

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ**

**ΕΞΑΤΜΙΣΗ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΑΠΟ ΓΥΜΝΟ**  
**ΕΔΑΦΟΣ**

**Κάργας Γ.**  
**Καθηγητής**

**2020**

## 1. Γενικά

Η εξάτμιση του νερού από το έδαφος απαιτεί την ικανοποίηση τριών προϋποθέσεων. Πρώτον, πρέπει να υπάρχει η διαθέσιμη ενέργεια για την μετάπτωση του νερού από την υγρή στην αέρια φάση. Δεύτερον, να υπάρχει η κατάλληλη κλίση της πίεσης υδρατμών μεταξύ της εδαφικής επιφάνειας και της γειτνιάζουσας ατμόσφαιρας και τρίτον, να υπάρχει εφοδιασμός με νερό της επιφάνειας του εδάφους από το εδαφικό προφίλ. Η ικανοποίηση των δύο πρώτων προϋποθέσεων εξαρτάται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες οι οποίες καθορίζουν την αποξηραντική ικανότητα της ατμόσφαιρας, η οποία επιβάλλει ένα μέγιστο ρυθμό εξάτμισης. Η τρίτη προϋπόθεση αφορά την ταχύτητα με την οποία μπορεί να μεταφέρεται το νερό διαμέσου του εδάφους στην επιφάνεια εξάτμισης.

Η εξάτμιση του νερού από γυμνό έδαφος υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης δεν αποτελεί μια διαδομένη περίπτωση, αφού ακόμα και αν η στάθμη του υπόγειου νερού είναι υψηλή, σπάνια αυτή παραμένει σε σταθερό βάθος. Επίσης ούτε οι ατμοσφαιρικές συνθήκες παραμένουν σταθερές για ένα σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα με αποτέλεσμα η εξάτμιση του νερού να λαμβάνει χώρα συνήθως κάτω από ασταθείς συνθήκες. Με τις κατατομές σταθερής κατάστασης ασχοληθήκαμε στο μάθημα των «Αρδεύσεων» και εν συντομία θα υπενθυμίσουμε εδώ τα βασικά σημεία. Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η σταθερή ταχύτητα εξάτμισης,  $u$ , είναι οι ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι υδραυλικές ιδιότητες του μέσου και το βάθος  $Z$  στο οποίο βρίσκεται η υπόγεια στάθμη του νερού. Για ένα έδαφος και βάθος  $Z$  η σταθερή κατατομή εξάτμισης (υγρασίας, πίεσης, υδραυλικής αγωγιμότητας και υδραυλικού φορτίου) μπορεί να πραγματοποιηθεί μέχρι μια  $u_{max}$ . Η  $u_{max}$  αποκτάται όταν η κλίση του υδραυλικού φορτίου τείνει  $-\infty$  στην επιφάνεια του εδάφους. Όταν η  $u$  είναι μεγαλύτερη από την  $u_{max}$  τότε η κλίση του υδραυλικού φορτίου μπορεί να τείνει στο  $-\infty$  σε σχετικά μικρά  $Z$ , οπότε η κατατομή σταθερής κατάστασης δεν είναι πραγματοποιήσιμη αφού δεν υπάρχει ροή και συνεπώς ακυρώνεται η βασική υπόθεση ότι η ταχύτητα ροής είναι σταθερή. Οι ΚΣΚ εξάτμισης είναι πραγματοποιήσιμες για όλες τις τιμές  $u$  οι οποίες είναι ίσες ή μικρότερες της  $u_{max}$ .

Η  $u_{max}$  που μπορεί να εμφανιστεί σ' ένα έδαφος εξαρτάται από την τιμή του  $Z$ . Όταν το  $Z$  μεγαλώνει τότε η δυνατή  $u_{max}$  που μπορεί να εμφανιστεί στην κατατομή μικραίνει, ενώ όταν το  $Z$  μικραίνει η  $u_{max}$  μεγαλώνει και στην περίπτωση που το  $Z$  είναι περίπου ίδιο με το πάχος της κορεσμένης περιοχής τότε η  $u_{max}$  τείνει να γίνει ίδια με τη δυνατή εξατμισοδιαπνοή που επιβάλλεται από την αποξηραντική ικανότητα της ατμόσφαιρας. Στην περίπτωση αυτή η κατατομή του φορτίου πίεσης μπορεί να υπολογιστεί με απευθείας ολοκλήρωση του νόμου του Darcy (δηλαδή για τον υπολογισμό των κατατομών στην περίπτωση των κατατομών σταθερής κατάστασης μας αρκεί ο ν. Darcy και η γνώση των υδραυλικών ιδιοτήτων)

$$u = -K(H) \left( \frac{dH}{dZ} + 1 \right) \rightarrow dZ = - \frac{dH}{\frac{u}{K(H)} + 1} \quad (1)$$

Με ολοκλήρωση της εξίσωσης από  $H=0$  που επικρατεί στο  $Z=0$  (στο βάθος που βρίσκεται η στάθμη του υπόγειου νερού) μέχρι το  $H$  που επικρατεί στο ύψος  $Z$  έχουμε

$$Z = -\int_0^H \frac{dH}{\frac{u}{K(H)} + 1}$$

Αν δεν υπάρχει αναλυτική σχέση, αλλά η σχέση  $H$  και  $K$  είναι γνωστή από πείραμα, τότε η ολοκλήρωση γίνεται με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

$$Z_i = Z_{i-1} - \int_0^H \frac{dH}{\frac{u}{K_{i-\frac{1}{2}}} + 1}$$

Για το ίδιο  $Z$  η τιμή της  $u_{max}$  εξαρτάται από το τύπο του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα εάν το  $Z$  είναι μικρό τότε η  $u_{max}$  είναι μεγαλύτερη στο χονδρόκοκο έδαφος. Εάν όμως το  $Z$  είναι σχετικά μεγάλο τότε η  $u_{max}$  πιθανότατα είναι μεγαλύτερη στο λεπτόκοκο αφού η  $K$  του χονδρόκοκου και συνεπώς η  $u$  μπορεί να μηδενίζεται σε σχετικά μικρό  $Z$  ενώ στο λεπτόκοκο η εξάτμιση μπορεί να συνεχίζεται.

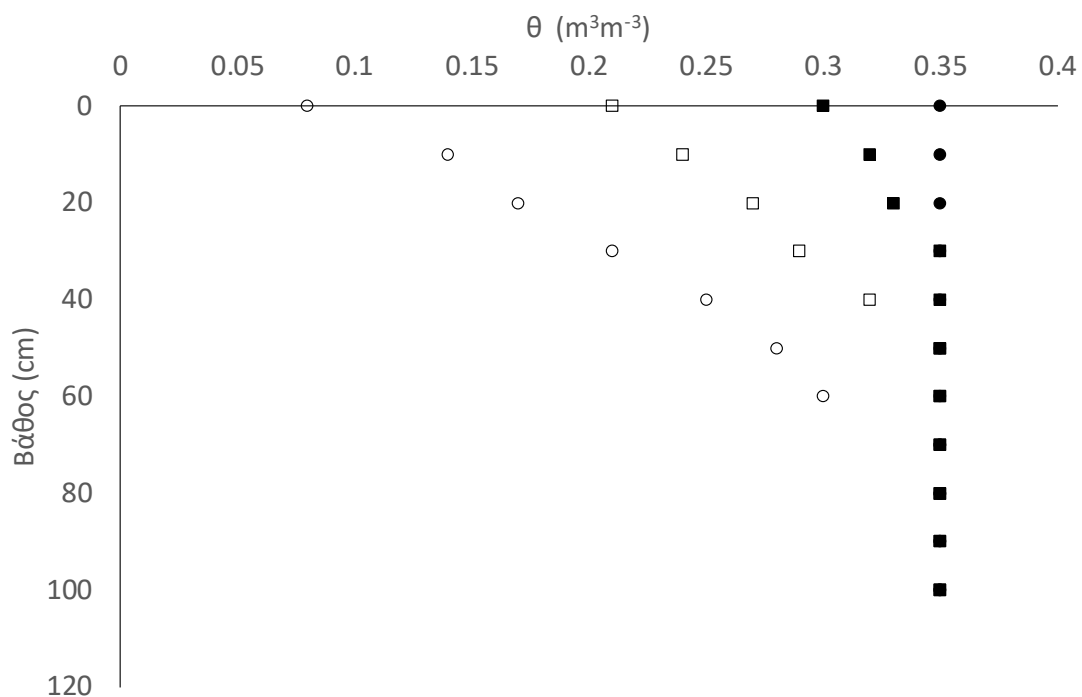
Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την εξάτμιση του νερού από ένα γυμνό έδαφος το οποίο έχει υψηλή υγρασία μέχρι ένα ορισμένο βάθος  $Z$  και στο οποίο η υπόγεια στάθμη του νερού εντοπίζεται πολύ βαθιά και δεν επηρεάζει την διαδικασία της εξάτμισης. Επίσης θεωρούμε όπως και στην περίπτωση της εξάτμισης σταθερής κατάστασης, ότι οι εξωτερικές ατμοσφαιρικές συνθήκες παραμένουν σταθερές. Η περίπτωση αυτή είναι αρκετά διαδεδομένη ειδικά στην περίπτωση της χειμερινής αγρανάπαυσης των ανοιξιάτικων καλλιεργειών ή στην περίπτωση των αρδευόμενων καλλιεργειών για το γυμνό έδαφος μεταξύ των γραμμών καλλιέργειας κ.λ.π.

Το φαινόμενο της εξάτμισης του εδαφικού νερού κάτω από αυτές τις συνθήκες λαμβάνει χώρα σε τρία διακριτά στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο όπου το έδαφος έχει υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία π.χ μετά την άρδευση ή βροχόπτωση μέχρι ένα ορισμένο βάθος, **η ταχύτητα εξάτμισης  $E_s$  για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα είναι σχετικά σταθερή και σχεδόν ίδια με τον μέγιστο ρυθμό εξάτμισης  $E_p$  ο οποίος επιβάλλεται αποκλειστικά από τις εξωτερικές ατμοσφαιρικές συνθήκες.** Δηλαδή θεωρείται ότι η ταχύτητα εξάτμισης από κορεσμένο έδαφος μέχρι ένα βάθος  $Z$  είναι ίση με την ταχύτητα εξάτμισης από ελεύθερη επιφάνεια νερού. Θεωρητικά βέβαια αυτή η υπόθεση δεν ισχύει αφού η επιφάνεια του εδάφους έχει διαφορετικό albedo από αυτή του νερού αλλά και διαφορετική θερμοκρασία. Στις ξηρές και ημίξηρες περιοχές η διάρκεια αυτού του σταδίου της εξάτμισης μπορεί να είναι από μερικές ώρες έως μερικές ημέρες. Η ταχύτητα της εξάτμισης κατά το στάδιο αυτό μπορεί να διατηρηθεί σταθερή παρόλη την μείωση της επιφανειακής υγρασίας επειδή η μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας ( $K$ ) αντισταθμίζεται από την αύξηση της κλίσης του υδραυλικού φορτίου. Από μια χρονική στιγμή και μετά όταν η επιφανειακή υγρασία προσεγγίζει την τιμή της αεροξήρανσης, η μείωση της

Κ δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από μια επιπλέον αύξηση της κλίσης του υδραυλικού φορτίου με αποτέλεσμα το πρώτο στάδιο της σταθερής ταχύτητας εξάτμισης να τελειώσει και να έχουμε είσοδο στο δεύτερο στάδιο. Στο τέλος του πρώτου σταδίου διαμορφώνεται η μέγιστη τιμή της κλίσης του υδραυλικού φορτίου (Σχήμα 1).

Με την συνέχιση της διαδικασίας της εξάτμισης κατά το δεύτερο στάδιο η κλίση του υδραυλικού φορτίου μειώνεται εξ αιτίας των απωλειών υγρασίας με το βάθος. Έτσι σε κάθε σημείο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους εμφανίζεται μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας και της κλίσης του υδραυλικού φορτίου **με αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας εξάτμισης**. Συνεπώς κατά το πρώτο στάδιο έχουμε αύξηση της κλίσης του υδραυλικού φορτίου με τον χρόνο μέχρι μια μέγιστη τιμή ενώ κατά το δεύτερο στάδιο έχουμε βαθμιαία μείωση της κλίσης του υδραυλικού φορτίου. Παράλληλα αυξάνεται το πάχος της εδαφικής ζώνης όπου η υγρασία θ αποκτά τιμές κοντά στην τιμή της αεροξήρανσης. Το πάχος αυτής της ζώνης αυξάνεται με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου. Κατά το στάδιο αυτό η ταχύτητα της εξάτμισης υπαγορεύεται από την ταχύτητα με την οποία μπορεί το έδαφος που ξηραίνεται να τροφοδοτήσει με νερό την επιφάνεια εξάτμισης. Συνεπώς η ταχύτητα εξάτμισης εξαρτάται βασικά από τις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους. Η χρονική διάρκεια του δεύτερου σταδίου είναι πολύ μεγαλύτερη αυτής του πρώτου σταδίου. Το τρίτο στάδιο, χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά μικρές ταχύτητες εξάτμισης και την μετατόπιση της ζώνης ξήρανσης βαθύτερα στο εσωτερικό του εδάφους (Hillel, 1989). Κατά το στάδιο αυτό η μεταφορά του νερού γίνεται υπό μορφή υδρατμών.

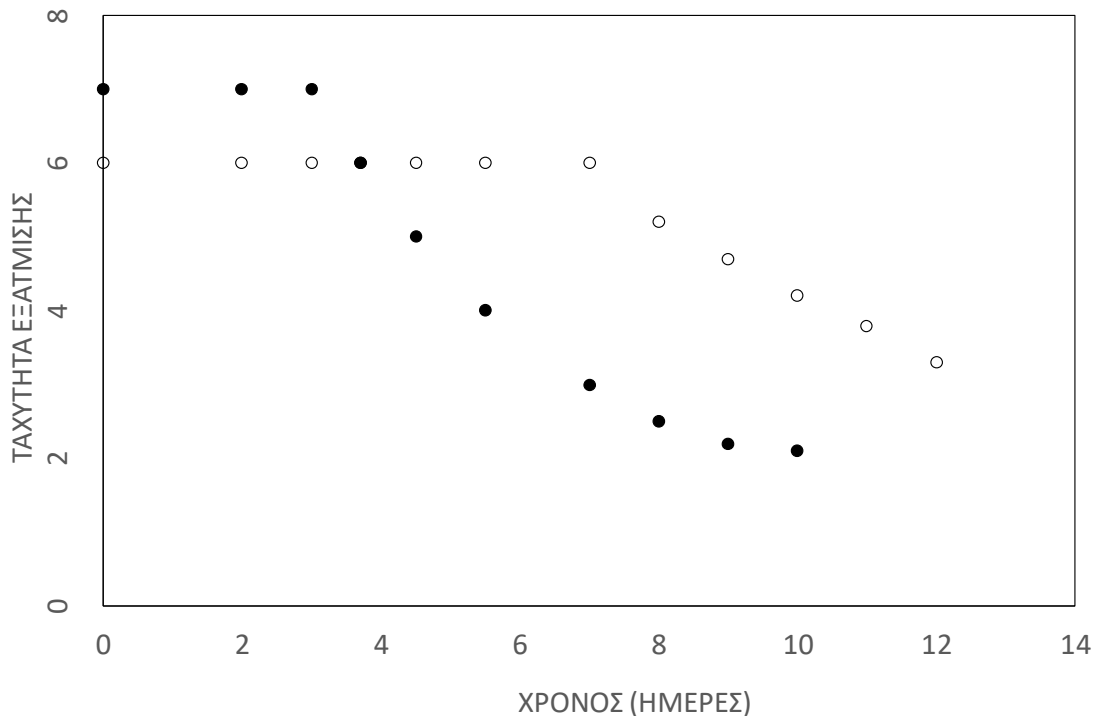
Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της ταχύτητας εξάτμισης και του χρόνου για δύο περιπτώσεις μέγιστης ταχύτητας εξάτμισης. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2 η μετάπτωση από το στάδιο 1 στο στάδιο 2 γίνεται σχετικά απότομα.



Σχήμα 1: Η μεταβολή κλίσεων κοντά στην επιφάνεια κατά την διάρκεια του πρώτου σταδίου

Αντίθετα η μετάπτωση από το δεύτερο στο τρίτο στάδιο γίνεται βαθμιαία με αποτέλεσμα να είναι δύσκολος ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο σταδίων.

Στο τέλος του πρώτου σταδίου ενώ η επιφανειακή υγρασία είναι ίδια και περίπου ίση με την τιμή της αεροξήρανσης, ανεξάρτητα από την τιμή της  $E_s$ , η κατά βάθος κατανομή της υγρασίας μπορεί να είναι τελείως διαφορετική αφού εξαρτάται από την τιμή της  $E_s$ .



Σχήμα 2: Η σχέση μεταξύ της ταχύτητας εξάτμισης με τον χρόνο στα τρία στάδια κάτω από δύο διαφορετικές μέγιστες ταχύτητες εξάτμισης.

Εάν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επιβάλουν μικρή ταχύτητα εξάτμισης  $E_s$  η διάρκεια του πρώτου σταδίου είναι μεγαλύτερη (Σχήμα 2). Το γεγονός αυτό είχε οδηγήσει διάφορους ερευνητές να υποθέσουν ότι στην περίπτωση της μεγαλύτερης ταχύτητας εξάτμισης κατά το πρώτο στάδιο είναι πιθανόν η αθροιστική εξάτμιση  $E_c$  να είναι μικρότερη από αυτή της μικρότερης ταχύτητας εξάτμισης. Αντίθετα οι Gardner and Hillel (1962) αναφέρουν ότι οι υψηλότερες ταχύτητες εξάτμισης κατά το πρώτο στάδιο οδηγούν σε μεγαλύτερες αθροιστικές εξατμίσεις σε κάθε χρονική στιγμή. Το πρώτο στάδιο κάτω από τις ίδιες ατμοσφαιρικές συνθήκες διαρκεί μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σ' ένα αργιλώδες έδαφος συγκριτικά με ένα αμμώδες αφού τα αργιλώδη εδάφη διατηρούν μεγαλύτερες τιμές υγρασίας καθώς και τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας στα μεγάλα αρνητικά φορτία πίεσης. Επίσης η κατάσταση της εδαφικής επιφάνειας επηρεάζει σημαντικά την χρονική διάρκεια του πρώτου σταδίου. Πιο συγκεκριμένα κάτω από τις ίδιες ατμοσφαιρικές συνθήκες η χρονική διάρκεια του πρώτου σταδίου επηρεάζεται από την δομή του εδάφους καθώς και την ύπαρξη φυτικών υπολειμμάτων (mulching). Η ταχύτητα εξάτμισης κατά το δεύτερο στάδιο είναι μειωμένη κατά 30-40% συγκριτικά με αυτή του πρώτου σταδίου (Ghildyal and Tripathi, 1987).

## 2. Μαθηματικές λύσεις

## 2.1. Πρώτο στάδιο

Οι Gardner and Hillel (1962) υπολόγισαν την διάρκεια του πρώτου σταδίου και την κατανομή της υγρασίας κατά το τέλος του, αξιοποιώντας την εξίσωση της μονοδιάστατης οριζόντιας διήθησης θεωρώντας ότι ο συντελεστής διάχυσης  $D$  είναι συνάρτηση της υγρασίας  $\theta$ . Για τον σκοπό αυτό θεώρησαν μια κατακόρυφη στήλη μήκους  $L$  ομοιογενούς υγρασίας, η οποία είναι κλειστή στον πάτο και άρα δεν υπάρχει ροή.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (1)$$

με συνθήκες

$$\theta = \theta_1, \quad 0 \leq Z \leq L, \quad t = 0 \quad (a)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0, \quad Z=0, \quad t > 0 \quad (b)$$

$$D \frac{\partial \theta}{\partial Z} = E, \quad 0 < Z < L, \quad t > 0 \quad (c)$$

$$\theta = \theta_c, \quad 0 < Z < L, \quad t = t_c \quad (d)$$

$$\theta_c = \theta_a, \quad Z=0, \quad t = t_c \quad (e)$$

όπου  $\theta_1$  η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία,  $\theta_c$  η περιεκτικότητα σε υγρασία στο τέλος του πρώτου σταδίου εξάτμισης όπου η ταχύτητα είναι σταθερή,  $t_c$  η χρονική διάρκεια του πρώτου σταδίου και  $E_s$  η σταθερή ταχύτητα εξάτμισης.

Από την εξ. (1) για σταθερή ταχύτητα εξάτμισης  $E_s$  έχουμε

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{E}{L} \quad (2)$$

Το (-) αντιπροσωπεύει την μείωση της υγρασίας  $\theta$  με τον χρόνο

Από την εξ. (1) και (2) παίρνουμε

$$-\frac{E}{L} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Με ολοκλήρωση της εξ. (3) παίρνουμε

$$D \frac{\partial \theta}{\partial Z} = -\frac{EZ}{L} + f(t) \quad (4)$$

Με την αξιοποίηση της οριακής συνθήκης (b) βρίσκουμε ότι  $f(t)=0$  με αποτέλεσμα η εξ. (4) να γίνεται

$$D \frac{\partial \theta}{\partial Z} = -\frac{EZ}{L} \quad (5)$$

Εάν αντικαταστήσουμε την διαχυτικότητα  $D$  με την αναλυτική έκφραση

$$D = D_a e^{\beta(\theta - \theta_a)}, \quad \text{όπου } D_a \text{ η διαχυτικότητα στην μικρότερη } \theta = \theta_a, \text{ τότε η εξ. (5)}$$

γίνεται

$$e^{(\beta(\theta - \theta_a))} \frac{\partial \theta}{\partial Z} = -\frac{EZ^2}{2LD_a} \quad (6)$$

Με ολοκλήρωση της εξ. (6) παίρνουμε

$$\frac{1}{\beta} e^{(\beta(\theta - \theta_a))} = -\frac{EZ^2}{2LD_a} + g(t) \quad (7)$$

Στον χρόνο  $t_c$  στην επιφάνεια  $Z=L$  η  $\theta=\theta_a$  οπότε  $g(t_c) = \frac{1}{\beta} + \frac{EL}{2D_a}$ . Τελικά η εξ.(7)

γίνεται

$$\frac{1}{\beta} e^{(\beta(\theta-\theta_a))} = -\frac{EZ^2}{2D_a L} + \frac{1}{\beta} + \frac{EL}{2D_a} \quad (8)$$

Πολλαπλασιάζοντας την εξ. (8) με  $\beta$  και παίρνοντας τον λογάριθμο καταλήγουμε στην

$$\theta_c = \theta_a + \frac{1}{\beta} \ln \left[ 1 + \frac{E\beta}{2D_a L} (L^2 - Z^2) \right] \quad (9)$$

Η Εξ. (9) περιγράφει την κατανομή της υγρασίας  $\theta$  σαν συνάρτηση του βάθους  $Z$  στο τέλος της φάσης της σταθερής ταχύτητας εξάτμισης (πρώτο στάδιο). Η κατανομή της υγρασίας θεωρείται ότι είναι ομοιόμορφη με το βάθος εκτός από την επιφάνεια  $Z=L$  όπου έχουμε απότομη κλίση και η υγρασία μεταπίπτει στην  $\theta_a$ .

Επίσης θεωρείται ότι η μέση υγρασία  $\bar{\theta}_c$  δεν διαφέρει σημαντικά από την υγρασία στο  $Z=0$ .

Η μέση περιεκτικότητα σε υγρασία  $\bar{\theta}_c$  σε όλο το βάθος  $L$  στο τέλος του πρώτου σταδίου διάρκειας  $t_c$  θα είναι

$$\bar{\theta}_c = \frac{1}{L} \int_0^L \theta_c dZ \quad (10)$$

Οι Gardner and Hillel (1962) θεώρησαν ότι η μέση  $\bar{\theta}_c$  μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ίση με την  $\theta$  στο  $Z=0$  (κάτω όριο) στο τέλος του πρώτου σταδίου οπότε η εξίσωση (9) γίνεται

$$\bar{\theta}_c = \theta_a + \frac{1}{\beta} \ln \left[ 1 + \frac{E\beta L}{2D_a} \right] \quad (11)$$

Η συνολική περιεκτικότητα σε νερό της στήλης θα είναι

$$W = L \left[ \theta_a + \frac{1}{\beta} \ln \left[ 1 + \frac{E\beta L}{2D_a} \right] \right] \quad (12)$$

Από την σύγκριση με πειραματικά δεδομένα βρέθηκε ότι οι εξισώσεις (11) και (12) δίνουν αξιόπιστες προβλέψεις όσον αφορά την κατανομή της μέσης υγρασίας και της περιεκτικότητας σε νερό στο τέλος του πρώτου σταδίου. Όταν οι τιμές των  $\bar{\theta}_c$  και  $W$  έχουν υπολογιστεί τότε είναι δυνατόν να υπολογιστεί και η ποσότητα του νερού η οποία έχει εξατμιστεί

$$\theta_1 L - \bar{\theta}_c L = Et_c \quad (13)$$

καθώς και η διάρκεια του πρώτου σταδίου

$$t_c = \left( \theta_1 - \bar{\theta}_c \right) \frac{L}{E} \quad (14)$$

Από την εξίσωση (14) προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η τιμή της  $E$  τόσο ο χρόνος που διαρκεί το πρώτο στάδιο εξάτμισης μικραίνει.

## 2.2. Δεύτερο στάδιο

Με την συνέχιση της εξάτμισης, ο ρυθμός μεταφοράς του νερού στην επιφάνεια του εδάφους γίνεται μικρότερος αυτού που επιβάλουν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες. Στην περίπτωση αυτή η ταχύτητα εξάτμισης καθώς και η αθροιστική εξάτμιση κατά το δεύτερο στάδιο μπορεί να υπολογιστεί από την επίλυση της εξ. (1) χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Boltzmann και θεωρώντας ότι η  $D$  είναι σταθερή. Η διαδικασία των υπολογισμών είναι ίδια με την περίπτωση της οριζόντιας διήθησης αφού και στις δύο περιπτώσεις αγνοείται η επίδραση της βαρύτητας.

Στην περίπτωση αυτή κατ' αναλογία με την αθροιστική οριζόντια διήθηση η αθροιστική εξάτμιση θα είναι

$$E_c = \int_{\theta_a}^{\theta_1} Z d\theta = t^{0.5} \int_{\theta_a}^{\theta_1} \phi d\theta \quad (15)$$

και η ταχύτητα εξάτμισης

$$E = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} t^{-0.5} \int_{\theta_a}^{\theta_1} \phi d\theta \quad (16)$$

Εάν θεωρήσουμε όπως προαναφέρθηκε την διαχυτικότητα  $D$  σταθερή, τότε η επίλυση της εξ. (1) χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Boltzmann οδηγεί στον υπολογισμό της αθροιστικής εξάτμισης

$$E_c = 2(\theta_1 - \theta_a) \left( \frac{\bar{D}}{\pi} \right)^{0.5} t^{0.5} = \alpha t^{0.5} \quad (17)$$

και στην ταχύτητα εξάτμισης

$$E = (\theta_1 - \theta_a) \left( \frac{\bar{D}}{\pi} \right)^{0.5} t^{-0.5} = \alpha t^{-0.5} \quad (18)$$

Από την εξίσωση (17) προκύπτει ότι η αθροιστική εξάτμιση είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου ενώ από την εξίσωση (18) προκύπτει ότι η ταχύτητα εξάτμισης είναι αντιστρόφως ανάλογη.

Επίσης το προφίλ υγρασίας με το βάθος σε μια χρονική στιγμή  $t$  δίνεται από την εξίσωση

$$\theta(Z, t) = \theta_a + (\theta_1 - \theta_a) \operatorname{erfc} \left( \frac{Z}{2\sqrt{\bar{D}t}} \right) \quad (19)$$

Η τιμή της μέσης  $\bar{D}$  αν είναι γνωστή η σχέση  $D(\theta)$  δίνεται από την εξίσωση

$$\bar{D} = \frac{1.85}{(\theta_1 - \theta_a)^{1.85}} \int_{\theta_a}^{\theta_1} D(\theta) (\theta_1 + \theta)^{0.85} d\theta \quad (20)$$

Ο όρος  $\alpha$  στην εξίσωση (17) μπορεί να υπολογιστεί εάν σχεδιάσουμε τα δεδομένα  $E_c \cdot t^{0.5}$ . Εάν θεωρήσουμε σαν  $t=0$  τον χρόνο κατά τον οποίο τελείωσε μια βροχόπτωση ή άρδευση και γνωρίζουμε την υγρασία  $\theta$  του εδάφους που έχει διαμορφωθεί μέχρι ένα βάθος  $Z$  καθώς και την  $\bar{D}$  τότε είναι δυνατόν να υπολογιστεί η αθροιστική εξάτμιση και η ταχύτητα εξάτμισης με τον χρόνο. Από



πειραματικά δεδομένα τα οποία συλλέχτηκαν στον πειραματικό αγρό του Εργαστηρίου Γ. Υδραυλικής προέκυψε ότι η σχέση  $E_c t^{0.5}$  είναι ισχυρά γραμμική και ότι η τιμή της κλίσης  $\alpha$  εξαρτάται από την αρχική υγρασία  $\theta_1$ .

### 3. Μοντέλο υπολογισμού της υγρασίας με το βάθος κατά το δεύτερο στάδιο της εξάτμισης (Suleiman and Ritchie, 2003)

Η εξίσωση ροής η οποία χρησιμοποιείται είναι η εξίσωση (1)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$$

με αρχικές και οριακές συνθήκες

$$t=0 \quad z>0 \quad \theta=\theta_0$$

$$t>0 \quad z=0 \quad \theta=\theta_\alpha$$

$$t>0 \quad E_s < E_p$$

όπου  $\theta_\alpha$  η υγρασία του αεροξηρανθέντος εδάφους,  $\theta_0$  η αρχική ομοιόμορφη υγρασία η οποία θεωρείται ότι είναι περίπου ίδια με την υγρασία στην υδατοικανότητα,  $E_s$  η πραγματική εξάτμιση και  $E_p$  η δυνητική εξατμισοδιαπνοή.

Η μεταβολή της  $\theta$  με το βάθος λόγω των αρχικών και οριακών συνθηκών που έχουν επιβληθεί δίνεται από μια εκθετική σχέση με τον χρόνο

$$\theta = \theta_\alpha + (\theta_0 - \theta_\alpha) \exp(-Ct) \quad (21)$$

Όπου  $C$  είναι μια παράμετρος η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με το έδαφος. Η τιμή της παραμέτρου  $C$  αναμένεται να μειώνεται με το βάθος  $Z$  επειδή η μεταβολή της τιμής της  $\theta$  είναι μικρότερη με το βάθος  $Z$ . Έτσι η  $C$  προσεγγίζει την τιμή 1 όταν το  $Z=0$  και την τιμή 0 όταν  $Z \rightarrow \infty$ . Επίσης η σχέση της παραμέτρου  $C$  με το βάθος  $Z$  δίνεται από μια δυναμοσυνάρτηση της μορφής

$$C = kZ^A \quad (22)$$

Οι παράμετροι  $k$  και  $A$  δίνονται σαν συναρτήσεις της αρχικής υγρασίας  $\theta_0$  από τις εξισώσεις

$$k = 0.3\theta_0 + 0.56 \quad (23)$$

$$A = 0.22\theta_0 - 1.99 \quad (24)$$

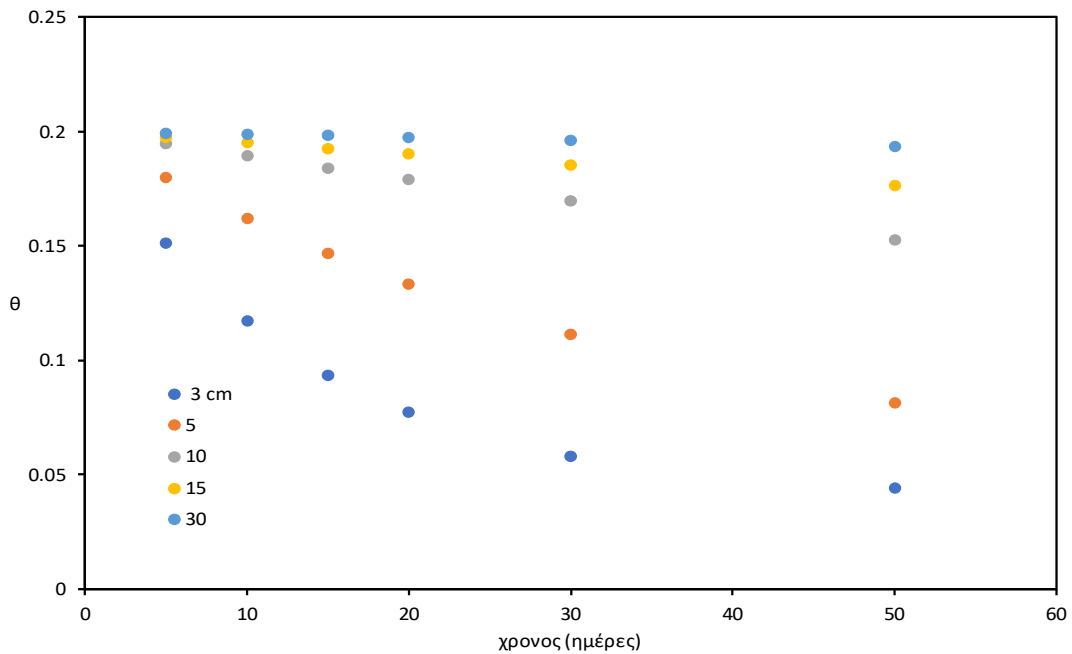
Επίσης η κλίση  $\alpha$  των εξισώσεων (17) και (18) συσχετίστηκε με την υγρασία  $\theta_0$ . Εάν δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα οι συγγραφείς προτείνουν σαν μια μέση τιμή της κλίσης 1.39.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται η μεταβολή της υγρασίας σε κάθε βάθος με τον χρόνο καθώς και η σχέση  $E-t^{0.5}$ .

Για τον υπολογισμό της  $\theta$  σε κάθε βάθος με τον χρόνο η μέθοδος υπολογισμού είναι η ακόλουθη. Αρχικά υπολογίστηκαν οι παράμετροι  $k$  και  $A$  από τις εξισώσεις 23 και 24 θεωρώντας αρχική υγρασία σε όλο το βάθος  $Z$   $0.2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Στην συνέχεια έγινε

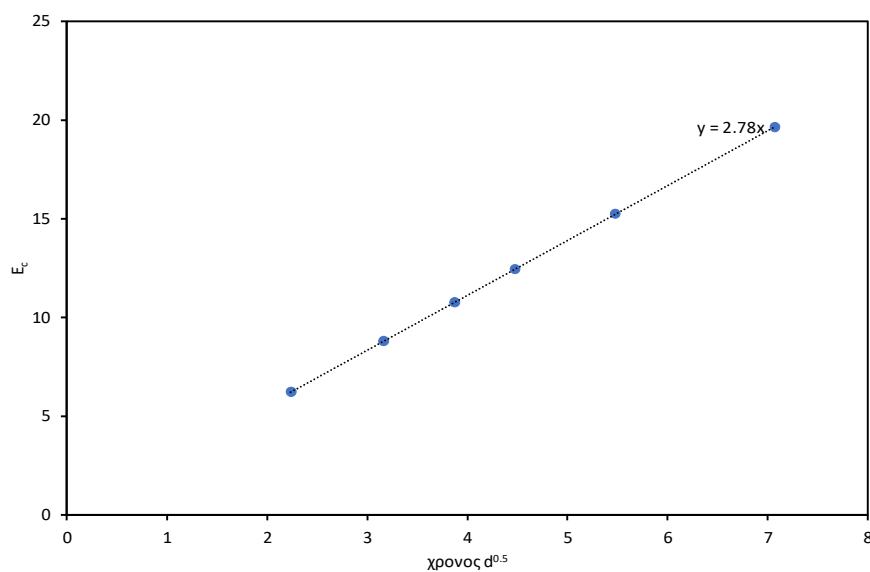
υπολογισμός της παραμέτρου C με το βάθος από την εξίσωση 22. Για τον υπολογισμό της τιμής της  $\theta$  σε κάθε βάθος και χρόνο έγινε από την εξίσωση 21 όπου σε κάθε βάθος διατηρούνταν σταθερή η τιμή της C και υπολογίστηκε η  $\theta$  σε κάθε χρόνο t.

Από το πρώτο σχήμα φαίνεται ότι οι μεταβολές της  $\theta$  με το βάθος μειώνονται και ότι για το βάθος των 30 cm οι μεταβολή μετά από 50 ημέρες είναι ελάχιστη. Αντίθετα στα βάθη 3 cm και 5 cm η μείωση της υγρασίας είναι μεγάλη και ειδικότερα στο βάθος των 3 cm είναι περίπου ίδια με την τιμή της αεροξήρασης ( $0.04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).



Σχήμα 3: Η μεταβολή της υγρασίας σε διάφορα βάθη με τον χρόνο

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η σχέση  $E_c \cdot t^{0.5}$  για τιμή κλίσης  $\alpha = 1.39 \times 0.2 = 2.78 \text{ mm d}^{0.5}$ .



Σχήμα 4: Η σχέση  $E_c \cdot t^{0.5}$

κάτω από δύο διαφορετικές μέγιστες ταχύτητες εξάτμισης.

#### **4. Μέθοδοι μείωσης της εξάτμισης από γυμνό έδαφος**

Η ταχύτητα εξάτμισης μπορεί να τροποποιηθεί με τρεις τρόπους: α) Μεταβάλλοντας την παρεχόμενη ενέργεια π.χ με τροποποίηση του albedo β) μειώνοντας την κλίση του υδραυλικού φορτίου π.χ με αύξηση του βάθους της υπόγειας στάθμης γ) μειώνοντας την υδραυλική αγωγιμότητα π.χ με όργωμα ή με τοποθέτηση φυτικών υπολειμμάτων.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται και από το στάδιο της εξάτμισης που επιδιώκουμε να ρυθμίσουμε. Εάν επιδιώκουμε να παρέμβουμε στο πρώτο στάδιο τότε στόχος πρέπει να είναι η μείωση της έντασης των εξωτερικών ατμοσφαιρικών συνθηκών. Στην περίπτωση αυτή συνήθως χρησιμοποιούμε διάφορα φυτικά υπολείμματα τα οποία μεταβάλουν τις ανακλαστικές ιδιότητες καθώς και την θερμοκρασία της εδαφικής επιφανείας. Στην βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί μειώσεις της εξάτμισης λόγω απόθεσης φυτικών υπολειμμάτων από 34% έως 50%. Ένας διαφορετικός τρόπος είναι η εφαρμογή οργώματος ώστε να επιταχυνθεί η ξήρανση της επιφανειακής στρώσης. Κατά το δεύτερο στάδιο στοχεύουμε κυρίως στην μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας ή του συντελεστή διάχυσης.

#### **5. Η επίδραση του οργώματος στην εξάτμιση**

Το όργωμα γενικά προκαλεί χαλάρωση της ανώτερης εδαφικής στρώσης, αυξάνει την τραχύτητά της και καταστρέφει την όποια εδαφική κρούστα έχει δημιουργηθεί στην επιφάνεια του εδάφους. Οι καταστάσεις αυτές επιφέρουν αύξηση της διήθησης του νερού στο έδαφος αλλά ταυτόχρονα μπορεί να οδηγήσουν και σε αύξηση της εξάτμισης. Έτσι η αύξηση του αποθηκευμένου νερού μπορεί να ακυρωθεί από την αύξηση της εξάτμισης. Το τι τελικά θα γίνει εξαρτάται από πολλούς παράγοντες.

Μόνο σε δύο περιπτώσεις είναι καθαρό το τι ακριβώς θα συμβεί με την εφαρμογή του οργώματος. Με την εφαρμογή του οργώματος γίνεται καταπολέμηση των ζιζανίων και άρα αντιμετωπίζεται η ανεπιθύμητη κατανάλωση νερού και στην περίπτωση των αργιλωδών εδαφών με την εφαρμογή οργώματος αποτρέπεται η δευτερεύουσα εξάτμιση από τις ρωγμές κατά την ξηρή περίοδο.

Στην περίπτωση του οργώματος με δίσκο σε γυμνό πηλώδες έδαφος στο Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής παρατηρήθηκε ότι αυξάνεται η υγρασία κορεσμού  $\theta_s$  ενώ ταυτόχρονα μειώνεται η υδραυλική αγωγιμότητα στο κορεσμό συγκριτικά με το γυμνό έδαφος. Όσον αφορά την χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας αυτή επηρεάζεται μόνο σε ένα μικρό εύρος πιέσεων κοντά στον κορεσμό (0-60 cm). Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι αυτός ο τύπος οργώματος καταστρέφει τους μεγάλους πόρους και αυξάνει την ποσότητα των μικρών πόρων.

#### ΑΣΚΗΣΗ

Να υπολογιστεί η ταχύτητα εξάτμισης και η αθροιστική εξάτμιση για 10 ημέρες σ' ένα ομοιογενές έδαφος το οποίο έχει κορεστεί σε μεγάλο βάθος όταν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες επιβάλουν μεγάλη ταχύτητα εξάτμισης. Η αρχική υγρασία είναι  $0.48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  και η υπολειμματική υγρασία είναι  $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Η μέση τιμή του συντελεστή διάχυσης  $D$  είναι  $100 \text{ cm}^2 \text{ day}^{-1}$ .

### Απάντηση

Για την επίλυση χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις 17 και 18 και επιλύουμε διαδοχικά για την 1,2 κ.λ.π ημέρα. Κατ' αρχάς υπολογίζουμε την αθροιστική εξάτμιση από την εξίσωση 17.

$$1 \ E=5.08 \text{ cm}$$

$$2 \ E=7.18$$

$$3 \ E=8.8$$

$$4 \ E=10.16$$

$$5 \ E=11.36$$

$$6 \ E=12.44$$

$$7 \ E=13.44$$

$$8 \ E=14.37$$

$$9 \ E=15.24$$

$$10 \ E=16.06$$

Η μέση ταχύτητα εξάτμισης υπολογίζεται με την βοήθεια της εξίσωσης 18

$$1 \ E=3.59 \text{ cm/day}$$

$$2 \ E=2.07$$

$$3 \ E=1.6$$

$$4 \ E=1.36$$

$$5 \ E=1.2$$

$$6 \ E=1.08$$

$$7 \ E=1$$

$$8 \ E=0.93$$

$$9 \ E=0.87$$

$$10 \ E=0.82$$