzas, J.D. “Determining sorptivity and hydraulic conductivity using double-ring infiltrometers. Numerical and experimental validation”. (υποβληθείσα προς δημοσίευση στο επιστημονικό περιοδικό “*Journal of Hydrology*”).

Κεφάλαιο 2

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Γενικά

Με βάση το περιεχόμενο και τους στόχους της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρατίθεται εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση, η οποία αφορά τα εξής τρία θέματα α) τη γενική θεώρηση λειτουργίας της πειραματικής διάταξης των κυλινδρικών διηθητόμετρων (μονός-διπλός κύλινδρος) και τον προσδιορισμό των υδραυλικών ιδιοτήτων K_s , S του εδάφους από τη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη β) τη διερεύνηση της μεταβολής των παραμέτρων της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον συναρτήσει των αρχικών και οριακών συνθηκών της διήθησης και γ) τη χρήση και παραμετροποίηση αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης της κίνησης του εδαφικού νερού.

2.2 Κυλινδρικά διηθητόμετρα (μονός - διπλός κύλινδρος)

Η διαδικασία του φαινομένου της διήθησης είναι άμεσα συνυφασμένη με δύο από τις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους: την υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό K_s [L/T] και την απορροφητικότητα S [$L/T^{0.5}$]. Η πρώτη υδραυλική ιδιότητα, K_s , αναφέρεται στον μέγιστο ρυθμό ροής του εδαφικού νερού που οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στη δύναμη της βαρύτητας σε ένα πλήρως κορεσμένο έδαφος και είναι μία εγγενής ιδιότητα του εδάφους. Η δεύτερη υδραυλική ιδιότητα, S , αναφέρεται στην ικανότητα του εδάφους να απορροφά νερό μέσω του τριχοειδούς φαινομένου, μεταβάλλεται δε συναρτήσει της αρχικής και τελικής περιεκτικότητας του νερού στο έδαφος καθώς και της ύπαρξης ή όχι φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους. Ως εκ τούτου, ο ακριβής προσδιορισμός των δύο παραπάνω υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους έχει ιδιαίτερη σημασία δεδομένου ότι ουσιαστικά ελέγχουν τη διαδικασία του φαινομένου της διήθησης.

Τα τελευταία χρόνια έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες πειραματικές συσκευές για τον προσδιορισμό των K_s , S : κυλινδρικά διηθητόμετρα με μονό ή διπλό κύλινδρο (single

or double ring infiltrometers) υπό το καθεστώς σταθερού φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους (π.χ. Bower, 1986; Wu et al., 1997; Bodhinayake and Noborio, 2005) αλλά και μεταβαλλόμενου φορτίου πίεσης (π.χ. Elrick et al., 1995; Angulo-Jaramillo et al., 2003), διηθητόμετρα δίσκου υπό το καθεστώς σταθερής μύζησης (π.χ. Warrick, 1992; Angulo-Jaramillo et al., 2000; Vandervaere et al., 2000). Στην παρούσα εργασία εξετάζεται ο προσδιορισμός των υδραυλικών ιδιοτήτων K_s και S με τη συσκευή των κυλινδρικών διηθητόμετρων με μονό και διπλό κύλινδρο υπό το καθεστώς σταθερού φορτίου πίεσης. Ας εξετάσουμε επομένως ορισμένες πτυχές του φαινομένου της διήθησης με χρήση κυλινδρικών διηθητόμετρων, αρχικά με μόνο κύλινδρο και εν συνεχεία με διπλό κύλινδρο.

Οι Marshall and Stirk (1950) αναφέρουν ότι ο ρυθμός διήθησης που μετράται με τη χρήση μονού κυλίνδρου μειώνεται όσο η διάμετρος του κυλίνδρου αυξάνεται. Ο Tricker (1978) αναφέρουν ότι στη περίπτωση του μονού κυλίνδρου η ροή του νερού μέσα στο έδαφος και κάτω από τον κύλινδρο είναι συνδυασμός κατακόρυφης και οριζόντιας διήθησης. Ο Youngs (1987) πραγματοποίησε πειράματα για τη μέτρηση διήθησης με μονό κύλινδρο με διαμέτρους από 2cm ως και 90cm και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα ήταν λογικά όταν η ακτίνα των κυλίνδρων ήταν τουλάχιστον 15cm. Στο ίδιο πείραμα αποδεικνύεται ότι με τη χρήση μεγάλων διαμέτρων μικραίνει η διακύμανση των τιμών της βασικής διηθητικότητας. Οι Reynolds and Elrick (1990) θέτουν το φαινόμενο της διήθησης στη περίπτωση του μονού κυλίνδρου ως ένα τρισδιάστατο πρόβλημα (3D-three dimensional problem). Οι Bagarello and Sgroi (2004) προτείνουν τη χρήση μονού κυλίνδρου με μεγάλες διαμέτρους για να αποφεύγεται η διατάραξη του εδάφους. Πρόσφατα οι Touma et al. (2007) εξέτασαν τον προσδιορισμό των K_s , S για τη περίπτωση διηθητόμετρου με μονό κύλινδρο μικρής διαμέτρου (12-15cm), υπό το καθεστώς αμελητέου φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους και με πολύ μικρό βάθος διείσδυσης του κυλίνδρου στο έδαφος ίσο με 0.4cm έως 0.5cm. Η ανάλυσή τους βασίστηκε στην εξίσωση των Haverkamp et al. (1994) μέσω της οποίας συνδέεται η τρισδιάστατη αθροιστική διήθηση που προέρχεται από μία κυκλική πηγή με την αντίστοιχη μονοδιάστατη κατακόρυφη αθροιστική διήθηση. Χρησιμοποιώντας διάφορες εξισώσεις μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης και τη μη γραμμική τεχνική ελαχιστοποίησης των τετραγώνων (Marquardt, 1963), κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η

χρήση διηθητόμετρου με μονό κύλινδρο είναι κατάλληλη για τον προσδιορισμό των K_s και S .

Τα κυλινδρικά διηθητόμετρα με διπλό κύλινδρο (ομόκεντροι κύλινδροι) χρησιμοποιούνται ευρύτατα για τον προσδιορισμό στον αγρό (in situ) της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό, K_s (Bower, 1986; Dirk et al., 1999). Η χρήση διπλού κυλίνδρου γίνεται με σκοπό να μειωθεί η πλευρική ροή στον εσωτερικό κύλινδρο από τον οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις της αθροιστικής διήθησης. Οι Burgy και Luthin (1956) αναφέρουν ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στις μετρούμενες ταχύτητες διήθησης με μονό κύλινδρο διαμέτρου 15cm και με διπλό κύλινδρο με εσωτερική διάμετρο 15cm και εξωτερική 30cm. Οι Swartzendruber and Olsen (1961a, 1961b) πραγματοποίησαν σε ένα αμμώδες έδαφος μία σειρά πειραμάτων με διπλούς κυλίνδρους διαφόρων διαστάσεων προκειμένου να μελετήσουν την επίδραση του εξωτερικού κυλίνδρου στη πλευρική ροή του εσωτερικού κυλίνδρου και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όταν η διάμετρος του εξωτερικού κυλίνδρου πλησιάζει τη τιμή των 120cm η πλευρική ροή στον εσωτερικό κύλινδρο γίνεται αμελητέα και συνεπακόλουθα τότε η ταχύτητα διήθησης που μετράται στον εσωτερικό κύλινδρο προσεγγίζει την κατακόρυφη μονοδιάστατη ταχύτητα διήθησης. Ο Ahuja (1976) αναφέρει ότι με χρήση διπλού κυλίνδρου με διαστάσεις 30cm και 90cm για τη διάμετρο του εσωτερικού και εξωτερικού κυλίνδρου αντίστοιχα ελαχιστοποιείται πρακτικά η πλευρική ροή. Οι Wu et al. (1997), χρησιμοποιώντας αριθμητικά δεδομένα διήθησης κυλινδρικών διηθητόμετρων για τρία εδάφη που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα υδραυλικών ιδιοτήτων, έδειξαν ότι στη περίπτωση που η διάμετρος του εσωτερικού και εξωτερικού κυλίνδρου είναι 20cm και 120cm αντίστοιχα, τότε η μετρούμενη ταχύτητα διήθησης ήταν από 20% έως 33% μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη κατακόρυφη μονοδιάστατη ταχύτητα διήθησης. Οι Lai and Ren (2007) προτείνουν ως ελάχιστη διάμετρο για τον εσωτερικό κύλινδρο τη τιμή των 80cm προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η πλευρική απόκλιση των γραμμών ροής του εδαφικού νερού κάτω από τον εσωτερικό κύλινδρο. Γίνεται σαφές ότι αποτελεσματικότητα της συσκευής των διπλών-ομόκεντρων κυλίνδρων δε μπορεί να κριθεί με ακρίβεια μέσα από το πρίσμα του αντικειμενικού στόχου που έχει η χρησιμοποίηση μιας τέτοιας συσκευής που δεν είναι άλλο από την απόκτηση της μονοδιάστατης κατακόρυφης ταχύτητας διήθησης. Εν ολίγοις δεν υπάρχει μια

επιστημονική ομοφωνία από την οποία να προκύπτουν με σαφήνεια οι ακριβείς διαστάσεις της συσκευής των ομόκεντρων κυλίνδρων με σκοπό την απόκτηση της μονοδιάστατης κατακόρυφης ταχύτητας διήθησης. Επιπλέον, ακόμα και σε μία υποτιθέμενα ιδανική περίπτωση όπου οι διαστάσεις των ομόκεντρων κυλίνδρων είναι συγκεκριμένες και γνωστές, προκειμένου να μετρηθεί με ακρίβεια η κατακόρυφη ταχύτητα διήθησης για ένα έδαφος, είναι περισσότερο πιθανό η συνολική διάμετρος των ομόκεντρων κυλίνδρων (αθροίζοντας την εσωτερική με την εξωτερική διάμετρο των κυλίνδρων) να είναι της τάξης των 100cm. Ορισμένα ζητήματα πρακτικής φύσεως που προκύπτουν από τη χρήση μιας συσκευής ομόκεντρων κυλίνδρων τέτοιων διαστάσεων είναι: α) Πόσο εύκολο είναι για έναν πειραματιστή να διαχειριστεί υπερβολικά μεγάλες ποσότητες νερού; β) Λόγω της χωρικής μεταβλητότητας των υδραυλικών ιδιοτήτων, πόσο εύκολο είναι για έναν πειραματιστή να πραγματοποιήσει μία σειρά από μετρήσεις διηθητικότητας με μία ογκώδη και δυσμετακίνητη συσκευή; γ) Πόσο εύκολο είναι να τοποθετηθεί ένας κύλινδρος μεγάλων διαστάσεων σε ένα ξηρό έδαφος;

Μία τυπική διαδικασία προσδιορισμού των εδαφικών υδραυλικών ιδιοτήτων K_s , S είναι η προσαρμογή μίας εκ των προτεινόμενων στη βιβλιογραφία εξισώσεων κατακόρυφης διήθησης, μέσω της μη γραμμικής τεχνικής ελαχιστοποίησης των τετραγώνων (Marquardt, 1963), σε πειραματικά δεδομένα κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης I [L]. Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, η απόκτηση δεδομένων κατακόρυφης διήθησης δεν είναι εφικτή στη μεν περίπτωση του μονού κυλίνδρου εφόσον η ροή του νερού μέσα στο έδαφος και κάτω από τον κύλινδρο είναι δισδιάστατη (συνδυασμός κατακόρυφης και οριζόντιας διήθησης με αξονική συμμετρία λόγω του τριχοειδούς φαινομένου). Στη δε περίπτωση του διπλού κυλίνδρου, αν και η πλευρική ροή του νερού κάτω από τον εσωτερικό κύλινδρο περιορίζεται από την ροή του νερού στον εξωτερικό κύλινδρο, εντούτοις δε μπορούμε να γνωρίζουμε με ακρίβεια αν είναι οι μετρήσεις αθροιστικής διήθησης που λαμβάνονται από τον εσωτερικό κύλινδρο είναι κοντινές ή μακρινές σε σχέση με την αντίστοιχη πραγματική κατακόρυφη διήθηση.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιείται διερεύνηση σε ότι αφορά τον προσδιορισμό των υδραυλικών ιδιοτήτων K_s , S από δεδομένα αθροιστικής διήθησης που προέρχονται από κυλινδρικά διηθητόμετρα με μονό και διπλό κύλινδρο διαφόρων διαστάσεων, κάτω από συνθήκες σταθερού φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους.

Μέσα από τη συγκεκριμένη έρευνα προτείνεται μία νέα μέθοδος προσδιορισμού των K_s και S από δεδομένα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων. Για την υλοποίηση του συγκεκριμένου στόχου χρησιμοποιήθηκαν α) αριθμητικά δεδομένα διήθησης κυλινδρικών διηθητόμετρων (μονός – διπλός κύλινδρος) από το ευρέως διαδεδομένο λογισμικό πακέτο προσομοίωσης της κίνησης του εδαφικού νερού HYDRUS-(2D/3D) (Simunek et al., 2006) β) πειραματικά δεδομένα ομόκεντρων κυλίνδρων οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε ειδική δεξαμενή χώματος με διαστάσεις $1m \times 1m \times 1m = 1m^3$ που κατασκευάστηκε στο εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Γ.Π.Α. και γ) μία πρόσφατα προτεινόμενη γραμμικοποιημένη εξίσωση μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης (Valiantzas, 2010).

2.3 Η εξίσωση του Kostiaκον και η προέκτασή της

Οι μέθοδοι επιφανειακής άρδευσης (λεκάνες, λωρίδες, αυλάκια) παραμένουν οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι άρδευσης ανά τον κόσμο. Εκτιμάται ότι οι επιφανειακές αρδεύσεις εφαρμόζονται σε ένα ποσοστό 95% περίπου των αρδευόμενων εκτάσεων ανά την υφήλιο (Pereira, 1996). Στην Ελλάδα, αν και οι δυνατότητες αυτοματοποίησης που παρέχουν τα συστήματα άρδευσης υπό πίεση έχει στρέψει τους παραγωγούς στην επιλογή τέτοιων συστημάτων, παρόλα αυτά οι επιφανειακές αρδεύσεις εξακολουθούν να παίζουν σημαντικό ρόλο καθώς εκτιμάται ότι το 30-40% των συλλογικών δικτύων άρδευσης της χώρας είναι επιφανειακά.

Η εξέλιξη του φαινομένου της διήθησης του εδαφικού νερού αποτελεί βασικό παράγοντα για την ανάλυση, το σχεδιασμό και την αποδοτικότητα των συστημάτων επιφανειακής άρδευσης. Για τον ορθό σχεδιασμό και λειτουργία ενός συστήματος επιφανειακής άρδευσης απαιτείται η καμπύλη της αθροιστικής διηθητικότητας, δηλαδή η μεταβολή της αθροιστικής διήθησης I [L] (εξαρτημένη μεταβλητή) ανά μονάδα επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου διήθησης τ [T] (ανεξάρτητη μεταβλητή).

Τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί αρκετές θεωρητικές (physical based) ή ημι-θεωρητικές (semi-theoretical) εξισώσεις διήθησης που περιγράφουν τη μεταβολή του I συναρτήσει του τ (π.χ. Green-Ampt, 1911; Philip, 1957b; Talsma και Parlange, 1972; Stroosnijder, 1976; Brutsaert, 1977; Parlange et al., 1982; Swartzendruber, 1987; Haverkamp et al., 1988; Fuentes et al., 1992; Vandervaere et al., 2000a). Η χρήση όμως

τέτοιου είδους εξισώσεων διήθησης σε πρακτικές εφαρμογές είναι δύσκολη λόγω των πολλών παραμέτρων που υπεισέρχονται σε αυτές (μη μοναδικότητα ή πιθανώς μη σύγκλιση του αντίστροφου προβλήματος) αλλά και της έντονης παραλλακτικότητας που παρουσιάζουν στο χώρο και στο χρόνο. Γι' αυτό, στις επιφανειακές αρδεύσεις χρησιμοποιείται κατά κόρον μία αμιγώς εμπειρική εξίσωση διήθησης, η εξίσωση του Kostiaκον (1932) ή η προέκτασή της (γνωστή ως εξίσωση Lewis-Kostiaκον):

$$I = \kappa \tau^a, \text{ εξίσωση Kostiaκον}$$

$$I = \kappa \tau^a + f_0 \tau, \text{ προέκταση της εξίσωσης Kostiaκον}$$

όπου I [L] η αθροιστική διήθηση ή αλλιώς το ύψος διήθησης, τ [T] ο χρόνος διήθησης ή αλλιώς χρόνος ευκαιρίας, κ [L/T^a] και a (αδιάστατη παράμετρος) εμπειρικοί συντελεστές και f_0 [L/T] η τελική διηθητικότητα του εδάφους που λαμβάνεται ίση με την υδραυλική αγωγιμότητα στο κορεσμό K_s [L/T]. Τα περισσότερα από τα αριθμητικά και αναλυτικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν για την πρόβλεψη των διαφόρων φάσεων της επιφανειακής άρδευσης χρησιμοποιούν ως δεδομένα εισόδου την εξίσωση του Kostiaκον ή την προέκτασή της, όπως: το μοντέλο «κινηματικού κύματος» (Walker and Humpherys 1983), το μοντέλο «μηδενικής αδράνειας» (Strelkoff and Katopodes 1977; Elliot et al. 1982a), το πλήρες υδροδυναμικό μοντέλο (Souza 1981; Strelkoff and Souza 1984) καθώς και η βελτιωμένη αναλυτική έκδοση του μοντέλου ισοζυγίου όγκου (Valiantzas 1997a,b; Valiantzas 2001; Valiantzas 2001a,b). Επίσης, οι περισσότερες τεχνικές που αναπτύχθηκαν για την ταυτοποίηση των συστημάτων επιφανειακής άρδευσης, σε ότι αφορά την διηθητικότητά τους, βασίζονται στον τύπο του Kostiaκον ή την προέκτασή του. Τέλος, η αξιολόγηση των συστημάτων επιφανειακής άρδευσης επίσης βασίζεται στον τύπο του Kostiaκον ή την προέκτασή του (Elliot and Walker, 1982b). Από τα προαναφερθέντα καθίσταται σαφές ότι η εμπειρική εξίσωση διήθησης του Kostiaκον έχει ευρεία χρήση στις επιφανειακές αρδεύσεις.

Η βαθμονόμηση της εξίσωσης του Kostiaκον ή της προέκτασής της συνίσταται στην εύρεση των τιμών των παραμέτρων που υπεισέρχονται σε αυτές από πειραματικά δεδομένα διήθησης. Οι βασικότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό στον αγρό των συγκεκριμένων παραμέτρων στις επιφανειακές αρδεύσεις

είναι: α) κυλινδρικά διηθητόμετρα β) μέθοδος της κατάκλισης γ) μέθοδος εισροής-εκροής δ) μέθοδος «δύο σημείων». Οι τιμές των παραμέτρων α , κ και f_0 που λαμβάνονται κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης αφορούν τις συγκεκριμένες συνθήκες που επικρατούν στον αγρό και χαρακτηρίζουν ένα συγκεκριμένο γεγονός άρδευσης. Όμως, από τη μία, οι συνθήκες που επικρατούν από ένα γεγονός επιφανειακής άρδευσης σε ένα άλλο μεταβάλλονται, είναι δηλαδή πιθανό να μεταβάλλεται π.χ. το φορτίο της ελεύθερης επιφάνειας του νερού πάνω στο έδαφος (οριακή συνθήκη – boundary condition) ή το υγρασιακό καθεστώς που επικρατεί στο έδαφος (αρχική συνθήκη - initial condition) ή και τα δύο μεταξύ των γεγονότων άρδευσης. Από την άλλη, ο Philip (1957a,c; Philip 1969) αναφέρει ξεκάθαρα ότι η αύξηση του φορτίου πίεσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού σε ένα έδαφος οδηγεί σε αύξηση των τιμών της ταχύτητας διήθησης, ενώ η αύξηση της αρχικής υγρασίας ενός εδάφους οδηγεί σε μείωση των τιμών της ταχύτητας διήθησης. Γίνεται επομένως αντιληπτό ότι οι τιμές των παραμέτρων α , κ και f_0 δεν παραμένουν οι ίδιες όταν μεταβάλλονται οι αρχικές και οριακές συνθήκες που επικρατούν στον αγρό μεταξύ δύο ή περισσότερων γεγονότων επιφανειακής άρδευσης. Το ερώτημα που γεννάται είναι το εξής: υπάρχει η δυνατότητα διόρθωσης των τιμών των παραμέτρων α , κ και f_0 όταν αυτές είναι γνωστές για ένα συγκεκριμένο γεγονός επιφανειακής άρδευσης ούτως ώστε οι νέες διορθωμένες τιμές τους να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να αντιπροσωπεύουν ένα άλλο γεγονός επιφανειακής άρδευσης στο οποίο επικρατούν διαφορετικές αρχικές και οριακές συνθήκες;

Απάντηση στο ερώτημα έρχονται να δώσουν οι Furman et al. (2006) που διερεύνησαν τη μεταβολή των εμπειρικών παραμέτρων α , κ και f_0 για διάφορες αρχικές και οριακές συνθήκες χρησιμοποιώντας αριθμητικά δεδομένα μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης για τρία εδάφη. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας υποδεικνύουν ότι εκ των τριών εμπειρικών παραμέτρων (α , κ και f_0) μόνο η διόρθωση ντου κ έχει στατιστικά συνεπή εφαρμογή. Όμως, η μεθοδολογία διόρθωσης που προτείνεται για το κ , εκτός από τη γνώση των τιμών αναφοράς των παραμέτρων α , κ και f_0 που αντιπροσωπεύουν ένα συγκεκριμένο γεγονός επιφανειακής άρδευσης, απαιτεί επιπρόσθετα και τη γνώση των τιμών ενός συντελεστή τάσης (αναφέρεται ως συντελεστής λ στη συγκεκριμένη εργασία), με αποτέλεσμα η προτεινόμενη μεθοδολογία

να περιορίζεται στις συγκεκριμένες αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης καθώς και για τα συγκεκριμένα τρία εδάφη που επιλέχθηκαν από τους ερευνητές.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται μια νέα απλοποιημένη μεθοδολογία προσδιορισμού – διόρθωσης της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης Kostiaκon για διάφορες αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης μέσω της σύνδεσης της παραμέτρου κ με την απορροφητικότητα S . Η προτεινόμενη μεθοδολογία διόρθωσης απαιτεί τη γνώση μόνο των τιμών αναφοράς των παραμέτρων α , κ και f_0 που αντιπροσωπεύουν ένα συγκεκριμένο γεγονός επιφανειακής άρδευσης. Για την υλοποίηση του συγκεκριμένου στόχου χρησιμοποιήθηκαν αριθμητικά δεδομένα κατακόρυφης και οριζόντιας διήθησης που προέρχονται από το ευρέως διαδεδομένο λογισμικό πακέτο προσομοίωσης της κίνησης του εδαφικού νερού HYDRUS-1D (Simunek et al., 1998). Η ημι-θεωρητική βάση της εξίσωσης διόρθωσης του εμπειρικού συντελεστή κ υποδεικνύει ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί για διάφορους τύπους εδαφών.

2.4 Χρήση αριθμητικών μοντέλων διήθησης

Η περιγραφή της κορεσμένης – ακόρεστης ροής του εδαφικού νερού σε ένα πορώδες μέσο βασίζεται στην εξίσωση του Richards (1931). Ωστόσο αναλυτικές λύσεις της εξίσωσης του Richards υπάρχουν για πολύ εξειδικευμένες περιπτώσεις και συνήθως δεν μπορούν να εφαρμοστούν σε πρακτικές εφαρμογές. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παραβολική της μορφή σε συνδυασμό με την έντονη μη γραμμικότητα των εξισώσεων που συνδέουν την περιεκτικότητα σε νερό θ , την υδραυλική αγωγιμότητα K και το φορτίο πίεσης H . Μία διέξοδο στο παραπάνω πρόβλημα αποτελεί η χρήση αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης της κίνησης του εδαφικού νερού, στα οποία η εξίσωση του Richards' επιλύεται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method) ή των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements method).

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν κάνει την εμφάνισή τους αρκετά αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης κορεσμένης – ακόρεστης ροής του εδαφικού νερού. Αν και ένα αριθμητικό μοντέλο αποτελεί εξ' ορισμού μία απλοποίηση της σύνθετης πραγματικότητας, ωστόσο τα αριθμητικά αποτελέσματα ενδέχεται να υπόκεινται σε κίνδυνο σημαντικών λαθών. Επομένως στη χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή από το χρήστη σε ένα συνδυασμό από βασικά κριτήρια προκειμένου

να ελέγχεται η αξιοπιστία και η ορθότητα των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Ένα από τα βασικότερα, αν όχι το βασικότερο, κριτήρια ελέγχου της ορθότητας των αριθμητικών αποτελεσμάτων ενός μοντέλου είναι το σφάλμα που αναφέρεται στο ισοζύγιο μάζας (ή όγκου) του νερού (mass balance error). Η διατήρηση της μάζας είναι η ελάχιστη απαίτηση για ένα ακριβές αριθμητικό μοντέλο, ωστόσο ένα μηδενικό σφάλμα ισοζυγίου της μάζας του νερού δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη και μία ακριβή αριθμητική λύση (Huang et al., 1996). Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει και ο Warrick (1991), ο οποίος αναφέρει ότι μία αποδεκτή τιμή στο σφάλμα ισοζυγίου της μάζας του νερού δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται ως το μοναδικό κριτήριο για ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα.

Οι Vancloster et al. (2000) αναφέρουν ότι η παραμετροποίηση και χρήση ενός αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης της κίνησης του νερού στο έδαφος από διαφορετικούς χρήστες μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές διαφορές στα αριθμητικά αποτελέσματα. Η διαφορετική επιλογή χωρικού και χρονικού βήματος (spatial and time step), σε ότι αφορά την επίλυση του αριθμητικού προβλήματος, είναι δυνατόν να οδηγήσει επίσης σε σημαντική διαφοροποίηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων και έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών ερευνητών (van Genuchten 1982; Milly, 1985; Celia et al., 1990; Zaidel and Russo, 1992; Baker, 1995; Pan et al., 1997; Miller et al., 1998; Romano et al., 1998; van Dam and Feddes, 2000).

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται μία νέα απλή και συνάμα γρήγορη μέθοδος με την οποία εντοπίζονται με γραφικό τρόπο και τελικώς ελαχιστοποιούνται πιθανά αριθμητικά προβλήματα που παρατηρούνται κατά τη χρήση αριθμητικών μοντέλων διήθησης. Το ενδιαφέρον εστιάζεται στην περίπτωση της μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης σε ένα ομοιογενές έδαφος με ενιαίο αρχικό υγρασιακό καθεστώς σε όλο το βάθος του εδαφικού προφίλ, καθώς στην επιφάνεια του εδάφους διατηρείται ένα σταθερό φορτίο πίεσης (το φαινόμενο της υστέρησης δεν λαμβάνεται υπόψη). Η γενικότερη προσέγγιση του προβλήματος βασίζεται στο ότι μία πρόσφατα προτεινόμενη γραμμικοποιημένη εξίσωση μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης (Valiantzas, 2010) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα επιπρόσθετο κριτήριο προκειμένου να εντοπίζονται εύκολα αλλά και γρήγορα πιθανή αριθμητική αδυναμία αλλά και λάθη αριθμητικών μοντέλων κατακόρυφης διήθησης που σχετίζονται με την

επίλυση του αριθμητικού προβλήματος και τελικώς να επιλέγεται η βέλτιστη χωρική διακριτοποίηση (spatial discretization) με σκοπό την απόκτηση όσο το δυνατόν αξιόπιστων αριθμητικών αποτελεσμάτων. Σε ένα πρώτο στάδιο, επαληθεύεται η γραμμικότητα της εξίσωσης κατακόρυφης διήθησης (Valiantzas, 2010) καθ' όλη τη διάρκεια εξέλιξης ενός γεγονότος διήθησης χρησιμοποιώντας αναλυτικά δεδομένα διήθησης. Σε ένα δεύτερο στάδιο, απεικονίζεται η μη γραμμική συμπεριφορά των αριθμητικών δεδομένων διήθησης στους αρχικούς χρόνους διήθησης, που προέρχονται από δύο αριθμητικά μοντέλα διαθέσιμα στη βιβλιογραφία, όταν αυτά εκφράζονται στη μορφή της παραπάνω γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης. Σε ένα τρίτο και τελευταίο στάδιο, η χρήση της παραπάνω γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης παρουσιάζεται ως ένας εύκολος και γρήγορος τρόπος εκτίμησης της ορθότητας αριθμητικών αποτελεσμάτων διήθησης που προέρχονται από το ευρέως διαδεδομένο λογισμικό πακέτο προσομοίωσης της κίνησης του εδαφικού νερού HYDRUS-1D (Simunek et al., 1998) με ταυτόχρονη εύρεση του καταλληλότερου χωρικού βήματος που χρησιμοποιείται ως παράμετρος εισαγωγής. Τα αριθμητικά αποτελέσματα από το HYDRUS-1D συγκρίνονται με αναλυτικά δεδομένα διήθησης διαθέσιμα στη βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 3

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Η εξίσωση διήθησης γραμμικής μορφής

Οι εξισώσεις διήθησης γραμμικής μορφής έχουν πλεονεκτήματα σε σχέση με τις κοινές μη γραμμικοποιημένες εξισώσεις διήθησης. Η οπτική παρατήρηση της γραμμικότητας μίας γραμμικής εξίσωσης διήθησης προσφέρει την δυνατότητα εκτίμησης της χρονικής διάρκειας στην οποία οι ιδανικές συνθήκες ενός γεγονότος διήθησης εξακολουθούν να ισχύουν. Όταν οι ιδανικές συνθήκες παραβιάζονται, π.χ. από κάποιο πιθανό λάθος κατά την διάρκεια ενός πειράματος μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης ή από κάποιο λάθος που πιθανώς υπεισέρχεται στα αριθμητικά δεδομένα διήθησης, η προσαρμογή μη γραμμικών εξισώσεων (non linear fitting) σε δεδομένα διήθησης I , τ δεν προσφέρει κανέναν έλεγχο σε ότι αφορά την επάρκεια της μορφής της μη γραμμικής εξίσωσης διήθησης σε σχέση με τα δεδομένα διήθησης και είναι δυνατόν οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων K_s , S που προκύπτουν με αυτή τη διαδικασία να μην έχουν καμία φυσική σημασία (Press et al., 1992; Clausnitzer et al., 1998; Vandervaere et al., 2000).

Πρόσφατα ο Valiantzas (2010) πρότεινε μία νέα εξίσωση μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης με δύο παραμέτρους. Ας δούμε πως προέκυψε η συγκεκριμένη εξίσωση μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης. Αρχικά εισήχθησαν κατάλληλες αδιάστατες μεταβλητές για την αθροιστική διήθηση και το χρόνο διήθησης στη δι-παραμετρική εξίσωση διήθησης του Philip (1957b) που έχει τη μορφή:

$$I = S\sqrt{\tau} + \lambda K_s \cdot \tau \quad (1)$$

όπου I [L] η αθροιστική διήθηση, τ [T] ο χρόνος διήθησης, K_s [L/T] η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό, S [L/T^{0.5}] η απορροφητικότητα, και λ αδιάστατη

μεταβλητή η τιμή της οποίας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $1/3 \leq \lambda \leq 2/3$ σύμφωνα με τους Youngs (1968), Philip (1969), Talsma and Parlange (1972) και Fuentes et al. (1992). Εν συνεχεία, οι ίδιες αδιάστατες μεταβλητές εισήχθησαν στις εξισώσεις των Green and Ampt (1911) και Talsma and Parlange (1972). Λαμβάνοντας υπόψη ότι η διηθητική συμπεριφορά των πραγματικών εδαφών υπόκειται μεταξύ των δύο ακραίων τιμών της παραμέτρου λ , δηλαδή θέτοντας $\lambda=1/3$ στην εξίσωση των Talsma and Parlange και $\lambda=2/3$ στην εξίσωση των Green and Ampt, προέκυψε μία προσεγγιστική τρι-παραμετρική αδιάστατη εξίσωση διήθησης. Η λύση της προαναφερθείσας προσεγγιστικής τρι-παραμετρικής αδιάστατης εξίσωσης διήθησης όταν αυτή υπόκειται προσεγγιστικά στο μέσο της διηθητικής συμπεριφοράς των πραγματικών εδαφών μεταξύ των ακραίων τιμών της παραμέτρου λ , και συγκεκριμένα για $\lambda=0.5$, οδήγησε τον Valiantzas (2010) στην παρακάτω εξίσωση μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης με δύο παραμέτρους:

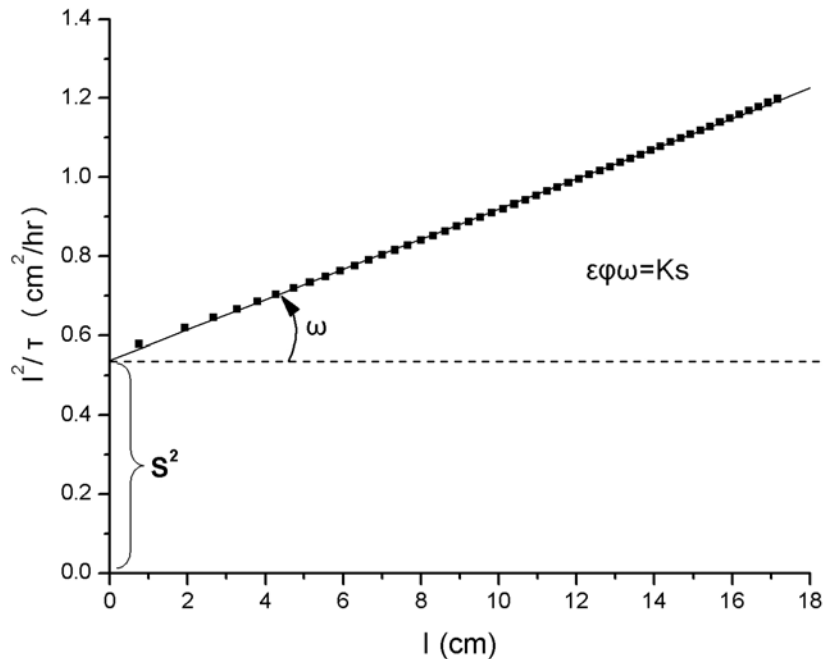
$$I = 0.5K_s \tau + S \sqrt{\tau} \left(1 + (0.5K_s / S)^2 \tau \right)^{1/2} \quad (2)$$

όπου I [L] η αθροιστική διήθηση, τ [T] ο χρόνος διήθησης, K_s [L/T] η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό και S [L/T^{0.5}] η απορροφητικότητα. Το πλεονέκτημα της εξίσωσης (2) είναι ότι μπορεί να μετασχηματιστεί στην παρακάτω γραμμικοποιημένη εξίσωση διήθησης:

$$\left(I^2 / \tau \right) = K_s \cdot (I) + S^2 \quad (3)$$

Η εξίσωση (3) δείχνει την γραμμικότητα των δεδομένων κατακόρυφης διήθησης όταν αυτά παρουσιάζονται σε ένα διάγραμμα όπου ο άξονας των X αντιπροσωπεύει τις τιμές της αθροιστικής διήθησης (I) και ο άξονας των Y τις τιμές $\left(I^2 / \tau \right)$. Η κλίση αυτής της ευθείας γραμμής (ή αλλιώς η εφαπτομένη της γωνίας που σχηματίζεται από αυτήν την ευθεία γραμμή) αντιπροσωπεύει το K_s ενώ το σημείο τομής της με τον άξονα των Y αντιπροσωπεύει το S^2 . Αυτά απεικονίζονται στο σχήμα (1) στο οποίο παρουσιάζονται αναλυτικά δεδομένα μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης για το έδαφος Yolo Light

Clay διαθέσιμα στη βιβλιογραφία (Haverkamp et al., 1988) εκπεφρασμένα στη μορφή της εξίσωσης (3).



Σχήμα 1. Απεικόνιση της γραμμικότητας αναλυτικών δεδομένων κατακόρυφης διήθησης για το έδαφος Yolo Light Clay (Haverkamp et al., 1988) εκπεφρασμένα στη μορφή της εξίσωσης (3).

Ο Valiantzas (2010) συγκρίνοντας την εξίσωση (3) με άλλες κοινές μη γραμμικές εξισώσεις διήθησης (δι-παραμετρικές και τρι-παραμετρικές) χρησιμοποιώντας πειραματικά και αναλυτικά δεδομένα μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης διαθέσιμα στη βιβλιογραφία για διάφορες αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η εξίσωση (3) παρέχει επαρκώς ακριβείς εκτιμήσεις των παραμέτρων K_s και S . Επίσης τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εκτιμήσεις των παραμέτρων K_s και S δεν επηρεάζονται πρακτικά από τον αριθμό των δεδομένων διήθησης στα οποία έγινε κάθε φορά η προσαρμογή (fitting) της εξίσωσης (3). Στην ίδια εργασία γίνεται μία σύγκριση της εξίσωσης (3) σε σχέση με τη γραμμικοποιημένη μορφή της εξίσωσης του Philip (εξίσωση 1) που προτάθηκε από τους Smiles and Knight (1976), και η οποία είναι:

$$I/\sqrt{\tau} = (\lambda K_s)\sqrt{\tau} + S \quad (4)$$

όπου I [L] η αθροιστική διήθηση, τ [T] ο χρόνος διήθησης, K_s [L/T] η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό, S [L/T^{0.5}] η απορροφητικότητα και $1/3 \leq \lambda \leq 2/3$. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εξίσωση (4) παρουσιάζει μέτρια γραμμική προσαρμογή σε σχέση με την εξίσωση (3), η εξίσωση (4) φαίνεται ακατάλληλη για την εκτίμηση της παραμέτρου K_s εφόσον η τιμή της παραμέτρου λ διαφέρει σημαντικά από έδαφος σε έδαφος και επιπλέον μεταβάλλεται σημαντικά με το χρόνο διήθησης (Haverkamp et al. 1988) και τέλος οι εκτιμήσεις της παραμέτρου S από την εξίσωση (4) είναι περισσότερο ανακριβείς σε σχέση με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις που προέρχονται από την εξίσωση (3). Εν ολίγοις, η γραμμικοποιημένη εξίσωση (3) υπερτερεί έναντι της αντίστοιχης εξίσωσης (4).

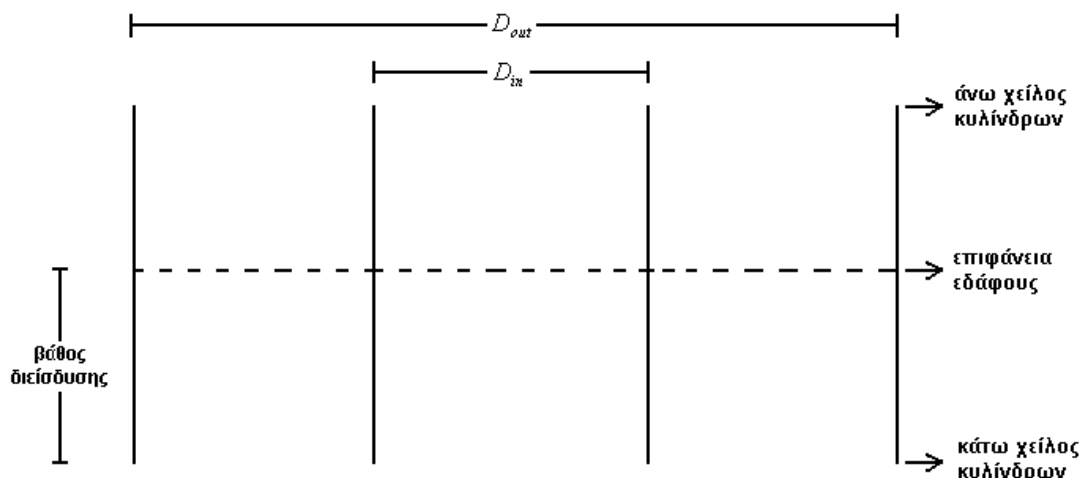
Στην παρούσα διδακτορική διατριβή η γραμμικοποιημένη εξίσωση μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης, εξίσωση (3), χρησιμοποιήθηκε για δύο λόγους:

1. Για τη διερεύνηση του φαινομένου της διήθησης κυλινδρικών διηθητόμετρων σταθερού φορτίου στην επιφάνεια του εδάφους με σκοπό την εύρεση μίας νέας μεθόδου προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων K_s και S .
2. Για την εκτίμηση της ορθότητας δεδομένων κατακόρυφης διήθησης που προέρχονται από αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης της κίνησης του εδαφικού νερού και την επιλογή του βέλτιστου χωρικού βήματος που οδηγεί στην απόκτηση όσο το δυνατόν ακριβέστερων αριθμητικών αποτελεσμάτων.

3.2 Ανάλυση του φαινομένου της διήθησης με κυλινδρικά διηθητόμετρα

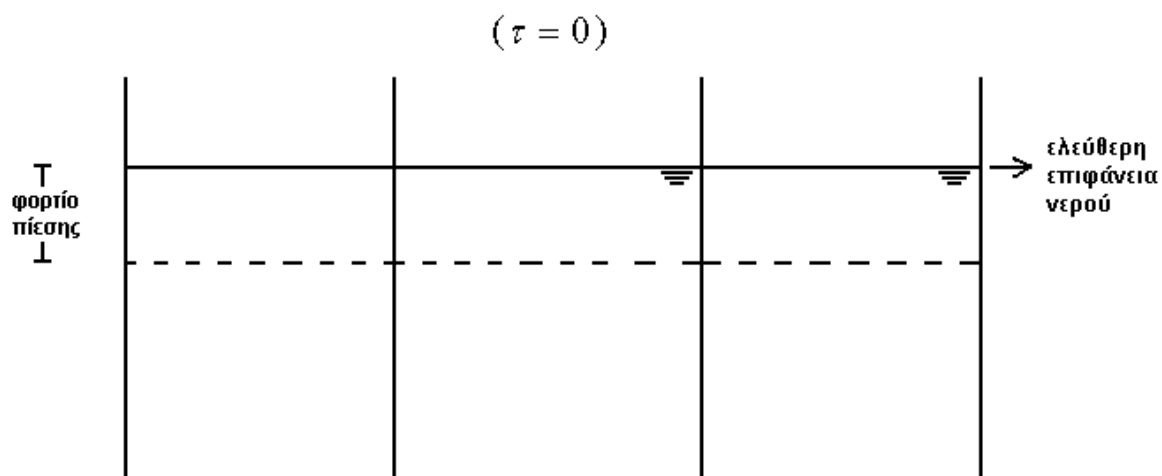
3.2.1 Διάταξη διπλού κυλίνδρου

Ας εξετάσουμε με λεπτομέρεια την εξέλιξη του φαινομένου της διήθησης στην περίπτωση ενός πειράματος με ομόκεντρους κυλίνδρους υπό το καθεστώς σταθερού φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους (σχήμα 2). Οι δύο κύλινδροι έχουν τοποθετηθεί στο ίδιο βάθος διείσδυσης μέσα στο έδαφος.



Σχήμα 2. Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης των ομόκεντρων κυλίνδρων. D_{in} , D_{out} οι διάμετροι του εσωτερικού και εξωτερικού κυλίνδρου αντίστοιχα.

Στον χρόνο μηδέν ($\tau = 0$), νερό ρίχνεται μέσα στους κυλίνδρους έτσι ώστε να υπάρχει το ίδιο ύψος νερού και στους δύο κυλίνδρους (σχήμα 3).



Σχήμα 3. Απεικόνιση της έναρξης ($\tau = 0$) ενός πειράματος διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων σταθερού φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους.

Αμέσως μετά το χρόνο μηδέν ξεκινάει η διήθηση του νερού μέσα στο έδαφος. Συγκεκριμένα το νερό αρχίζει να κινείται μέσα στο έδαφος κατά την κατακόρυφη διεύθυνση μόνο, εφόσον η κίνηση του εδαφικού νερού τόσο στον εσωτερικό κύλινδρο όσο και στον εξωτερικό κύλινδρο περιορίζεται από τα τοιχώματα των κυλίνδρων. Η

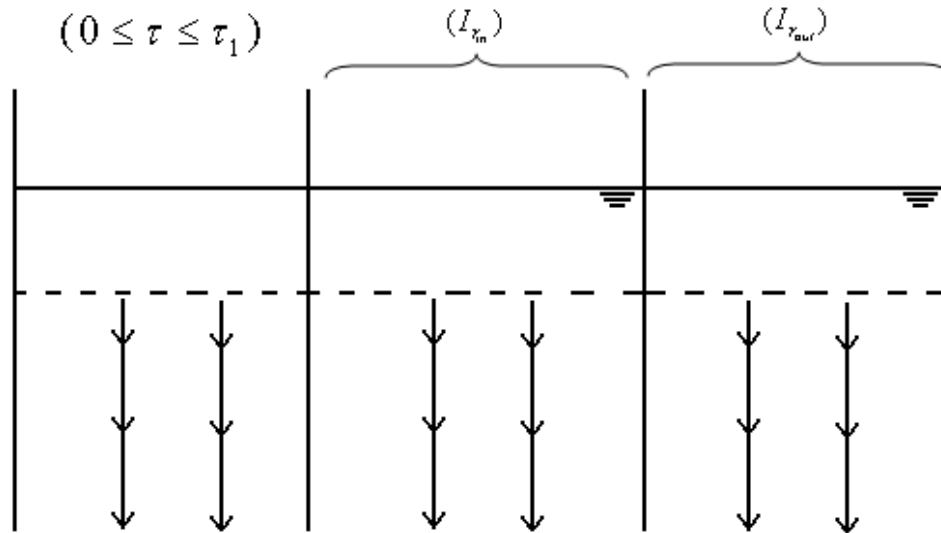
μονοδιάστατη κατακόρυφη κίνηση του εδαφικού νερού συνεχίζεται μέχρι την χρονική στιγμή τ_1 που το “μέτωπο διαβροχής” φτάνει στο κάτω χείλος των κυλίνδρων ($0 \leq \tau \leq \tau_1$). Είναι προφανές ότι η έννοια του “μετώπου διαβροχής” είναι πλέον σαφής για ελαφριά εδάφη και γίνεται λιγότερο σαφής σε βαριά εδάφη. Στη παρούσα διατριβή ορίζεται μάλλον αυθαίρετα σαν “μέτωπο διαβροχής” το μέτωπο όπου η τιμή της εδαφικής υγρασίας Θ ξεπερνά μία οριακή τιμή υγρασίας Θ_{op} που δίνεται από την σχέση:

$$\Theta_{op} = \Theta_{in} + \varepsilon_{\Delta\Theta} \quad (5)$$

όπου Θ_{in} [$L^{-3}L^{-3}$] είναι η αρχική υγρασία του εδάφους και $\varepsilon_{\Delta\Theta}$ [$L^{-3}L^{-3}$] είναι μία σχετικά μικρή, όμως πεπερασμένη, αύξηση της αρχικής υγρασιακής κατάστασης Θ_{in} του εδάφους. Μέχρι τη χρονική στιγμή τ_1 η μονοδιάστατη κατακόρυφη διήθηση, που λαμβάνει χώρα τόσο στον εσωτερικό όσο και στον εξωτερικό κύλινδρο, έχει τα ίδια ποσοτικά χαρακτηριστικά στην περίπτωση όπου οι δύο κύλινδροι έχουν τοποθετηθεί στο ίδιο βάθος μέσα στο έδαφος και διατηρείται ίδιο το φορτίο πίεσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού μέσα στους κυλίνδρους και πάνω στην επιφάνεια του εδάφους καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Εν ολίγοις μέχρι τη χρονική στιγμή τ_1 , δηλαδή τη χρονική στιγμή που το “μέτωπο διαβροχής” φτάνει στο κάτω χείλος των κυλίνδρων, η μετρούμενη αθροιστική διήθηση στον εσωτερικό κύλινδρο ($I_{r_{in}}$) είναι ίση με την μετρούμενη αθροιστική διήθηση στον εξωτερικό κύλινδρο ($I_{r_{out}}$) και αυτές με τη σειρά τους έχουν ίδιες ακριβώς τιμές με την μονοδιάστατη κατακόρυφη αθροιστική διήθηση (I_{1D}) συναρτήσει του χρόνου διήθησης τ (σχήμα 4), δηλαδή ισχύει:

$$(I_{r_{in}}) = (I_{r_{out}}) = (I_{1D}), \quad 0 \leq \tau \leq \tau_1 \quad (6)$$

Προς αποφυγήν οποιασδήποτε παρεξήγησης σημειώνεται ότι ο όρος ($I_{r_{out}}$) εκφράζει την αθροιστική διήθηση που μετράται στο δακτύλιο που δημιουργείται μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού κυλίνδρου.



Σχήμα 4. Απεικόνιση της μονοδιάστατης κατακόρυφης κίνησης του εδαφικού νερού μέχρι τη χρονική στιγμή που το “μέτωπο διαβροχής” φτάνει στο κάτω χείλος των ομόκεντρων κυλίνδρων ($0 \leq \tau \leq \tau_1$).

Όταν το “μέτωπο διαβροχής” ξεπεράσει το κάτω χείλος των κυλίνδρων, δηλαδή για χρόνους $\tau > \tau_1$, η μονοδιάστατη κατακόρυφη κίνηση του εδαφικού νερού στον εξωτερικό κύλινδρο παύει να υφίσταται διότι το νερό πλέον κινείται και πλευρικά λόγω του τριχοειδούς φαινομένου και επομένως η αθροιστική διήθηση στον εξωτερικό κύλινδρο λαμβάνει πλέον μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές της μονοδιάστατης κατακόρυφης κίνησης του εδαφικού νερού συναρτήσει του χρόνου διήθησης τ . Για τους ίδιους χρόνους, $\tau > \tau_1$, η πλευρική κίνηση του νερού κάτω από τον εσωτερικό κύλινδρο περιορίζεται λόγω της διήθησης του νερού στο μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού κυλίνδρου και η μετρούμενη αθροιστική διήθηση στον εσωτερικό κύλινδρο ενδέχεται να έχει τιμές που μπορεί να είναι κοντινές ή αρκετά κοντινές στις

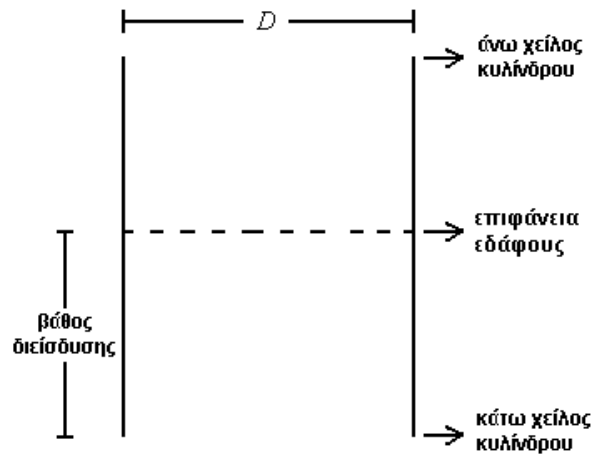
αντίστοιχες τιμές της μονοδιάστατης κατακόρυφης κίνησης. Αγνοώντας το αν η μετρούμενη αθροιστική διήθηση στον εσωτερικό κύλινδρο προσεγγίζει ή όχι τη μονοδιάστατη κατακόρυφη κίνηση, παρ' όλα αυτά η αθροιστική διήθηση στον εξωτερικό κύλινδρο αρχίζει να έχει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στον εσωτερικό κύλινδρο για χρόνους $\tau > \tau_1$. Επομένως θα ισχύει:

$$(I_{r_{out}}) > (I_{r_{in}}) \quad \tau > \tau_1 \quad (7)$$

Η τυποποιημένη μέθοδος χρήσης της διάταξης των ομόκεντρων κυλίνδρων βασίζεται στη μέτρηση της αθροιστικής διήθησης μόνο του εσωτερικού κυλίνδρου (<http://www.fao.org/docrep/s8684e/s8684e0a.htm#annex>). Ο εξωτερικός κύλινδρος χρησιμοποιείται με μοναδικό σκοπό τη μείωση της πλευρικής ροής στον εσωτερικό κύλινδρο από τον οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις της αθροιστικής διήθησης. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή οι μετρήσεις αθροιστικής διήθησης τόσο από τον εσωτερικό όσο και από τον εξωτερικό κύλινδρο αξιοποιούνται με σκοπό την εύρεση μια νέας μεθόδου προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους K_s και S . Σε ένα πρώτο στάδιο, τα δεδομένα $(I_{r_{in}})$, $(I_{r_{out}})$ μετασχηματίζονται στη μορφή της γραμμικής εξίσωσης (3) προκειμένου να εντοπιστεί με γραφικό τρόπο ο χρόνος τ_1 , δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει το “μέτωπο διαβροχής” το κάτω χείλος των κυλίνδρων. Σε ένα δεύτερο στάδιο, η γραμμική εξίσωση (3) προσαρμόζεται πάνω στα δεδομένα $(I_{r_{in}})$, $(I_{r_{out}})$ μέχρι τον χρόνο τ_1 που εντοπίστηκε γραφικά στο πρώτο στάδιο και εξετάζεται ο προσδιορισμός των K_s , S . Η προτεινόμενη μέθοδος δοκιμάστηκε χρησιμοποιώντας αριθμητικά δεδομένα ομόκεντρων κυλίνδρων για τέσσερα εδάφη που προέρχονται από το λογισμικό πακέτο HYDRUS-(2D/3D) και επαληθεύτηκε από πειραματικά δεδομένα ομόκεντρων κυλίνδρων μετά από ελεγχόμενο πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής του Γ.Π.Α.

3.2.2 Διάταξη μονού κυλίνδρου

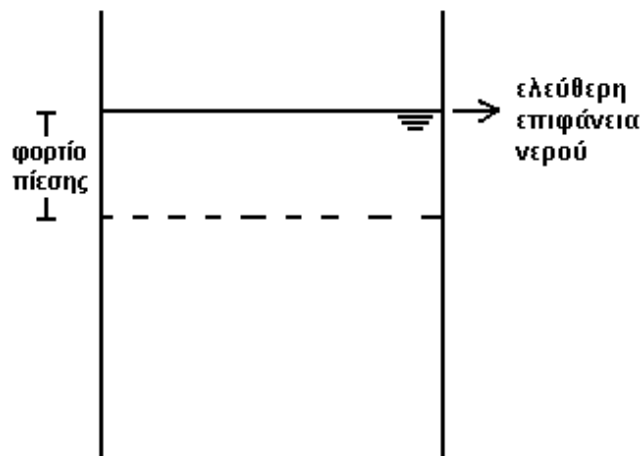
Η εξέλιξη του φαινομένου της διήθησης στην περίπτωση ενός πειράματος με μονό κύλινδρο υπό το καθεστώς σταθερού φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους (σχήμα 5) έχει διαφορές και ομοιότητες σε σχέση με τη συσκευή των ομόκεντρων κυλίνδρων.



Σχήμα 5. Απεικόνιση κυλινδρικού διηθητόμετρου με μονό κύλινδρο διαμέτρου D .

Στο χρόνο μηδέν ($\tau = 0$), νερό ρίχνεται μέσα στον κύλινδρο (σχήμα 6), όπως και στην περίπτωση του διπλού κυλίνδρου. Το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους και μέσα στον κύλινδρο διατηρείται σταθερό μέχρι το τέλος του πειράματος.

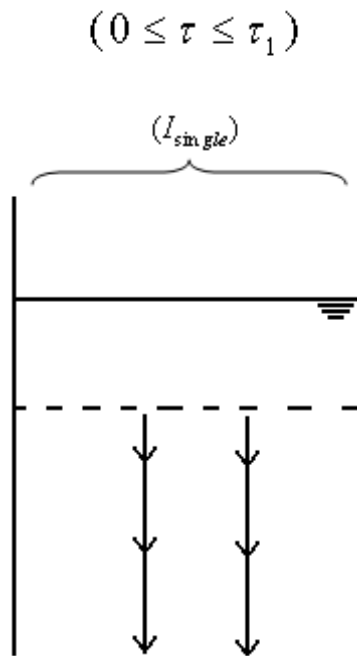
($\tau = 0$)



Σχήμα 6. Απεικόνιση της έναρξης ($\tau = 0$) ενός πειράματος διήθησης με μονό κύλινδρο σταθερού φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους.

Αμέσως μετά τον χρόνο μηδέν ξεκινάει η διήθηση του νερού μέσα στο έδαφος. Όπως και στην περίπτωση του διπλού κυλίνδρου, το νερό αρχίζει να κινείται μέσα στο έδαφος κατά την κατακόρυφη διεύθυνση μόνο, εφόσον η κίνηση του εδαφικού νερού περιορίζεται από τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Η μονοδιάστατη κατακόρυφη κίνηση του εδαφικού νερού μέσα στον κύλινδρο συνεχίζεται μέχρι την χρονική στιγμή τ_1 που το “μέτωπο διαβροχής” φτάνει στο κάτω χείλος του κυλίνδρου ($0 \leq \tau \leq \tau_1$). Μέχρι αυτή τη χρονική στιγμή, η μετρούμενη αθροιστική διήθηση στον μονό κύλινδρο (I_{single}) είναι ουσιαστικά η μονοδιάστατη κατακόρυφη αθροιστική διήθηση (I_{1D}) του εδάφους συναρτήσει του χρόνου διήθησης τ (σχήμα 7), δηλαδή ισχύει:

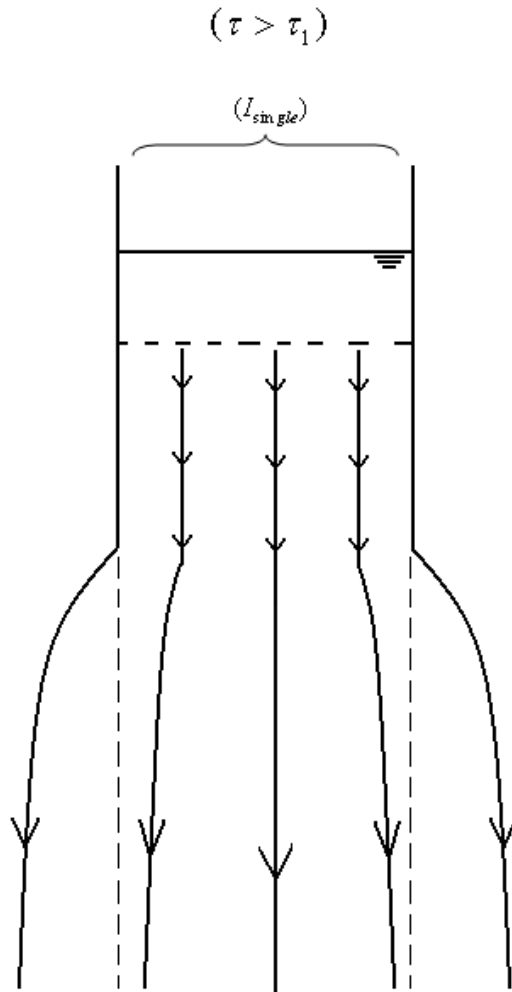
$$(I_{single}) = (I_{1D}), \quad 0 \leq \tau \leq \tau_1 \quad (8)$$



Σχήμα 7. Απεικόνιση της μονοδιάστατης κατακόρυφης κίνησης του εδαφικού νερού μέχρι τη χρονική στιγμή που το “μέτωπο διαβροχής” φτάνει στο κάτω χείλος του μονού κυλίνδρου ($0 \leq \tau \leq \tau_1$).

Όταν το “μέτωπο διαβροχής” ξεπεράσει το κάτω χείλος των κυλίνδρων, δηλαδή για χρόνους $\tau > \tau_1$, η μονοδιάστατη κατακόρυφη κίνηση του εδαφικού νερού στον κύλινδρο παύει να υφίσταται διότι το νερό πλέον κινείται και πλευρικά λόγω του τριχοειδούς φαινομένου (σχήμα 8). Επομένως η μετρούμενη αθροιστική διήθηση στον κύλινδρο, (I_{single}) , αρχίζει να έχει μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με την μονοδιάστατη κατακόρυφη αθροιστική διήθηση (I_{1D}) συναρτήσει του χρόνου διήθησης τ , δηλαδή:

$$(I_{single}) > (I_{1D}), \quad \tau > \tau_1 \quad (9)$$



Σχήμα 8. Απεικόνιση της πλευρικής ροής του εδαφικού νερού όταν το “μέτωπο διαβροχής” ξεπεράσει το κάτω χείλος του μονού κυλίνδρου ($\tau > \tau_1$).

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, όπως έγινε και στην περίπτωση των ομόκεντρων κυλίνδρων, τα δεδομένα (I_{single}) μετασχηματίζονται στη μορφή της γραμμικής εξίσωσης διήθησης (3) με σκοπό να εξεταστεί κατά πόσο είναι εφικτός ο προσδιορισμός των υδραυλικών ιδιοτήτων K_s , S του εδάφους με τη συγκεκριμένη τεχνική. Για τη διερεύνηση της συγκεκριμένης διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν αριθμητικά δεδομένα διήθησης μονού κυλίνδρου που προέρχονται από το λογισμικό πακέτο HYDRUS-(2D/3D) για τα τέσσερα εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν και στην περίπτωση των ομόκεντρων κυλίνδρων.

3.2.3 Αριθμητικά δεδομένα διήθησης κυλινδρικών διηθητόμετρων (μονός – διπλός κύλινδρος)

Η προτεινόμενη μέθοδος προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους K_s , S από δεδομένα αθροιστικής διήθησης κυλινδρικών διηθητόμετρων δοκιμάστηκε χρησιμοποιώντας αριθμητικά δεδομένα κυλινδρικών διηθητόμετρων (μονός – διπλός κύλινδρος) που προέρχονται από το λογισμικό πακέτο HYDRUS-(2D/3D) (Šimůnek et al., 2006). Στο παραπάνω αριθμητικό μοντέλο η εξίσωση του Richards' επιλύεται αριθμητικά με τη βοήθεια ενός γραμμικού σχήματος πεπερασμένων στοιχείων (Galerkin type linear finite element scheme). Το HYDRUS-(2D/3D) έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές για την προσομοίωση του φαινομένου της διήθησης σε κυλινδρικά διηθητόμετρα αλλά και διηθητόμετρα δίσκου (ενδεικτικά: Ramos et al., 2006; Lai and Ren, 2007; Bagarello et al., 2010; Kodešová et al., 2010; Lai et al., 2010; Alberti and Cey, 2011). Πρόκειται για ένα λογισμικό πακέτο που είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο στην επιστημονική κοινότητα (<http://www.pc-progress.com/en-/Default.aspx?h3d-references>) τα αποτελέσματα του οποίου θεωρούνται ακριβή και αξιόπιστα.

Προκειμένου να καλυφθεί ένα ευρύ φάσμα των εδαφικών υδραυλικών ιδιοτήτων, επιλέχθηκαν τα εξής τέσσερα εδάφη από τη βιβλιογραφία: Grenoble Sand (Haverkamp et al., 1988), Soil and Sand mixture (Poulovassilis et al., 1989), Guelph Loam (van Genuchten, 1980) και Yolo Light Clay (Warrick, 2003). Οι καμπύλες $\theta(h)$, $K(\theta)$ αποδίδονται από το μοντέλο των van Genuchten – Mualem (1980) σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\Theta(h) = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{(1 + (\alpha \cdot h)^n)^m}, \quad h < 0 \quad (10)$$

$$\Theta(h) = \Theta_s, \quad h \geq 0 \quad (11)$$

$$K(\Theta) = K_s \cdot \left(\frac{\Theta(h) - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r} \right)^l \cdot \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\Theta(h) - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (12)$$

όπου $\Theta(h)$ [L^3L^{-3}] η κατ' όγκο περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, Θ_r [L^3L^{-3}] η υπολειπόμενη περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό, Θ_s [L^3L^{-3}] η κατ' όγκο περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό στον κορεσμό, h [L] το φορτίο πίεσης, $K(\Theta)$ [LT^{-1}] η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους συναρτήσσει της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό, και α [L^{-1}], n (αδιάστατη παράμετρος) και m (αδιάστατη παράμετρος) αριθμητικές εμπειρικές παράμετροι με $m = 1 - \frac{1}{n}$, $n > 1$. Οι υδραυλικές ιδιότητες των τεσσάρων εδαφών παρουσιάζονται στο πίνακα (1). Στις προσομοιώσεις για το έδαφος Guelph Loam επιλέχθηκε $h_s = -2\text{cm}$ (air-entry pressure) για την καλύτερη πρόβλεψη της υδραυλικής αγωγιμότητας από την αντίστοιχη συνάρτηση (Vogel et al., 2001).

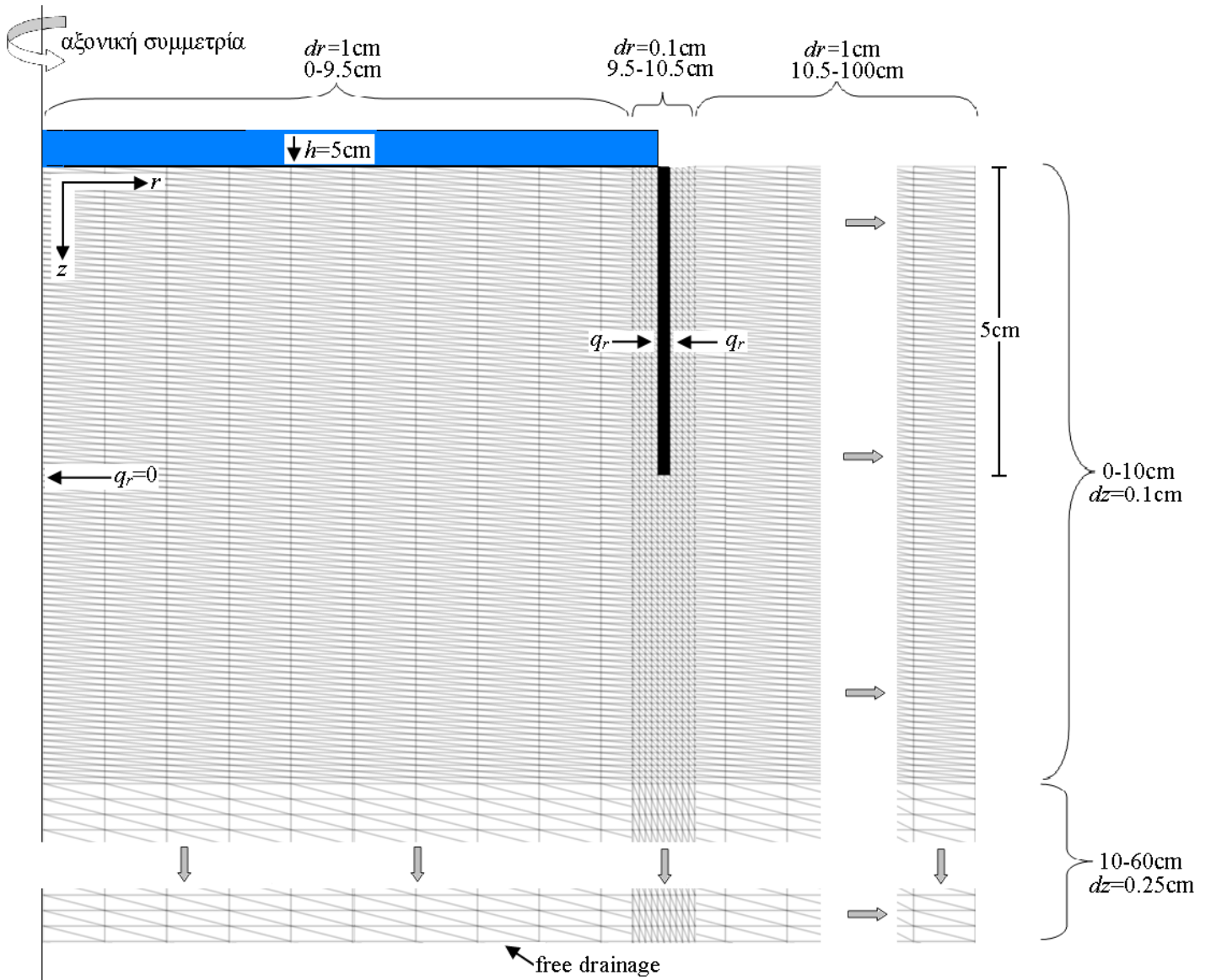
Έδαφος	θ_s (-)	θ_r (-)	α (cm^{-1})	n (-)	l (-)	h_s (cm)	$K_s = K_{s,o}$ (cm/min)	S_o ($\text{cm}/\text{min}^{0.5}$)
Grenoble Sand	0.312	0.06	0.0426	2.899	0.5	-	0.2553	1.47
Soil and Sand Mixture	0.312	0.208	0.221	2.404	0.5	-	0.012	0.128
Guelph Loam	0.52	0.218	0.115	2.03	0.5	-2	0.02194	0.6652
Yolo Light Clay	0.495	0.124	0.015	2	0.5	-	0.0007383	0.1069

Πίνακας 1. Υδραυλικές ιδιότητες των τεσσάρων υπό μελέτη εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις του φαινομένου της διήθησης με κυλινδρικά διηθητόμετρα (μονός – διπλός κύλινδρος). $K_{s,o}$ και S_o οι “πραγματικές τιμές” της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό και της απορροφητικότητας αντίστοιχα.

Σε όλες τις προσομοιώσεις (μονός – διπλός κύλινδρος) χρησιμοποιήθηκε ορθογώνιο πλέγμα βάθους 60cm και μήκους 100cm με αξονική συμμετρία. Με την αξονική συμμετρία, δηλαδή με χρήση κυλινδρικών συντεταγμένων (r, z), το τρισδιάστατο πρόβλημα της διήθησης του εδαφικού νερού στα κυλινδρικά διηθητόμετρα ανάγεται ουσιαστικά σε ένα δισδιάστατο πρόβλημα. Στην περίπτωση των ομόκεντρων κυλίνδρων, η ακτίνα του εσωτερικού και του εξωτερικού κυλίνδρου ήταν 5cm και 10cm αντίστοιχα και για τα τέσσερα εδάφη ενώ το βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων στο έδαφος ήταν 5cm, 10cm, 15cm για τα εδάφη Grenoble Sand και Soil and Sand mixture και 5cm, 10cm για τα εδάφη Guelph Loam και Yolo Light Clay. Στην περίπτωση του μονού κυλίνδρου η ακτίνα και το βάθος διείσδυσης ήταν 10cm και 5cm αντίστοιχα σε όλες τις περιπτώσεις. Όσον αφορά την κατακόρυφη διεύθυνση του πλέγματος, το χωρικό βήμα dz τέθηκε ίσο με 0.1cm για τα πρώτα 10cm από την επιφάνεια του εδάφους και 0.25cm για τα υπόλοιπα 50cm του πλέγματος με σκοπό να αποκτηθούν όσο το δυνατόν πιο ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα σύμφωνα με την εργασία των Valiantzas et al. (2011). Αν και στη συγκεκριμένη εργασία (Valiantzas et al., 2011) προτείνεται μια μεθοδολογία επιλογής του βέλτιστου χωρικού βήματος dz που οδηγεί στην απόκτηση αξιόπιστων αριθμητικών αποτελεσμάτων στην περίπτωση της μονοδιάστατης κατακόρυφης κίνησης του εδαφικού νερού, ωστόσο η συγκεκριμένη εργασία βρίσκει εφαρμογή και στην αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου της διήθησης με κυλινδρικά διηθητόμετρα (μονός – διπλός κύλινδρος) όπου στους αρχικούς χρόνους διήθησης και μέχρι το “μέτωπο διαβροχής” να φτάσει στο κάτω χείλος των κυλίνδρων η κίνηση του νερού στο έδαφος είναι μονοδιάστατη και κατακόρυφη. Όσον αφορά την οριζόντια διεύθυνση του πλέγματος, το χωρικό βήμα dr τέθηκε ίσο με 1cm, εκτός από την περιοχή πλησίον των τοιχωμάτων των κυλίνδρων (δηλαδή στα 5cm και 10cm για τους ομόκεντρους κυλίνδρους και στα 10cm για τον μονό κύλινδρο) όπου τέθηκε ίσο με 0.1cm. Η συγκεκριμένη επιλογή του dr έγινε με σκοπό να οριοθετηθούν τα τοιχώματα των κυλίνδρων μέσα στο πλέγμα. Οι χρόνοι προσομοίωσης τόσο στην περίπτωση των ομόκεντρων κυλίνδρων όσο και στην περίπτωση του μονού κυλίνδρου ήταν 30min, 300min, 300min, και 1200min για τα εδάφη Grenoble Sand, Soil and Sand mixture, Guelph Loam και Yolo Light Clay αντίστοιχα.

Η οριακή συνθήκη που χρησιμοποιήθηκε στο άνω όριο του πλέγματος (επιφάνεια του εδάφους) και μέσα στα κυλινδρικά διηθητόμετρα (μονός – διπλός κύλινδρος) είναι τύπου Dirichlet, δηλαδή ένα σταθερό φορτίο πίεσης ίσο με $h=5\text{cm}$ καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η οριακή συνθήκη στο κάτω όριο του πλέγματος ήταν ελεύθερη στράγγιση (free drainage). Η οριακή συνθήκη που εφαρμόστηκε στον άξονα συμμετρίας z καθώς και στα τοιχώματα των κυλίνδρων είναι τύπου Neumann όπου η ειδική παροχή του Darcy τέθηκε ίση με το μηδέν, δηλαδή $q_r = 0$. Όσον αφορά τις αρχικές συνθήκες διήθησης, σε όλες τις περιπτώσεις το αρχικό υγρασιακό καθεστώς (και κατ' επέκταση και το αρχικό φορτίο πίεσης) ήταν ομοιόμορφο σε όλο το εδαφικό προφίλ. Οι τιμές της αρχικής υγρασίας και του αρχικού φορτίου πίεσης ήταν 0.08 ($h=-85\text{cm}$), 0.2 ($h=-200\text{cm}$), 0.27 ($h=-500\text{cm}$) και 0.24 ($h=-200\text{cm}$) για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη Grenoble Sand, Soil and Sand mixture, Guelph Loam και Yolo Light Clay αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι μετά το τέλος κάθε αριθμητικής προσομοίωσης ακολουθούσε ενδεδειγμένος έλεγχος στα αριθμητικά αποτελέσματα προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι δεν υπεισέρχονται σε αυτά λάθη που προέρχονται από τυχόν αστοχίες κατά την διαδικασία εισόδου όλων των δεδομένων εισαγωγής (input parameters) στο αριθμητικό μοντέλο. Το σφάλμα του υδατικού ισοζυγίου σε όλες τις προσομοιώσεις ήταν μικρότερο του 0.3% (μια ιδιαίτερα αποδεκτή τιμή σφάλματος) και το “μέτωπο διαβροχής” δεν ξεπερνούσε το κάτω όριο του πλέγματος.

Ενδεικτικά, στο σχήμα (9) απεικονίζεται η διακριτοποίηση του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στις αριθμητικές προσομοιώσεις του φαινομένου της διήθησης με μονό κύλινδρο ακτίνας 10cm και βάθους διείσδυσης ίσο με 5cm.



Σχήμα 9. Απεικόνιση της διακριτοποίησης του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε στις αριθμητικές προσομοιώσεις του φαινομένου της διήθησης με μονό κύλινδρο ακτίνας 10cm και βάθους διείσδυσης 5cm. Η έντονη μαύρη γραμμή αντιπροσωπεύει το τοίχωμα του κυλίνδρου.

3.2.4 Αριθμητικά δεδομένα οριζόντιας και κατακόρυφης διήθησης

Για να εκτιμήσουμε αριθμητικά τις τιμές των υδραυλικών παραμέτρων K_s , S που προσδιορίζονται με την προτεινόμενη μέθοδο, οι τιμές των K_s , S πρέπει να συγκριθούν με τις “πραγματικές τιμές” τους ούτως ώστε να υπάρχει ένα σημείο αναφοράς. Οι “πραγματικές τιμές” της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό, $K_{s,o}$, θεωρείται ότι είναι οι τιμές του K_s που λαμβάνονται από την βιβλιογραφία για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη, δηλαδή $K_s = K_{s,o}$ και απεικονίζονται στον πίνακα (1). Οι “πραγματικές τιμές” της απορροφητικότητας, S_o , προσδιορίστηκαν από αριθμητικά δεδομένα οριζόντιας διήθησης που προέρχονται από το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της μονοδιάστατης κίνησης του εδαφικού νερού HYDRUS-1D (Šimůnek et al., 1998). Συγκεκριμένα το HYDRUS-1D χρησιμοποιήθηκε για να παραχθούν αριθμητικά δεδομένα οριζόντιας διήθησης για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη με τις ίδιες ακριβώς αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις του φαινομένου της διήθησης με κυλινδρικά διηθητόμετρα. Εν συνεχεία, προκειμένου να υπολογιστούν οι πραγματικές τιμές της απορροφητικότητας S_o , στα αποκτούμενα δεδομένα οριζόντιας αθροιστικής διήθησης συναρτήσεως του χρόνου $\tau^{0.5}$ προσαρμόστηκε η εξίσωση οριζόντιας διήθησης του Philip:

$$I_{horizontal} = S_o \cdot \tau^{0.5} \quad (13)$$

όπου $I_{horizontal}$ [L] η αθροιστική διήθηση ανά μονάδα επιφάνειας, τ [T] ο χρόνος διήθησης και S_o [L/T^{0.5}] η “πραγματική τιμή” της απορροφητικότητας. Οι τιμές του S_o που υπολογίστηκαν με αυτή τη διαδικασία απεικονίζονται στον πίνακα (1).

Με το αριθμητικό μοντέλο HYDRUS-1D προσομοιώθηκε και η μονοδιάστατη κατακόρυφη κίνηση του εδαφικού νερού για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη και για τις ίδιες ακριβώς αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης όπως στην περίπτωση της οριζόντιας διήθησης. Αυτό έγινε προκειμένου να δειχθεί η ισχυρά γραμμική συμπεριφορά των δεδομένων κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης I_{1D} όταν αυτά μετασχηματίζονται στην μορφή της εξίσωσης (3) (Valiantzas, 2010; Valiantzas et al.,

2011). Τέλος υπολογίστηκαν οι παράμετροι προσαρμογής $K_{s,es}^{(1D)}$, $S_{es}^{(1D)}$ προσαρμόζοντας την εξίσωση (3) στα αριθμητικά δεδομένα I_{1D} .

3.2.5 Πειραματικά δεδομένα διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων

Για την πειραματική επαλήθευση της προτεινόμενης μεθόδου προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους K_s και S , πραγματοποιήθηκε ελεγχόμενο πείραμα ομόκεντρων κυλίνδρων σε συνθήκες εργαστηρίου.

Το πορώδες μέσο

Το πορώδες μέσο που επιλέχθηκε ήταν μίξη χώματος που προέρχεται από τον αγρό του Γ.Π.Α και χαλαζιακής άμμου εμπορίου με κατ' όγκο αναλογία 20% χώμα – 80% άμμος. Για την εύρεση της κοκκομετρικής σύστασης του χώματος από τον αγρό του Γ.Π.Α ελήφθησαν με τη βοήθεια ενός δειγματολήπτη 8 δείγματα εδάφους ανά 20cm από την επιφάνεια του εδάφους και σε βάθος έως 160cm (0-20cm, 20-40cm, 40-60cm, 60-80cm, 80-100cm, 100-120cm, 120-140cm, 140-160cm). Η εργαστηριακή ανάλυση των δειγμάτων έδειξε ότι πρόκειται για ένα έδαφος Loam (πίνακας 2). Με την ίδια εργαστηριακή ανάλυση βρέθηκαν και τα κλάσματα της άμμου (πίνακας 3). Η μίξη του χώματος με την άμμο πραγματοποιήθηκε αφού πρώτα όλη η ποσότητα του χώματος πέρασε από κόσκινο 2mm για την απομάκρυνση τυχόν λίθων και εφόσον είχε προηγηθεί αεροζήρανση του χώματος για περίπου τρεις εβδομάδες. Επίσης για την εύρεση των τιμών της κατά βάρος υγρασίας για τη μίξη χώματος-άμμου αλλά και για την άμμο στις αρνητικές πιέσεις που αντιστοιχούν στο ισοδύναμο υγρασίας και το σημείο μάρανσης, χρησιμοποιήθηκε η συσκευή Richards του Ινστιτούτου Εδαφολογίας Αθηνών (ΕΘΙΑΓΕ) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα (4).

Sample ID	Sand	Clay	Silt	Texture
B1(0-20cm)	33	23	44	loam
B2(20-40cm)	28	26	46	loam
B3(40-60cm)	32	23	45	loam
B4(60-80cm)	40	21	39	loam
B5(80-100cm)	38	19	43	loam
B6(100-120cm)	37	23	40	loam
B7(120-140cm)	40	22	38	loam
B8(140-160cm)	40	28	32	clay loam

Πίνακας 2. Κοκκομετρική σύσταση χόματος από αγρό του Γ.Π.Α.

Διάμετρος άμμου	Ποσοστό κλάσματος
$d > 0.35\text{mm}$	12.7 %
$0.35\text{mm} > d > 0.21\text{mm}$	71.7%
$0.21\text{mm} > d > 0.105\text{mm}$	15%
$d < 0.105$	0.6%

Πίνακας 3. Κοκκομετρική σύσταση χαλαζιακής άμμου εμπορίου.

Πορώδες μέσο	Ισοδύναμο (-330cm)	Σημείο μάρανσης (-15000cm)
Άμμος	$0.0088 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	$0.0005 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
Μίξη χόματος-άμμου	$0.0211 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$	$0.0057 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

Πίνακας 4. Κατά βάρος υγρασία για τη μίξη χόματος-άμμου αλλά και για την άμμο στις αρνητικές πιέσεις που αντιστοιχούν στο ισοδύναμο υγρασίας και το σημείο μάρανσης χρησιμοποιώντας η συσκευή Richards.

Προεργασία πειράματος ομόκεντρων κυλίνδρων – Πείραμα κατακόρυφης διήθησης

Η προεργασία του πειράματος ομόκεντρων κυλίνδρων αφορά σε ένα πείραμα μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης στο ίδιο πορώδες μέσο (μίξη χώματος - άμμου). Το συγκεκριμένο πείραμα κατακόρυφης διήθησης έλαβε χώρα για δύο λόγους:

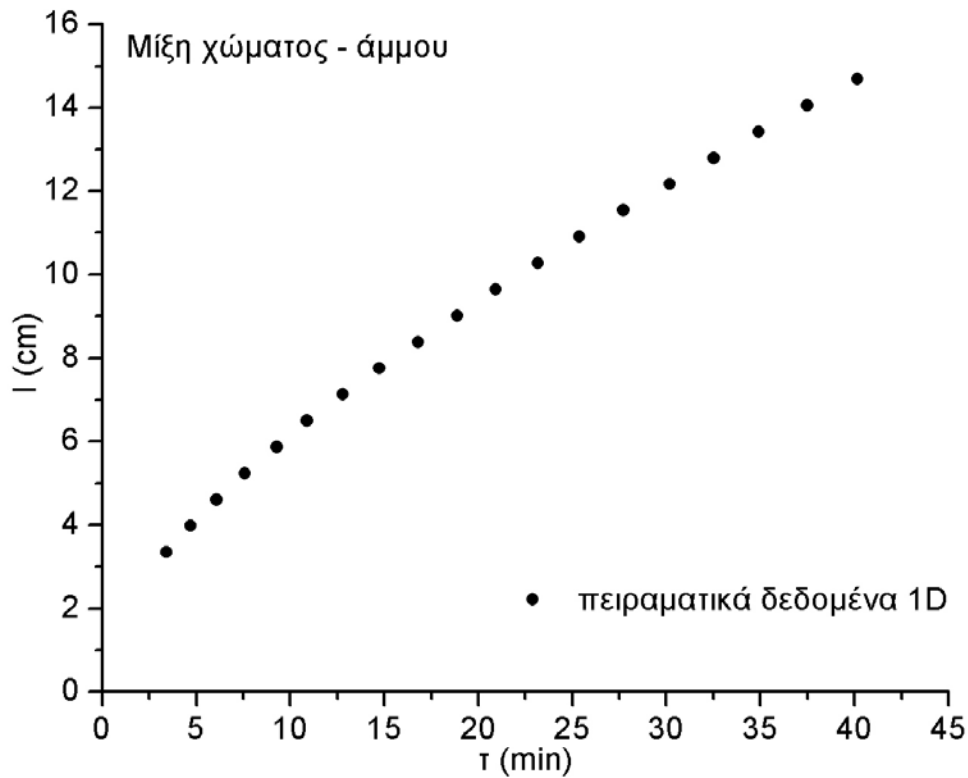
1. Για να αποκτηθούν γενικές πληροφορίες για τη διηθητική συμπεριφορά του συγκεκριμένου πορώδους μέσου.
2. Για να ελεγχθεί η δυνατότητα εφαρμογής της γραμμικοποιημένης εξίσωσης (3) στα αποκτούμενα δεδομένα κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης του συγκεκριμένου πορώδους μέσου.

Το πείραμα κατακόρυφης διήθησης πραγματοποιήθηκε σε κύλινδρο από plexiglas διαμέτρου 8cm και ύψους 45cm (σχήμα 10).



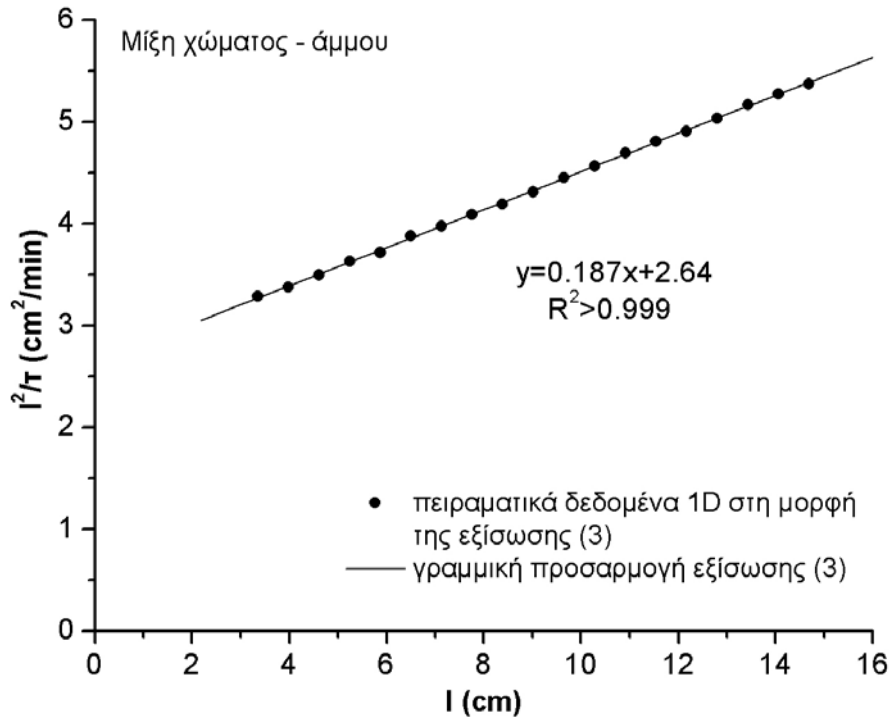
Σχήμα 10. Φωτογραφία κατά τη διάρκεια του πειράματος μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης της μίξης χώματος-άμμου.

Το συγκεκριμένο υλικό (plexiglas) μας έδωσε τη δυνατότητα της οπτικής παρατήρησης της κίνησης του “μετώπου διαβροχής” κατά τη διάρκεια του πειράματος. Η κατακόρυφη κίνηση του “μετώπου διαβροχής” ήταν ομοιόμορφη σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η οριακή συνθήκη στο άνω όριο του πορώδους μέσου ήταν ένα σταθερό φορτίο πίεσης ίσο με 2cm καθ’ όλη τη διάρκεια του πειράματος, ενώ στο κάτω όριο ήταν ελεύθερη στράγγιση. Όσον αφορά την αρχική συνθήκη διήθησης, το πορώδες μέσο ήταν ξηρό κατά την τοποθέτηση του μέσα στον κύλινδρο. Στο σχήμα (11) απεικονίζονται τα δεδομένα κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης που προέκυψαν από το συγκεκριμένο πείραμα.



Σχήμα 11. Πειραματικά δεδομένα μονοδιάστατης κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης της μίξης χώματος-άμμου.

Στο σχήμα (12) απεικονίζονται τα ίδια πειραματικά αποτελέσματα εκπεφρασμένα στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) καθώς και η γραμμική προσαρμογή (linear fitting) της εξίσωσης (3) στα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 12. Απεικόνιση πειραματικών δεδομένων μονοδιάστατης κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης της μίξης χώματος-άμμου στη μορφή της εξίσωσης (3).

Από το σχήμα (12) επιβεβαιώνεται η γραμμικότητα των πειραματικών δεδομένων μονοδιάστατης κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης της μίξης χώματος-άμμου όταν αυτά εκφράζονται στη μορφή της εξίσωσης (3) (Valiantzas, 2010). Ο συντελεστής προσδιορισμού της γραμμικής προσαρμογής της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) στα πειραματικά αποτελέσματα είναι $R^2 > 0.999$. Η εξίσωση που προκύπτει από την γραμμική προσαρμογή είναι η εξής:

$$y = 0.187 \cdot x + 2.64 \quad (14)$$

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στο υποκεφάλαιο 3.1, η κλίση αυτής της ευθείας γραμμής αντιπροσωπεύει το K_s ενώ το σημείο τομής της με τον άξονα των Y αντιπροσωπεύει το S^2 . Επομένως $K_s=0.187\text{cm}/\text{min}$ και $S = \sqrt{2.64\text{cm min}^{-0.5}} = 1.62\text{cm min}^{-0.5}$. Οι τιμές των K_s και S που εκτιμήθηκαν από τη συγκεκριμένη διαδικασία συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές των K_s και S που προέκυψαν από το ελεγχόμενο πείραμα ομόκεντρων κυλίνδρων χρησιμοποιώντας τη προτεινόμενη μέθοδο.

Επίσης προσδιορίστηκε πειραματικά η υδραυλική αγωγιμότητα στο κορεσμό της μίξης χώματος – άμμου με τη μέθοδο σταθερού φορτίου σε κύλινδρο μικρών διαστάσεων (ύψους 10cm και διαμέτρου 7cm) και βρέθηκε ίση με 0.19cm/min. Η τιμή αυτή συγκρίνεται επίσης με τη τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό που εκτιμάται από πειραματικά δεδομένα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο.

Πείραμα ομόκεντρων κυλίνδρων

Μετά την επιλογή του πορώδους μέσου (μίξη χώματος-άμμου) ακολούθησε ελεγχόμενο πείραμα ομόκεντρων κυλίνδρων σε συνθήκες εργαστηρίου για την πειραματική επαλήθευση της προτεινόμενης μεθόδου προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους K_s και S . Το πείραμα ομόκεντρων κυλίνδρων διεξήχθη στο εργαστήριο του Γ.Π.Α. Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκε ένα ξύλινο κυτίο διαστάσεων 1m^3 , ανοιχτό στο πάνω μέρος του. Στο κάτω μέρος του (βάση) ανοίχτηκαν οπές και τοποθετήθηκε ποσότητα χαλικιών, γεώφασμα μεγάλης περατότητας (για να μην επηρεάζει τη στράγγιση) και ειδική σήτα για τη σωστή στράγγιση του πορώδους μέσου. Όλα αυτά απεικονίζονται στο σχήμα (13).



Σχήμα 13. Φωτογραφίες της πειραματικής κατασκευής (κυτίο).

Εν συνεχεία η μίξη χώματος - άμμου τοποθετήθηκε μέσα στο κυτίο σε ύψος 70cm. Παράλληλα με την τοποθέτηση του δείγματος ενσωματώθηκαν 17 αισθητήρες υγρασίας EC5-Decagon Devices η αξιοπιστία των οποίων έχει ελεγχθεί σε πρόσφατη εργασία (Πολλάλης et al., 2009). Ο λόγος χρησιμοποίησης των αισθητήρων υγρασίας ήταν η συστηματική καταγραφή της κίνησης του μετώπου διαβροχής κατά τη διάρκεια του πειράματος με τους ομόκεντρους κυλίνδρους. Ο αισθητήρας EC5 απεικονίζεται στο σχήμα (14) και αποτελείται από δύο ακίδες από fiberglass πάχους 0.2mm, πλάτους 0.7mm και ύψους 9cm. Πρόκειται επομένως για έναν αισθητήρα υγρασίας με μικρό όγκο αναφοράς ($\approx 180\text{cm}^3$). Το γεγονός αυτό τον κάνει ιδιαίτερα χρήσιμο σε πειραματικές διαδικασίες που επιδιώκεται η λήψη δεδομένων υγρασίας σε υψηλή χωρική ανάλυση. Με

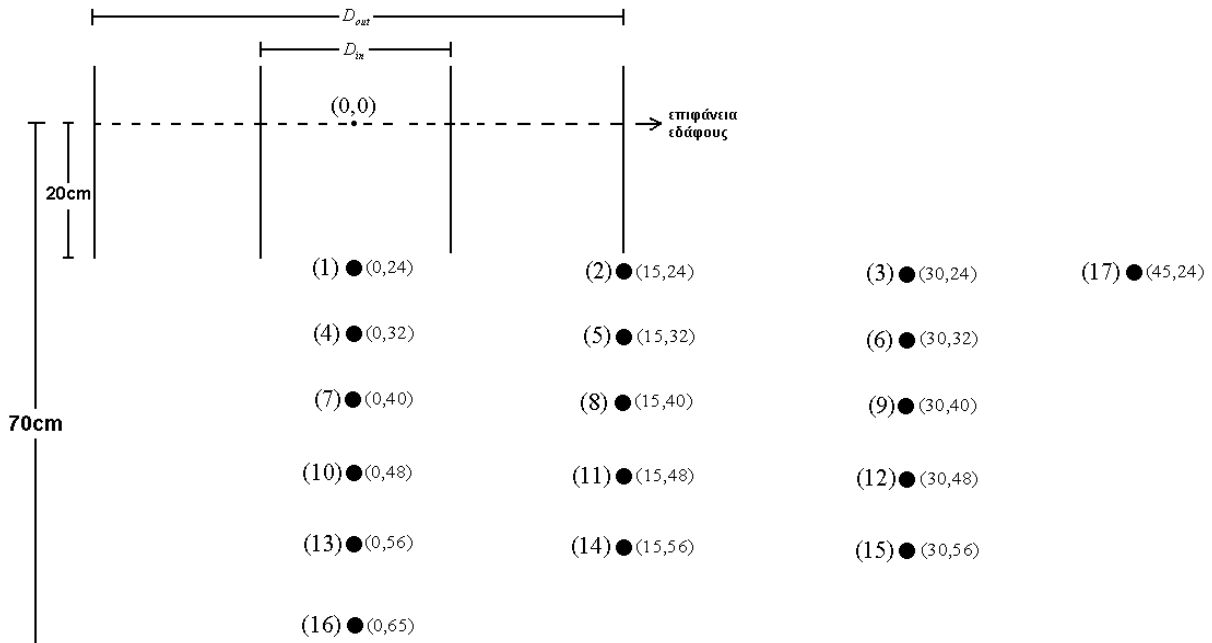
τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος που είναι ενσωματωμένο στον αισθητήρα, μετατρέπονται οι μεταβολές της χωρητικότητας του πυκνωτή (και κατ' επέκταση της υγρασίας) σε τιμές ηλεκτρικής τάσης mV (σήμα εξόδου) που λαμβάνονται με τη χρήση ενός αυτόματου καταγραφέα (datalogger). Σύμφωνα με τις οδηγίες χρήσης του οργάνου (Decagon Devices Ins. 2006) το εύρος λειτουργίας του είναι από 0–1m³/m³. Η συχνότητα λειτουργίας του είναι 70MHz. Το ηλεκτρικό ρεύμα που τροφοδοτεί τον αισθητήρα πρέπει να έχει σταθερή τιμή τάσης κατά την διάρκεια των μετρήσεων (Kizito et al., 2008). Η σταθερή αυτή τιμή τάσης επιλέγεται μέσα στο εύρος τιμών 2-5V. Στην παρούσα διατριβή η τάση τροφοδοσίας του αισθητήρα ήταν ίση με 3.25V και η εξίσωση βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη τάση σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι η ακόλουθη: $\Theta = 1.07 \cdot 10^{-3} \cdot mV - 0.48$. Όταν χρησιμοποιούνται οι εργοστασιακές εξισώσεις βαθμονόμησης, οι αποκλίσεις των τιμών της εδαφικής υγρασίας είναι της τάξης $\pm 0,03m^3 / m^3$. Αντίθετα, αν πραγματοποιηθεί ειδική βαθμονόμηση, τότε οι αποκλίσεις είναι της τάξης $\pm 0,01m^3 / m^3$.



Σχήμα 14. Απεικόνιση του αισθητήρα υγρασίας EC5-Decagon Devices.

Οι ακριβείς θέσεις των αισθητήρων υγρασίας απεικονίζονται στο σχήμα (15). Η κατακόρυφη απόσταση των αισθητήρων ήταν 8cm ούτως ώστε να μην υπάρχει αλληλεπίδραση στις ενδείξεις τους, σύμφωνα με όγκο αναφοράς (<http://www.decagon.com/assets/Uploads/EC-5-Volume-of-Sensitivity.pdf>) που δίνει η

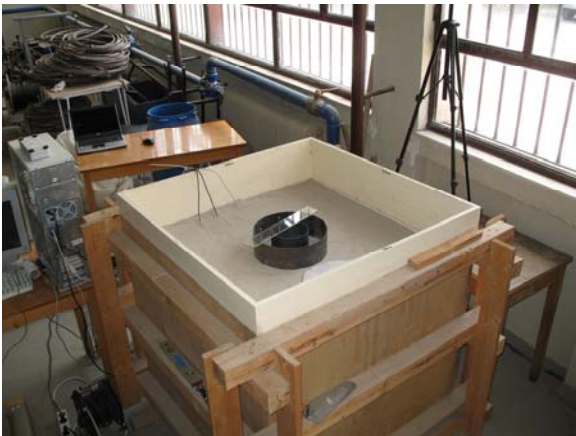
κατασκευάστρια εταιρεία (ο αισθητήρας EC5 καταγράφει μεταβολές υγρασίας σε απόσταση περίπου 4cm πάνω και κάτω από το σημείο στο οποίο έχει τοποθετηθεί). Η πρώτη σειρά αισθητήρων, δηλαδή οι αισθητήρες (1), (2) και (3), τοποθετήθηκαν σε βάθος 24cm από την επιφάνεια του εδάφους με σκοπό να προσδιορίσουμε πειραματικά (μέσω της μεταβολής των τιμών της υγρασίας τους σε σχέση με την αρχική υγρασία του πορώδους μέσου) το χρόνο τ_1 , δηλαδή το χρόνο που απαιτείται για να φτάσει το “μέτωπο διαβροχής” το κάτω χείλος των κυλίνδρων (το βάθος διείσδυσης των ομόκεντρων κυλίνδρων ήταν ίσο με 20cm όπως αναφέρεται παρακάτω). Οι αισθητήρες με αριθμό (16) και (17) τοποθετήθηκαν με σκοπό να ελέγξουμε αν το μέτωπο διαβροχής έχει φτάσει στη βάση και στα πλευρικά τοιχώματα του κυτίου αντίστοιχα.



Σχήμα 15. Απεικόνιση της διάταξης των 17 αισθητήρων υγρασίας EC5-Decagon Devices (σύμβολο “●”) που τοποθετήθηκαν μέσα στο κυτίο. Δεξιά και αριστερά των αισθητήρων αναγράφεται ο αριθμός τους και οι συντεταγμένες τους αντίστοιχα.

Η αρχική υγρασία της μίξης χώματος – άμμου που τοποθετήθηκε μέσα στο κυτίο ήταν $0\text{m}^3/\text{m}^3$, δηλαδή πρόκειται για ένα ξηρό πορώδες μέσο όπως ακριβώς επιβεβαιώθηκε και από τις αρχικές ενδείξεις των αισθητήρων υγρασίας. Στην επιφάνεια του δείγματος τοποθετήθηκαν ομόκεντροι κύλινδροι διαμέτρου 15cm και 30cm για τον

εσωτερικό και εξωτερικό κύλινδρο αντίστοιχα. Το ύψος των κυλίνδρων ήταν ίσο με 30cm. Το φορτίο πίεσης τέθηκε ίσο με 5cm και στους δύο κυλίνδρους, το οποίο διατηρήθηκε σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Το βάθος διείσδυσης των ομόκεντρων κυλίνδρων ήταν ίσο με 20cm. Οι μετρήσεις αθροιστικής διήθησης λάμβαναν χώρα ταυτόχρονα τόσο στον εσωτερικό όσο και στον εξωτερικό κύλινδρο και το πείραμα είχε διάρκεια 120min. Επίσης, στη επιφάνεια του εδάφους και μέσα στους κυλίνδρους τοποθετήθηκε γεώφασμα μεγάλης περατότητας (προκειμένου να μην επηρεάζει το φαινόμενο της διήθησης κατά τη διάρκεια του πειράματος) με σκοπό να διαταραχθεί όσο το δυνατόν λιγότερο το πορώδες μέσω από την ακαριαία συμπλήρωση νερού μέσα στους κυλίνδρους κατά την έναρξη του πειράματος. Στο σχήμα (16) παρουσιάζονται φωτογραφίες πριν αλλά και κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 16. Φωτογραφίες πριν και κατά τη διάρκεια του πειράματος ομόκεντρων κυλίνδρων.

Σημείωση: Στο κυτίο, πριν την τοποθέτηση της μίξης χώματος-άμμου, είχε τοποθετηθεί μαζί με τους αισθητήρες υγρασίας το έδαφος Loam σε ύψος 70cm που χρησιμοποιήθηκε εκ των υστέρων για να γίνει η μίξη χώματος-άμμου. Εκείνη τη χρονική περίοδο, επιχειρήθηκε να μετρηθεί η μονοδιάστατη κατακόρυφη κίνηση του εδαφικού νερού μέσα στο κυτίο εφαρμόζοντας φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του πορώδους μέσου ίσο με 5cm πάνω σε όλη την επιφάνεια του κυτίου. Εφόσον μετρήθηκε η μονοδιάστατη αθροιστική διήθηση, το πορώδες μέσο αφέθηκε να στραγγίσει. Μετά το πέρας περίπου ενός μήνα, παρατηρήθηκε το εξής: στην επιφάνεια του εδάφους είχε δημιουργηθεί μία κρούστα πάχους 2-3cm ιδιαίτερα αδιαπέρατη. Επομένως η συνέχιση στο ίδιο πορώδες μέσο ενός πειράματος διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων θα επηρεαζόταν από την ύπαρξη αυτής της λεπτής αδιαπέρατης στρώσης στην επιφάνεια του εδάφους. Επίσης παρατηρήθηκαν ρωγμές στην επιφάνεια του εδάφους. Γι' αυτούς τους λόγους επιλέχθηκε στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί μία μίξη χώματος-άμμου ούτως ώστε το νέο πορώδες μέσο να είναι ευκολότερα διαχειρίσιμο.

3.3 Σύνδεση της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκov με την απορροφητικότητα S

3.3.1 Γενική μεθοδολογία

Στις επιφανειακές αρδεύσεις χρησιμοποιείται κατά κόρον μία αμιγώς εμπειρική εξίσωση διήθησης, η εξίσωση του Kostiaκov (1932). Η προέκτασή της (γνωστή ως εξίσωση Lewis-Kostiaκov), δίνεται από τη σχέση:

$$I = \kappa \tau^{\alpha} + f_0 \tau \quad (15)$$

όπου I [L] η αθροιστική διήθηση ή αλλιώς το ύψος διήθησης, τ [T] ο χρόνος διήθησης ή αλλιώς χρόνος ευκαιρίας, κ [L/T ^{α}] και α (αδιάστατη παράμετρος) εμπειρικοί συντελεστές και f_0 [L/T] η τελική διηθητικότητα του εδάφους που λαμβάνεται ίση με την υδραυλική αγωγιμότητα στο κορεσμό K_s [L/T]. Οι δύο παράμετροι κ , α είναι αμιγώς εμπειρικοί παράμετροι χωρίς καμία φυσική σημασία, ενώ η παράμετρος f_0 είναι ουσιαστικά η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους στον κορεσμό, K_s . Στις επιφανειακές αρδεύσεις συνήθως η παράμετρος f_0 (ή K_s) προσδιορίζεται ανεξάρτητα με βαθμονόμηση δεδομένων

εκροής σε σχέση με τις παραμέτρους κ , α , που προσδιορίζονται με βαθμονόμηση δεδομένων προώθησης. Οι τρεις παράμετροι κ , α , f_0 που έχουν προσδιοριστεί για ένα γεγονός άρδευσης αφορούν τις συγκεκριμένες αρχικές και οριακές συνθήκες που επικρατούν στον αγρό και επομένως χαρακτηρίζουν μόνο το συγκεκριμένο γεγονός άρδευσης.

Η εξίσωση κατακόρυφης διήθησης του Philip (1957b) για χρόνους διήθησης όχι πολύ μεγάλους έχει την μορφή:

$$I = S\sqrt{\tau} + \mu K_s \tau \quad (16)$$

όπου I [L] η αθροιστική διήθηση ανά μονάδα επιφάνειας, τ [T] ο χρόνος διήθησης, K_s [L/T] η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό, S [L/T^{0.5}] η απορροφητικότητα και μ μία σταθερά από $0 \leq \mu \leq 1$. Η τιμή της σταθεράς μ διαφέρει από έδαφος σε έδαφος και για διαφορετικούς χρόνους διήθησης με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προσδιοριστεί εκ των προτέρων. Αργότερα ο Philip (1969) πρότεινε $\mu \approx 1$ για ολόκληρο το εύρος των χρόνων διήθησης. Εν συνεχεία οι Swartzendruber and Youngs (1974) έθεσαν $\mu = 1$ και η εξίσωση (16) μετατρέπεται στη δι-παραμετρική εξίσωση διήθησης του Philip που έχει τη μορφή:

$$I = S\sqrt{\tau} + K_s \tau \quad (17)$$

Στην παρούσα διατριβή, η προέκταση της εξίσωσης του Kostiaikov (εξίσωση 15), μία αμιγώς εμπειρική εξίσωση διήθησης, θεωρείται ως μία τροποποιημένη μορφή της κλασσικής δι-παραμετρικής εξίσωσης διήθησης του Philip (εξίσωση 17) με την εξής μορφή:

$$I = (S\sqrt{\tau})^{2\alpha} + K_s \tau = S^{2\alpha} \tau^\alpha + K_s \tau \quad (18)$$

όπου η εμπειρική παράμετρος κ συνδέεται με την φυσικής σημασίας παράμετρο S του εδάφους. Η εξίσωση (18) θα αναφέρεται από εδώ και στο εξής ως “προέκταση της δι-

παραμετρικής εξίσωσης του Philip”. Οι εξισώσεις (15) και (18) έχουν την ίδια μαθηματική μορφή και η αντιστοιχία των όρων που υπεισέρχονται σε αυτές οδηγεί στην επόμενη σχέση μεταξύ της παραμέτρου κ και της απορροφητικότητας S :

$$\kappa = S^{2\alpha} \quad (19)$$

Η απορροφητικότητα S , σε αντίθεση με την αμιγώς εμπειρική παράμετρο κ , είναι μία παράμετρος με φυσική σημασία και οι τιμές της μεταβάλλονται συναρτήσει του φορτίου πίεσης που επικρατεί στην επιφάνεια του εδάφους (οριακή συνθήκη – boundary condition) και της αρχικής υγρασίας του εδάφους (αρχική συνθήκη – initial condition). Έτσι η απορροφητικότητα S υπολογίζεται σύμφωνα με την απλοποιημένη ανάλυση των Green and Ampt (1911) [Haverkamp et al. 1988; Warick 2003]:

$$S^2 = 2K_s(h - h_f)(\theta_s - \theta_{in}) = 2K_s(h - h_f)\Delta\theta \quad (20)$$

όπου θ_s [L^3L^{-3}] η εδαφική υγρασία στον κορεσμό, θ_{in} [L^3L^{-3}] η αρχική υγρασία του εδαφικού προφίλ, h [L] το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους, $\Delta\theta = \theta_s - \theta_{in}$ και h_f [L] το φορτίο πίεσης που επικρατεί στο μέτωπο διαβροχής σύμφωνα με την ανάλυση των Green and Ampt και προσεγγίζεται αρκετά καλά για κάθε έδαφος σύμφωνα με την σχέση του Neuman (1976):

$$h_f = \frac{1}{K_s} \int_0^{-\infty} K(h)dh \quad (21)$$

όπου $K(h)$ η μεταβολή της υδραυλικής αγωγιμότητας συναρτήσει του φορτίου πίεσης h .

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 (υποκεφάλαιο 2.3), οι τιμές των παραμέτρων α , κ και f_0 δεν παραμένουν οι ίδιες όταν μεταβάλλονται οι αρχικές και οριακές συνθήκες που επικρατούν στον αγρό μεταξύ δύο ή περισσότερων γεγονότων επιφανειακής άρδευσης. Έστω ότι θέλουμε να προσδιορίσουμε τις τιμές αυτών των τριών παραμέτρων για ένα συγκεκριμένο γεγονός επιφανειακής άρδευσης από δεδομένα κατακόρυφης

διήθησης. Ας υποθέσουμε ότι κ_0 , α_0 , και f_0 είναι οι τιμές αναφοράς των παραμέτρων της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov που έχουν αποκτηθεί με ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) σε δεδομένα κατακόρυφης διήθησης (κατάσταση αναφοράς – reference condition) και αφορούν συγκεκριμένες αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης, δηλαδή φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους $h = h_0$ και αρχικό υγρασιακό καθεστώς του εδαφικού προφίλ $\theta_{in} = \theta_{in(0)}$ και $\Delta\theta_0 = \theta_s - \theta_{in(0)}$. Σύμφωνα με την εξίσωση (19), η απορροφητικότητα S_0 που αντιστοιχεί στις συγκεκριμένες συνθήκες διήθησης είναι:

$$S_0 = \kappa_0^{1/2\alpha_0} \quad (22)$$

Από εδώ και στο εξής, ο δείκτης “0” θα αναφέρεται στις αρχικές και οριακές συνθήκες της κατάστασης αναφοράς, δηλαδή του “βασικού σεναρίου” (base case) όπως αναφέρεται από τους Furman et al. (2006).

3.3.2 Μεταβολή της απορροφητικότητας S συναρτήσει των οριακών συνθηκών

Από την εξίσωση (20) είναι φανερό ότι η απορροφητικότητα S επηρεάζεται από την μεταβολή του φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους και το αρχικό υγρασιακό καθεστώς του εδαφικού προφίλ. Το πρώτο βήμα αποτελείται από την περιγραφή της μεταβολής της απορροφητικότητας S συναρτήσει της μεταβολής μόνο του φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους h υποθέτοντας ότι ο αρχικό υγρασιακό καθεστώς παραμένει αμετάβλητο, δηλαδή $\theta_{in} = \theta_{in(0)}$ και $\Delta\theta = \Delta\theta_0$.

Ας υποθέσουμε ότι η απορροφητικότητα για την κατάσταση αναφοράς, S_0 , είναι γνωστή με βαθμονόμηση. Επομένως, η απορροφητικότητα $S_{h,\Delta\theta_0}$ για κάθε φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους και για την ίδια αρχική συνθήκη ($\theta_{in} = \theta_{in(0)}$ και $\Delta\theta = \Delta\theta_0$) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (20) ως εξής:

$$S_{h,\Delta\theta_0}^2 = 2K_s(h - h_f)\Delta\theta_0 \quad (23)$$

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (20) για τις συνθήκες αναφοράς, δηλαδή $h = h_0$, $\Delta\theta = \Delta\theta_0$ και $S = S_0$, έχουμε:

$$S_0^2 = 2K_s(h_0 - h_f)\Delta\theta_0 \quad (24)$$

Με αφαίρεση των εξισώσεων (23) και (24), έχουμε:

$$S_{h,\Delta\theta}^2 = S_0^2 + 2K_s(h - h_0)\Delta\theta_0 \quad (25)$$

Η εξίσωση (25) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η μεταβολή της απορροφητικότητας S όταν μεταβάλλεται το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους h ενώ το αρχικό υγρασιακό καθεστώς του εδαφικού προφίλ παραμένει σταθερό.

3.3.3 Μεταβολή της απορροφητικότητας S συναρτήσει των αρχικών συνθηκών

Το δεύτερο βήμα αποτελείται από την περιγραφή της μεταβολής της απορροφητικότητας S συναρτήσει της μεταβολής μόνο του αρχικού υγρασιακού καθεστώτος υποθέτοντας ότι το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους h παραμένει αμετάβλητο, δηλαδή $h = h_0$ και $\Delta\theta \neq \Delta\theta_0$. Με διαίρεση των εξισώσεων (20) και (23), έχουμε:

$$S_{h,\Delta\theta}^2 = S_{h,\Delta\theta_0}^2 \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_0} \right) \quad (26)$$

Η εξίσωση (26) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η μεταβολή της απορροφητικότητας S όταν το αρχικό υγρασιακό καθεστώς θ_{in} μεταβάλλεται και το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους h παραμένει σταθερό.

3.3.4 Μεταβολή της απορροφητικότητας S συναρτήσει των αρχικών και οριακών συνθηκών

Συνδέοντας τις εξισώσεις (25) και (26) προκύπτει:

$$S_{h,\Delta\theta}^2 = [S_0^2 + 2K_s(h - h_0)\Delta\theta_0] \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta\theta_0} \right) \quad (27)$$

δηλαδή ότι η απορροφητικότητα S μπορεί να υπολογιστεί για κάθε μεταβολή του φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους h και για κάθε μεταβολή του υγρασιακού καθεστώτος $\Delta\theta$ συναρτήσει των παραμέτρων S_0 , h_0 , $\theta_{in(0)}$ της κατάστασης αναφοράς.

3.3.5 Μεταβολή της παραμέτρου κ συναρτήσει των αρχικών και οριακών συνθηκών

Η εξίσωση (27), λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (22), παίρνει την μορφή:

$$\kappa_{h,\Delta\theta} = \left[\left[\kappa_0^{1/\alpha_0} + 2f_0(h - h_0)(\theta_s - \theta_{in(0)}) \right] \frac{\theta_s - \theta_{in}}{\theta_s - \theta_{in(0)}} \right]^{\alpha_0} \quad (28)$$

δηλαδή η παράμετρος κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov μπορεί να διορθωθεί - υπολογιστεί για κάθε μεταβολή του φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους h και για κάθε μεταβολή του υγρασιακού καθεστώτος $\Delta\theta$ όταν οι τιμές των παραμέτρων κ_0 , α_0 , και f_0 της κατάστασης αναφοράς είναι γνωστές.

3.3.6 Διαδικασία διόρθωσης της παραμέτρου κ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία διόρθωσης της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov αποτελείται από τα εξής τρία βήματα:

1. Υποθέτουμε ότι οι τιμές των παραμέτρων κ_0 , α_0 , και f_0 (τιμές αναφοράς) είναι γνωστές για μία κατάσταση αναφοράς, δηλαδή περιγράφουν μία

κατακόρυφη διήθηση με φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους $h = h_0$ και αρχικό υγρασιακό καθεστώς του εδαφικού προφίλ $\theta_{in} = \theta_{in(0)}$.

2. Για διαφορετικές, αυθαίρετα επιλεγμένες, αρχικές και οριακές συνθήκες κατακόρυφης διήθησης, δηλαδή $\theta_{in} = \theta_{in,new}$ και $h = h_{new}$, η νέα τιμή της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov διορθώνεται σύμφωνα με την εξίσωση (28) ως εξής:

$$\kappa_{corrected} = \left[\left[\kappa_0^{1/\alpha_0} + 2f_0(h_{new} - h_0)(\theta_s - \theta_{in(0)}) \right] \frac{\theta_s - \theta_{in,new}}{\theta_s - \theta_{in(0)}} \right]^{\alpha_0} \quad (29)$$

3. Η νέα εξίσωση διήθησης που αντιστοιχεί στις νέες αυθαίρετα επιλεγμένες αρχικές και οριακές συνθήκες κατακόρυφης διήθησης περιγράφεται από την προέκταση της εξίσωσης του Kostiakov με παραμέτρους $\kappa_{corrected}$, α_0 , και f_0 .

3.3.7 Επικύρωση της προτεινόμενης μεθόδου – Αριθμητικά δεδομένα διήθησης

Για την αξιολόγηση της απόδοσης της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης απαιτούνται δεδομένα μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης για διάφορες αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης. Η εξίσωση του Richards' περιγράφει με λεπτομέρεια την εξέλιξη του φαινομένου της διήθησης και πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν τη λύση της προκειμένου να αποκτήσουν δεδομένα αναφοράς (Young et al. 2002; Zerihum et al. 2005). Παρ' όλα αυτά, η εξίσωση του Richards' είναι γενικά δύσκολο να λυθεί εφόσον είναι μή-γραμμικής μορφής με δύο εξαρτημένες μεταβλητές θ και h . Επιπρόσθετα, χρειάζεται τη λεπτομερή γνώση των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους που είναι δύσκολο να εκτιμηθούν.

Στην παρούσα διατριβή, για την επικύρωση της προτεινόμενης μεθόδου, τα δεδομένα μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης προέρχονται από το λογισμικό πακέτο HYDRUS-1D. Συγκεκριμένα προσομοιώνεται το φαινόμενο της κατακόρυφης διήθησης με αρχικές και οριακές συνθήκες που αφορούν τη κατάσταση αναφοράς αλλά και νέες αυθαίρετα επιλεγμένες αρχικές και οριακές συνθήκες (πίνακας 5) καλύπτοντας ένα τυπικό εύρος συνθηκών που εφαρμόζονται στις αρδεύσεις και επιλέγονται δύο εδάφη με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες (πίνακας 6). Οι καμπύλες $\theta(h)$, $K(\theta)$ αποδίδονται από το μοντέλο των van Genuchten – Mualem (1980). Οι τιμές των παραμέτρων κ_0 , α_0 , και f_0

αποκτούνται με ανάλυση παλινδρόμησης στα δεδομένα διήθησης που περιγράφουν την κατάσταση αναφοράς. Εν συνεχεία, ακολουθεί η διαδικασία διόρθωσης της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον που αντιστοιχεί στις νέες αυθαίρετα επιλεγμένες αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης σύμφωνα με την εξίσωση (29). Τέλος, τα διορθωμένα δεδομένα διήθησης της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αριθμητικά δεδομένα διήθησης που προέρχονται από το λογισμικό πακέτο HYDRUS-1D.

	Yolo Light Clay	Sandy Loam
Φορτίο πίεσης στη επιφάνεια του εδάφους (cm)	2.5	2.5
	$h_0 = 5$	$h_0 = 5$
	10	10
	15	15
	20	20
Αρχικό υγρασιακό καθεστώς (-)	$\theta(-150\text{cm}) = 0.275$	$\theta(-150\text{cm}) = 0.2105$
	$\theta_{in(0)} = \theta(-200\text{cm}) = 0.242$	$\theta_{in(0)} = \theta(-200\text{cm}) = 0.1957$
	$\theta(-300\text{cm}) = 0.2048$	$\theta(-400\text{cm}) = 0.1692$
	$\theta(-800\text{cm}) = 0.155$	$\theta(-3000\text{cm}) = 0.1407$

Πίνακας 5. Αρχικές και οριακές συνθήκες για τις αριθμητικές προσομοιώσεις οριζόντιας και κατακόρυφης διήθησης. Ο δείκτης “0” αναφέρεται στις αρχικές και οριακές συνθήκες της κατάστασης αναφοράς.

Έδαφος	K_s (cm h^{-1})	θ_s (-)	θ_r (-)	a (cm^{-1})	n (-)	l (-)
Sandy Loam	0.35125	0.3213	0.1346	0.0174	1.864	-0.451
Yolo Light Clay	0.04429	0.4950	0.1240	0.0150	2.000	0.500

Πίνακας 6. Υδραυλικές ιδιότητες των υπό μελέτη εδαφών.

Σημειώνεται ότι το λογισμικό πακέτο HYDRUS-1D χρησιμοποιήθηκε επιπρόσθετα για την προσομοίωση του φαινομένου της οριζόντιας διήθησης για τα ίδια εδάφη και για τις ίδιες αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης που επιλέχθηκαν στην κατακόρυφη διήθηση (πίνακας 5 και 6) προκειμένου να αποκτηθούν οι “πραγματικές τιμές” της απορροφητικότητας S μέσω της προσαρμογής της εξίσωσης οριζόντιας διήθησης του Philip (εξίσωση 13) πάνω στα αποκτούμενα δεδομένα οριζόντιας αθροιστικής διήθησης.

3.4 Διερεύνηση αξιοπιστίας αποτελεσμάτων αριθμητικών μοντέλων διήθησης

3.4.1 Γενικά

Για την υλοποίηση του τρίτου στόχου της παρούσας διατριβής, που έχει να κάνει με την ορθή χρήση αριθμητικών μοντέλων διήθησης και συνάμα την επιλογή του καταλληλότερου χωρικού βήματος με σκοπό να αποκτήσουμε όσο το δυνατόν πιο ακριβή αριθμητικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης, χρησιμοποιήθηκαν τα εξής:

1. Η γραμμικοποιημένη εξίσωση (3) κατακόρυφης διήθησης (Valiantzas, 2010), η οποία παρουσιάστηκε αναλυτικά στο υποκεφάλαιο 3.1.
2. Αριθμητικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης διαθέσιμα στη βιβλιογραφία και από δύο αριθμητικά μοντέλα διήθησης.
3. Αναλυτικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης από δύο αναλυτικές λύσεις διαθέσιμες στην βιβλιογραφία.

3.4.2 Αριθμητικά – Αναλυτικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης

Προκειμένου να επαληθευτεί η γραμμικότητα της εξίσωσης (3) σε όλο το χρονικό εύρος ενός γεγονότος κατακόρυφης διήθησης, ακόμα και στους πολύ αρχικούς χρόνους όπου $\tau \rightarrow 0$, χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης διαθέσιμα στη βιβλιογραφία (Philip 1987, Table 2) και αφορούν το ιδεατό έδαφος “Knight”. Οι τιμές των υδραυλικών παραμέτρων K_s και S τέθηκαν ίσες με 1cm/h και $1\text{cmh}^{-0.5}$ αντίστοιχα (Valiantzas, 2010).

Η πρώτη ομάδα αριθμητικών δεδομένων κατακόρυφης διήθησης αποκτήθηκε από την βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, αριθμητικά δεδομένα μονοδιάστατης κατακόρυφης

διήθησης που προέρχονται από το αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών LOC1.B3 για ένα έδαφος Clay για συγκεκριμένες αρχικές και οριακές συνθήκες είναι διαθέσιμα στην εργασία των Haverkamp et al. (1988, Table 2). Η δεύτερη ομάδα αριθμητικών δεδομένων κατακόρυφης διήθησης αποκτήθηκε χρησιμοποιώντας το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης κατακόρυφης διήθησης των (Wu et al., 1997) στο οποίο η εξίσωση του Richards' επιλύεται αριθμητικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Οι υδραυλικές ιδιότητες περιγράφονται από το μοντέλο των van Genuchten – Mualem (1980). Ο αριθμητικός κώδικας του μοντέλου είναι γραμμένος στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και τρέχει σε περιβάλλον MS-DOS. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο αριθμητικό μοντέλο για να αποκτηθούν αριθμητικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης για το έδαφος Berino Fine Sand (Hills et al., 1989). Το αρχικό φορτίο πίεσης ήταν ομοιόμορφο σε όλο το εδαφικό προφίλ και ίσο με -1000cm , ενώ η οριακή συνθήκη στο πάνω όριο τέθηκε ίση με ένα φορτίο πίεσης που αντιστοιχεί σε ύψος νερού 5cm . Το χωρικό βήμα dz ήταν ίσο με 2.5cm , ενώ το αρχικό βήμα χρόνου dt τέθηκε ίσο με 10^{-4}h . Σημειώνεται ότι η καμπύλη διήθησης που προέκυψε ήταν σε απόλυτη συμφωνία με την αντίστοιχη των Wu et al. (1997). Τα δεδομένα αθροιστικής διήθησης από τις δύο πρώτες ομάδες αριθμητικών δεδομένων κατακόρυφης διήθησης μετασχηματίστηκαν στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης (3) προκειμένου να ελεγχθεί η γραμμικότητά τους.

Η τρίτη ομάδα αριθμητικών δεδομένων κατακόρυφης διήθησης αποκτήθηκε χρησιμοποιώντας το αριθμητικό μοντέλο HYDRUS-1D. Τα τρία εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα εξής: Loam, Yolo Light Clay και Sandy Clay Loam. Οι καμπύλες $\theta(h)$, $K(\theta)$ αποδίδονται για τα πρώτα δύο εδάφη από το μοντέλο των van Genuchten – Mualem (VG-M), ενώ για το τρίτο έδαφος από το μοντέλο των Brooks and Corey (BC). Οι υδραυλικές ιδιότητες των τριών εδαφών παρουσιάζονται στο πίνακα (7). Σε όλες τις προσομοιώσεις η οριακή συνθήκη διήθησης στο άνω όριο τέθηκε με τη μορφή μίας σταθερής υγρασίας ίσης με την υγρασία στο κορεσμό θ_s , ενώ η αντίστοιχη στο κάτω όριο ήταν ελεύθερη στράγγιση. Το αρχικό ομοιόμορφο φορτίο πίεσης του εδαφικού προφίλ ήταν -490cm , -325cm και -17500cm για τα εδάφη Loam, Yolo Light Clay και Sandy Clay Loam αντίστοιχα. Προκειμένου να γίνει μια λεπτομερής διερεύνηση σε ότι αφορά τη γραμμικότητά των αριθμητικών δεδομένων κατακόρυφης

διήθησης όταν αυτά μετασχηματίζονται στη μορφή της εξίσωσης (3) σε σχέση με την εκάστοτε επιλογή χωρικού και χρονικού βήματος, το χωρικό βήμα μεταβαλλόταν μεταξύ $0.1\text{cm} \leq dz \leq 2\text{cm}$ και για τα τρία εδάφη ενώ το αρχικό χρονικό βήμα μεταβαλλόταν μεταξύ $10^{-7}\text{h} \leq d\tau_{in} \leq 10^{-4}\text{h}$ για το έδαφος Sandy Clay Loam και μεταξύ $10^{-7}\text{h} \leq d\tau_{in} \leq 10^{-2}\text{h}$ για τα άλλα δύο εδάφη. Οι τιμές του αρχικού χρονικού βήματος $d\tau_{in} = 10^{-4}\text{h}$ και $d\tau_{in} = 10^{-2}\text{h}$ που παρουσιάζονται στις προηγούμενες δύο ανισότητες εκφράζουν τις μέγιστες τιμές αρχικού χρονικού βήματος προκειμένου να συγκλίνει η λύση στο αριθμητικό μοντέλο για τα αντίστοιχα εδάφη. Σημειώνεται ότι μετά το τέλος κάθε αριθμητικής προσομοίωσης ακολουθούσε ενδελεχής έλεγχος στα αριθμητικά αποτελέσματα προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι δεν υπεισέρχονται σε αυτά λάθη που προέρχονται από τυχόν αστοχίες κατά την διαδικασία εισόδου όλων των δεδομένων εισαγωγής (input parameters) στο αριθμητικό μοντέλο. Το σφάλμα του υδατικού ισοζυγίου σε όλες τις προσομοιώσεις ήταν μικρότερο του 0.006% (μια ιδιαίτερα αποδεκτή τιμή σφάλματος) και το “μέτωπο διαβροχής” δεν ξεπερνούσε το κάτω όριο του πλέγματος.

Soil	K_s (cm h ⁻¹)	θ_s (—)	θ_r (—)	α (cm ⁻¹)	n (—)	l (—)
Loam (VG-M)	2.16	0.45	0.1	0.01	2	0.5
Yolo Light Clay (VG-M)	0.0443	0.495	0.124	0.015	2	0.5
Sandy Clay Loam (BC)	0.43	0.33	0.068	0.0356	0.25	0

Πίνακας 7. Υδραυλικές ιδιότητες των υπό μελέτη εδαφών.

Για να έχουμε ένα σημείο αναφοράς και να ελέγξουμε την ακρίβεια των αριθμητικών αποτελεσμάτων, τα δεδομένα διήθησης που προήλθαν από το HYDRUS-1D συγκρίθηκαν με αναλυτικά δεδομένα διήθησης χρησιμοποιώντας την αναλυτική λύση των Warrick et al. (1985). Στη σχετική εργασία προτείνεται μία γενικευμένη αναλυτική λύση που αφορά την μονοδιάστατη κατακόρυφη διήθηση σε ομοιογενή εδάφη με ομοιόμορφο αρχικό υγρασιακό καθεστώς του εδαφικού προφίλ και σταθερή υγρασία στην επιφάνεια τους ως οριακή συνθήκη. Στη παρούσα διατριβή η αναλυτική λύση των Warrick et al. (1985) χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να αποκτήσουμε αναλυτικά

δεδομένα κατακόρυφης διήθησης για τα τρία ίδια εδάφη και με τις ίδιες ακριβώς αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις με το μοντέλο HYDRUS-1D που αναφέρονται στη προηγούμενη παράγραφο.

Κεφάλαιο 4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων κυλινδρικών διηθητόμετρων (μονός–διπλός κύλινδρος)

4.1.1 Αριθμητικά δεδομένα διάταξης διπλού κυλίνδρου

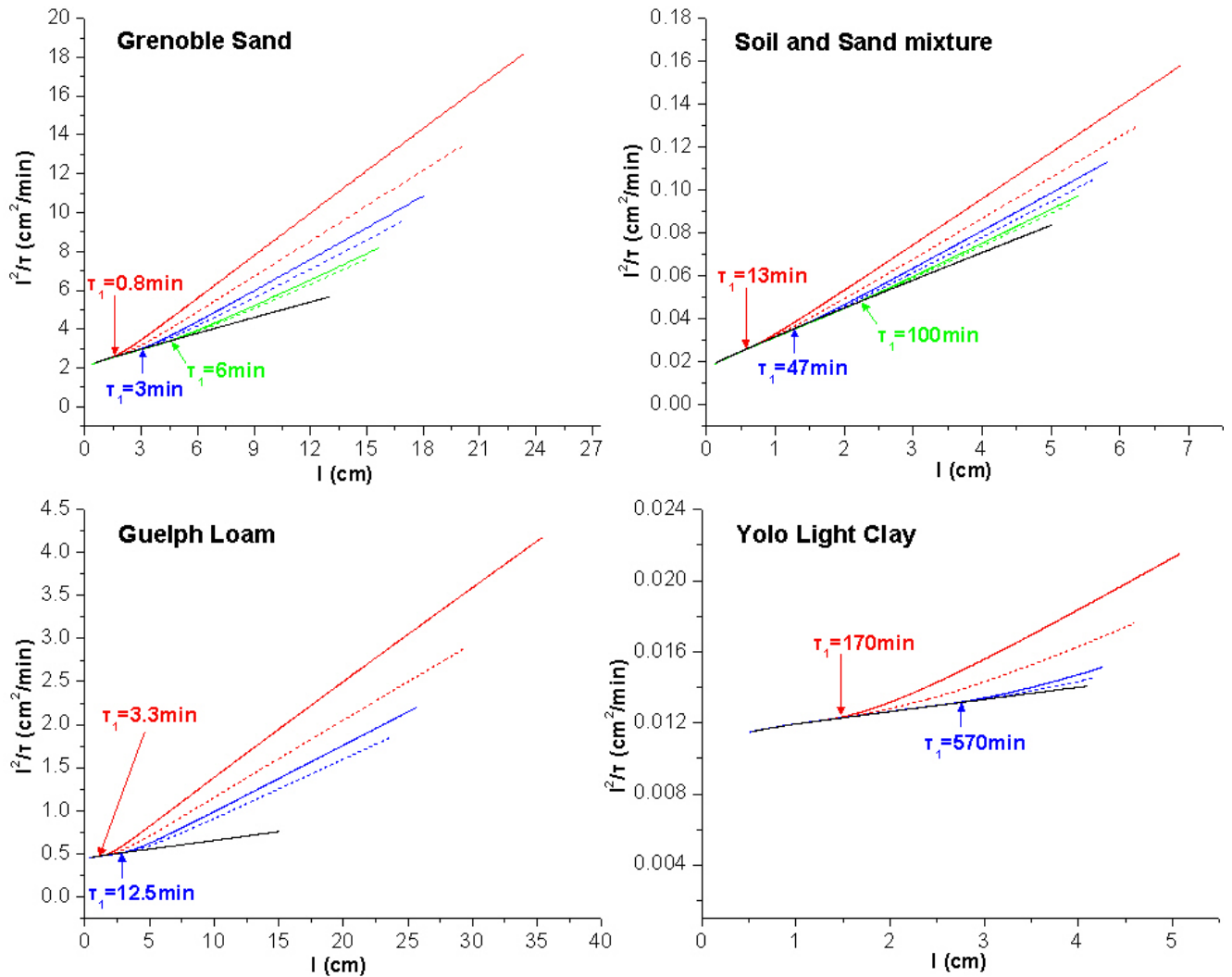
Στο σχήμα (17) παρουσιάζονται για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη τα αριθμητικά αποτελέσματα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων, που προέρχονται από το λογισμικό πακέτο HYDRUS-(2D/3D), στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) τόσο για τον εσωτερικό ($I_{r_{in}}^2 / \tau, I_{r_{in}}$) όσο και για τον εξωτερικό κύλινδρο ($I_{r_{out}}^2 / \tau, I_{r_{out}}$) για τα επιλεγμένα βάθη διεύθυνσης των κυλίνδρων. Η ακτίνα του εσωτερικού και του εξωτερικού κυλίνδρου είναι 5cm και 10cm αντίστοιχα σε όλες τις προσομοιώσεις. Στο σημείο αυτό σημειώνεται και πάλι ότι όρος ($I_{r_{out}}$) εκφράζει την αθροιστική διήθηση που υπολογίζεται στον δακτύλιο που δημιουργείται μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού κυλίνδρου. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης (με τις ίδιες αρχικές και οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στις προσομοιώσεις του φαινομένου της διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων), που προέρχονται από το λογισμικό πακέτο HYDRUS-1D, στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3), δηλαδή ($I_{1D}^2 / \tau, I_{1D}$), προκειμένου να δειχθεί η ισχυρά γραμμική μορφή τους (Valiantzas 2010, Valiantzas et al., 2011). Από το σχήμα (17) γίνεται αντιληπτό ότι τα αριθμητικά δεδομένα ($I_{r_{in}}$), ($I_{r_{out}}$) στη μορφή της εξίσωσης (3) έχουν γραμμική συμπεριφορά στα πρώτα στάδια της εξέλιξης του φαινομένου της διήθησης κάτω από τους ομόκεντρους κυλίνδρους, δηλαδή ακολουθούν τη γραμμική συμπεριφορά των αριθμητικών δεδομένων κατακόρυφης διήθησης (I_{1D}) στη μορφή της εξίσωσης (3).

Αυτό είναι απόλυτα λογικό εφόσον στους αρχικούς χρόνους διήθησης κάτω από τους ομόκεντρους κυλίνδρους και μέχρι τη χρονική στιγμή τ_1 που το “μέτωπο διαβροχής” φτάνει στο κάτω χείλος των κυλίνδρων, η κίνηση του εδαφικού νερού περιορίζεται από τα τοιχώματα των κυλίνδρων με αποτέλεσμα το εδαφικό νερό να κινείται μόνο κατακόρυφα προς τα κάτω. Επιπρόσθετα στο χρονικό διάστημα $0 \leq \tau \leq \tau_1$ ισχύει $(I_{r_{in}}) = (I_{r_{out}}) = (I_{1D})$, όπως φαίνεται στο σχήμα (17) από την ταύτιση των γραμμικών τμημάτων που δημιουργούνται από την αποτύπωση των δεδομένων $(I_{r_{in}})$, $(I_{r_{out}})$ και (I_{1D}) στη μορφή της εξίσωσης (3) και την ταύτιση των κλίσεων τους. Σημειώνεται ότι ο χρόνος τ_1 δεν έχει ακόμα προσδιοριστεί.

Όταν το “μέτωπο διαβροχής” ξεπεράσει το κάτω χείλος των κυλίνδρων, δηλαδή για $\tau > \tau_1$, οι τιμές αθροιστικής διήθησης $(I_{r_{in}})$ και $(I_{r_{out}})$ δεν έχουν πλέον τις ίδιες τιμές και συγκεκριμένα ισχύει $(I_{r_{out}}) > (I_{r_{in}})$. Αυτό συμβαίνει διότι η πλευρική κίνηση του εδαφικού νερού κάτω από τον εσωτερικό κύλινδρο περιορίζεται από την ύπαρξη του εξωτερικού κυλίνδρου σε σχέση με τη κίνηση του νερού στον εξωτερικό κύλινδρο που είναι πλέον σε μεγαλύτερη αλληλεπίδραση με τις τριχοειδείς δυνάμεις. Όλα αυτά αποτυπώνονται πολύ καθαρά στο σχήμα (17) ως εξής: μετά το γραμμικό τμήμα των αριθμητικών δεδομένων αθροιστικής διήθησης $(I_{r_{in}})$, $(I_{r_{out}})$ στη μορφή της εξίσωσης (3) όπως συζητήθηκε στη προηγούμενη παράγραφο, οι καμπύλες που αντιστοιχούν στον εξωτερικό κύλινδρο $(I_{r_{out}})$ για όλα τα επιλεγμένα βάθη διείσδυσης των κυλίνδρων και για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη αρχίζουν να έχουν συνεχώς μεγαλύτερες κλίσεις σε σχέση με τις κλίσεις των καμπυλών που αντιστοιχούν στον εσωτερικό κύλινδρο $(I_{r_{in}})$. Επομένως στο σημείο όπου αρχίζει ο διαχωρισμός των καμπυλών (για διάφορα βάθη διείσδυσης των κυλίνδρων που έχουν επιλεγεί) αντιστοιχεί ο συγκεκριμένος χρόνος διήθησης τ_1 όπου το “μέτωπο διαβροχής” μόλις διαπερνά το κάτω χείλος των κυλίνδρων. Η διαφοροποίηση των προαναφερθέντων καμπυλών είναι εντονότερη όσο μικρότερο είναι το βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων. Συμπερασματικά, η παρουσίαση των αθροιστικών δεδομένων διήθησης στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) στο ίδιο διάγραμμα μας επιτρέπει να εντοπίσουμε γραφικά την οριακή τιμή

του χρόνου τ_1 όπου το “μέτωπο διαβροχής” μόλις διαπερνά το κάτω χείλος των κυλίνδρων και η κίνηση του εδαφικού νερού κάτω από τα κυλινδρικά διηθητόμετρα είναι απόλυτα κατακόρυφη. Ο χρόνος τ_1 για τα επιλεγμένα βάθη διείσδυσης των ομόκεντρων κυλίνδρων για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη δείχνεται στο σχήμα (17). Συγκεκριμένα ο χρόνος τ_1 για το έδαφος Grenoble Sand είναι 0.8min, 3min και 6min για βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων 5cm, 10cm και 15cm αντίστοιχα, για το έδαφος Soil and Sand mixture είναι 13min, 47min και 100min για βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων 5cm, 10cm και 15cm αντίστοιχα, για το έδαφος Guelph Loam είναι 3.3min και 12.5min για βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων 5cm και 10cm αντίστοιχα και για το έδαφος Yolo Light Clay είναι 170min και 570min για βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων 5cm και 10cm αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι η τιμή του οριακού χρόνου διήθησης τ_1 διαφοροποιείται ανάλογα με την υφή του εδάφους και γενικά έχει μεγαλύτερη τιμή σε λεπτόκοκκα εδάφη σε σχέση με τα χονδρόκοκκα εδάφη. Επίσης η τιμή του οριακού χρόνου διήθησης τ_1 διαφοροποιείται ανάλογα με το βάθος διείσδυσης των ομόκεντρων κυλίνδρων που έχουν επιλεγεί και συγκεκριμένα αυξάνεται όσο αυξάνεται το βάθος διείσδυσης των ομόκεντρων κυλίνδρων όπου η μονοδιάστατη κατακόρυφη κίνηση του εδαφικού νερού διαρκεί περισσότερο χρόνο. Όσο όμως αυξάνεται το βάθος διείσδυσης των ομόκεντρων κυλίνδρων και κατ' επέκταση και ο χρόνος τ_1 , οι καμπύλες που αντιστοιχούν στον εσωτερικό ($I_{r_{in}}$) και εξωτερικό ($I_{r_{out}}$) κύλινδρο για $\tau > \tau_1$ (ξεχωριστά για κάθε ένα από τα επιλεγμένα βάθη διείσδυσης των κυλίνδρων και για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη) αποκλίνουν λιγότερο έντονα και συνεπώς καθίσταται δυσκολότερος ο γραφικός προσδιορισμός - εντοπισμός του χρόνου τ_1 .

Σημειώνεται ότι τα ίδια συμπεράσματα (που αφορούν στις τιμές του οριακού χρόνου διήθησης τ_1 καθώς και στο μέγεθος διαφοροποίησης-απόκλισης των προαναφερθέντων καμπυλών) προέκυψαν κατόπιν επεξεργασίας αριθμητικών δεδομένων αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων ορίζοντας στο αριθμητικό μοντέλο HYDRUS-(2D/3D) διαφορετικές τιμές διαμέτρου ομόκεντρων κυλίνδρων (και όχι μόνο για διάμετρο εσωτερικού και εξωτερικού κυλίνδρου ίση με 10cm και 20cm αντίστοιχα, σχήμα 17) και για αυτό το λόγο τα αντίστοιχα σχήματα δεν παρουσιάζονται.



Σχήμα 17. Απεικόνιση αριθμητικών δεδομένων αθροιστικής διήθησης διπλού κυλίνδρου (HYDRUS-2D/3D) στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) τόσο για τον εσωτερικό κύλινδρο ακτίνας 5cm (διακεκομμένη γραμμή) όσο και για τον εξωτερικό κύλινδρο ακτίνας 10cm (συνεχής γραμμή) για βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων 5cm (κόκκινο χρώμα), 10cm (μπλε χρώμα) και 15cm (πράσινο χρώμα) για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη. Στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζονται για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη τα αντίστοιχα αριθμητικά αποτελέσματα κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης (HYDRUS-1D) στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) (συνεχής μαύρη γραμμή) καθώς και ο χρόνος τ_1 .

Στον πίνακα (8) παρουσιάζονται οι λόγοι $K_s^{*(DR)} = K_{s,es}^{(DR)} / K_{s,o}$ και $S^{*(DR)} = S_{es}^{(DR)} / S_o$, όπου τα $K_{s,o}$ και S_o είναι οι “πραγματικές τιμές” της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό και της απορροφητικότητας αντίστοιχα (πίνακας (1), υποκεφάλαιο 3.2.3), $K_{s,es}^{(DR)}$ (cm/min) και $S_{es}^{(DR)}$ (cm/min^{0.5}) είναι οι εκτιμήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό και της απορροφητικότητας αντίστοιχα που αποκτήθηκαν κατόπιν εφαρμογής γραμμικής προσαρμογής (linear fitting) της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) στα αριθμητικά δεδομένα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων του σχήματος (17) μέχρι τον χρόνο τ_1 που έχει ήδη ταυτοποιηθεί γραφικά χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις.

Έδαφος	Ομόκεντροι κύλινδροι						Κατακόρυφη διήθηση	
	Βάθος διείσδυσης = 5cm		Βάθος διείσδυσης = 10cm		Βάθος διείσδυσης = 15cm			
	$K_s^{*(DR)}$	$S^{*(DR)}$	$K_s^{*(DR)}$	$S^{*(DR)}$	$K_s^{*(DR)}$	$S^{*(DR)}$	$K_s^{*(1D)}$	$S^{*(1D)}$
Grenoble Sand	1.185	0.984	1.104	0.990	1.086	0.991	1.052	1.002
Soil and Sand Mixture	1.172	1.039	1.135	1.046	1.108	1.055	1.078	1.08
Guelph Loam	1.118	1.001	0.994	1.004	-	-	0.92	1.011
Yolo Light Clay	1.015	0.989	0.948	0.991	-	-	0.94	0.996

Πίνακας 8. Παρουσίαση των λόγων $K_s^{*(DR)} = K_{s,es}^{(DR)} / K_{s,o}$ και $S^{*(DR)} = S_{es}^{(DR)} / S_o$ για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη που αποκτήθηκαν κατόπιν εφαρμογής γραμμικής προσαρμογής της εξίσωσης (3) στα αριθμητικά δεδομένα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων (HYDRUS-2D/3D) μέχρι το χρόνο τ_1 που εντοπίστηκε γραφικά από το σχήμα (17). Παρουσίαση επίσης των αντίστοιχων λόγων $K_s^{*(1D)} = K_{s,es}^{(1D)} / K_{s,o}$ και $S^{*(1D)} = S_{es}^{(1D)} / S_o$ που αποκτήθηκαν κατόπιν εφαρμογής γραμμικής προσαρμογής της εξίσωσης (3) για όλους τους χρόνους διήθησης στα αριθμητικά δεδομένα κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης (HYDRUS-1D).

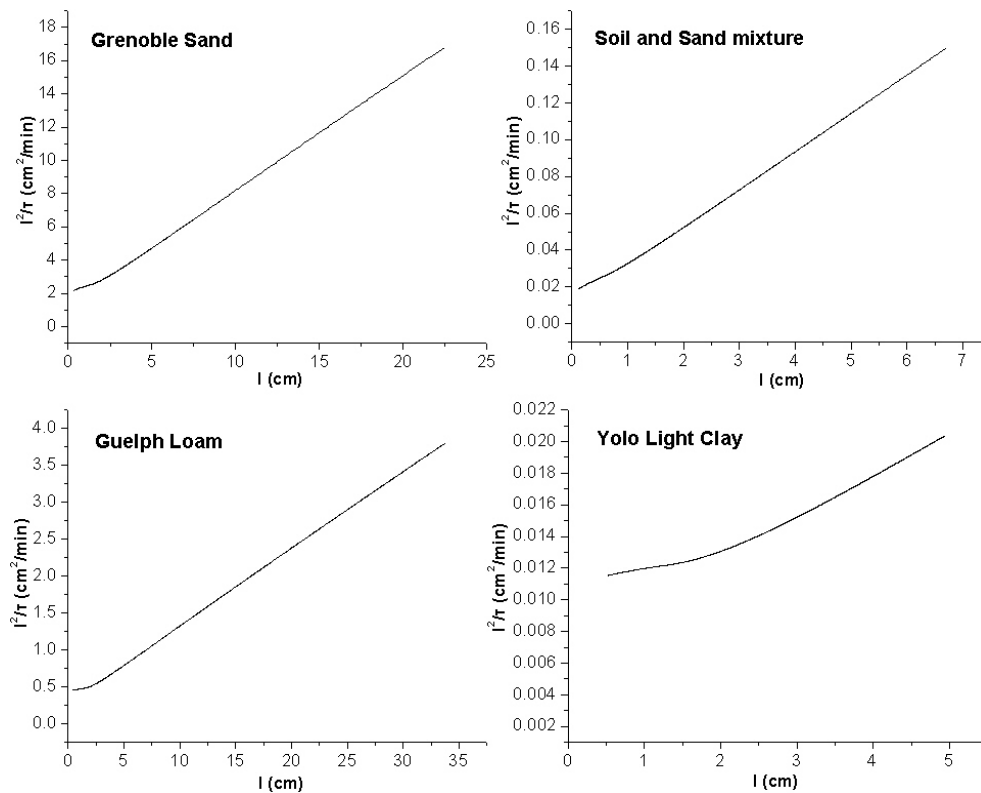
Στον πίνακα (8) παρουσιάζονται επιπλέον οι λόγοι $K_s^{*(1D)} = K_{s,es}^{(1D)} / K_{s,o}$ και $S^{*(1D)} = S_{es}^{(1D)} / S_o$, όπου τα $K_{s,es}^{(1D)}$ και $S_{es}^{(1D)}$ είναι οι εκτιμήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό και της απορροφητικότητας αντίστοιχα που αποκτήθηκαν κατόπιν εφαρμογής γραμμικής προσαρμογής (linear fitting) της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) στα αριθμητικά δεδομένα μονοδιάστατης κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης του σχήματος (17) για όλους τους χρόνους διήθησης. Από εδώ και στο εξής τα πρόσημα “+” και “-” θα δηλώνουν την υπερεκτίμηση και υποεκτίμηση αντίστοιχα τόσο για την υδραυλική αγωγιμότητα στο κορεσμό όσο και για την απορροφητικότητα που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο. Το επί τοις εκατό (%) σφάλμα εκτίμησης για την απορροφητικότητα S κυμαίνεται μεταξύ του +5.5% (για το έδαφος Soil and Sand mixture και για βάθος διείσδυσης 15cm) και του -1.6% (για το έδαφος Grenoble Sand και για βάθος διείσδυσης 5cm). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι εκτιμώμενες τιμές της απορροφητικότητας χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη μέθοδο ταιριάζουν πολύ καλά με τις αντίστοιχες “πραγματικές τιμές” απορροφητικότητας. Η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει αρκετά ακριβείς εκτιμήσεις της παραμέτρου S και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της απορροφητικότητας S . Όσον αφορά την υδραυλική αγωγιμότητα στο κορεσμό K_s , το επί τοις εκατό (%) σφάλμα εκτίμησης κυμαίνεται μεταξύ του +18.5% (για το έδαφος Grenoble Sand και για βάθος διείσδυσης 5cm) και του -5.2% (για το έδαφος Yolo Light Clay και για βάθος διείσδυσης 10cm). Ως μία γενική παρατήρηση, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι όσο αυξάνεται το βάθος διείσδυσης των ομόκεντρων κυλίνδρων, υπάρχει μία γενική τάση οι λόγοι για το $K_s^{*(DR)}$ να μειώνονται σταδιακά πλησιάζοντας το λόγο $K_s^{*(1D)}$. Συγκεκριμένα το επί τοις εκατό (%) σφάλμα εκτίμησης της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό μειώνεται για το έδαφος Grenoble Sand από +18.5% (βάθος διείσδυσης 5cm) σε +10.4% (βάθος διείσδυσης 10cm) και τελικά σε +8.6% (βάθος διείσδυσης 15cm), για το έδαφος Soil and Sand mixture από +17.2% (βάθος διείσδυσης 5cm) σε +13.5% (βάθος διείσδυσης 10cm) και τελικά σε +10.8% (βάθος διείσδυσης 15cm), για το έδαφος Guelph Loam από +11.8% (βάθος διείσδυσης 5cm) σε -0.6% (βάθος διείσδυσης 10cm) και για το έδαφος Yolo Light Clay από +1.5% (βάθος διείσδυσης 5cm) σε -5.2% (βάθος διείσδυσης 10cm). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι ο χρόνος τ_1 , δηλαδή ο χρόνος που η

μονοδιάστατη κατακόρυφη διήθηση λαμβάνει χώρα κάτω από τους ομόκεντρους κυλίνδρους μέχρι το “μέτωπο διαβροχής” να φτάσει το κάτω χείλος των κυλίνδρων, αυξάνεται όσο αυξάνεται το βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων με αποτέλεσμα την καλύτερη εδραίωση της γραμμικότητας των αντίστοιχων δεδομένων διήθησης. Τα αποτελέσματα επίσης δείχνουν ότι στη περίπτωση ενός χονδρόκοκκου εδάφους το βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων προτιμάται να είναι μεγαλύτερο ή ίσο των 10cm προκειμένου να οδηγηθούμε σε εκτιμήσεις του K_s με μεγαλύτερη ακρίβεια. Γενικά η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει ακριβείς εκτιμήσεις της παραμέτρου K_s δεδομένου ότι μία ακρίβεια προσδιορισμού του K_s της τάξης 10-15% είναι στη πράξη αποδεκτή (Philip, 1987) λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες αβεβαιότητας που επικρατούν στο πεδίο (π.χ ακρίβεια μέτρησης, ετερογένεια κ.τ.λ.). Σημειώνεται ότι το K_s είναι η παράμετρος με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα στο προσδιορισμό της κατά την εφαρμογή του αντίστροφου προβλήματος (Clausnitzer et al., 1998; Valiantzas, 2010).

Εν κατακλείδι, τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν γενικά ότι η προτεινόμενη μέθοδος προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους K_s και S από δεδομένα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων παρέχει εκτιμήσεις των παραμέτρων για πρακτικές εφαρμογές με αποδεκτή ακρίβεια.

4.1.2 Αριθμητικά δεδομένα διάταξης μονού κυλίνδρου

Στο σχήμα (18) παρουσιάζονται για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη τα αριθμητικά αποτελέσματα αθροιστικής διήθησης μονού κυλίνδρου, που προέρχονται από το λογισμικό πακέτο HYDRUS-(2D/3D), στη μορφή της εξίσωσης (3). Η ακτίνα του μονού κυλίνδρου είναι 10cm και βάθος διείσδυσης ίσο με 5m σε όλες τις προσομοιώσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν σε μία πρώτη προσέγγιση ότι τα δεδομένα διήθησης μονού κυλίνδρου στη μορφή της εξίσωσης (3), δηλαδή $(I_{single}^2 / \tau, I_{single})$, αποτελούνται από δύο γραμμικά τμήματα. Το πρώτο γραμμικό τμήμα διαρκεί μέχρι το χρόνο τ_1 που το μέτωπο διαβροχής φτάνει το κάτω χείλος των κυλίνδρων και η κίνηση του εδαφικού νερού κάτω από τον κύλινδρο είναι απόλυτα μονοδιάστατη και κατακόρυφη (όπως ακριβώς και στη περίπτωση των ομόκεντρων κυλίνδρων), το δε δεύτερο γραμμικό τμήμα αντιστοιχεί στους χρόνους $\tau > \tau_1$.



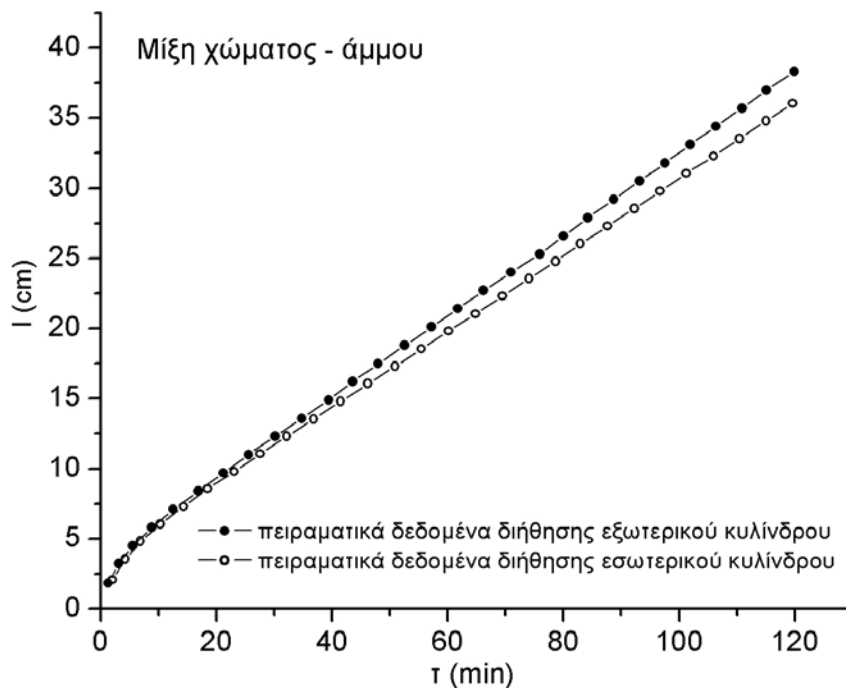
Σχήμα 18. Απεικόνιση αριθμητικών δεδομένων αθροιστικής διήθησης μονού κυλίνδρου (HYDRUS-2D/3D) ακτίνας 10cm στη μορφή της εξίσωσης (3) για βάθος διείσδυσης του κυλίνδρου ίσο με 5cm για τα τέσσερα υπό μελέτη εδάφη.

Όπως φαίνεται από το σχήμα (18), τα δύο προαναφερθέντα γραμμικά τμήματα έχουν εμφανώς διαφορετικές κλίσεις. Ωστόσο, η μετάβαση από το ένα γραμμικό τμήμα στο άλλο είναι σταδιακή και δεν συμβαίνει ακαριαία. Σε αντίθεση με την περίπτωση των ομόκεντρων κυλίνδρων, αυτή η συμπεριφορά των δεδομένων μονού κυλίνδρου δεν μας δίνει την δυνατότητα να εντοπίσουμε γραφικά το χρόνο τ_1 με ακρίβεια. Επομένως, οποιαδήποτε περαιτέρω προσαρμογή της εξίσωσης (3) στο πρώτο γραμμικό τμήμα των δεδομένων μονού κυλίνδρου (που αντιστοιχεί στην μονοδιάστατη κατακόρυφη κίνηση του εδαφικού νερού κάτω από τον κύλινδρο) θα οδηγούσε στην απόκτηση μη ρεαλιστικών τιμών για τις παραμέτρους K_s και S . Το ίδιο συμπέρασμα προέκυψε κατόπιν επεξεργασίας αριθμητικών δεδομένων αθροιστικής διήθησης μονού κυλίνδρου ορίζοντας στο αριθμητικό μοντέλο HYDRUS-(2D/3D) βάθος διείσδυσης του μονού κυλίνδρου ίσο

με 10cm και 15cm και για αυτό το λόγο τα αντίστοιχα σχήματα δεν παρουσιάζονται. Παρ' όλα αυτά το συγκεκριμένο θέμα χρίζει περαιτέρω έρευνας.

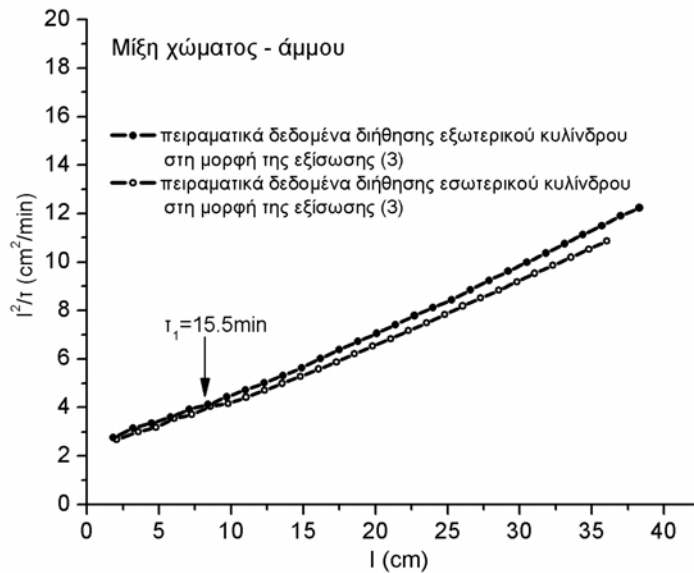
4.1.3 Πειραματικά δεδομένα διάταξης διπλού κυλίνδρου

Στο σχήμα (19) παρουσιάζονται σε ένα τυπικό διάγραμμα (I, τ) τα πειραματικά δεδομένα της αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων τόσο για τον εσωτερικό κύλινδρο (ακτίνας 7.5cm) όσο και για τον εξωτερικό κύλινδρο (ακτίνας 15cm) για βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων ίσο με 20cm για τη μίξη χώματος – άμμου. Παρατηρούμε ότι οι μετρημένες τιμές της αθροιστικής διήθησης ακολουθούν την τυπική μορφή παρουσίασης αθροιστικών δεδομένων διήθησης. Όπως αναμένεται, οι τιμές αθροιστικής διήθησης που μετρήθηκαν στον εσωτερικό κύλινδρο (με τελική τιμή τα 36cm) είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές αθροιστικής διήθησης στον εξωτερικό κύλινδρο (με τελική τιμή τα 38.5cm).



Σχήμα 19. Απεικόνιση πειραματικών δεδομένων αθροιστικής διήθησης διπλού κυλίνδρου τόσο για τον εσωτερικό κύλινδρο (ακτίνας 7.5cm) όσο και για τον εξωτερικό κύλινδρο (ακτίνας 15cm) για βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων ίσο με 20cm για τη μίξη χώματος – άμμου.

Στο σχήμα (20) παρουσιάζονται (για τη μίξη χώματος – άμμου) τα πειραματικά δεδομένα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων για βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων ίσο με 20cm τόσο για τον εσωτερικό κύλινδρο (ακτίνας 7.5cm) όσο και για τον εξωτερικό κύλινδρο (ακτίνας 15cm) στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3), δηλαδή: $(I_{r_{in}}^2 / \tau, I_{r_{in}})$ και $(I_{r_{out}}^2 / \tau, I_{r_{out}})$.



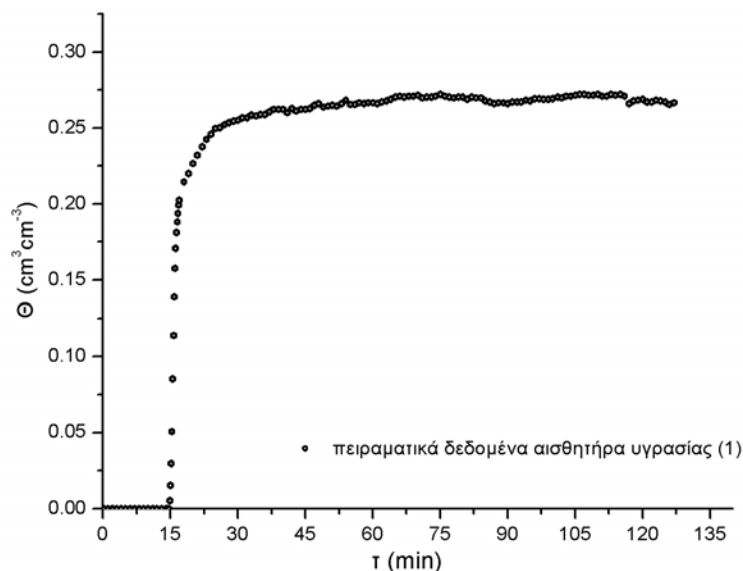
Σχήμα 20. Απεικόνιση πειραματικών δεδομένων αθροιστικής διήθησης διπλού κυλίνδρου τόσο για τον εσωτερικό κύλινδρο (ακτίνας 7.5cm) όσο και για τον εξωτερικό κύλινδρο (ακτίνας 15cm) στη μορφή της εξίσωσης (3) για βάθος διείσδυσης των κυλίνδρων ίσο με 20cm για τη μίξη χώματος – άμμου. Στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζεται ο χρόνος τ_1 .

Παρατηρούμε ότι τα πειραματικά δεδομένα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων στη μορφή της εξίσωσης (3), τόσο για τον εσωτερικό ($I_{r_{in}}$) όσο και για τον εξωτερικό κύλινδρο ($I_{r_{out}}$), παρουσιάζουν γραμμική συμπεριφορά στους αρχικούς χρόνους διήθησης. Αυτό συμβαίνει διότι στους αρχικούς χρόνους διήθησης κάτω από τους ομόκεντρους κυλίνδρους και μέχρι το χρόνο διήθησης τ_1 όπου το “μέτωπο διαβροχής” φτάνει στο κάτω χείλος των κυλίνδρων, το εδαφικό νερό κινείται μόνο

κατακόρυφα προς τα κάτω εφόσον η κίνησή του περιορίζεται από τα τοιχώματα των κυλίνδρων. Επομένως, τα μετρούμενα πειραματικά δεδομένα $(I_{r_{in}}), (I_{r_{out}})$, εκπεφρασμένα στη μορφή της εξίσωσης (3), ακολουθούν τη γραμμική συμπεριφορά δεδομένων κατακόρυφης μονοδιάστατης διήθησης (Valiantzas, 2010). Επίσης για όσο διαρκεί η γραμμική συμπεριφορά παρατηρούμε ότι οι δύο καμπύλες είναι σχεδόν ταυτόσημες, δηλαδή $I_{r_{in}}(\tau) \approx I_{r_{out}}(\tau)$ για $I \leq 8.5cm$. Η σχεδόν ταυτοποίηση των καμπυλών είναι απόλυτα λογική αν αναλογιστούμε ότι μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή (δηλαδή μέχρι το χρόνο που το μέτωπο διαβροχής φτάνει στο κάτω χείλος των κυλίνδρων, χρόνος τ_1) το πείραμα των ομόκεντρων κυλίνδρων ανάγεται σε ένα ταυτόχρονο πείραμα μέτρησης της μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης τόσο στον εσωτερικό όσο και στον εξωτερικό κύλινδρο με τις ίδιες ακριβώς αρχικές και οριακές συνθήκες. Η ελάχιστη διαφοροποίηση των δύο καμπυλών μέχρι τον χρόνο τ_1 μπορεί να οφείλεται σε πιθανό συστηματικό σφάλμα μετρήσεων, π.χ. της εκτίμησης του όγκου των κυλίνδρων.

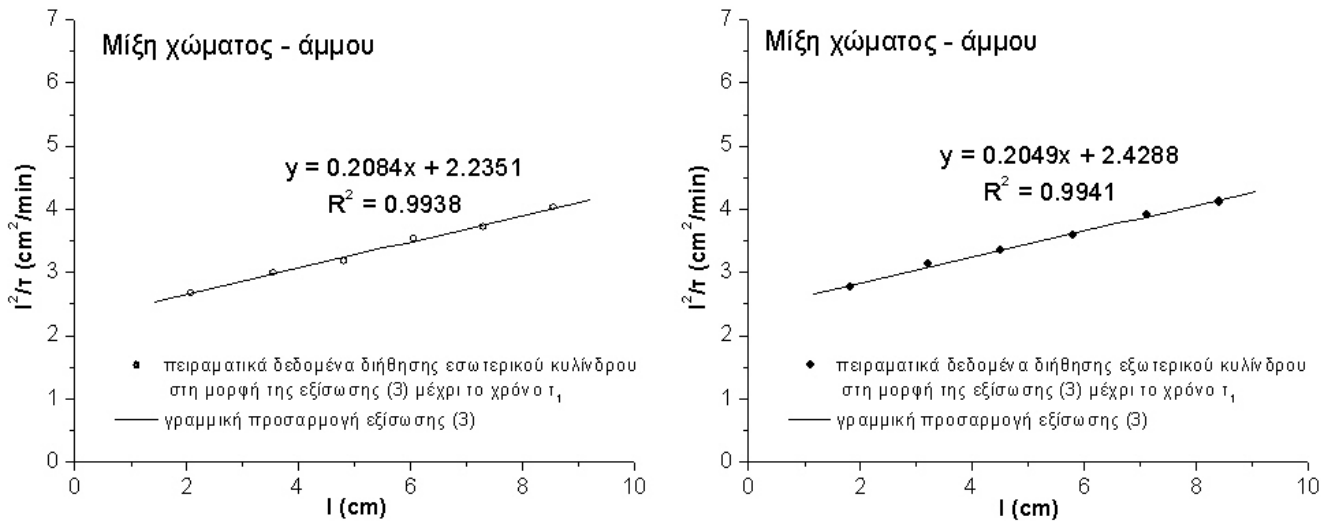
Μετά το γραμμικό τμήμα των πειραματικών δεδομένων αθροιστικής διήθησης $(I_{r_{in}}), (I_{r_{out}})$ στη μορφή της εξίσωσης (3), η κλίση της καμπύλης που αντιστοιχεί στον εξωτερικό κύλινδρο $(I_{r_{out}})$ αρχίζει να έχει συνεχώς μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τη κλίση της καμπύλης που αντιστοιχεί στον εσωτερικό κύλινδρο $(I_{r_{in}})$, διότι πλέον ισχύει $(I_{r_{out}}) > (I_{r_{in}})$. Η διαφοροποίηση της κλίσης των δύο προαναφερθέντων καμπυλών είναι μικρή μεν, διακριτή δε. Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη τάση μη έντονου διαχωρισμού των καμπυλών παρατηρήθηκε και στις αριθμητικές προσομοιώσεις διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων όπου όσο αυξανόταν το βάθος διείδυσης τόσο μειωνόταν η διακριτότητα των δύο καμπυλών. Το σημείο στο οποίο οι δύο προαναφερθέντες καμπύλες ξεκινούν να έχουν διαφορετικές κλίσεις αντιστοιχεί στο χρόνο τ_1 που απεικονίζεται στο σχήμα (20). Ο χρόνος τ_1 αντιστοιχεί στην τιμή των $\approx 15.5min$. Η τιμή αυτή επιβεβαιώθηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα εδαφικής υγρασίας που ελήφθησαν από τους αισθητήρες υγρασίας EC5-Decagon Devices. Συγκεκριμένα, κατά την έναρξη του πειράματος διήθησης ταυτόχρονα άρχισε και η καταγραφή των πειραματικών δεδομένων εδαφικής υγρασίας από τους αισθητήρες υγρασίας μέσω του

καταγραφέα δεδομένων (data logger). Σύμφωνα με τις ενδείξεις όλων των αισθητήρων υγρασίας, η αρχική τιμή υγρασίας κατά την έναρξη του πειράματος διήθησης ήταν $0\text{m}^3/\text{m}^3$, εφόσον το πορώδες μέσο (μίξη χώματος άμμου) που τοποθετήθηκε μέσα στο κувίο ήταν τελείως ξηρό. Ο αισθητήρας υγρασίας με αριθμό (1) είχε τοποθετηθεί σε βάθος 24cm (σχήμα 10). Λαμβάνοντας υπόψη τον όγκο αναφοράς του αισθητήρα EC5 και το ότι το βάθος διείσδυσης των ομόκεντρων κυλίνδρων ήταν ίσο με 20cm, γίνεται κατανοητό ότι η πρώτη μεταβολή στην ένδειξη του συγκεκριμένου αισθητήρα υγρασίας υποδηλώνει την έλευση του “μετώπου διαβροχής” στο βάθος των 20cm, δηλαδή την έλευση του μετώπου διαβροχής από το κάτω χείλος των κυλίνδρων. Όπως φαίνεται από τη μεταβολή της υγρασίας του αισθητήρα (1) συναρτήσει του χρόνου διήθησης τ στο σχήμα (21), αυτό συνέβη στο χρόνο ≈ 15 min από την έναρξη του πειράματος, χρονική στιγμή κατά την οποία η ένδειξη του συγκεκριμένου αισθητήρα μεταβλήθηκε από $0\text{cm}^3/\text{cm}^3$ σε $0.03\text{cm}^3/\text{cm}^3$. Επομένως ο χρόνος τ_1 που προσδιορίστηκε γραφικά από τα πειραματικά δεδομένα διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων χρησιμοποιώντας τη προτεινόμενη μέθοδο είναι σε πολύ καλή συμφωνία με το χρόνο τ_1 που προσδιορίστηκε από τη μέτρηση της εδαφικής υγρασίας με τους αισθητήρες EC5.



Σχήμα 21. Απεικόνιση της μεταβολής των ενδείξεων υγρασίας του αισθητήρα υγρασίας (1) συναρτήσει του χρόνου διήθησης τ κατά τη διάρκεια του πειράματος ομόκεντρων κυλίνδρων.

Στο σχήμα (22) απεικονίζονται τα πειραματικά δεδομένα αθροιστικής διήθησης τόσο για τον εσωτερικό όσο και για τον εξωτερικό κύλινδρο, εκπεφρασμένα στη μορφή της εξίσωσης (3), μέχρι τον χρόνο τ_1 (που προσδιορίστηκε γραφικά από το σχήμα 20). Η γραμμική προσαρμογή της εξίσωσης (3) οδήγησε στις αντίστοιχες εξισώσεις που παρουσιάζονται στο σχήμα (22). Ο συντελεστής προσδιορισμού της γραμμικής προσαρμογής είναι $R^2 > 0.99$ και για τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 22. Απεικόνιση της γραμμικής προσαρμογής της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) στα πειραματικά δεδομένα αθροιστικής διήθησης τόσο του εσωτερικού (αριστερά) όσο και του εξωτερικού κυλίνδρου (δεξιά) μέχρι το χρόνο τ_1 .

Σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στο υποκεφάλαιο 3.1, η κλίση της ευθείας γραμμής που προκύπτει από την γραμμική προσαρμογή αντιπροσωπεύει το K_s . Επομένως, στη μεν περίπτωση χρησιμοποίησης των δεδομένων διήθησης του εσωτερικού κυλίνδρου μέχρι τον χρόνο τ_1 η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό εκτιμάται να είναι 0.2084cm/min, στη δε περίπτωση των δεδομένων του εξωτερικού κυλίνδρου η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό εκτιμάται να είναι 0.2049cm/min (σχήμα 22). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τιμές του K_s που προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα αθροιστικής διήθησης τόσο του εσωτερικού όσο και του εξωτερικού κυλίνδρου είναι σχεδόν ταυτόσημες (η σχετική διαφορά τους είναι μόλις 1.7%) αφού μέχρι τον χρόνο τ_1 ισχύει $(I_{r_{in}}) \approx (I_{r_{out}})$, όπως συζητήθηκε προηγουμένως. Η μέση τιμή των δύο

παραπάνω τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό συμβολίζεται ως

$$K_{s,es}^{(DR)} = \frac{0.2084 + 0.2049}{2} \text{ cm/min} = 0.2066 \text{ cm/min}. \text{ Σύμφωνα και πάλι με την ανάλυση}$$

που έγινε στο υποκεφάλαιο 3.1, το σημείο τομής της ευθείας γραμμής (που προκύπτει από την παραπάνω γραμμική προσαρμογή) με τον άξονα των Y αντιπροσωπεύει το S^2 .

Στη περίπτωση χρησιμοποίησης των δεδομένων διήθησης του εσωτερικού κυλίνδρου η απορροφητικότητα λαμβάνει τη τιμή $\sqrt{2.2351} = 1.50 \text{ cm}/\sqrt{\text{min}}$ ενώ στη περίπτωση των δεδομένων διήθησης του εξωτερικού κυλίνδρου η απορροφητικότητα έχει τιμή $\sqrt{2.4288} = 1.54 \text{ cm}/\sqrt{\text{min}}$ (σχήμα 22), τιμές που ουσιαστικά ταυτίζονται μεταξύ τους. Η μέση τιμή των δύο παραπάνω τιμών απορροφητικότητας συμβολίζεται ως

$$S_{es}^{(DR)} = \frac{1.5 + 1.54}{2} \text{ cm}/\sqrt{\text{min}} = 1.52 \text{ cm}/\sqrt{\text{min}}. \text{ Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν ακόμα}$$

περισσότερο την ορθότητα του πειράματος των ομόκεντρων κυλίνδρων.

Για την πειραματική επαλήθευση της προτεινόμενης μεθόδου προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους ακολουθεί σύγκριση των τιμών των παραμέτρων K_s και S που εκτιμήθηκαν από τα πειραματικά δεδομένα των ομόκεντρων κυλίνδρων σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο με αυτές που προέκυψαν από το πείραμα μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης στο ίδιο πορώδες μέσο (μίξη χώματος – άμμου). Επιπλέον η τιμή του K_s που εκτιμήθηκε από το πείραμα των ομόκεντρων κυλίνδρων συγκρίνεται με την πειραματική τιμή άμεσου προσδιορισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας στον κορεσμό με τη μέθοδο σταθερού φορτίου που πραγματοποιήθηκε σε κορεσμένο δείγμα του ίδιου πορώδους μέσου (μίξη χώματος – άμμου) σε μικρό κατακόρυφο κύλινδρο (ύψους 10cm και διαμέτρου 7cm).

Η γραμμική προσαρμογή των πειραματικών δεδομένων κατακόρυφης μονοδιάστατης διήθησης στο ίδιο πορώδες μέσο, εκπεφρασμένων υπό την μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3), οδηγεί στις εκτιμήσεις $K_s = 0.187 \text{ cm/min}$ και $S = 1.62 \text{ cm min}^{-0.5}$ (σχήμα 12). Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές των K_s και S με τις αντίστοιχες μέσες τιμές τους που προκύπτουν από το πείραμα ομόκεντρων κυλίνδρων ($K_s = 0.2066 \text{ cm/min}$ και $S = 1.52 \text{ cm min}^{-0.5}$), παρατηρούμε ότι: όσον αφορά την υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό K_s η επί τοις εκατό (%) διαφορά εκτίμησης είναι

+10.48%, ενώ όσον αφορά την απορροφητικότητα S η επί τοις εκατό (%) διαφορά εκτίμησης είναι -6.2%.

Η μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό με τη μέθοδο σταθερού φορτίου βρέθηκε να είναι ίση με 0.21cm/min. Στην περίπτωση αυτή παρατηρούμε ότι το επί τοις εκατό (%) σφάλμα εκτίμησης της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό K_s είναι +8.7%.

Συνολικά τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους K_s και S παρέχει αρκετά καλές εκτιμήσεις για τις δύο αυτές υδραυλικές παραμέτρους και έχει αποδεκτή ακρίβεια σφάλματος εκτίμησης τους. Στο σημείο αυτό σημειώνεται και πάλι ότι μία ακρίβεια προσδιορισμού του K_s της τάξης 10-15% είναι στη πράξη αποδεκτή (Philip, 1987) λαμβάνοντας υπόψη διάφορους παράγοντες αβεβαιότητας που επικρατούν στο πεδίο (π.χ ακρίβεια μέτρησης, ετερογένεια κ.τ.λ.) και επίσης ότι το K_s είναι η παράμετρος με τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα στο προσδιορισμό της κατά την εφαρμογή του αντίστροφου προβλήματος (Clausnitzer et al., 1998; Valiantzas, 2010).

Σημείωση: Όπως αναφέρθηκε, η χρήση διπλού κυλίνδρου γίνεται προκειμένου να μειωθεί η πλευρική ροή στον εσωτερικό κύλινδρο από τον οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις της αθροιστικής διήθησης με σκοπό να αποκτηθούν δεδομένα αθροιστικής διήθησης που προσεγγίζουν τη μονοδιάστατη κατακόρυφη διήθηση. Εν συνεχεία, μια τυπική διαδικασία εκτίμησης των εδαφικών υδραυλικών ιδιοτήτων K_s , S θα αποτελούσε η προσαρμογή μίας εκ των προτεινόμενων στη βιβλιογραφία εξισώσεων κατακόρυφης διήθησης, μέσω της μη γραμμικής τεχνικής ελαχιστοποίησης των τετραγώνων (Marquardt, 1963), στα δεδομένα αθροιστικής διήθησης του εσωτερικού κυλίνδρου. Ας εξετάσουμε τις τιμές των K_s και S που προκύπτουν από την προσαρμογή πέντε εξισώσεων διήθησης στα δεδομένα διήθησης του εσωτερικού κυλίνδρου του ελεγχόμενου πειράματος ομόκεντρων κυλίνδρων στη μίξη χώματος-άμμου. Οι εξισώσεις διήθησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

Swartzendruber (1987), με $\alpha=1$

$$i = K_s t + \frac{S}{\alpha} \left[1 - \exp(-\alpha t^{0.5}) \right], \text{ συμβολίζεται ως (SW)}$$

Brutsaert (1977), με $\beta=1$

$$i = K_s t + \frac{S^2}{\beta K_s} \left[1 - \frac{1}{1 + \beta K_s \sqrt{t} / S} \right], \text{ συμβολίζεται ως (BR)}$$

Parlange et. al. (1982), με $\delta=0.85$

$$t = \frac{S^2}{2K_s^2(1-\delta)} \left[\frac{2K_s i}{S^2} - \ln \left(\frac{\exp\left(\frac{2\delta K_s i}{S^2}\right) + \delta - 1}{\delta} \right) \right], \text{ συμβολίζεται ως (PA)}$$

Stroosnijder (1976)

$$i = K_s t + \frac{3S^2}{4K_s} \left[1 - \exp\left(-\frac{4K_s t^{0.5}}{3S}\right) \right], \text{ συμβολίζεται ως (ST)}$$

Valiantzas (2010)

$$I = 0.5K_s \tau + S\sqrt{\tau} \left(1 + (0.5K_s / S)^2 \tau \right)^{1/2}, \text{ συμβολίζεται ως (VZ)}$$

Οι παράμετροι προσαρμογής των K_s και S που προκύπτουν για τις επιλεγμένες εξισώσεις διήθησης είναι:

$$\text{SW} (K_s = 0.269 \text{ cm} / \text{ min} , \alpha = 0,512 \text{ και } S = 1.957 \text{ cm min}^{-0.5})$$

$$\text{BR} (K_s = 0.253 \text{ cm} / \text{ min} \text{ και } S = 1.460 \text{ cm min}^{-0.5})$$

$$\text{PA} (K_s = 0.268 \text{ cm} / \text{ min} \text{ και } S = 1.380 \text{ cm min}^{-0.5})$$

$$\text{ST} (K_s = 0.258 \text{ cm} / \text{ min} \text{ και } S = 1.344 \text{ cm min}^{-0.5})$$

$$\text{VZ} (K_s = 0.255 \text{ cm} / \text{ min} \text{ και } S = 1.260 \text{ cm min}^{-0.5})$$

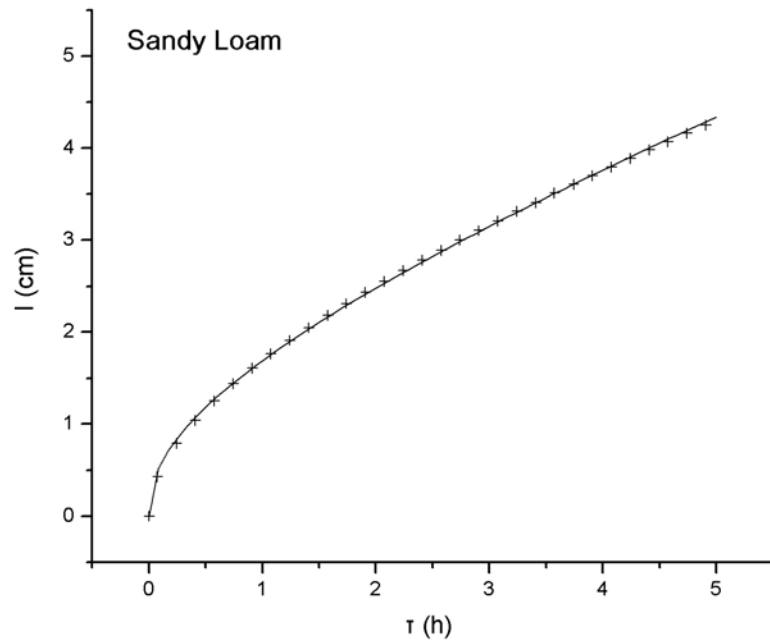
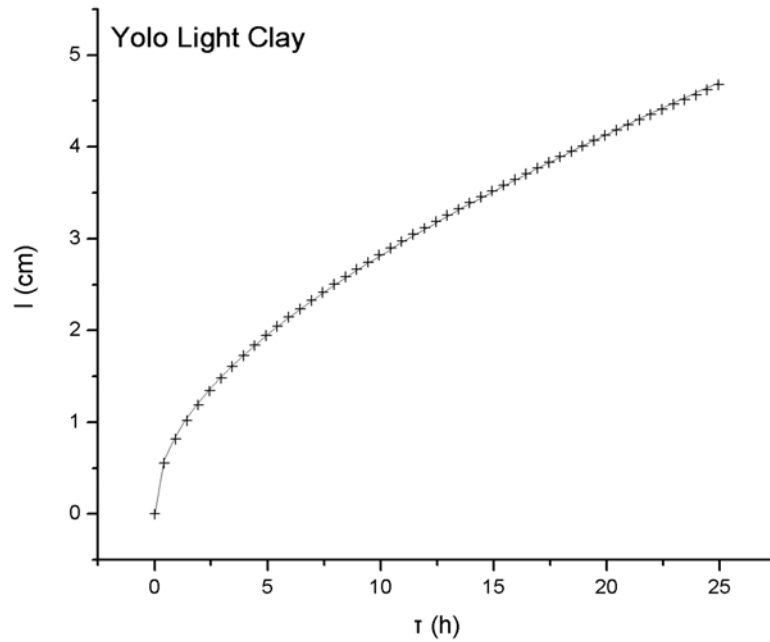
Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές των K_s και S που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη διαδικασία με τη τιμή $K_s = 0.21 \text{ cm/min}$ (που προέκυψε από τον άμεσο προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό με τη μέθοδο σταθερού φορτίου) και τη τιμή $S = \sqrt{2.64} \text{ cm min}^{-0.5} = 1.52 \text{ cm min}^{-0.5}$ (που προέκυψε από τα πειραματικά δεδομένα των ομόκεντρων κυλίνδρων σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο), παρατηρούμε ότι με το μοντέλο **SW** υπερεκτιμάται το K_s κατά 28% και το S κατά 29%, με το μοντέλο **BR** υπερεκτιμάται το K_s κατά 20.5% και υποεκτιμάται το S κατά 6.5%, με το μοντέλο **PA** υπερεκτιμάται το K_s κατά 27.6% και υποεκτιμάται το S κατά 9.5%, με το μοντέλο **ST** υπερεκτιμάται το K_s κατά 23% και υποεκτιμάται το S κατά 12.5% και με το μοντέλο **VZ** υπερεκτιμάται το K_s κατά 22% και υποεκτιμάται το S κατά 7.5%. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επίδραση της πλευρικής ροής που λαμβάνει χώρα κάτω από τον εσωτερικό κύλινδρο παρά την ύπαρξη του εξωτερικού κυλίνδρου (για το συγκεκριμένο πείραμα ομόκεντρων κυλίνδρων ακτίνας 7.5cm και 15cm για τον εσωτερικό και εξωτερικό κύλινδρο αντίστοιχα στη μίξη χώματος-άμμου) οδηγεί σε υπερεκτίμηση του K_s από 20.5-28%.

4.2 Διόρθωση της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκon για μεταβολή των αρχικών και οριακών συνθηκών διήθησης.

Στο σχήμα (23) απεικονίζεται η εξαιρετική προσαρμογή της “προέκτασης της δι-παραμετρικής εξίσωσης του Philip” (εξίσωση 18) στις δύο αριθμητικές αθροιστικές καμπύλες αναφοράς (κατακόρυφη διήθηση) για τα δύο εδάφη που μελετήθηκαν. Ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2 > 0.999$ και για τις δύο περιπτώσεις. Οι τιμές αναφοράς των παραμέτρων S_0 , α_0 της προέκτασης της δι-παραμετρικής εξίσωσης του Philip (δηλαδή οι τιμές που αντιστοιχούν στην κατάσταση αναφοράς ή αλλιώς “βασική περίπτωση”), που προέκυψαν με ανάλυση παλινδρόμησης στις αριθμητικές προσομοιώσεις για την κατάσταση αναφοράς, παρουσιάζονται στο πίνακα (9). Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζονται και οι τιμές αναφοράς των παραμέτρων κ_0 και α_0 της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκon που προκύπτουν από την εξίσωση (19).

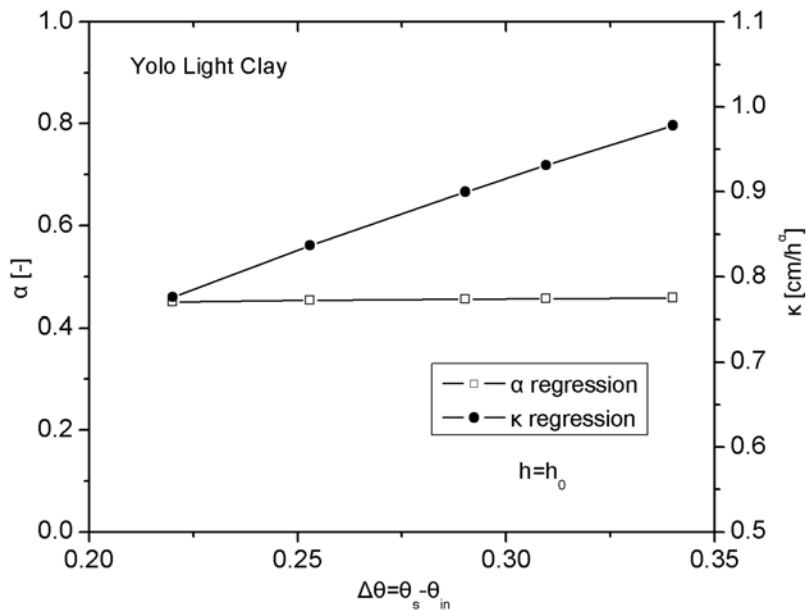
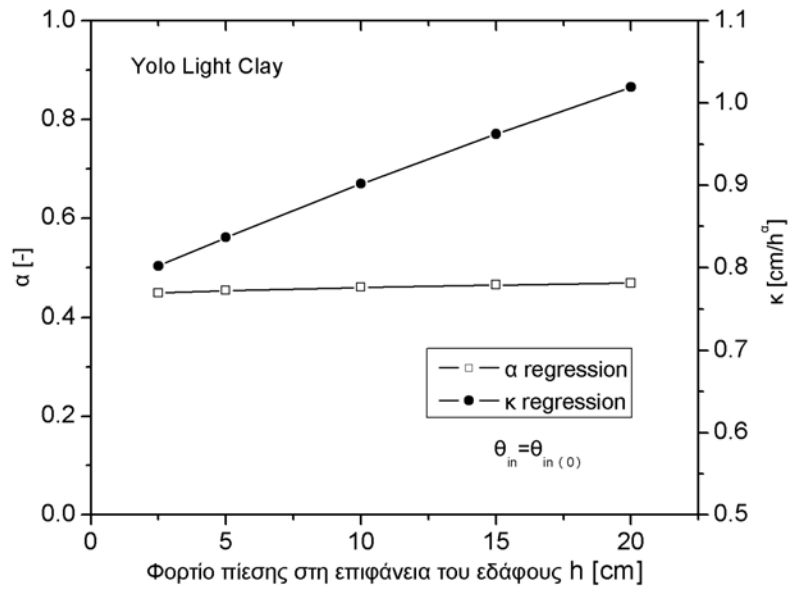
	Yolo Light Clay	Sandy Loam
“Προέκταση της δι-παραμετρικής εξίσωσης του Philip”	$S_0 = 0.821 \text{ cm h}^{-0.5}$	$S_0 = 1.428 \text{ cm h}^{-0.5}$
	$\alpha_0 = 0.453$	$\alpha_0 = 0.408$
Προέκταση της εξίσωσης του Kostiaκon	$\kappa_0 = 0.836 \text{ cm/h}^a$	$\kappa_0 = 1.338 \text{ cm/h}^a$
	$\alpha_0 = 0.453$	$\alpha_0 = 0.408$

Πίνακας 9. Οι τιμές αναφοράς των παραμέτρων της “προέκτασης της δι-παραμετρικής εξίσωσης του Philip” και της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκon.

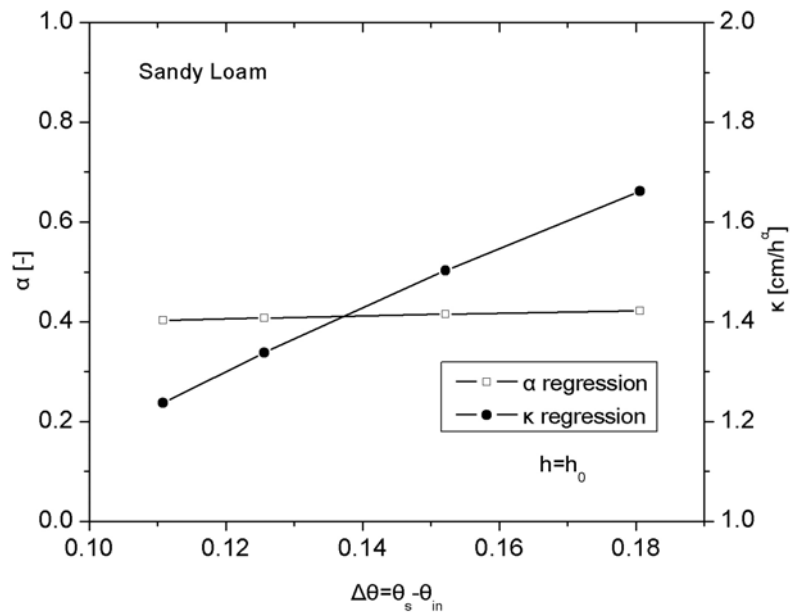
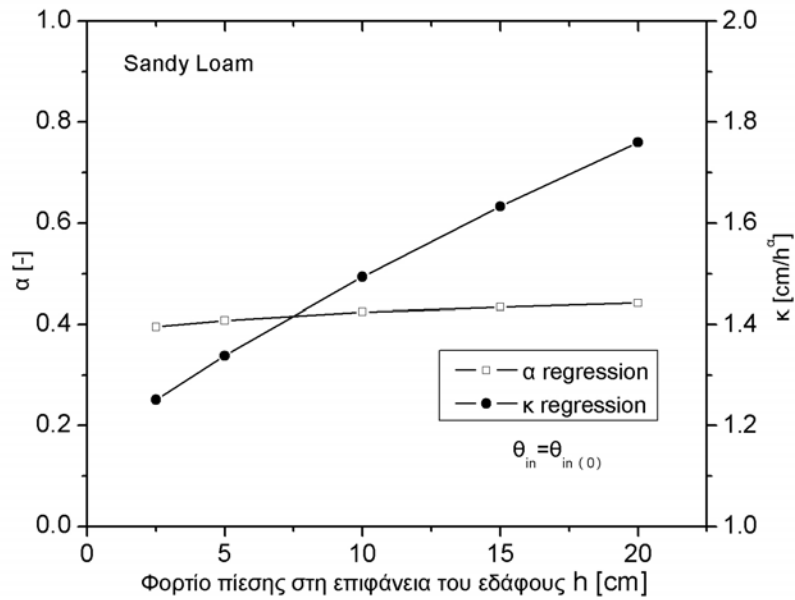


Σχήμα 23. Απεικόνιση της προσαρμογής της “προέκτασης της δι-παραμετρικής εξίσωσης του Philip” (συνεχής γραμμή) στις αριθμητικές προσομοιώσεις κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης από το HYDRUS-1D (σύμβολο “+”) για τις δύο καταστάσεις αναφοράς. Εδάφη: Yolo Light Clay (πάνω) και Sandy Loam (κάτω).

Στα σχήματα (24α)-(24β) παρουσιάζεται η διακύμανση των τιμών των παραμέτρων α , κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκon για τα δύο εδάφη οι οποίες προέκυψαν με ανάλυση παλινδρόμησης στα αριθμητικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης (HYDRUS-1D) όταν μεταβάλλεται το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους h ενώ η αρχική υγρασία θ_{in} παραμένει αμετάβλητη και ίση με την υγρασία αναφοράς $\theta_{in(0)}$, καθώς επίσης και τη μεταβολή των παραμέτρων α , κ όταν μεταβάλλεται η αρχική υγρασία θ_{in} (δηλαδή $\Delta\theta \neq \text{σταθερό}$) ενώ παραμένει αμετάβλητο το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους h και ίσο με τη τιμή αναφοράς h_0 . Τα αποτελέσματα δείχνουν την εξάρτηση των τιμών των παραμέτρων α , κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκon τόσο στις αρχικές όσο και στις οριακές συνθήκες διήθησης. Η διακύμανση των παραμέτρων α , κ είναι της τάξης του 10^{-2} και 10^{-1} αντίστοιχα και για τα δύο εδάφη. Γενικά, η μεταβολή των αρχικών και οριακών συνθηκών h , $\Delta\theta_{in}$ επηρεάζει με παρόμοιο τρόπο το εύρος τιμών της παραμέτρου α και για τα δύο εδάφη. Αντίθετα, η μεταβολή των h , $\Delta\theta_{in}$ επηρεάζει περισσότερο το εύρος τιμών της παραμέτρου κ στην περίπτωση του εδάφους Sandy Loam απ' ότι στο έδαφος Yolo Light Clay. Η τιμή της παραμέτρου κ αυξάνεται όσο αυξάνεται η τιμή του φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους h και όσο μειώνεται η τιμή της αρχικής υγρασίας θ_{in} . Σημειώνεται ότι τα συγκεκριμένα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με αυτά των Furman et al. (2006). Τέλος, η διακύμανση των τιμών του α σε σχέση με τη μεταβολή των h , $\Delta\theta_{in}$ είναι μάλλον ασήμαντη (οι τιμές του α διαφέρουν μόλις 5% κατά μέσο όρο σε όλη την εξεταζόμενη ζώνη μεταβολής των h , $\Delta\theta_{in}$) σε σχέση με την αντίστοιχη διακύμανση των τιμών του κ η οποία είναι μάλλον σημαντική (οι τιμές του κ διαφέρουν έως 30% κατά μέσο όρο).



Σχήμα 24α. Παρουσίαση της μεταβολής των παραμέτρων κ , α της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov που αποκτήθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης στα αριθμητικά δεδομένα κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης (HYDRUS-1D) συναρτήσει του φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους όταν $\theta_{in} = \theta_{in(0)}$ (πάνω) και συναρτήσει της διαφοράς $\Delta\theta = \theta_s - \theta_{in}$ όταν $h = h_0$ (κάτω) για το έδαφος Yolo Light Clay.

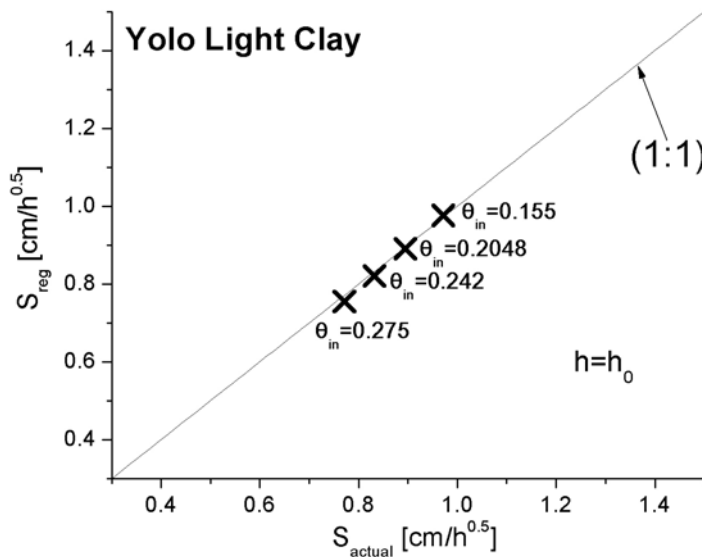
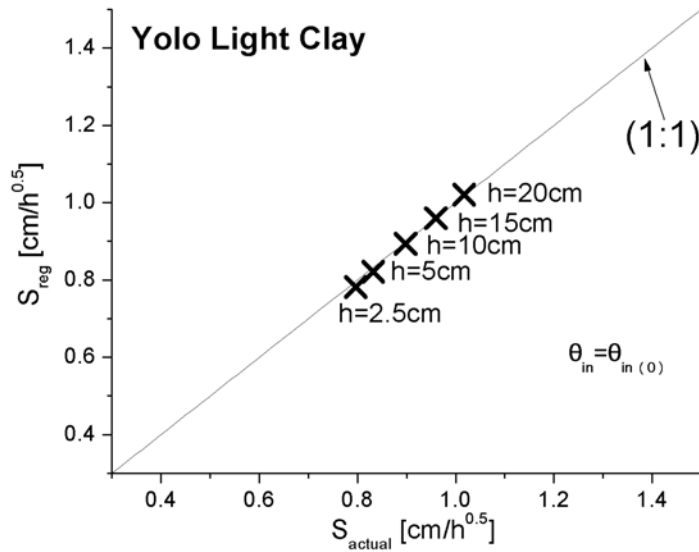


Σχήμα 24β. Παρουσίαση της μεταβολής των παραμέτρων κ , α της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov που αποκτήθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης στα αριθμητικά δεδομένα κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης (HYDRUS-1D) συναρτήσει του φορτίου πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους όταν $\theta_{in} = \theta_{in(0)}$ (πάνω) και συναρτήσει της διαφοράς $\Delta\theta = \theta_s - \theta_{in}$ όταν $h = h_0$ (κάτω) για το έδαφος Sandy Loam.

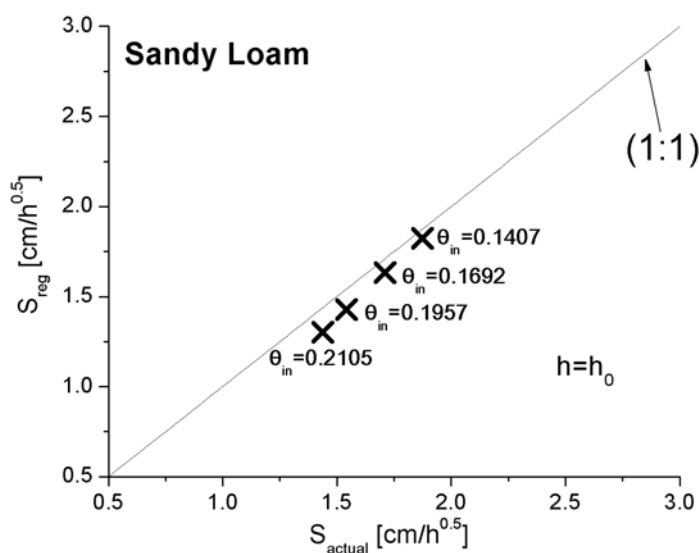
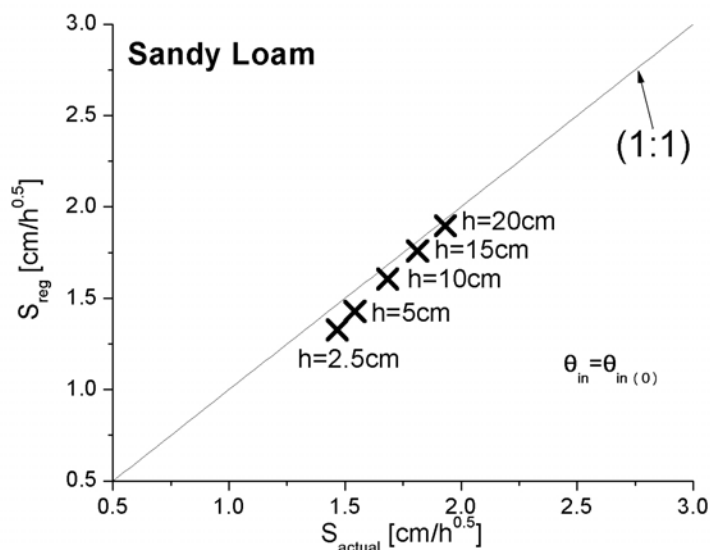
Στα σχήματα (25α)-(25β) απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ των πραγματικών τιμών της απορροφητικότητας S_{actual} που αποκτήθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης της εξίσωσης οριζόντιας διήθησης του Philip $I = S\sqrt{t}$ στα αριθμητικά δεδομένα οριζόντιας διήθησης και των τιμών της απορροφητικότητας $S_{reg} = \kappa_{reg}^{1/2a_{reg}}$ που αποκτήθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον στα αριθμητικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης όταν το h μεταβάλλεται ενώ $\theta_{in} = \theta_{in(0)}$ (πάνω) και όταν το θ_{in} μεταβάλλεται ενώ $h=h_0$ (κάτω) για τα δύο εδάφη που χρησιμοποιήθηκαν. Όσον αφορά το έδαφος Yolo Light Clay, παρατηρείται εξαιρετική συμφωνία μεταξύ των τιμών των S_{actual} , S_{reg} . Όσον αφορά το έδαφος Sandy Loam, παρατηρείται μία απόκλιση μεταξύ των τιμών των S_{actual} , S_{reg} . Παρ' όλα αυτά, σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η προέκταση της εξίσωσης του Kostiaκον (εξίσωση 15) μπορεί να συνδεθεί και να αποδοθεί με την μορφή της προέκτασης της δι-παραμετρικής εξίσωσης του Philip (εξίσωση 18), καθώς και ότι η απορροφητικότητα S στην εξίσωση (18) προσεγγίζει ικανοποιητικά τις τιμές της πραγματικής απορροφητικότητας S_{actual} .

Στα σχήματα (26α)-(26β) απεικονίζονται για τα δύο υπό μελέτη εδάφη οι εξής τρεις καμπύλες: η διορθωμένη αθροιστική καμπύλη διήθησης που προέρχεται από την προέκταση της εξίσωσης του Kostiaκον θέτοντας $\kappa = \kappa_{corrected}$ με χρήση της εξίσωσης (29) και διατηρώντας σταθερές τις τιμές των παραμέτρων α_0 και f_0 που αντιστοιχούν στην κατάσταση αναφοράς (αναγράφεται ως “correction”), η αθροιστική καμπύλη κατακόρυφης διήθησης που προέρχεται από αριθμητικές προσομοιώσεις με το λογισμικό μοντέλο HYDRUS-1D για μεταβολές του φορτίου πίεσης h στην επιφάνεια του εδάφους (πίνακας 5) διατηρώντας σταθερό το αρχικό υγρασιακό καθεστώς $\theta_{in} = \theta_{in(0)}$ (αναγράφεται ως “simulated”), καθώς επίσης και η αθροιστική καμπύλη κατακόρυφης διήθησης που αντιστοιχεί στις αρχικές και οριακές συνθήκες της κατάστασης αναφοράς, δηλαδή της βασικής περίπτωσης (αναγράφεται ως “base case”), η οποία προέρχεται από το αριθμητικό μοντέλο HYDRUS-1D. Στα σχήματα (27α)-(27β) απεικονίζονται για τα δύο υπό μελέτη εδάφη οι τρεις προαναφερθέντες αθροιστικές καμπύλες διήθησης που αντιστοιχούν στις μεταβολές του αρχικού υγρασιακού καθεστώτος θ_{in} (πίνακας 5) διατηρώντας σταθερό το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους $h = h_0$. Στα

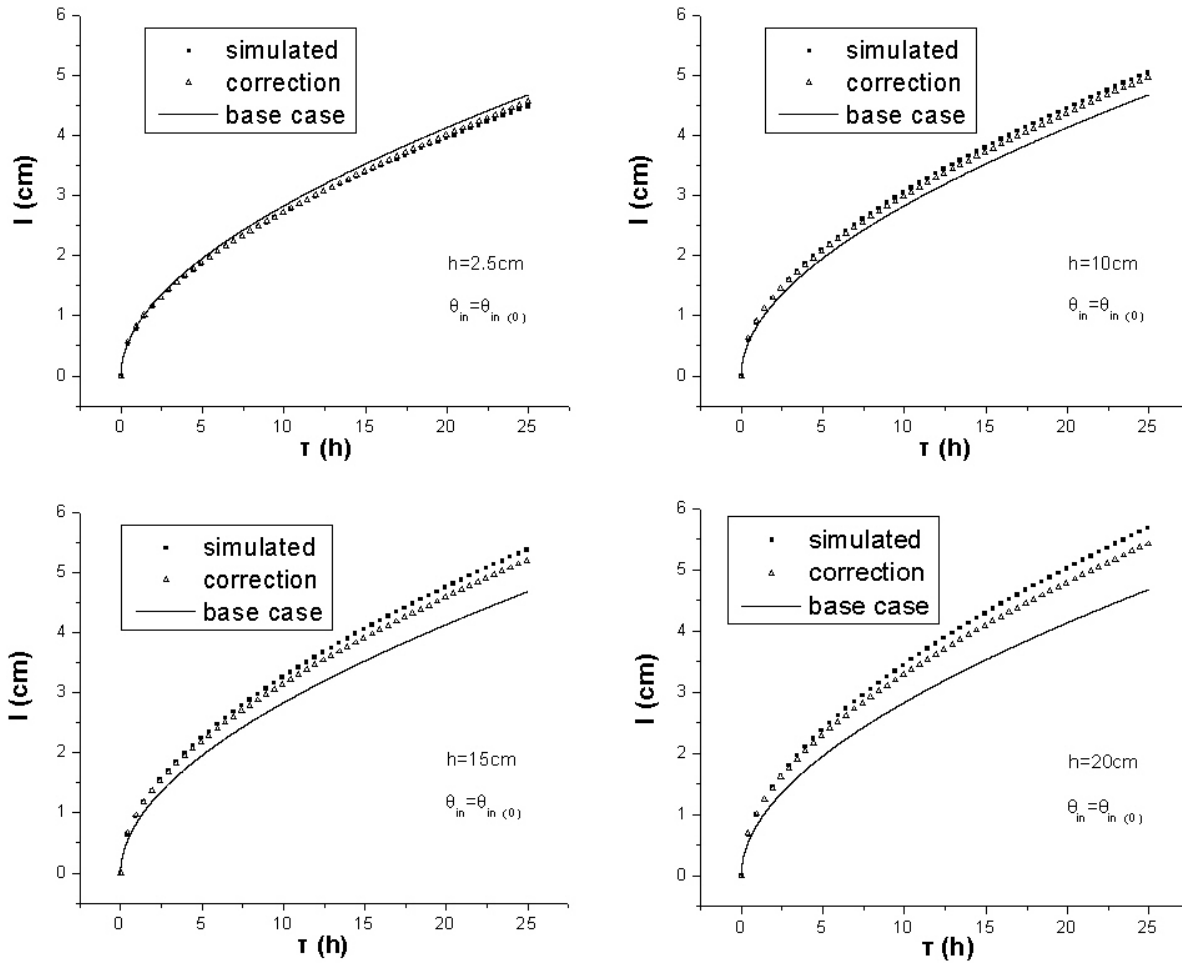
σχήματα (28α)-(28β)-(28γ) και (29α)-(29β)-(29γ) απεικονίζονται για τα δύο υπό μελέτη εδάφη οι τρεις προαναφερθέντες αθροιστικές καμπύλες διήθησης που αντιστοιχούν στην ταυτόχρονη μεταβολή τόσο του φορτίου πίεσης h στην επιφάνεια του εδάφους όσο και του αρχικού υγρασιακού καθεστώτος θ_{in} σε σχέση με την κατάσταση αναφοράς. Η καμπύλη “base case” είναι η ίδια σε όλες τις περιπτώσεις για καθένα από τα δύο υπό μελέτη εδάφη. Είναι φανερό ότι η καμπύλη διόρθωσης βρίσκεται σε όλες τις περιπτώσεις μεταξύ των άλλων δύο καμπυλών. Επίσης η καμπύλη διόρθωσης έχει τη γενική τάση να προσεγγίζει τη καμπύλη “simulated”. Μία πρώτη προσέγγιση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η γενική απόδοση της προτεινόμενης μεθόδου είναι ικανοποιητική. Η λεπτομερής ανάλυση των αποτελεσμάτων υποδεικνύει ότι η προτεινόμενη μέθοδος διόρθωσης έχει ελαφρώς καλύτερη απόδοση στο έδαφος Yolo Light Clay απ’ ότι στο έδαφος Sandy Loam, δηλαδή ότι οι καμπύλες “corrected” προσεγγίζουν ελαφρώς καλύτερα τις καμπύλες “simulated” στο έδαφος Yolo Light Clay απ’ ότι στο έδαφος Sandy Loam. Η διαφορά μεταξύ των δύο τελευταίων προαναφερθέντων καμπυλών αυξάνει όσο αυξάνεται το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους h και όσο μειώνεται το αρχικό υγρασιακό καθεστώς θ_{in} . Οι αποκλίσεις αυτές ίσως οφείλονται στη διακύμανση, έστω και μικρή, της παραμέτρου α της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov (σχήματα 24α, 24β) καθώς επίσης και στη μεταβολή της τιμής του φορτίου πίεσης h_f που αντιστοιχεί στο μέτωπο διαβροχής σύμφωνα με την ανάλυση των Green and Ampt με το αρχικό υγρασιακό καθεστώς θ_{in} . Παρ’ όλα αυτά, σε όλες τις περιπτώσεις οι μέγιστες αποκλίσεις μεταξύ των καμπυλών “corrected” και “simulated” παρατηρούνται σε ακραίες τιμές επιλογής του φορτίου πίεσης h (π.χ. $h=20\text{cm}$) οι οποίες όμως αντιστοιχούν σε μη ρεαλιστικές καταστάσεις σε ότι αφορά τη πρακτική των αρδεύσεων.



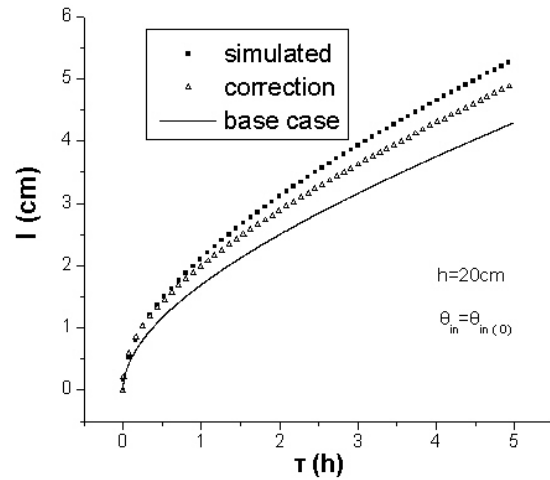
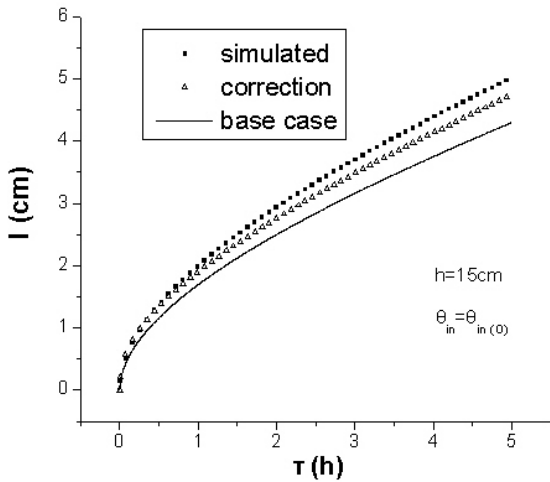
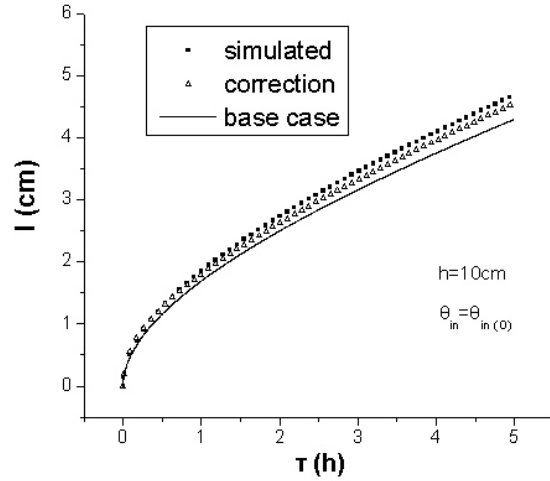
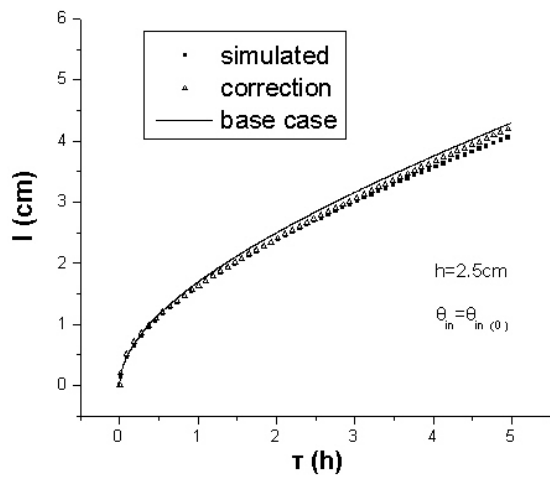
Σχήμα 25α. Σύγκριση μεταξύ των πραγματικών τιμών της απορροφητικότητας S_{actual} που αποκτήθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης της εξίσωσης $I = S\sqrt{t}$ στα αριθμητικά δεδομένα οριζόντιας διήθησης και των τιμών της απορροφητικότητας $S_{reg} = \kappa_{reg}^{1/2} a_{reg}$ που αποκτήθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον στα αριθμητικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης όταν το h μεταβάλλεται ενώ $\theta_{in} = \theta_{in(0)}$ (πάνω) και όταν το θ_{in} μεταβάλλεται ενώ $h=h_0$ (κάτω) για το έδαφος Yolo Light Clay.



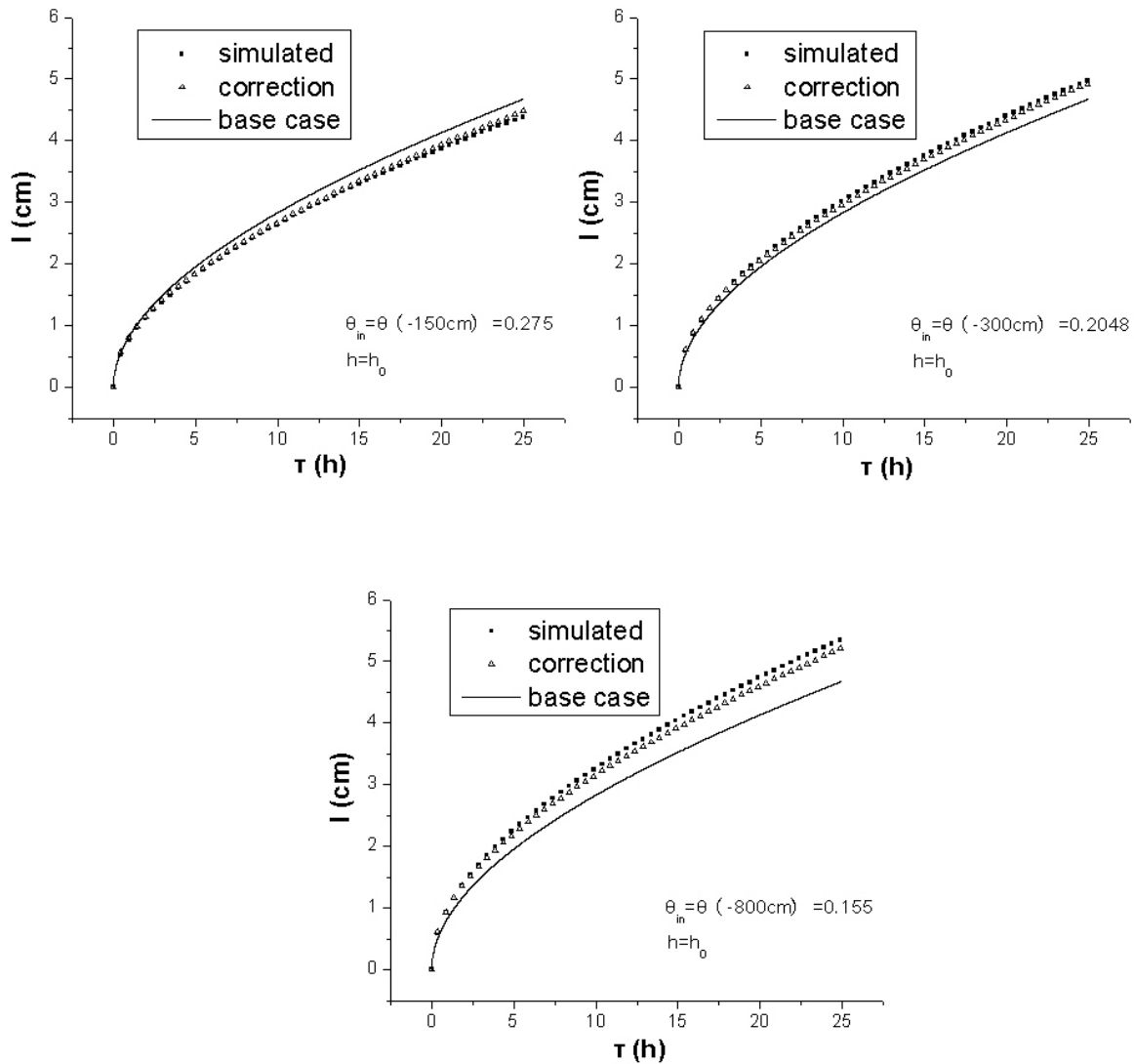
Σχήμα 25β. Σύγκριση μεταξύ των πραγματικών τιμών της απορροφητικότητας S_{actual} που αποκτήθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης της εξίσωσης $I = S\sqrt{t}$ στα αριθμητικά δεδομένα οριζόντιας διήθησης και των τιμών της απορροφητικότητας $S_{reg} = \kappa_{reg}^{1/2} a_{reg}$ που αποκτήθηκαν με ανάλυση παλινδρόμησης της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκον στα αριθμητικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης όταν το h μεταβάλλεται ενώ $\theta_{in} = \theta_{in(0)}$ (πάνω) και όταν το θ_{in} μεταβάλλεται ενώ $h=h_0$ (κάτω) για το έδαφος Sandy Loam.



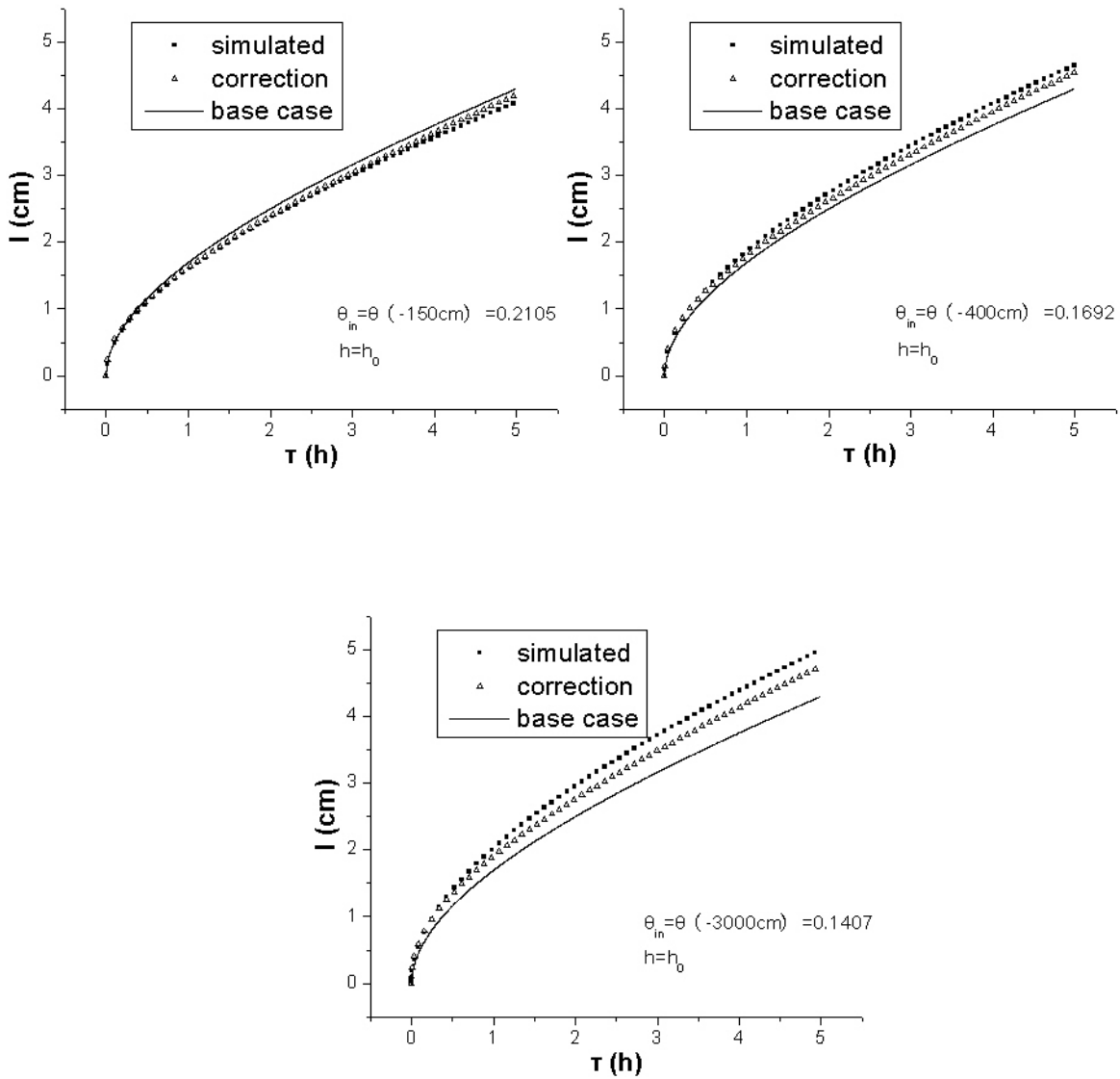
Σχήμα 26α. Απεικόνιση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης (εξίσωση 29) της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov όταν το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους h μεταβάλλεται ενώ $\theta_{in} = \theta_{in(0)}$ για το έδαφος Yolo Light Clay.



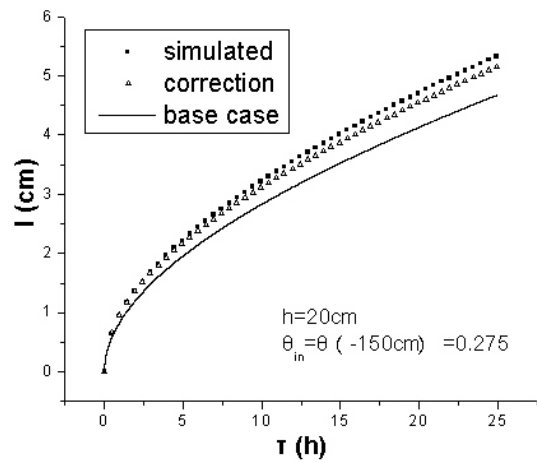
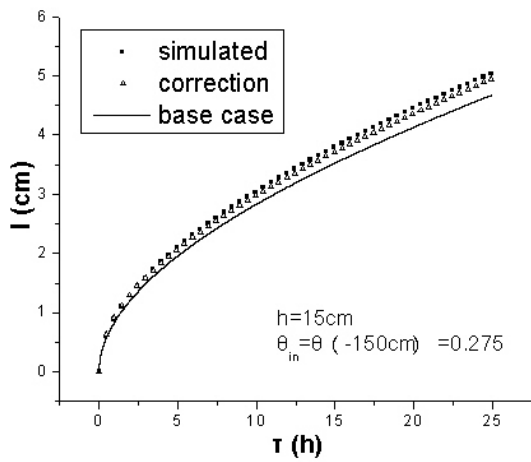
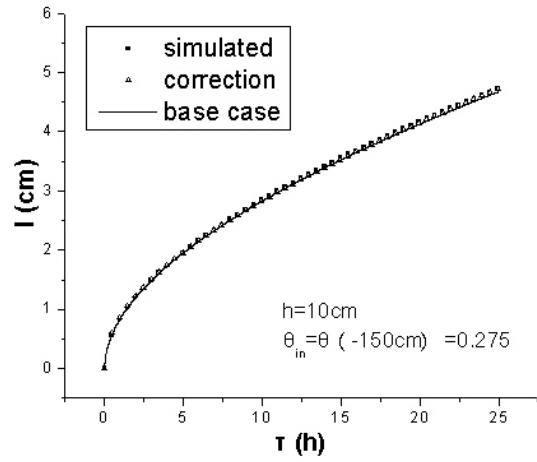
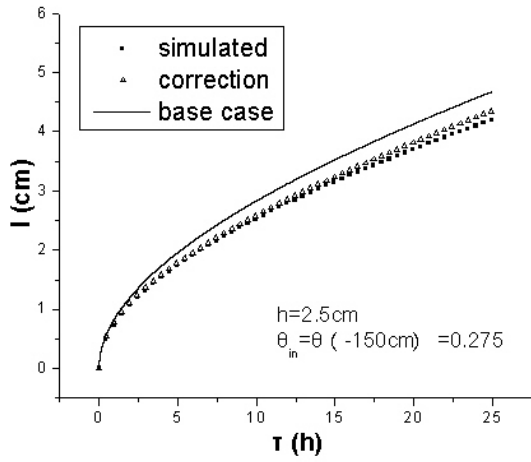
Σχήμα 26β. Απεικόνιση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης (εξίσωση 29) της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov όταν το φορτίο πίεσης στην επιφάνεια του εδάφους h μεταβάλλεται ενώ $\theta_{in} = \theta_{in(0)}$ για το έδαφος Sandy Loam.



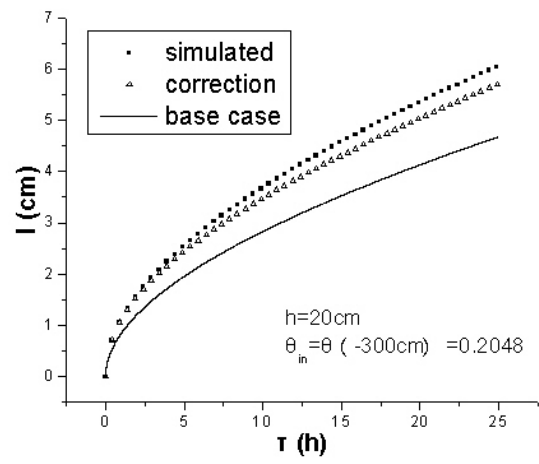
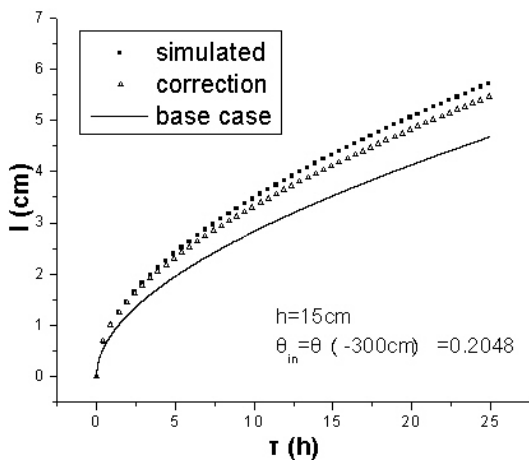
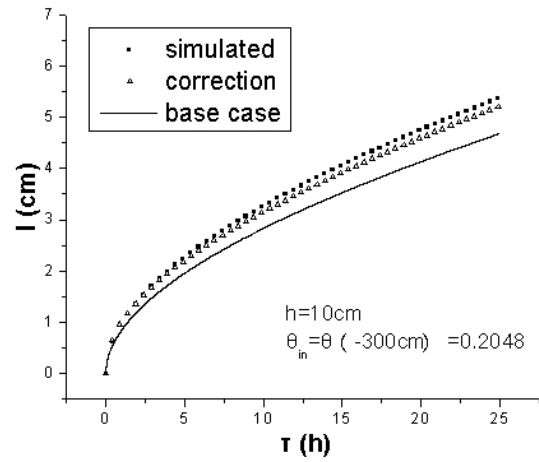
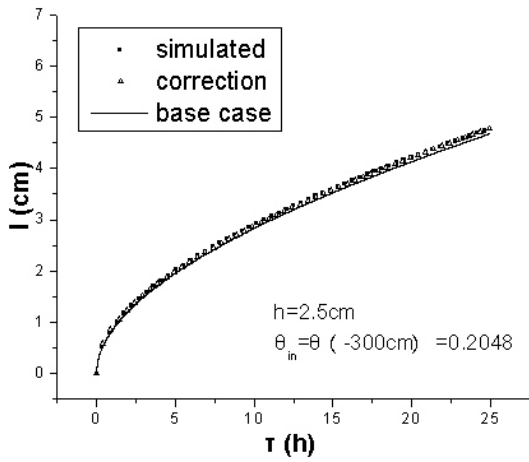
Σχήμα 27α. Απεικόνιση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης (εξίσωση 29) της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov όταν το αρχικό υγρασιακό καθεστώς θ_{in} μεταβάλλεται ενώ $h = h_0$ για το έδαφος Yolo Light Clay.



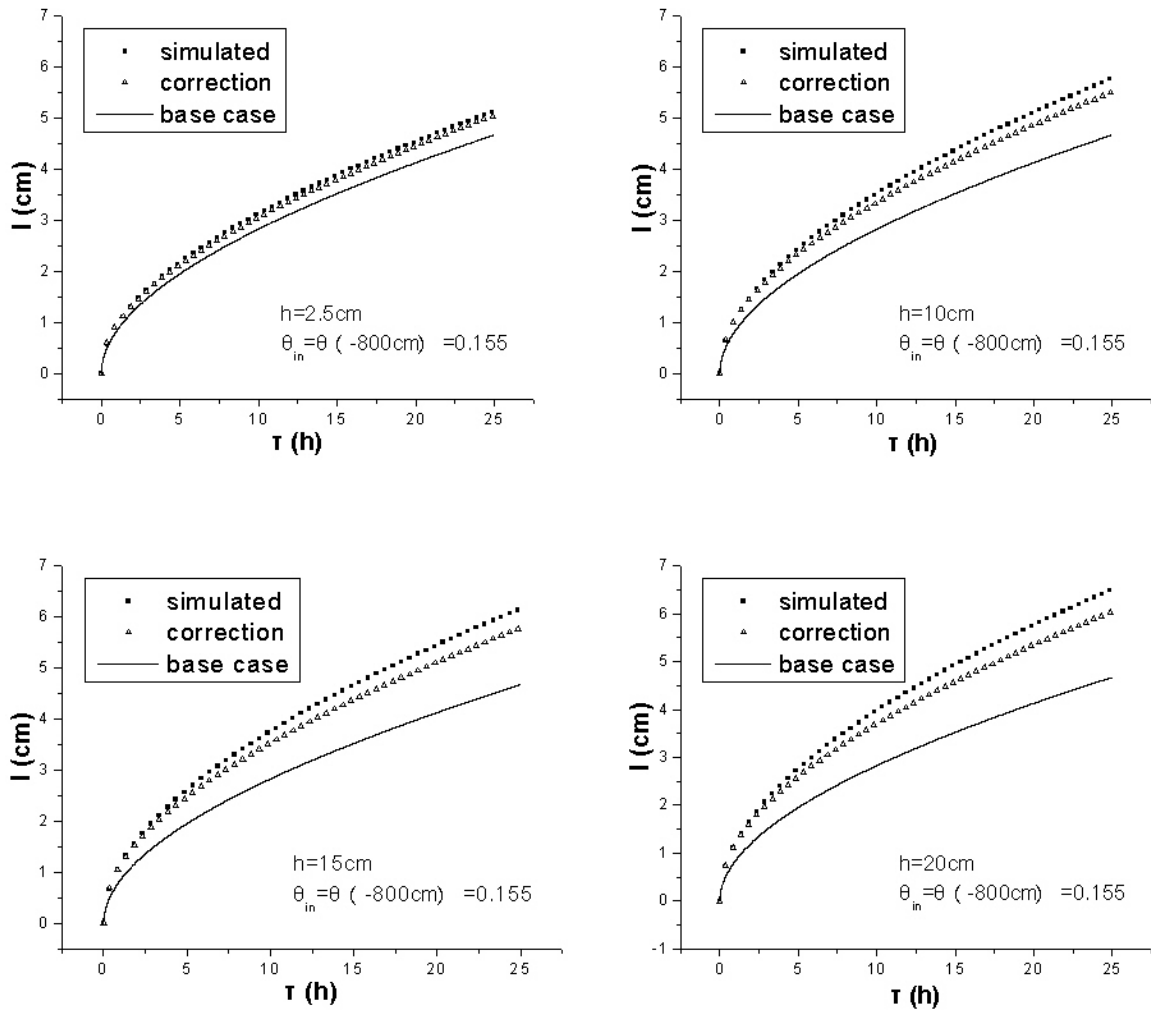
Σχήμα 27β. Απεικόνιση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης (εξίσωση 29) της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov όταν το αρχικό υγρασιακό καθεστώς θ_{in} μεταβάλλεται ενώ $h = h_0$ για το έδαφος Sandy Loam.



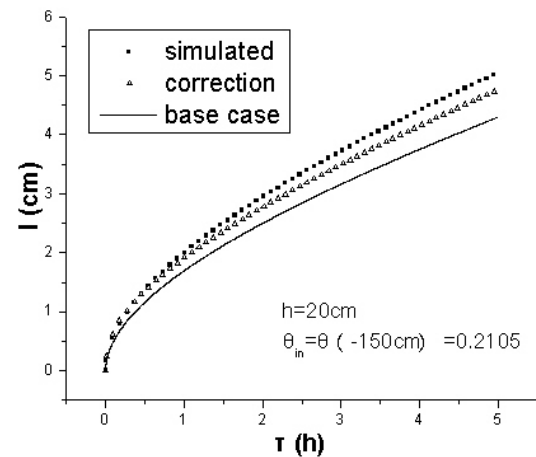
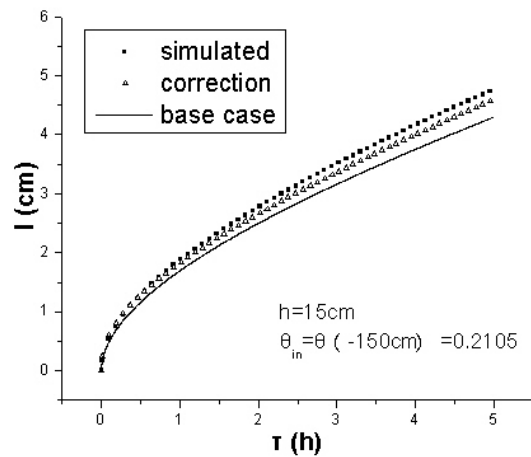
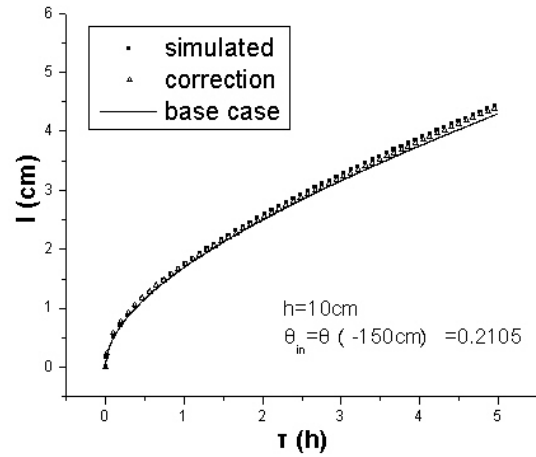
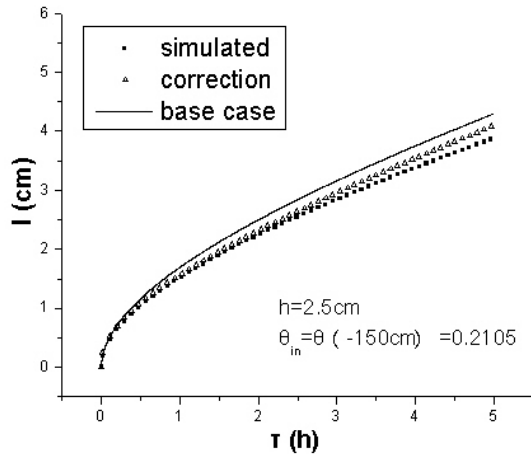
Σχήμα 28α. Απεικόνιση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης (εξίσωση 29) της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov για ταυτόχρονη μεταβολή των h , θ_{in} ($h=2.5-10-15-20\text{cm}$ και $\theta_{in}=0.275$) σε σχέση με την κατάσταση αναφοράς για το έδαφος Yolo Light Clay.



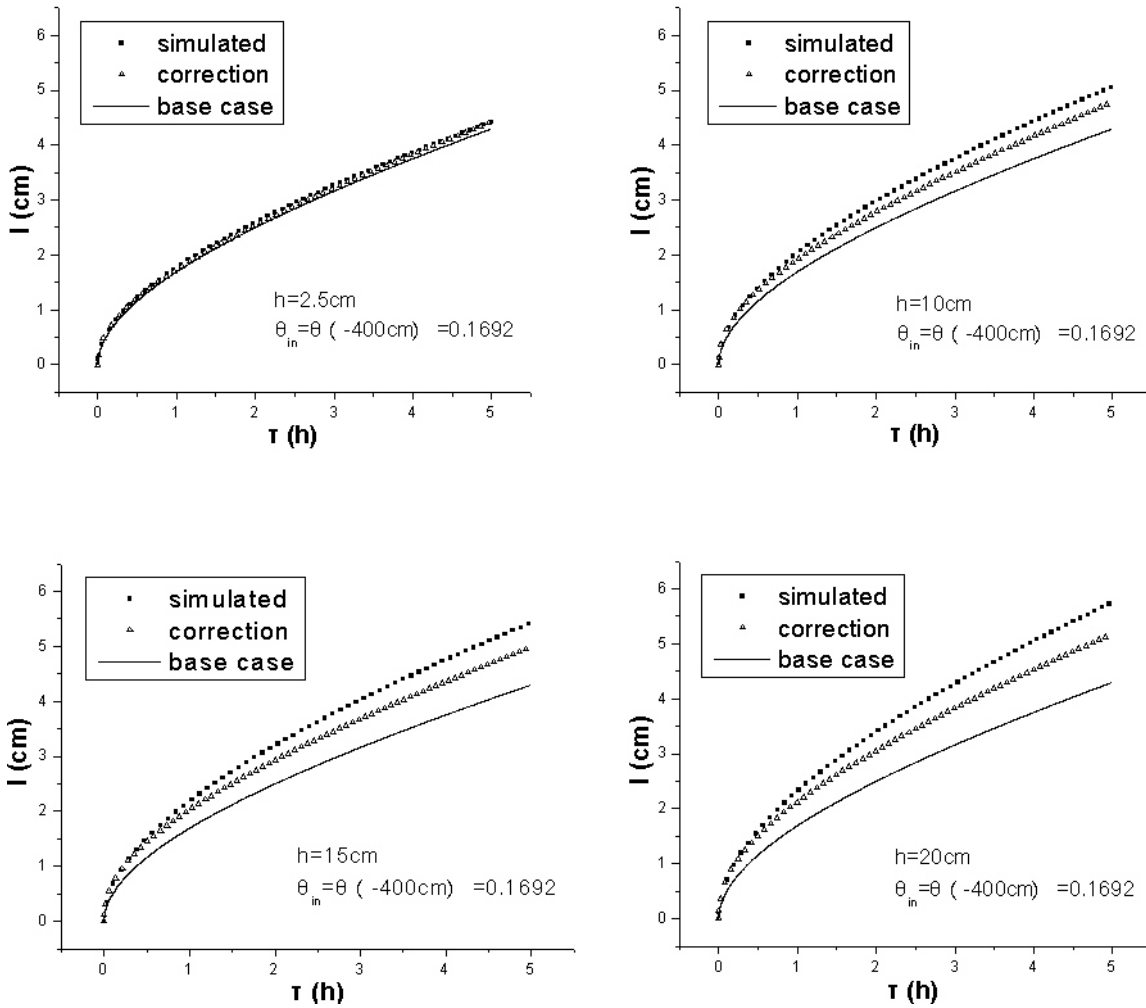
Σχήμα 28β. Απεικόνιση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης (εξίσωση 29) της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov για ταυτόχρονη μεταβολή των h , θ_{in} ($h=2.5-10-15-20\text{cm}$ και $\theta_{in}=0.2048$) σε σχέση με την κατάσταση αναφοράς για το έδαφος Yolo Light Clay.



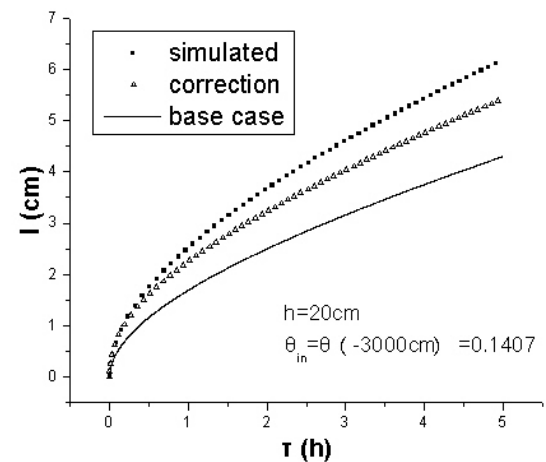
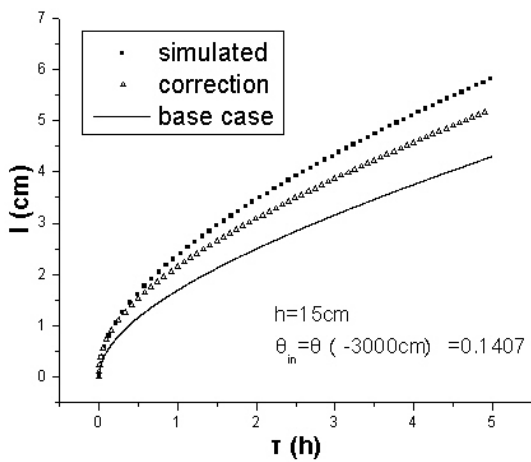
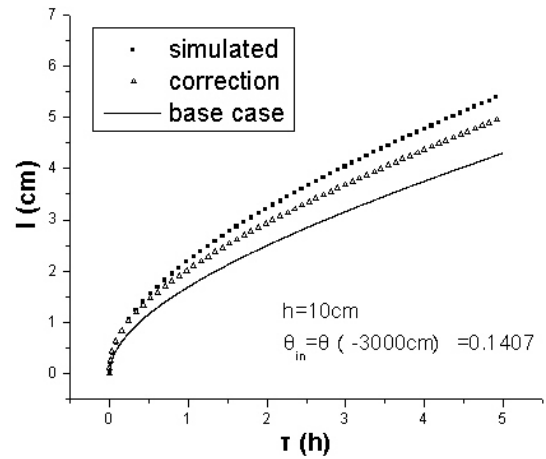
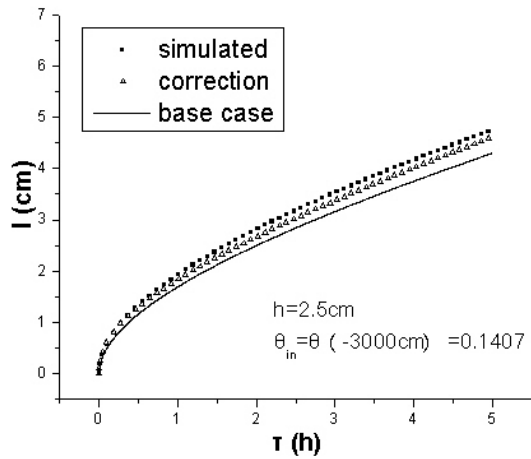
Σχήμα 28γ. Απεικόνιση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης (εξίσωση 29) της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov για ταυτόχρονη μεταβολή των h , θ_{in} ($h=2.5-10-15-20$ cm και $\theta_{in}=0.155$) σε σχέση με την κατάσταση αναφοράς για το έδαφος Yolo Light Clay.



Σχήμα 29α. Απεικόνιση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης (εξίσωση 29) της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov για ταυτόχρονη μεταβολή των h , θ_{in} ($h=2.5-10-15-20\text{cm}$ και $\theta_{in}=0.2105$) σε σχέση με την κατάσταση αναφοράς για το έδαφος Sandy Loam.



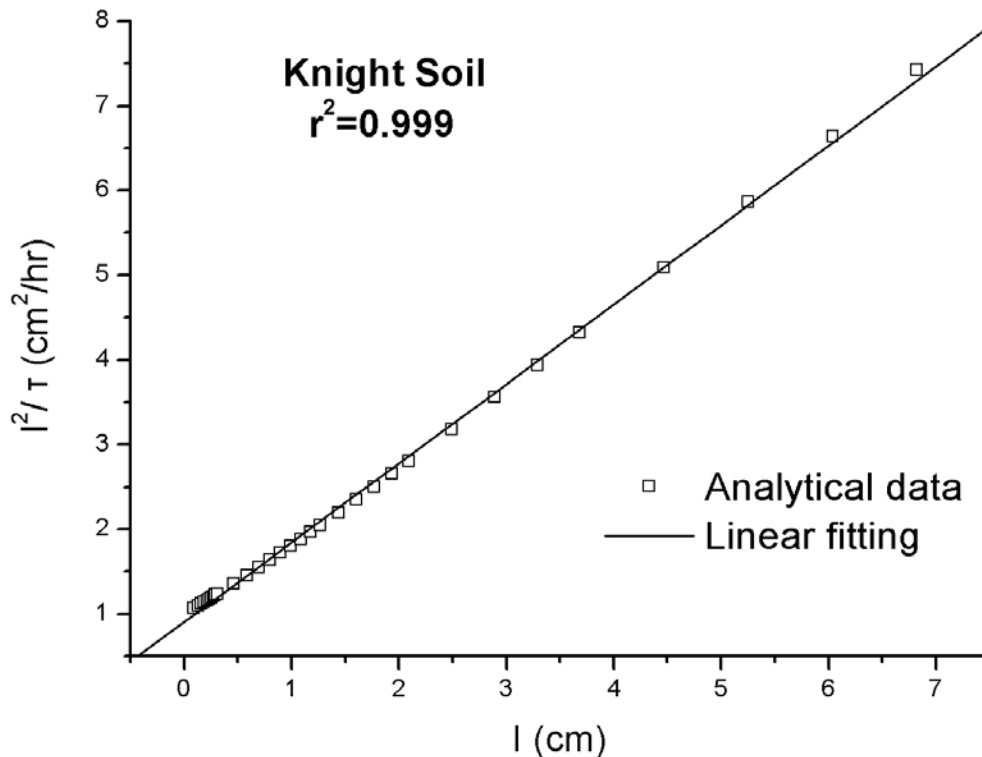
Σχήμα 29β. Απεικόνιση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης (εξίσωση 29) της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiakov για ταυτόχρονη μεταβολή των h , θ_{in} ($h=2.5-10-15-20\text{cm}$ και $\theta_{in}=0.1692$) σε σχέση με την κατάσταση αναφοράς για το έδαφος Sandy Loam.



Σχήμα 29γ. Απεικόνιση της προτεινόμενης μεθόδου διόρθωσης (εξίσωση 29) της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκon για ταυτόχρονη μεταβολή των h , θ_{in} ($h=2.5-10-15-20\text{cm}$ και $\theta_{in}=0.1407$) σε σχέση με την κατάσταση αναφοράς για το έδαφος Sandy Loam.

4.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων αριθμητικών μοντέλων διήθησης - επιλογή βέλτιστου χωρικού βήματος

Στο σχήμα (30) παρουσιάζονται τα αναλυτικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης (I, τ) για το έδαφος “Knight” (Philip, 1987) όταν αυτά μετασχηματίζονται στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3), δηλαδή ($I^2/\tau, I$). Ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 της γραμμικής προσαρμογής είναι 0.999. Στο σχήμα (30) φαίνεται καθαρά η ισχυρή γραμμική μορφή των αναλυτικών δεδομένων διήθησης, όταν αυτά μετασχηματίζονται στη μορφή της εξίσωσης (3). Αυτή η γραμμικότητα διατηρείται σε όλους του χρόνους διήθησης, ακόμα και στους πολύ αρχικούς χρόνους όπου $\tau \rightarrow 0$.



Σχήμα 30. Απεικόνιση της γραμμικότητας αναλυτικών δεδομένων κατακόρυφης διήθησης για το έδαφος “Knight” (Philip, 1987) στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) και παρουσίαση της γραμμικής προσαρμογής της στα αναλυτικά δεδομένα διήθησης.

Στο σχήμα (31) παρουσιάζονται αριθμητικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης όταν αυτά εκφράζονται στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) για το έδαφος Clay που προέρχονται από την βιβλιογραφία (Haverkamp et al., 1988) και για το έδαφος Berino Fine Sand που προέκυψαν από τη προσομοίωση του φαινομένου της κατακόρυφης διήθησης χρησιμοποιώντας το αριθμητικό μοντέλο των Wu et al. (1997). Είναι προφανές ότι η γραμμικότητα της εξίσωσης (3) παύει να υφίσταται στους αρχικούς χρόνους διήθησης και στις δύο περιπτώσεις, ενώ αντίθετα η γραμμικότητα θα έπρεπε να διατηρείται σε όλους τους χρόνους διήθησης ακόμα και όταν $\tau \rightarrow 0$ όπως αποδείχθηκε προηγουμένως στη περίπτωση των αναλυτικών δεδομένων διήθησης για το έδαφος Knight”.

Στο σχήμα (32) παρουσιάζονται για τα τρία υπό μελέτη εδάφη οι αθροιστικές καμπύλες κατακόρυφης διήθησης που προέρχονται χρησιμοποιώντας το αριθμητικό μοντέλο HYDRUS-1D στη περίπτωση που το αρχικό χρονικό βήμα $d\tau_{in}$ παραμένει σταθερό ενώ το χωρικό βήμα dz είναι να μεν ομοιόμορφο σε όλες τις προσομοιώσεις αλλά μεταβάλλεται από προσομοίωση σε προσομοίωση. Στο ίδιο σχήμα απεικονίζονται για τα τρία υπό μελέτη εδάφη οι αθροιστικές καμπύλες κατακόρυφης διήθησης που προέρχονται χρησιμοποιώντας την αναλυτική λύση των Warrick et al. (1985) για τις ίδιες αρχικές και οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν και στις προσομοιώσεις με το λογισμικό HYDRUS-1D. Μία πρώτη οπτική σύγκριση των αθροιστικών καμπυλών δείχνει ότι υπάρχει συμφωνία μεταξύ των αναλυτικών και αριθμητικών δεδομένων για τα εδάφη Loam και Yolo Light Clay για όλες τις τιμές του επιλεγμένου χωρικού βήματος dz . Όσον αφορά το έδαφος Sandy Clay Loam, η χωρική διακριτοποίηση επηρεάζει περισσότερο τα αριθμητικά αποτελέσματα και συγκεκριμένα όσο το χωρικό βήμα αυξάνεται διαδοχικά από 0.1cm έως 2cm τα αριθμητικά αποτελέσματα αποκλίνουν ελαφρώς από τα αντίστοιχα αναλυτικά. Παρ’ όλα αυτά, η οπτική παρατήρηση όλων των αθροιστικών καμπυλών δεν υποδεικνύει την παρουσία πιθανής αριθμητικής ανωμαλίας και δεν προσφέρει κανέναν έλεγχο για την ύπαρξη ή μη πιθανής αριθμητικής αδυναμίας.

Στο σχήμα (33) παρουσιάζονται τα ίδια αριθμητικά και αναλυτικά δεδομένα διήθησης της προηγούμενης παραγράφου εκπεφρασμένα αυτή τη φορά στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3), δηλαδή $(F^2/\tau, I)$. Όσον αφορά τα αναλυτικά δεδομένα διήθησης είναι εμφανής η ισχυρή γραμμική μορφή τους όταν αυτά

εκφράζονται στη μορφή της εξίσωσης (3), ακόμα και στους πολύ αρχικούς χρόνους διήθησης όπου $\tau \rightarrow 0$, όπως ακριβώς αποδείχθηκε και προηγουμένως στην περίπτωση των αναλυτικών δεδομένων διήθησης για το έδαφος “Knight”. Εντούτοις, όσον αφορά τα αριθμητικά αποτελέσματα η γραμμικότητα της εξίσωσης (3) παύει να υφίσταται στους αρχικούς χρόνους διήθησης, ακόμα και στη περίπτωση που το χωρικό βήμα λαμβάνει τη μικρότερη από τις τιμές που έχουν επιλεγεί ($dz=0.1\text{cm}$) όπου υπάρχει ιδιαίτερα υψηλή χωρική ανάλυση. Αυτό υποδηλώνει ότι για κάποιο λόγο, στη περίπτωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων, η αθροιστική διήθηση υποεκτιμάται στους αρχικούς χρόνους διήθησης για το έδαφος Loam και Yolo Light Clay ενώ υπερεκτιμάται για το έδαφος Sandy Clay Loam. Επίσης η χρονική διάρκεια του μη-γραμμικού τμήματος αυξάνεται όσο αυξάνεται το χωρικό βήμα dz .

Το αντίκτυπο της μη-γραμμικής συμπεριφοράς των αριθμητικών δεδομένων (I^2/τ , I) στους αρχικούς χρόνους διήθησης, λόγω της μεταβολής της χωρικής διακριτοποίησης, παρουσιάζεται στο σχήμα (34), στο οποίο απεικονίζονται τα σχετικά σφάλματα της αθροιστικής διήθησης των αριθμητικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τα αναλυτικά δεδομένα αθροιστικής διήθησης. Όταν τα αριθμητικά δεδομένα μετασχηματίζονται στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3), είναι εμφανής η εξάρτηση του μεγέθους και της διάρκειας απόκλισης του μη-γραμμικού τμήματος σε σχέση με τα αναλυτικά δεδομένα. Ακόμα και στη περίπτωση που το χωρικό βήμα λαμβάνει τη μικρότερη τιμή, $dz=0.1\text{ cm}$, οι αρχικές τιμές για το σχετικό σφάλμα είναι 17.9%, 46.2% και -10% για τα εδάφη Loam, Yolo Light Clay και Sandy Clay Loam αντίστοιχα, γεγονός που αποδεικνύει την αδυναμία της αριθμητικής λύσης να περιγράψει το φαινόμενο στους αρχικούς χρόνους διήθησης. Η αρχική τιμή σχετικού σφάλματος 46.2% για το έδαφος Yolo Light Clay δεν απεικονίζεται στο σχήμα (34) προς χάριν της οπτικής παρουσίασης όλων των αποτελεσμάτων.

Γενικά, η επιλογή του αρχικού χρονικού βήματος $d\tau_{in}$ διαδραματίζει σημαντικό ρόλο αφού έχει να κάνει με τη σύγκλιση της αριθμητικής λύσης, ειδικότερα στις περιπτώσεις προσομοίωσης του φαινομένου της διήθησης για ξηρά εδάφη, στα οποία η μεταβολή του φορτίου πίεσης είναι ιδιαίτερα απότομη στους αρχικούς χρόνους. Στη παρούσα διατριβή, οι μέγιστες τιμές αρχικού χρονικού βήματος $d\tau_{in}$ που επιλέχθηκαν στις αριθμητικές προσομοιώσεις με το HYDRUS-1D, προκειμένου να συγκλίνει η λύση

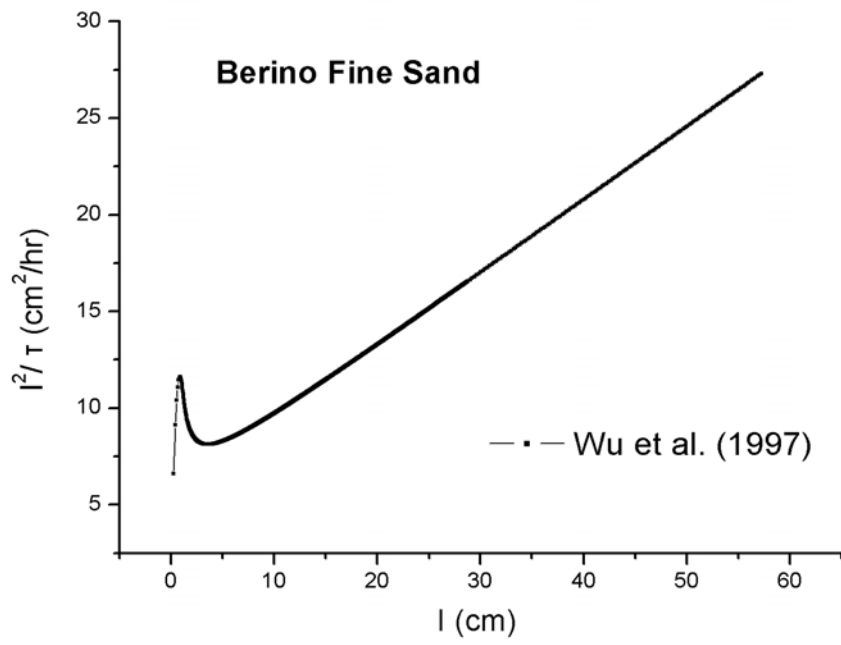
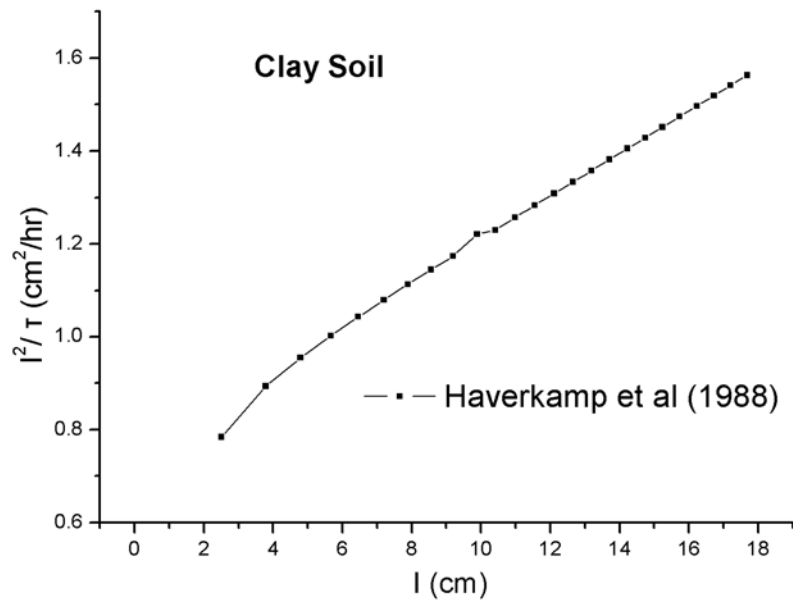
στο αριθμητικό μοντέλο, ήταν $d\tau_{in} = 10^{-4} h$ για το έδαφος Sandy Clay Loam και $d\tau_{in} = 10^{-2} h$ για τα εδάφη Loam και Yolo Light. Πραγματοποιώντας μία σειρά από αριθμητικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τιμές αρχικού χρονικού βήματος μικρότερες από $10^{-4} h$ και $10^{-2} h$ (έως και $d\tau_{in} = 10^{-7} h$) για τα αντίστοιχα εδάφη και διατηρώντας σταθερό το χωρικό βήμα dz , παρατηρήθηκε ότι η μορφή των αριθμητικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν με αυτή τη διαδικασία (μετά τον μετασχηματισμό τους στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης 3) δεν επηρεαζόταν σημαντικά. Γι' αυτό το λόγο τα σχήματα που αφορούν τη συγκεκριμένη διαδικασία δεν παρουσιάζονται.

Εν κατακλείδι, η γραφική απεικόνιση των αριθμητικών δεδομένων μονοδιάστατης κατακόρυφης διήθησης στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) (δηλαδή $(I^2/\tau, I)$, Valiantzas, 2010) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα επιπρόσθετο κριτήριο για να εντοπιστεί εύκολα και γρήγορα πιθανή αδυναμία της αριθμητικής λύσης με οπτική παρατήρηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ένας γρήγορος τρόπος προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη χωρική διακριτοποίηση του αριθμητικού πλέγματος με σκοπό την απόκτηση αριθμητικών αποτελεσμάτων με όσο το δυνατόν περισσότερη ακρίβεια.. Σημειώνεται ότι η επιλογή χωρικής και χρονικής διακριτοποίησης των αριθμητικών μοντέλων αποτελεί ακόμα και στις μέρες μας ένα θεμελιώδες ερώτημα που έχει αποτελέσει γενικότερα αντικείμενο εργασίας πολλών ερευνητών. Η χρήση της προτεινόμενης μεθόδου αποκτά ιδιαίτερη σημασία για εφαρμογές στις οποίες το ενδιαφέρον εστιάζεται στους αρχικούς χρόνους διήθησης.

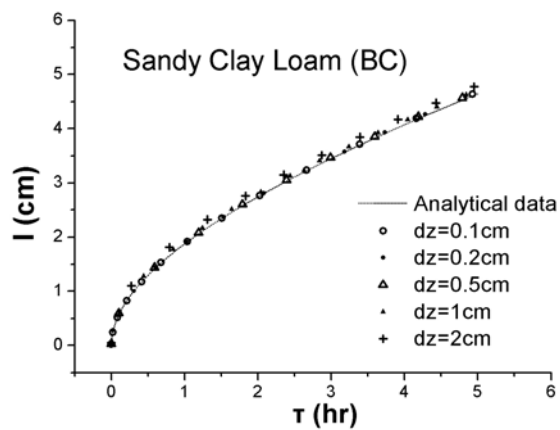
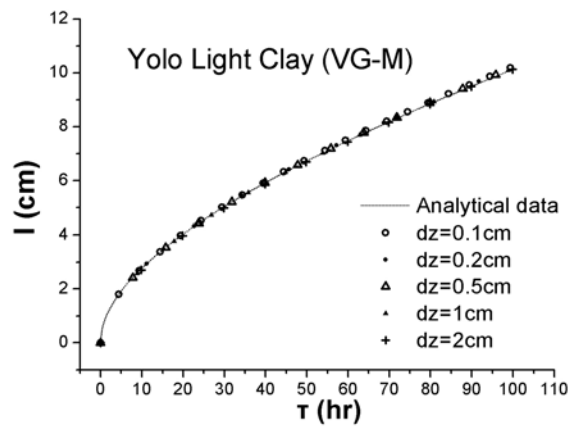
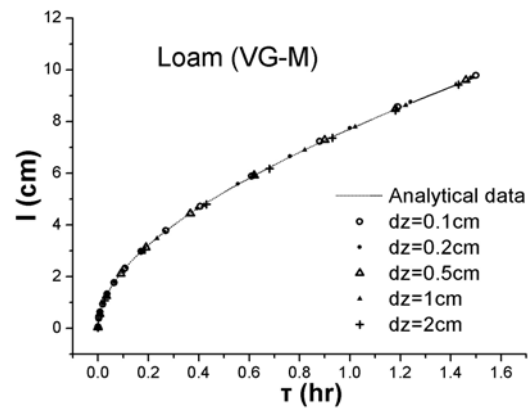
Η διαδικασία της προτεινόμενης μεθόδου, στη περίπτωση που το φαινόμενο της κατακόρυφης διήθησης προσομοιώνεται με το λογισμικό HYDRUS-1D, έχει τα ακόλουθα βήματα:

1. Αρχικά επιλέγονται αυθαίρετα τιμές που αφορούν τη χωρική και χρονική διακριτοποίηση του αριθμητικού μοντέλου ($dz, d\tau_{in}$).

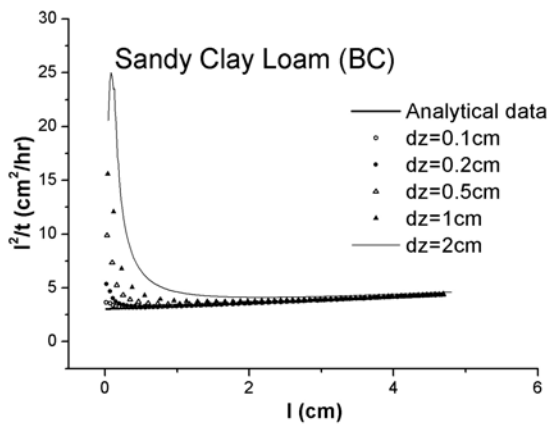
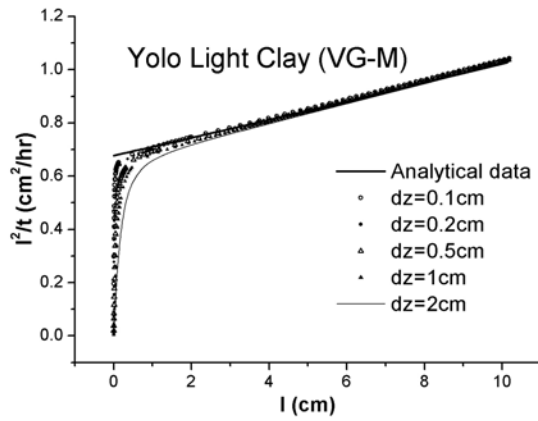
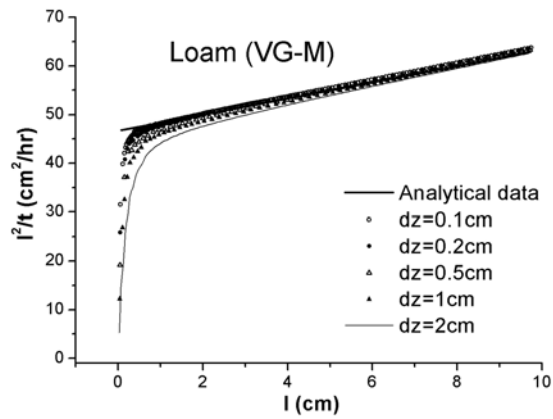
2. Ακολουθούν αριθμητικές προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές για τα dz , $d\tau_{in}$ (είτε αυξάνοντας είτε μειώνοντας τη χωρική και χρονική διακριτοποίηση ή και τα δύο).
3. Τα αθροιστικά δεδομένα διήθησης που προκύπτουν από όλες τις αριθμητικές προσομοιώσεις προβάλλονται σε ένα διάγραμμα $(X,Y)= (I, I^2/\tau)$, δηλαδή προβάλλονται στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3).
4. Προκειμένου να αποκτήσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο ακριβή αριθμητικά αποτελέσματα, επιλέγουμε (με οπτική παρατήρηση) τα αριθμητικά αποτελέσματα που αντιστοιχούν στον συνδυασμό τιμών dz και $d\tau_{in}$ για τον οποίο η διάρκεια του μή-γραμμικού τμήματος τους είναι μικρότερη.



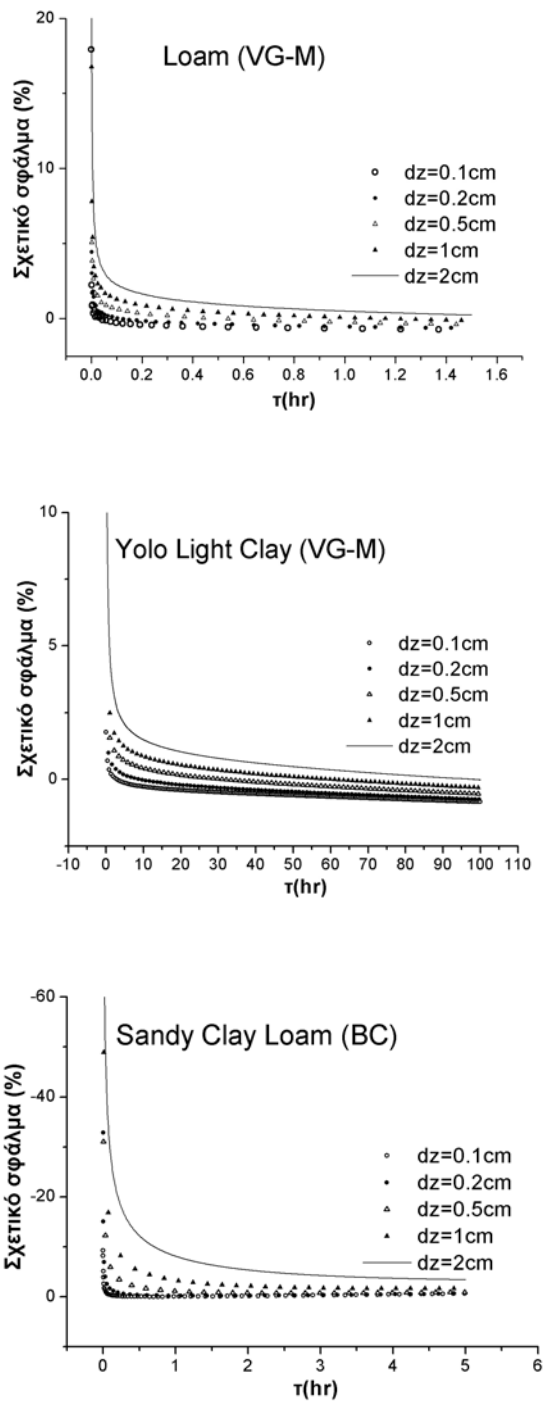
Σχήμα 31. Απεικόνιση της γραμμικότητας αριθμητικών δεδομένων κατακόρυφης διήθησης για το έδαφος Clay (Haverkamp et al., 1988) που αποκτήθηκαν από την βιβλιογραφία (πάνω) και για το έδαφος Berino Fine Sand που αποκτήθηκαν χρησιμοποιώντας το αριθμητικό μοντέλο των Wu et al. (1997), εκπεφρασμένα στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3).



Σχήμα 32. Αθροιστικές καμπύλες κατακόρυφης διήθησης (HYDRUS-1D) όταν το χωρικό βήμα dz μεταβάλλεται ενώ το αρχικό χρονικό βήμα $d\tau_{in}$ παραμένει σταθερό για τα τρία υπό μελέτη εδάφη. Τα αναλυτικά δεδομένα κατακόρυφης διήθησης προέρχονται από την αναλυτική λύση των Warrick et al. (1985).



Σχήμα 33. Γραμμική απεικόνιση των αριθμητικών (HYDRUS-1D) και αναλυτικών (Warrick et al. 1985) αποτελεσμάτων στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) (Valiantzas, 2010) όταν το χωρικό βήμα dz μεταβάλλεται ενώ το αρχικό χρονικό βήμα $d\tau_{in}$ παραμένει σταθερό για τα τρία υπό μελέτη εδάφη.



Σχήμα 34. Απεικόνιση των σχετικών σφαλμάτων (%) της αθροιστικής διήθησης των αριθμητικών αποτελεσμάτων (HYDRUS-1D) σε σχέση με τα αναλυτικά δεδομένα αθροιστικής διήθησης (Warrick et al. 1985) όταν το χωρικό βήμα dz μεταβάλλεται ενώ το αρχικό χρονικό βήμα $d\tau_{in}$ παραμένει σταθερό για τα τρία υπό μελέτη εδάφη.

Κεφάλαιο 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Συμπεράσματα

Όσον αφορά την προτεινόμενη μέθοδο προσδιορισμού των υδραυλικών ιδιοτήτων K_s και S από δεδομένα αθροιστικής διήθησης που προέρχονται από κυλινδρικά διηθητόμετρα με διπλό κύλινδρο, εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Η προτεινόμενη μέθοδος εκμεταλλεύεται τα δεδομένα αθροιστικής διήθησης του εξωτερικού κυλίνδρου, τα οποία μπορούν να μετρηθούν παράλληλα με τα δεδομένα αθροιστικής διήθησης του εσωτερικού κυλίνδρου σε ένα πείραμα ομόκεντρων κυλίνδρων.
- Η μετατροπή των δεδομένων αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων στη μορφή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3), εξίσωση που πρόσφατα παρουσιάστηκε από τον Valiantzas (2010), μας δίνει τη δυνατότητα να εντοπίσουμε γραφικά το χρόνο τ_1 που χρειάζεται το “μέτωπο διαβροχής” να φτάσει στο κάτω χείλος των κυλίνδρων, δηλαδή το χρόνο μέχρι τον οποίο η κίνηση του εδαφικού νερού κάτω από τα κυλινδρικά διηθητόμετρα είναι απόλυτα μονοδιάστατη κατακόρυφη αφού περιορίζεται από τα τοιχώματα των κυλίνδρων.
- Η γραμμική προσαρμογή της γραμμικοποιημένης εξίσωσης διήθησης (3) στα αριθμητικά δεδομένα διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων μέχρι το χρόνο τ_1 , δίνει την δυνατότητα εκτίμησης των τιμών των υδραυλικών ιδιοτήτων K_s και S με αποδεκτή ακρίβεια.
- Η προτεινόμενη μέθοδος, όσον αφορά την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό, της απορροφητικότητας και του χρόνου τ_1 ,

επαληθεύτηκε με πειραματικά δεδομένα ομόκεντρων κυλίνδρων σε συνθήκες εργαστηρίου.

- Η προτεινόμενη μέθοδος δεν απαιτεί την εκτέλεση ενός πειράματος ομόκεντρων κυλίνδρων μέχρι την επίτευξη συνθηκών σταθερής κατάστασης (δηλαδή μέχρι να σταθεροποιηθεί η κλίση της αθροιστικής καμπύλης διήθησης), εφόσον η προτεινόμενη μέθοδος ουσιαστικά απαιτεί δεδομένα αθροιστικής διήθησης ομόκεντρων κυλίνδρων μέχρι τη χρονική στιγμή τ_1 . Επομένως η προτεινόμενη μέθοδος δεν αποτελεί μία χρονοβόρα διαδικασία.
- Η προτεινόμενη μέθοδος δεν απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού, εφόσον η πειραματική της επαλήθευση έγινε με ομόκεντρους κυλίνδρους ακτίνας 7.5cm και 15cm για τον εσωτερικό και εξωτερικό κύλινδρο αντίστοιχα. Επομένως η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί από έναν πειραματιστή για μία σειρά από μετρήσεις διηθητικότητας δίχως να διαχειριστεί υπερβολικά μεγάλες ποσότητες νερού.

Όσον αφορά τη προτεινόμενη μέθοδο προσδιορισμού – διόρθωσης της παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης Kostiaκov για διάφορες αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης, εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Η προέκτασή της εξίσωσης του Kostiaκov, μία αμιγώς εμπειρική εξίσωση διήθησης, μπορεί να θεωρηθεί ως μία τροποποιημένη μορφή της κλασσικής δι-παραμετρικής εξίσωσης διήθησης του Philip.
- Η σύνδεση της αμιγούς εμπειρικής παραμέτρου κ της προέκτασης της εξίσωσης του Kostiaκov με την απορροφητικότητα S , μας δίνει τη δυνατότητα διόρθωσης της παραμέτρου κ για διάφορες αρχικές και οριακές συνθήκες διήθησης μέσω της μεταβολής της απορροφητικότητας S χρησιμοποιώντας μία απλή αλγεβρική εξίσωση.
- Η προτεινόμενη μέθοδος διόρθωσης έχει ελαφρώς καλύτερη απόδοση στα λεπτόκκοκα εδάφη σε σχέση με τα χονδρόκκοκα εδάφη.

- Η ημι-θεωρητική βάση της εξίσωσης διόρθωσης του εμπειρικού συντελεστή k υποδεικνύει ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί για διάφορους τύπους εδαφών.

Όσον αφορά τη προτεινόμενη μέθοδο με την οποία εντοπίζονται με γραφικό τρόπο και τελικώς ελαχιστοποιούνται πιθανά αριθμητικά προβλήματα που παρατηρούνται κατά τη χρήση αριθμητικών μοντέλων διήθησης, εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Η μετατροπή των αριθμητικών δεδομένων κατακόρυφης αθροιστικής διήθησης στη μορφή της γραμμικής εξίσωσης διήθησης του Valiantzas (2010) μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα επιπρόσθετο κριτήριο προκειμένου να εντοπίζονται εύκολα αλλά και γρήγορα πιθανή αριθμητική αδυναμία αλλά και λάθη αριθμητικών μοντέλων κατακόρυφης διήθησης που σχετίζονται με την επίλυση του αριθμητικού προβλήματος.
- Η προτεινόμενη μέθοδος οδηγεί στην επιλογή του βέλτιστου χωρικού βήματος dz με σκοπό την απόκτηση όσο το δυνατόν ακριβέστερων δεδομένων κατακόρυφης διήθησης.
- Η συγκεκριμένη εργασία βρίσκει εφαρμογή και στην αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου της διήθησης με κυλινδρικά διηθητόμετρα (μονός – διπλός κύλινδρος) όπου στους αρχικούς χρόνους διήθησης και μέχρι το “μέτωπο διαβροχής” να φτάσει στο κάτω χείλος των κυλίνδρων η κίνηση του νερού στο έδαφος είναι μονοδιάστατη και κατακόρυφη.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ahuja, L.R., 1976. Measurement hydrologic properties of soil with a double ring infiltrometer and multiple depth tensiometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40:494-499.

Alberti, D. R., and E. E. Cey, 2011. Evaluation of macropore flow and transport using three-dimensional simulation of tension infiltration experiments. *Vadose Zone Journal*, 10:603-617.

Angulo-Jaramillo, R., Vandervaere, J.P., Roulier, S., Thony, J.L, Gaudet, J.P., and Vauclin, M., 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent developments. *Soil Tillage Res.*, 55:1-29.

Angulo-Jaramillo, R., Elrick., D., Parlange, J.Y., Gerard-Marchant, P. and Haverkamp, R., 2003. Analysis of short-time single-ring infiltration under falling-head conditions with gravitational effects. *Hydrology Days Proceedings*, 16-23.

Bagarello, V. and Sgroi, A., 2004. Using the single-ring infiltrometer method to detect temporal changes in surface soil field-saturated hydraulic conductivity. *Soil and Tillage Res.*, 76:13-24.

Baker, D.L., 1995. Darcian weighted interblock conductivity means for vertical unsaturated flow. *Ground Water*, 33:385-390.

Bagarello, V., M. Castellini, M. Iovino, and A. Sgroi, 2010. Testing the concentric-disk tension infiltrometer for field measurement of soil hydraulic conductivity. *Geoderma*, 158:427-435.

Barry, D.A., J.Y. Parlange, R. Haverkamp and P.J. Ross.1995. Infiltration under ponded conditions. 4. An explicit predictive infiltration formula. *Soil Sci.*160:8-17.

Bodhinayake, W., Si, and B.C., Noborio, K., 2005. Determination of hydraulic properties in sloping landscapes from tension and double-ring infiltrometers. *Vadose Zone Journal*, 3:964-970.

Bouwer, H., 1986. Intake rate: cylinder infiltrometer. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1.* second ed. ASA and SSSA, Madison, WI, Agron. Monog. 9, pp. 825-844.

Brutsaert, W., 1977. Vertical infiltration in dry soil. *Water Resources Res.*, 13:363-368.

Burgy, R.H., and Luthin, J.N., 1956. A test of the single-ring and double-ring types of infiltrometers. *Trans. Am. Geophys. Union*, 27:189-191.

Celia, M. A., Bouloutas, E. T. and Zarba, R. L., 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resour. Res.*, 26:1483-1496.

Clausnitzer, V., J.W. Hopmans, and J. L. Starr, 1998. Parameter uncertainty analysis of common infiltration models. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:1477-1487.

Dirk, S.M., Carlson, D.D., Cherkauer, D.S., and Malik, P., 1999. Scale dependency of hydraulic conductivity in heterogeneous media. *Ground Water*, 37:904-919.

Elliott, R. L., Walker, W. R., and Skogerboe, G. V., 1982a. Zero-inertia modeling of furrow irrigation advance. *J. Irrig. and Drain. Div.*, ASCE, 108(3), 179–195.

Elliott, R. L., and Walker, W. R., 1982b. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans. ASAE*, 25(2), 396–400.

Elrick, D.E., Parkin, G.W., Reynolds, and W.D., Fallow, D.J., 1995. Analysis of early-time and steady-state single-ring infiltration under falling head conditions. *Water Resources Res.*, 31:1883-1893.

Fuentes, C., R. Haverkamp, and J.-Y. Parlange, 1992. Parameter constraints on closed-form soil–water relationships. *J. Hydrol.* 134: 117–142.

Furman, A., Warrick, A. W., Zerihum, D. and Sanchez, C. A., 2006. Modified Kostiakov infiltration function: accounting for initial and boundary conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 132(6), 587–596.

Green, W.A., and G.A. Ampt, 1911. Studies on soils physics: 1. The flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci. (Cambridge)* 4:1-24.

Haverkamp, R., M. Kutilek, J.-Y. Parlange, R. Lendon, and M. Krejca, 1988. Infiltration under ponded conditions: 2. Infiltration equations tested for parameter time-dependence and predictive use. *Soil Sci.*, 145:317-329.

Haverkamp, R., J.-Y. Parlange, J.L. Starr, G. Schmitz, and C. Fuentes, 1990. Infiltration under ponded conditions: 3. A predictive equation based on physical parameters. *Soil Sci.*, 149:292-300.

Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J., and Parlange, J.Y., 1994. 3-Dimensional analysis from disc infiltrometer. 2. Physically-based infiltration equation. *Water Resources Res.*, 30:2931-2935.

Hills, R. G., Porro, I., Hudson, D. B., and Wierenga, P. J., 1989. Modeling one-dimensional infiltration into very dry soils. 1. Model development and evaluation. *Water Resour. Res.*, 25:1259-1269.

Huang, K., Mohanty, B. P., and van Genuchten, M. T. (1996). "A new convergence criterion for the modified Picard iteration method to solve the variably saturated flow equation". *J. Hydrol.*, 178, 69-91.

Kodešová, R., J. Šimůnek, A. Nikodem, and V. Jirků, 2010. Estimation of the dual-permeability model parameters using tension disk infiltrometer and Guelph permeameter. *Vadose Zone Journal*, Special Section: "Preferential Flow", 9:213-225.

Kostiakov, A. N., 1932. On the dynamics of the coefficients of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purpose of amelioration. *Transactions of the 6th Communication of the Int. Society of Soil Sciences*, Part A:17–21.

Lai, J., and L. Ren, 2007. Assessing the size dependency of measured hydraulic conductivity using double-ring infiltrometers and numerical simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71:1667–1675.

Lai, J., Y. Luo, and L. Ren, 2010. Buffer index effects on hydraulic conductivity measurements using numerical simulations of double-ring infiltration, *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, 74:1526-1536.

Marquardt, D. W., 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Ind. and Appl. Math.*, 11:431-441.

Marshall, T.J., and Stirk, G.G., 1950. The effect of lateral movement of water in soil on infiltration measurements. *Austr. J. Agric. Res.*, 1:253-265.

Miller, C. T., Williams, G. W., Kelly, C. T., Tocci, M. D., 1998. Robust solution of Richards equation for nonuniform porous media. *Water Resour. Res.*, 34:2599-2610.

Milly, P. C. D., 1985. A mass conservative procedure for time – stepping in models of unsaturated flow. *Adv. Water Resour.*, 8:32-36.

Neuman, S. P., 1976. Wetting front pressure head in the infiltration model of Green and Ampt. *Water Resour. Res.*, 12:564-565.

Pan, L., and Wierenga, P. J., 1997. Improving numerical modeling of 2-D water flow in variably saturated and heterogenous porous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61(2):335-346.

Parlange, J.-Y., I. Lisle, R.D. Braddock, and R.E. Smith, 1982. The three-parameter infiltration equation. *Soil Sci.*, 133:337-341.

Pereira, L.S., 1996. "Surface irrigation systems", *State-of-the-art, Sustainability of Irrigated Agriculture*, Kluwer Academic Publishers, 269-289.

Philip, J. R., 1957a. The theory of infiltration: 5. The influence of the initial moisture content. *Soil Sci.*, 84, 329–339.

Philip, J.R., 1957b. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Sci.*, 84:257-264.

Philip, J. R., 1957c. The theory of infiltration: 6. Effect of water depth over soil. *Soil Sci.*, 85, 278–286.

Philip, J. R., 1969. Theory of infiltration. *Adv. Hydrosci.*, 5, 215–305.

Philip, J.R., 1987. The infiltration joining problem. *Water Resour. Res.*, 12:2239-2245.

Πολλάλης, Ε., Κ. Σούλης, Ε. Διαμαντόπουλος, Π. Λόντρα, Γ. Κάργας, Ι.Δ. Βαλιάντζας, 2009. Αξιολόγηση ενός χαμηλού κόστους αισθητήρα εδαφικής υγρασίας. Πρακτικά 11^{ου} Εθνικού Συνεδρίου ΕΕΔΥΠ, Βόλος 27-30 Μαΐου.

Pollalis, E.D., Valiantzas, J.D. "Determining sorptivity and hydraulic conductivity using double-ring infiltrometers. Numerical and experimental validation". (υποβληθείσα προς δημοσίευση στο επιστημονικό περιοδικό "Journal of Hydrology").

Poulovassilis A., Elmaloglou S., Kerkides P., and Argyrokastritis I., 1989. A variable sorptivity infiltration equation. *Water Resour. Management*, 3:287-298.

Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P., 1992. *Numerical recipes in C*. 2nd ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge, England.

Ramos T. B., M. C. Goncalves, J. C. Martins, et al., 2006. Estimation of soil hydraulic properties from numerical inversion of tension disk infiltrometer data. *Vadose Zone Journal*, 5:684-696.

Reynolds, W.D., and Elrick, D.E., 1990. Ponded infiltration from a single ring. I. Analysis of steady state flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:1233-1241.

Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1:318-333.

Romano, N., Brunone, B., Santini, A., 1998. Numerical analysis of one-dimensional unsaturated flow in layered soils. *Adv. Water Resour.*, 21:315-324.

Šimůnek, J., Šejna, M., and van Genuchten, M. Th., 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, Calif.

Šimůnek, J., M.Th . van Genuchten, and M. Šejna., 2006. The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Technical manual, Version 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic.

Smiles, D.E., and J.H. Knight, 1976. A note on the use of the Philip infiltration equation. *Aust. J. Soil Res.*, 14:103–108.

Souza, F. (1981). “Nonlinear hydrodynamic model of furrow irrigation,” Ph.D. thesis, Univ. of California at Davis, Davis, Calif.

Strelkoff, T., and Katopodes, N. D., 1977. Border irrigation hydraulics with zero inertia. *J. Irrig. and Drain. Div.*, 103(3), 325–342.

Strelkoff, T. and F. Souza, 1984. Modeling effect of depth on furrow infiltration. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 110: 375-387.

Stroosnijder, L., 1976. Infiltratie en Herverdeling van Water in Gronde, *Versl..Landbouwk. Onderz.*, 847.

Swartzendruber, D., and Olson, T.C., 1961a. Model study of the double ring infiltrometer as affected by depth of wetting and particle size. *Soil Sci.*, 92:219-225.

Swartzendruber, D., and Olson, T.C., 1961b. Sandy-model study of buffer effects in the double ring infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 25:5-8.

Swartzendruber, D. and Young, E.G., 1974. A comparison of physically-based infiltration equation. *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, 12:822-828.

Swartzendruber, D., 1987. A quasi-solution of Richards' equation for the downward infiltration of water into soil. *Water Resources Res.*, 23:809-817.

Talsma, T., and J.-Y. Parlange, 1972. One-dimensional vertical infiltration. *Aust. J. Soil Res.*, 10:143.

Touma, J., Voltz, M., and Albergel J., 2007. Determining soil saturated hydraulic conductivity and sorptivity from single ring infiltration tests. *European J. of Soil Sci.*, 58:229-238.

Tricker, A.S., 1978. Infiltration cylinder – Some comments on its use. *J. Hydrol.*, 36:383-391.

Valiantzas, J. D., 1997a. Surface irrigation advance equation: Variation of subsurface shape factor. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE*, 123(4), 300–306.

Valiantzas, J. D., 1997b. Volume balance irrigation advance equation: Variation of surface shape factor. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE*, 123(4), 307–312.

Valiantzas, J. D., 2001. Discussion on explicit volume balance model solution. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE*, 127(1), 60–62.

Valiantzas, J. D., 2001a. Optimal furrow design. I: Time of advance equation. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE*, 127(4), 201–208.

Valiantzas, J. D., 2001b. Optimal furrow design. II: Explicit calculation of design variables. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE*, 127(4), 209–215.

Valiantzas, J.D., 2010. New linearized two-parameter infiltration equation for direct determination of conductivity and sorptivity. *J. Hydrol.*, 384:1-13.

Valiantzas, J.D., Pollalis, E.D., Soulis, K., Londra, P.A., 2009. “Modified form of the extended Kostiakov equation including various initial and boundary conditions”. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE*, 135:450-458.

Valiantzas, J.D., Pollalis, E.D., Soulis, K.X., and Londra, P.A., 2011. Rapid graphical detection of weakness problems in numerical simulation models using a linearized form equation. *J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE*, 137:524–529.

Vanclooster, M., Boesten, J. J. T. I., Trevisan, M., Brown, C. D., Capri, E., Eklo, O. M., Gottesburen, B., Gouy, V., and van der Linden, A. M. A., 2000. A European test of pesticide-leaching models: methodology and major recommendations. *Agric. Water Manage.*, 44:1-19.

van Dam, J. C., Feddes, R. A., 2000. Numerical simulations of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. *J. Hydrol.*, 233:72-85.

Vandervaere, J.-P., M. Vauclin, and D.E. Elrick, 2000. Transient flow from tension infiltrometers: I. The two-parameter equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:1263–1272.

van Genuchten, M.Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898.

van Genuchten, M. Th., 1982. A comparison of numerical solutions of the one - dimensional unsaturated - saturated flow and transport equations. *Adv. Water Resour.*, 5:47-55.

Vogel, T., van Genuchten, M.Th., and Císlerová, M., 2001. Effect of the shape of the soil hydraulic functions near saturation on variably-saturated flow predictions. *Adv. in Water Resour.*, 24:133-144.

Walker, W. R., and Humpherys, A., (1983). Kinematic wave furrow irrigation model. *J. Irrig. Drain. Div., ASCE*, 109: 377-392.

Warrick, A. W., 1991. Numerical approximations of Darcian flow through unsaturated soil. *Water Resour. Res.*, 27:1215-1222.

Warrick, A.W., 1992. Models for disk infiltrometers. *Water Resources Res.*, 28:1319-1327.

Warrick, A. W., Lomen, D. O., and Yates, S. R., 1985. Generalized solution to infiltration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:34–38.

Warrick, A. W., 2003. “Soil water dynamics.” Oxford University Press. New York.

Wu, L., Pan, L., Roberson, M.J, and Shouse, P.J., 1997. Numerical evaluation of ring infiltrometers under various soil conditions. *Soil Sci.*, 162:771-777.

Young, M. H., Karagunduz, A., Simunek, J., and Pennell, K. D., 2002. A modified upward infiltration method for characterizing soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66:57-64.

Youngs, E.G., 1968. An estimation of sorptivity for infiltration studies from moisture moments considerations. *Soil Sci.*, 106:157–163.

Youngs, E.G., 1987. Estimating hydraulic conductivity values from ring infiltrometer measurements. *J. Soil Sci.*, 38:623-632.

Zaidel, J. and Russo, D., 1992. Estimation of finite difference interblock conductivities for simulation of infiltration into initially dry soils. *Water Resour. Res.*, 28:2285-2295.

Zerihum, D., Furman, A., Warrick, A. W., and Sanchez, C. A., 2005. Coupled surface–subsurface solute transport model for irrigation borders and basins. I. Model development. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131:396–406.