

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΔΩΝ ΜΕΣΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ RETC

Π. Λόντρα*, Γ. Κάργας, Ι. Βαλιάντζας

Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Σχολή Αγροτικής Παραγωγής, Υποδομών και Περιβάλλοντος, Γ.Π.Α., Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα

*Στοιχεία επικοινωνίας: v.londra@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα προσδιορισμού της καμπύλης υγρασίας, $\theta(H)$, και πειράματα εκροής ενός βήματος για τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας, $K(\theta)$, σε μια άμμο, ένα αμμοπηλώδες και ένα πηλώδες έδαφος. Οι πειραματικές τιμές συγκρίθηκαν με τις προβλεπόμενες από το ευρέως διαδεδομένο κλειστού τύπου αναλυτικό μοντέλο Mualem-van Genuchten χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα RETC για δύο σενάρια πρόβλεψης με τρεις παραμέτρους προσαρμογής a , n , θ_r . Στο πρώτο σενάριο σαν δεδομένα εισόδου στο RETC χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές τιμές της $\theta(H)$ και η τιμή της K στον κορεσμό, K_s , και στο δεύτερο σενάριο οι πειραματικές τιμές των $\theta(H)$, $K(\theta)$ και K_s για δύο τύπους παλινδρόμησης του μοντέλου. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι το δεύτερο σενάριο, και μόνο για τον έναν από τους δύο τύπους παλινδρόμησης, περιγράφει ικανοποιητικά τη σχέση $K(\theta)$ σε όλα τα πορώδη μέσα που μελετήθηκαν, αλλά μειώνει την ακρίβεια πρόβλεψης της $\theta(H)$.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας, υδραυλική αγωγιμότητα, μοντέλο Mualem-van Genuchten

EVALUATION OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF POROUS MEDIA USING RETC CODE

P. Londra*, G. Kargas, J. Valiantzas

Lab. of Agricultural Hydraulics, School of Agricultural Production, Infrastructures and Environment, A.U.A., 75 Iera Odos street, 11855 Athens

*Corresponding author; v.londra@aua.gr

ABSTRACT

In this study, experiments were conducted to determine the soil water retention curve $\theta(H)$ and hydraulic conductivity $K(\theta)$ of three porous media with different soil texture, a sand, a sandy loam and a loam soil. The experimental data were compared with those predicted by the worldwide used closed-form analytical hydraulic model of Mualem-van Genuchten using RETC program for two prediction scenarios with three fitting parameters a , n , θ_r . The first scenario uses as input data the experimental $\theta(H)$ and K_s measurements and the second scenario uses the experimental $\theta(H)$, $K(\theta)$ and K_s measurements for two types of regression analysis. Analysis of the results showed that only one type of the second scenario regression analysis describes properly $K(\theta)$ relationship for all porous media studied but decreases the precision of $\theta(H)$ prediction.

KEY WORDS: Water retention curve, hydraulic conductivity, Mualem-van Genuchten model

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση των δύο κυριότερων υδραυλικών ιδιοτήτων, της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας και της υδραυλικής αγωγιμότητας, είναι απαραίτητη στην μελέτη της κίνησης του νερού και των διαλυτών αλάτων σε πορώδη μέσα, καθώς και στα μοντέλα προσομοίωσης αυτών (van Genuchten and Leij, 1992; Valiantzas and Londra, 2008).

Όμως, ενώ η μέτρηση της καμπύλης υγρασίας $\theta(H)$ μπορεί να γίνει γρήγορα και εύκολα, η μέτρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας συναρτήσει της υγρασίας, $K(\theta)$, ή του φορτίου πίεσης, $K(H)$, αποτελεί μία δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία. Γι' αυτό το λόγο, έχουν αναπτυχθεί διάφορα στατιστικά μοντέλα κατανομής του μεγέθους των πόρων για την έμμεση πρόβλεψη της $K(\theta)$ από τη χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας και την υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό K_s (Burdine, 1953; Childs and Collis George, 1950; Mualem, 1976). Η εισαγωγή αναλυτικών εκφράσεων της καμπύλης υγρασίας $\theta(H)$ σε συνδυασμό με τα παραπάνω μοντέλα οδήγησαν σε κλειστού τύπου αναλυτικά μοντέλα πρόβλεψης των υδραυλικών ιδιοτήτων (Brooks and Corey, 1964; van Genuchten, 1980). Σε αρκετές περιπτώσεις όμως, οι υπολογισμένες τιμές αποκλίνουν σημαντικά από τις πραγματικές τιμές της K (Londra, 2010; Poulouvasilis et al., 1988; Talsma, 1985; Valiantzas and Sassalou, 1991; Valiantzas et al., 2007).

Η μέθοδος εκροής ενός βήματος (Doering, 1965), η οποία είναι εύκολη και απλή στην εφαρμογή της, αποτελεί μια από τις πιο διαδεδομένες εργαστηριακές μεθόδους προσδιορισμού της σχέσης μεταξύ της διαχυτικότητας του εδάφους και της περιεχόμενης υγρασίας, $D(\theta)$, που μπορεί να διεξαχθεί στην ίδια συσκευή προσδιορισμού της καμπύλης υγρασίας. Στη συνέχεια ο υπολογισμός της $K(\theta)$ προκύπτει από την $D(\theta)$ και την καμπύλη υγρασίας (Childs and Collis George, 1950). Πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει μεθόδους άμεσου υπολογισμού της $D(\theta)$ από δεδομένα εκροής ενός βήματος (Gupta et al., 1974; Londra and Valiantzas, 2011; Passioura, 1976; Valiantzas, 1989; Valiantzas et al., 2007; Valiantzas and Londra, 2012). Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου εκροής ενός βήματος είναι η αδυναμία πρόβλεψης της $K(\theta)$ κοντά στον κορεσμό.

Το πρόγραμμα RETC (van Genuchten et al., 1991) παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού των παραμέτρων των μοντέλων πρόβλεψης της $K(\theta)$ είτε από την προσαρμογή μόνο των πειραματικών δεδομένων της καμπύλης υγρασίας είτε από την προσαρμογή ταυτόχρονα των πειραματικών δεδομένων της $\theta(H)$ και της $K(\theta)$ υποθέτοντας διάφορες αναλυτικές εκφράσεις της $\theta(H)$ και της $K(\theta)$. Μερικοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα RETC για διάφορα σενάρια προσαρμογής των υδραυλικών ιδιοτήτων (Yates et al., 1992; van Genuchten and Leij, 1992; Schaap and Leij, 2000; Schaap and van Genuchten, 2006; Kargas and Londra, 2015).

Από τη μέχρι τώρα δημοσιευμένη έρευνα φαίνεται να μην έχει εξεταστεί η πρόβλεψη των υδραυλικών ιδιοτήτων όταν χρησιμοποιούνται σαν δεδομένα εισαγωγής στο πρόγραμμα RETC ταυτόχρονα πειραματικά δεδομένα $\theta(H)$ and $K(\theta)$ όταν τα δεδομένα $K(\theta)$ έχουν αποκτηθεί από την μέθοδο εκροής ενός βήματος με την βοήθεια της απλοποιημένης εξίσωσης των Valiantzas et al. (2007).

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν να προσδιοριστεί πειραματικά η $K(\theta)$ σε τρία πορώδη μέσα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο εκροής ενός βήματος και οι πειραματικές τιμές να συγκριθούν με τις προβλεπόμενες από το μοντέλο Mualem-van Genuchten (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980) χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα RETC (van Genuchten et al., 1991) για δύο σενάρια πρόβλεψης με τρεις παραμέτρους προσαρμογής το καθένα (α , n , θ_r). Το πρώτο σενάριο αφορά στην προσαρμογή της εξίσωσης van Genuchten στα πειραματικά δεδομένα της $\theta(H)$ και στη σύγκριση των πειραματικών και των προβλεπόμενων $\theta(H)$ και $K(\theta)$ από το μοντέλο Mualem-van Genuchten. Το δεύτερο σενάριο αφορά στην προσαρμογή του μοντέλου Mualem-van Genuchten, χρησιμοποιώντας δύο τύπους παλινδρόμησης του μοντέλου, ταυτόχρονα στα πειραματικά δεδομένα $\theta(H)$ και $K(\theta)$ και στη σύγκριση των

πειραματικών και των προβλεπόμενων $\theta(H)$ και $K(\theta)$ από το μοντέλο.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. Πορώδη μέσα

Σε διαταραγμένα δείγματα, μιας άμμου ($0.2 \text{ mm} < d < 0.5 \text{ mm}$), ενός αμμοπηλώδους εδάφους (13.2% clay, 8% silt, 78.8% sand) και ενός πηλώδους εδάφους (22% clay, 39% silt, 39% sand), διεξήχθησαν στο εργαστήριο πειράματα προσδιορισμού της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας και πειράματα εκροής ενός βήματος χρησιμοποιώντας συσκευή Haines (Haines, 1930) για τα δύο πρώτα πορώδη μέσα και κύτταρο Richards για το πηλώδες έδαφος (Kargas and Londra, 2015). Αρχικά μετρήθηκε η καμπύλη υγρασίας $\theta(H)$ και ακολούθησε, στο ίδιο δείγμα και στην ίδια συσκευή, πείραμα εκροής ενός βήματος (Doering, 1965) για τον προσδιορισμό της διαχυτικότητας του εδάφους $D(\theta)$ και κατά συνέπεια της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους $K(\theta)$ χρησιμοποιώντας την καμπύλη υγρασίας.

2.2. Πειραματική διαδικασία

Σε χωνιά Buchner με πορώδη κεραμική πλάκα (συσκευή Haines) τοποθετήθηκαν δείγματα μιας άμμου και ενός αμμοπηλώδους εδάφους, ύψους 2.5 cm και διαμέτρου 9.6 cm, ενώ σε κύτταρο Richards τοποθετήθηκε δείγμα ενός πηλώδους εδάφους, ύψους 3 cm και διαμέτρου 7 cm. Τα δείγματα, αφού δέχτηκαν έναν κύκλο διαβροχής και αποστράγγισης, επανακορέστηκαν και μετρήθηκε ο κλάδος αποστράγγισης της καμπύλης υγρασίας εφαρμόζοντας είτε μικρά βήματα αρνητικής πίεσης (συσκευή Haines) είτε μικρά βήματα θετικής πίεσης (κύτταρο Richards) και μετρώντας την περιεχόμενη εδαφική υγρασία.

Στα ίδια δείγματα, στην ίδια συσκευή, μετά το τέλος της μέτρησης της καμπύλης υγρασίας, έγινε κορεσμός των δειγμάτων και ακολούθησε η διαδικασία εκροής ενός βήματος. Τα δείγματα δέχτηκαν απότομα ένα μεγάλο βήμα αρνητικής ή θετικής πίεσης h_f ίσο με την τελική τιμή πίεσης της καμπύλης υγρασίας ($h_f = -90 \text{ cm}$ για την άμμο, $h_f = -134 \text{ cm}$ για το αμμοπηλώδες και $h_f = +380 \text{ cm}$ για το πηλώδες έδαφος) και καταγράφονταν οι όγκοι εκροής V_i στους αντίστοιχους χρόνους t_i . Ακολούθως, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες περιεχόμενες υγρασίες θ_i , ως $\theta_i = \theta_s - V_i/V_o$, όπου θ_s η υγρασία στον κορεσμό και V_o ο όγκος του δείγματος.

Σύμφωνα με τους Valiantzas et al. (2007) η απεικόνιση της αδιάστατης μεταβλητής S , που προκύπτει από τα δεδομένα εκροής, με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου είναι της μορφής:

$$S(\sqrt{t}) = a(\sqrt{t})^b + c \quad (2.1)$$

όπου $S = \frac{\theta - \theta_f}{\theta_s - \theta_f}$ ($0 \leq S \leq 1$), θ_f η περιεχόμενη υγρασία στο τέλος του πειράματος εκροής ενός

βήματος, και a , b , c παράμετροι προσαρμογής της εξίσωσης στα πειραματικά δεδομένα.

Τα δεδομένα εκροής που λαμβάνονται υπόψη είναι αυτά που δεν υπόκεινται στο εμπόδιο της πλάκας και περιορίζονται στο στάδιο III της περιοχής $S(\sqrt{t})$ (Valiantzas et al., 2007).

Στη συνέχεια η διαχυτικότητα του εδάφους $D(\theta)$ υπολογίστηκε από τα δεδομένα εκροής ενός βήματος χρησιμοποιώντας την εξίσωση των Valiantzas et al. (2007):

$$D(\bar{\theta}) = -\frac{2L^2 a^{2/b}}{\pi^2} \left(\frac{\bar{\theta} - \theta_f}{\theta_s - \theta_f} - c \right)^{-2/b} \left[b - 1 - (b/2)c \left(\frac{\theta_s - \theta_f}{\bar{\theta} - \theta_f} \right) \right] \quad (2.2)$$

όπου L το ύψος του δείγματος και a , b , c οι προαναφερόμενοι παράμετροι προσαρμογής στα δεδομένα εκροής ενός βήματος (Valiantzas et al., 2007).

Η εξίσωση αυτή έχει επαληθευτεί για διάφορους τύπους πορωδών μέσων (Valiantzas et al., 2007; Valiantzas and Londra, 2008; Kargas and Londra, 2015).

Ο υπολογισμός της $K(\theta)$ έγινε χρησιμοποιώντας την εξίσωση (Childs and Collis-George, 1950):

$$K(\theta) = D(\bar{\theta}) \frac{d\theta}{dH} \quad (2.3)$$

όπου $d\theta/dH$ η κλίση της καμπύλης υγρασίας.

Επίσης, για τα ίδια δείγματα προσδιορίστηκαν πειραματικά η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό K_s με περατόμετρο σταθερού φορτίου (Klute and Dirksen, 1986).

2.3. Πρόγραμμα RETC

Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα RETC (van Genuchten et al., 1991) για τον υπολογισμό των παραμέτρων προσαρμογής του ευρέως διαδεδομένου μοντέλου Mualem-van Genuchten (Mualem, 1976; van Genuchten, 1980) στα πειραματικά δεδομένα της καμπύλης υγρασίας και της υδραυλικής αγωγιμότητας όπως προέκυψαν από τα δεδομένα εκροής ενός βήματος.

Ο van Genuchten (1980) πρότεινε την ακόλουθη συνάρτηση περιγραφής της καμπύλης υγρασίας:

$$\theta(H) = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{1 + (\alpha|H|)^n} \right)^m + \theta_r \quad (2.4)$$

όπου θ_s η υγρασία στον κορεσμό, θ_r η υγρασία στο σημείο μάρανσης και α , m , n οι εμπειρικοί παράμετροι προσαρμογής και $m=1-1/n$.

Συνδυάζοντας την εξίσωση van Genuchten (1980) με το στατιστικό μοντέλο του Mualem (1976) η υδραυλική αγωγιμότητα $K(\theta)$ προκύπτει ως

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^p \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2 \quad (2.5)$$

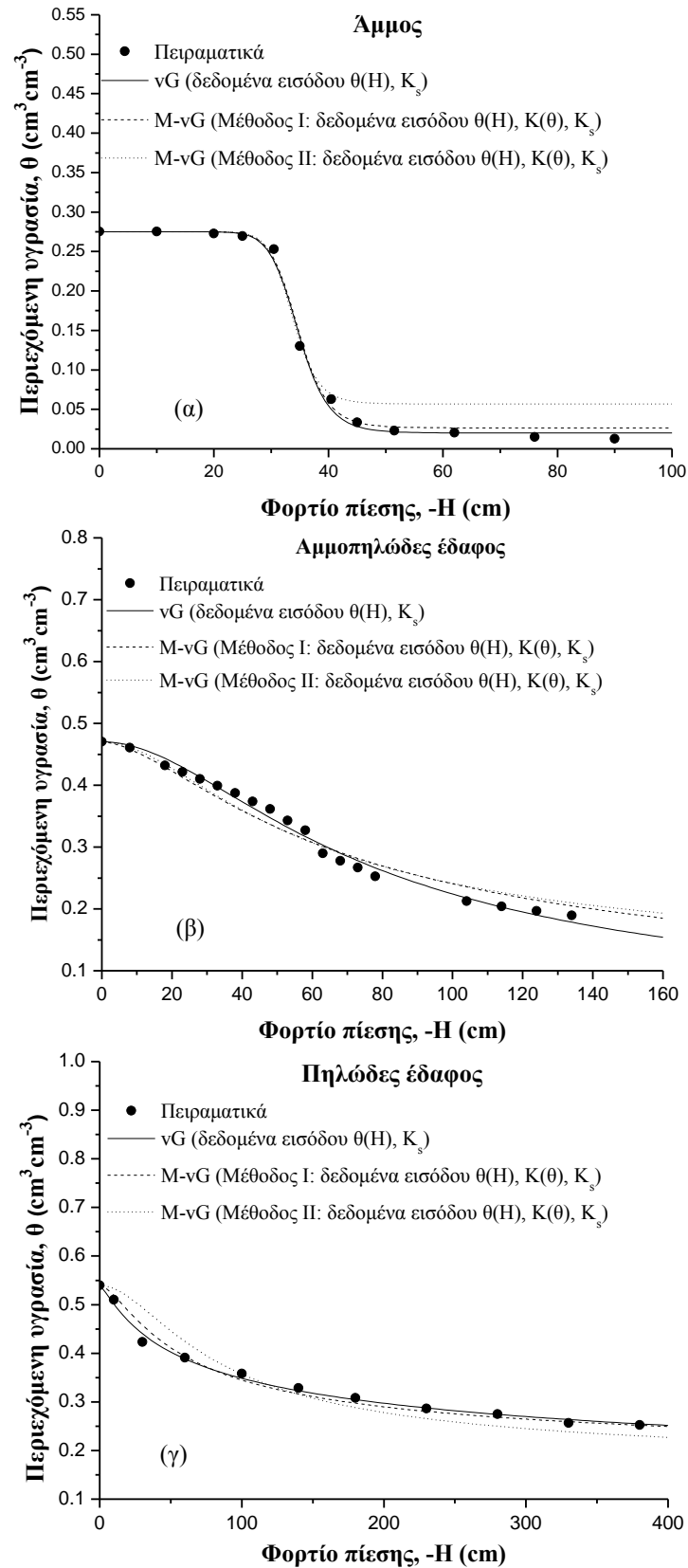
όπου K_s η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό και p παράμετρος κατανομής πόρων.

Οι παράμετροι προσαρμογής του μοντέλου α , n , θ_r προσδιορίστηκαν από το πρόγραμμα RETC χρησιμοποιώντας δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο σαν δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα της καμπύλης υγρασίας και της υδραυλικής αγωγιμότητας στο κορεσμό (K_s). Στο δεύτερο σενάριο χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα εισόδου οι πειραματικές τιμές των $\theta(H)$, $K(\theta)$ και K_s . Στην περίπτωση αυτή εξετάστηκαν δύο μέθοδοι παλινδρόμησης του μοντέλου, Μέθοδος I: “*Conductivity versus Water Content*” και Μέθοδος II: “*Log. Transform. Conductivity versus Water Content*”. Η τιμή της παραμέτρου p θεωρήθηκε σταθερή και $p=0.5$, τιμή που χρησιμοποιείται ευρέως (Mualem, 1976).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο Σχήμα 1 απεικονίζονται οι κλάδοι αποστράγγισης της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας, $\theta(H)$, μιας άμμου (Σχήμα 1α), ενός αμμοπηλώδους (Σχήμα 1β) και ενός πηλώδους εδάφους (Σχήμα 1γ), όπως προέκυψαν πειραματικά και υπολογιστικά μέσω του προγράμματος RETC χρησιμοποιώντας α) την εξίσωση van Genuchten με δεδομένα εισόδου τις πειραματικές τιμές $\theta(H)$ και τη μετρημένη υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό K_s (πρώτο σενάριο) και β) το μοντέλο Mualem-van Genuchten και δεδομένα εισόδου τις πειραματικές τιμές $\theta(H)$, K_s και $K(\theta)$ από δεδομένα εκροής ενός βήματος (δεύτερο σενάριο), για δύο μεθόδους παλινδρόμησης του μοντέλου (μέθοδος I και Μέθοδος II).

Οι παράμετροι προσαρμογής του μοντέλου α , n , θ_r και οι πειραματικές τιμές θ_s , K_s δίνονται για κάθε πορώδες μέσω στον Πίνακα 1. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός της μεγάλης διαφοράς των τιμών της θ_r μεταξύ των δύο σεναρίων πρόβλεψης στην περίπτωση του πηλώδους εδάφους σε αντίθεση με τα άλλα δύο πορώδη μέσα.



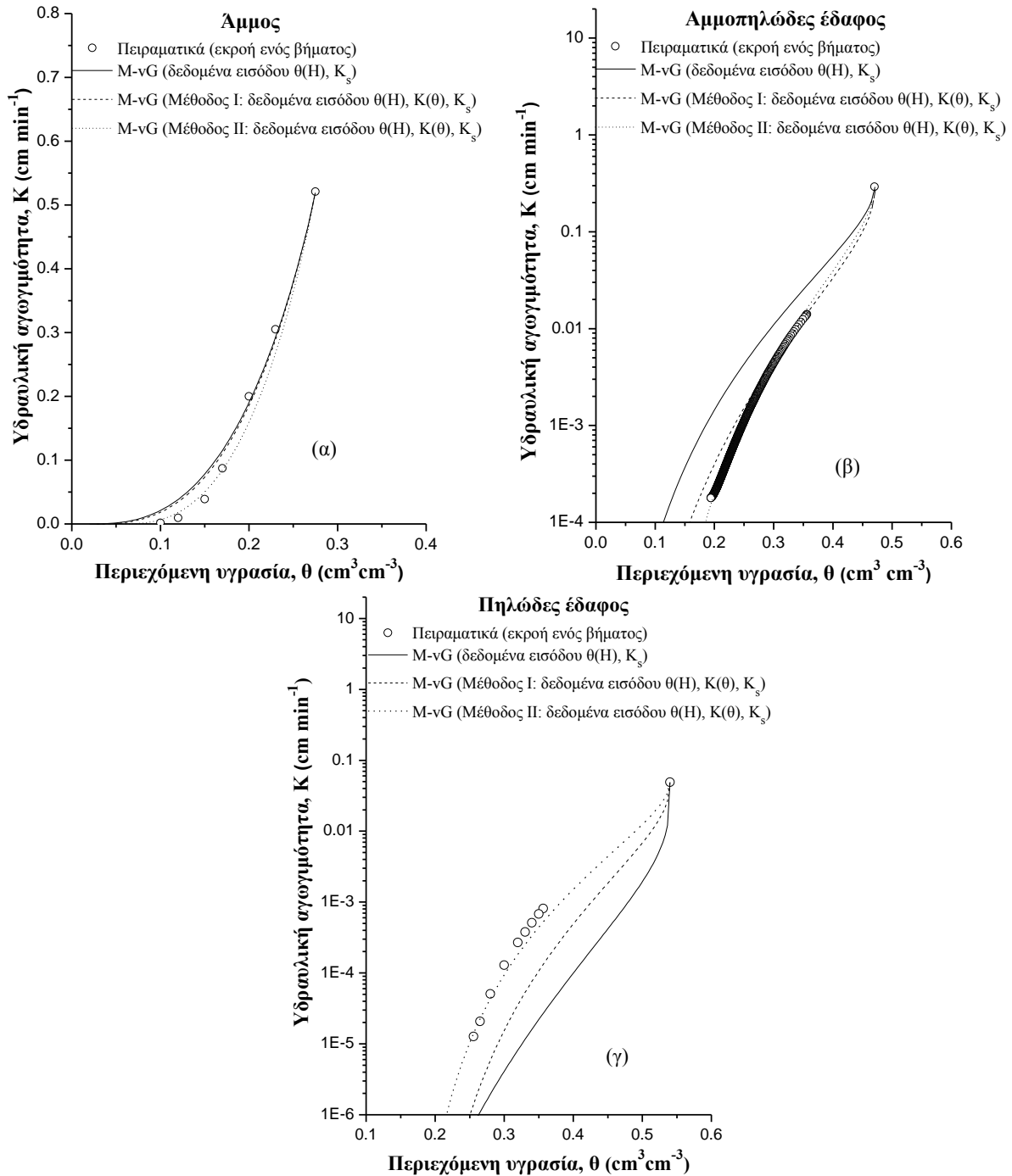
Σχήμα 1: Χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας μιας άμμου (α), ενός αμμοπηλώδους εδάφους (β) και ενός πηλώδους εδάφους (γ), όπως προέκυψαν: i) από πείραμα, ii) από την εξίσωση van Genuchten (vG) με δεδομένα εισόδου τις πειραματικές τιμές $\theta(H)$ και K_s και iii) από το μοντέλο Mualem-van Genuchten (M-vG) με δεδομένα εισόδου τις πειραματικές τιμές $\theta(H)$, $K(\theta)$ και K_s για τις μεθόδους παλινδρόμησης I και II του μοντέλου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, υπάρχει πολύ καλή σύγκλιση μεταξύ πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών της $\theta(H)$ για το πρώτο σενάριο πρόβλεψης, ενώ μειώνεται η ακρίβεια της πρόβλεψης στην περίπτωση του δεύτερου σεναρίου. Ωστόσο, η μείωση είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση χρήσης της μεθόδου παλινδρόμησης II του μοντέλου, κυρίως για την άμμο και το πηλώδες έδαφος.

Πίνακας 1: Παράμετροι προσαρμογής α , n , θ_r του μοντέλου Mualem-van Genuchten χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα RETC με δεδομένα εισόδου: α) τις πειραματικές τιμές $\theta(H)$ και τη μετρημένη υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό K_s και β) τις πειραματικές τιμές $\theta(H)$, K_s και $K(\theta)$ για τις μεθόδους παλινδρόμησης I και II του μοντέλου.

Πορώδες μέσο	RETC Mualem-van Genuchten	α (cm ⁻¹)	n	θ_r (cm ³ ·cm ⁻³)	θ_s (cm ³ ·cm ⁻³)	K_s (cm·min ⁻¹)
Άμμος	δεδομένα εισόδου $\theta(H)$, K_s Μέθοδος I	0.029	13.746	0.020	0.275	0.521
	με δεδομένα εισόδου $\theta(H)$, K_s , $K(\theta)$ Μέθοδος II	0.029	14.219	0.026	0.275	0.521
	με δεδομένα εισόδου $\theta(H)$, K_s , $K(\theta)$	0.030	15.978	0.057	0.275	0.521
Αμμοπηλώδες έδαφος	δεδομένα εισόδου $\theta(H)$, K_s Μέθοδος I	0.019	1.941	0	0.470	0.292
	με δεδομένα εισόδου $\theta(H)$, K_s , $K(\theta)$ Μέθοδος II	0.025	1.666	0.008	0.470	0.292
	με δεδομένα εισόδου $\theta(H)$, K_s , $K(\theta)$	0.026	1.875	0.086	0.470	0.292
Πηλώδες έδαφος	δεδομένα εισόδου $\theta(H)$, K_s Μέθοδος I	0.053	1.248	0	0.540	0.049
	με δεδομένα εισόδου $\theta(H)$, K_s , $K(\theta)$ Μέθοδος II	0.033	1.574	0.164	0.540	0.049
	με δεδομένα εισόδου $\theta(H)$, K_s , $K(\theta)$	0.018	1.890	0.163	0.540	0.049

Στο Σχήμα 2 δίνονται οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας συναρτήσει της υγρασίας, $K(\theta)$, των τριών πορωδών μέσων που μελετήθηκαν, όπως προέκυψαν από την εξ. (2.3), χρησιμοποιώντας την εξ. (2.2) (Valiantzas et al., 2007), λαμβάνοντας υπόψη τα πειραματικά δεδομένα εκροής ενός βήματος και την καμπύλη υγρασίας. Επίσης, παρουσιάζονται και οι προβλέψεις $K(\theta)$ του μοντέλου Mualem-van Genuchten, όπως προέκυψαν από το υπολογιστικό πρόγραμμα RETC με δεδομένα εισαγωγής: α) τις πειραματικές τιμές $\theta(H)$ και K_s (πρώτο σενάριο) και β) τις πειραματικές τιμές $\theta(H)$, την K_s και τις τιμές $K(\theta)$ από τα δεδομένα εκροής ενός βήματος (δεύτερο σενάριο) για τις μεθόδους παλινδρόμησης I και II του μοντέλου.



Σχήμα 2: Υδραυλική αγωγιμότητα συναρτήσει της υγρασίας μιας άμμου (α), ενός αμμοπηλώδους εδάφους (β) και ενός πηλώδους εδάφους (γ), όπως προέκυψαν: i) από πείραμα εκροής ενός βήματος, ii) από το μοντέλο Mualem-van Genuchten (M-vG) με δεδομένα εισόδου τις πειραματικές τιμές $\theta(H)$ και K_s και iii) από το μοντέλο M-vG με δεδομένα εισόδου τις πειραματικές τιμές $\theta(H)$, K_s και $K(\theta)$ για τις μεθόδους παλινδρόμησης I και II του μοντέλου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, στις περιπτώσεις του αμμοπηλώδους και του πηλώδους εδάφους, το πρώτο σενάριο πρόβλεψης της $K(\theta)$ από δεδομένα εισόδου μόνο την πειραματική $\theta(H)$ και την K_s , που αποτελεί την πιο συνηθισμένη περίπτωση χρήσης, αδυνατεί να περιγράψει την $K(\theta)$ και δίνει σχετικά καλή σύγκλιση μόνο στην περίπτωση της άμμου. Στην περίπτωση του δεύτερου σεναρίου, που χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου οι

πειραματικές τιμές $\theta(H)$, K_s και $K(\theta)$ και η μέθοδος παλινδρόμησης I, η πρόβλεψη της $K(\theta)$ βελτιώνεται ικανοποιητικά μόνο στην περίπτωση του αμμοπηλώδους εδάφους (Σχήμα 2β), ενώ με τη χρήση της μεθόδου παλινδρόμησης II επιτυγχάνεται πολύ ικανοποιητική πρόβλεψη της $K(\theta)$ και στα τρία πορώδη μέσα που μελετήθηκαν.

Ωστόσο, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, φαίνεται ότι η μέθοδος II παρόλο ότι μπορεί να περιγράψει με μεγάλη ακρίβεια την $K(\theta)$ (Σχήμα 2), μειώνει όμως την ακρίβεια πρόβλεψης της $\theta(H)$, συγκριτικά με τις άλλες περιπτώσεις (πρώτο σενάριο και δεύτερο σενάριο-μέθοδος I) σε όλα τα πορώδη μέσα που μελετήθηκαν (Σχήμα 1). Πιθανόν, η αδυναμία αυτή να μπορεί να ξεπεραστεί με την αύξηση των παραμέτρων προσαρμογής. Ειδικότερα, θα πρέπει να μελετηθεί ως επιπλέον παράμετρος προσαρμογής η παράμετρος p , η οποία συνήθως λαμβάνεται σαν σταθερά με τιμή 0.5 (Muallem, 1976), παρόλο ότι έχει δειχθεί ότι η τιμή της μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά (Leij et al., 1992; Schaap and van Genuchten, 2006; Kargas and Londra, 2015).

Επίσης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μπορούμε βάσιμα να υποθέσουμε ότι το δεύτερο σενάριο με χρήση της μεθόδου II μπορεί να δώσει μια αξιόπιστη προσέγγιση της $K(\theta)$ και για τιμές υγρασίας κοντά στον κορεσμό. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ξεπεραστεί και το μειονέκτημα της μεθόδου εκροής ενός βήματος που αδυνατεί να προβλέψει τιμές της $K(\theta)$ κοντά στον κορεσμό.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε τρία πορώδη μέσα διαφορετικής κοκκομετρικής σύστασης, μια άμμο, ένα αμμοπηλώδες και ένα πηλώδες έδαφος, προσδιορίστηκαν οι δύο βασικές υδραυλικές ιδιότητες, καμπύλη υγρασίας και υδραυλική αγωγιμότητα, στο ίδιο δείγμα, χρησιμοποιώντας μια εύκολη και γρήγορη μεθοδολογία. Οι πειραματικές τιμές $K(\theta)$ που προέκυψαν από δεδομένα εκροής ενός βήματος συγκρίθηκαν με αυτές που προέβλεψε το μοντέλο Muallem-van Genuchten για δύο σενάρια με τρεις παραμέτρους προσαρμογής (a , n , θ_r) και διαφορετικούς τύπους παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το RETC με δεδομένα εισόδου τις πειραματικές τιμές $\theta(H)$, K_s και $K(\theta)$ και τη χρήση της μεθόδου παλινδρόμησης II δίνει αξιόπιστες προβλέψεις της $K(\theta)$, αλλά ταυτόχρονα οδηγεί σε μείωση της ακρίβειας πρόβλεψης της $\theta(H)$. Πιθανότατα, η αδυναμία αυτή μπορεί να ξεπεραστεί εάν θεωρηθεί σαν επιπλέον παράμετρος προσαρμογής η παράμετρος p του μοντέλου Muallem-van Genuchten.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Brooks, R.H. and Corey, A.T. 1964. *Hydraulic properties of porous media*. Hydrology Paper No.3, Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Burdine, N.T. 1953. *Relative permeability calculations from pore-size distribution data*. Petr. Trans., Am. Inst. Mining Metall. Eng., 198: 71-77.
- Childs, E.C. and Collis-George, N. 1950. *The permeability of porous materials*. Proc. Roy. Soc., London, 201A: 392-405.
- Doering, E.J. 1965. *Soil water diffusivity by the one-step method*. Soil Science, 99: 322-326.
- Gupta, S.C., Farrel, D.A., Larson, W.E. 1974. *Determining effective soil water diffusivities from one-step outflow experiments*. Soil Science Society of America Journal, 38: 710-716.
- Haines, W.B. 1930. *Studies in the physical properties of soils. V. The hysteresis effect in capillary properties and the modes of moisture distribution associated therewith*. Journal of Agricultural Science, 20: 97-116.
- Kargas, G. and Londra, P.A. 2015. *Effect of tillage practices on the hydraulic properties of a loamy soil*. Desalination and Water Treatment, 54(8): 2138-2146.
- Klute, A. and Dirksen, C. 1986. *Methods of Soil Analysis*. Part 1, 2nd ed. Agron. Monogr. 9, ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 687-734.

- Leij, F.J., van Genuchten, M.Th., Yates, S.R., Russell, W.B. and Kaveh, F. 1992. *RETC: A computer program for analyzing soil water retention and hydraulic conductivity data*. In M.Th. van Genuchten, F.J. Leij and L.J. Lund (ed.) Proc. Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. University of California, Riverside, CA. pp. 263-272.
- Londra, P.A. 2010. *Simultaneous determination of water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity of substrates using a steady-state laboratory method*. HortScience, 45(7): 1106-1112.
- Londra, P.A. and Valiantzas, J.D. 2011. *Soil water diffusivity determination using a new two-point outflow method*. Soil Science Society of America Journal, 75: 1343–1346.
- Mualem, Y. 1976. *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water Resources Research, 12: 513-522.
- Passioura, J.B. 1976. *Determining soil water diffusivities from one step outflow experiments*. Australian Journal of Soil Research, 15: 1-8.
- Poulovassilis, A., Polychronides, M. and Kerkides, P. 1988. *Evaluation of various computational schemes in calculating unsaturated hydraulic conductivity*. Agricultural Water Management, 13: 317-327.
- Schaap, M.G. and Leij, F.J. 2000. *Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with Mualem-van Genuchten model*. Soil Science Society of America Journal, 64: 843-851.
- Schaap, M.G. and van Genuchten M.Th. 2006. *A modified Mualem-van Genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation*. Vadose Zone J., 5: 27-34.
- Talsma, T. 1985. *Prediction of hydraulic conductivity from soil water retention data*. Soil Science, 140(3): 184-188.
- Valiantzas, J.D. 1989. *A simple approximate equation to calculate diffusivities from one-step outflow experiments*. Soil Science Society of America Journal, 53: 342-349.
- Valiantzas, J.D. and Salsalou, A. 1991. *Laboratory determination of unsaturated hydraulic conductivity using a generalized-form hydraulic model*. Journal of Hydrology, 128: 293-304.
- Valiantzas, J.D., Londra, P. and Salsalou, A. 2007. *Explicit formulae for the soil water diffusivity using the one-step outflow technique*. Soil Science Society of America Journal, 71: 1685-1693.
- Valiantzas, J.D., and Londra, P.A. 2008. *Direct determination of the Brooks–Corey hydraulic functions by fitting an extended power function to the outflow method data*. Journal of Hydrology, 362, 128– 133.
- Valiantzas, J.D., and Londra, P.A. 2012. *Simplified equations for the determination of the hydraulic properties of horticultural substrates by one-step outflow experiments*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 175: 49–52.
- van Genuchten, M.Th. 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.
- van Genuchten, M.Th., Leij, F.J. and Yates, S.R. 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*. U.S.D.A., Riverside, California.
- van Genuchten, M.Th. and Leij, F.J. 1992. *On estimating the hydraulic properties of unsaturated soils*. In M.Th. van Genuchten, F.J. Leij and L.J. Lund (ed.) Proc. Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. University of California, Riverside, CA. pp. 1-14.
- Yates, S.R., van Genuchten, M.Th., Warick, A.W. and Leij, F.J. 1992. *Analysis of measured, predicted and estimated hydraulic conductivity using the RETC program*. Soil Science Society of America Journal, 56:347-354.