



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**«ΧΡΗΣΗ ΛΥΣΙΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΚΡΙΒΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
ΤΟΥ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΥΔΑΤΟΣ»**

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΛΑΖΑΡΑΚΗΣ

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
"Εφαρμοσμένη Επιστήμη και Τεχνολογία στη Γεωπονία"**

ΙΟΥΝΙΟΣ 2020

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ, ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, 2020

ΜΕΛΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΔΡ ΜΑΝΙΟΣ ΘΡΑΣΥΒΟΥΛΟΣ

ΙΔΙΟΤΗΤΑ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΙΔΡΥΜΑ/ΦΟΡΕΑΣ: ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

2. ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΔΡ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΙΔΙΟΤΗΤΑ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΙΔΡΥΜΑ/ΦΟΡΕΑΣ: ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

3. ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΔΡ ΔΑΛΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΙΔΙΟΤΗΤΑ: ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ

**ΤΟ ΕΡΓΟ ΑΥΤΟ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ
ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ, ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ**

Αυσίμετρα, Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή, Κίνηση Εδαφικού Ύδατος

*Στην Αθηνά, στον Κωνσταντίνο
και στην Ευσεβία*

Περίληψη

Ο ορθός υπολογισμός των αρδευτικών αναγκών μιας καλλιέργειας έχει πρωταρχικό ρόλο στην ανάπτυξη των καλλιεργούμενων φυτών, μιας και η ελλειμματική ή πλεονασματική άρδευση μπορούν να οδηγήσουν σε μη-βέλτιστες συνθήκες παραγωγής αλλά και σπατάλη πολύτιμων υδάτινων πόρων. Ειδικά στην περιοχή της Μεσογείου που χαρακτηρίζεται από περιορισμένες βροχοπτώσεις και υψηλές θερμοκρασίες, ο ακριβής υπολογισμός των αναγκών εξατμισοδιαπνοής αποκτά ιδιαίτερη σημασία. Παράλληλα, οι διαλυμένες ουσίες που καταλήγουν στο έδαφος, οι οποίες προέρχονται από φυσικές ή ανθρωπογενείς ενέργειες όπως είναι θρεπτικά συστατικά, οι χημικές ενώσεις από εντομοκτόνα και πρασιτοκτόνα κ.α. παρασύρονται στο εσωτερικό του από το νερό που διηθείται. Οι ουσίες αυτές, υπό δεδομένες συνθήκες και συγκεντρώσεις είναι ωφέλιμες, όμως αν μεταφερθούν στα επιφανειακά και υπόγεια ύδατα σε μεγάλες συγκεντρώσεις αποτελούν περιβαλλοντικό πρόβλημα.

Σε θεωρητικό επίπεδο, η κίνηση του ύδατος στο έδαφος διέπεται από την διήθηση η οποία είναι η φυσική διεργασία εισόδου και κίνησης του νερού στο έδαφος και εξαρτάται κυρίως από την βαρύτητα και τις φυσικές ιδιότητες του εδάφους, τις φυσικές διόδους που είναι σχηματισμένες στο αδιατάραχτο προφίλ του εδάφους, την αρχική περιεκτικότητα του εδάφους σε υγρασία, την ένταση και την διάρκεια των κατακρημνίσεων, καθώς και τα χαρακτηριστικά της φυτοκάλυψης. Τα χαρακτηριστικά της βλάστησης έχουν επίσης ιδιαίτερη σημασία καθώς η υδατική απορρόφηση της ρίζας (root water uptake) παρουσιάζει χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις ανάλογα με την ανάπτυξη του φυτού και τις περιβαλλοντικές παραμέτρους. Τα λυσίμετρα αποτελούν μια αποτελεσματική μέθοδο για την ακριβή μέτρηση των αρδευτικών αναγκών με τον έμμεσο υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται με την λεπτομερή καταγραφή παραμέτρων όπως του αποστραγγιζόμενου νερού από το έδαφος, όσο και του νερού που απομακρύνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον. Παράλληλα αποτελούν σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση της κίνησης του ύδατος μέσα στο έδαφος αλλά και του προσδιορισμού των αλάτων, των ρυπαντών, των θρεπτικών κ.α.. Παρόλη τη χρησιμότητά τους, η κατασκευή λυσίμετρων αποτελεί πρόκληση, ιδιαίτερα για δενδρώδεις καλλιέργειες.

Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει το μαθηματικό υπόβαθρο της κίνησης του ύδατος στο έδαφος. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των λυσίμετρων από το 1720 ως σήμερα. Αναλύονται οι διαφορετικοί τύποι λυσίμετρων ανάλογα με ουσιώδη χαρακτηριστικά όπως το σχήμα, το βάθος, το εδαφικό προφίλ, τα υλικά κατασκευής, τους μηχανισμούς και αισθητήρες που περιέχουν για την πετύχουν τη μέτρηση των απαραίτητων παραμέτρων με την κατάλληλη ακρίβεια για την χρήση που προορίζονται, κάνοντας μια ανασκόπηση στην διαθέσιμη σχετική βιβλιογραφία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα λυσίμετρα μεγάλου μεγέθους που αφορούν στην έρευνα σε δενδρώδεις καλλιέργειες. Τέλος,

Μεταπτυχιακή διατριβή Γεωργίου Λαζαράκη

περιγράφονται τα μη-ζυγιστικά λυσίμετρα που έχουν εγκατασταθεί στον χώρο του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου καθώς και αρχικά αποτελέσματα από πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής σε καλλιέργειες δέντρων ελιάς.

Ευχαριστίες

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή υλοποιήθηκε στο Τμήμα Γεωπονίας της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου με την επιστημονική υποστήριξη του εργαστηρίου Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Δρ. Ιωάννη Δαλιακόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ μαζί του και να προσπαθήσω να φέρω σε πέρας ένα, όπως αποδείχθηκε, δύσκολο έργο.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τις καθηγήτριες και τους καθηγητές του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Εφαρμοσμένη Επιστήμη και Τεχνολογία στη Γεωπονία» του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου, για την μετάδοση των πολύτιμων γνώσεών τους, που θα αποτελούν στο εξής για εμένα, σημαντικό επιστημονικό εφόδιο.

Ευχαριστούμε επίσης τις εταιρίες LANDCO, Future Intelligence και ANELIΞΙΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ Α.Ε., εταίρων του έργου «Ανάπτυξη Στάγδην Άρδευσης Υψηλής Ακρίβειας για Δενδρώδεις Καλλιέργειες» (ακρωνύμιο: Drip Irrigation Precise – DR.I.P) και κωδικό: Τ1ΕΔΚ-03372 που υλοποιείται στα πλαίσια της Ενιαίας Δράσης Κρατικών Ενισχύσεων Έρευνας, Τεχνολογικής Ανάπτυξης και Καινοτομίας «ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ» και στη διάρκεια του οποίου κατασκευάστηκαν τα λυσίμετρα του αγροκτήματος του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου (ΕΛΜΕΠΙΑ).

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την σύζυγο μου Ευσεβία, και τα παιδιά μου Κωνσταντίνο και Αθηνά, για την συμπαράσταση και την ανοχή τους για την απουσία μου όλο αυτό το διάστημα.

Περιεχόμενα

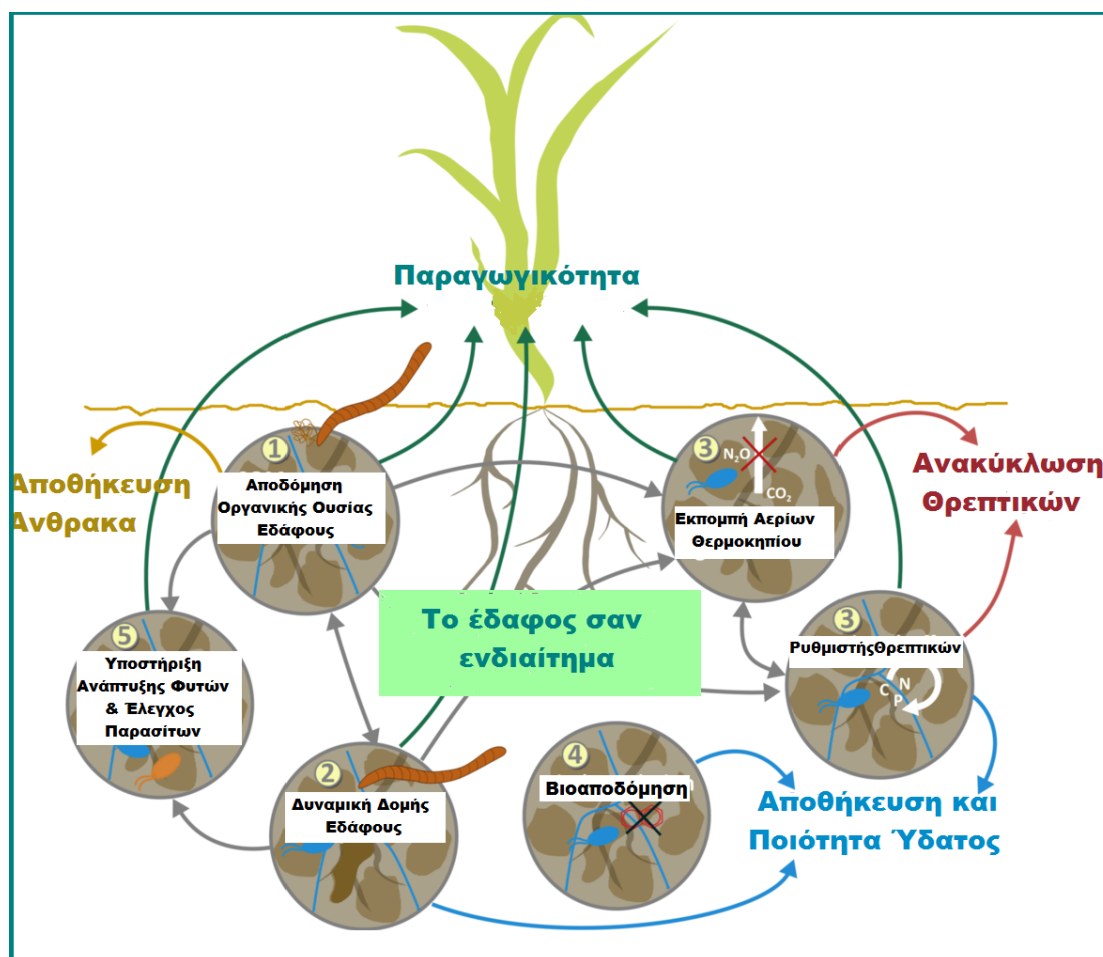
Περίληψη.....	vii
Ευχαριστίες	ix
Περιεχόμενα	xi
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Το έδαφος	1
1.1.1 Υφή του εδάφους.....	2
1.1.2 Δομή του εδάφους	3
1.1.3 Ειδικό και φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους	5
1.1.4 Πορώδες του εδάφους	6
1.2 Ροή στο έδαφος.....	7
1.2.1 Μόνιμη υδατική ροή.....	7
1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την κορεσμένη ροή του νερού	8
1.3.1 Διήθηση	9
1.3.2 Ροή Μητρικού δυναμικού-Τριχοειδής πίεση	10
1.3.3 Επιφανειακή Τάση.....	11
1.3.4 Χαρακτηριστική καμπύλη	11
1.4 Λυσίμετρα.....	13
1.5 Σκοπός της διπλωματικής	16
2 Μεθοδολογία	17
2.1 Κίνηση ύδατος στο έδαφος.....	17
2.1.1 Ροή ύδατος σε άμμο, ιλύ και άργιλο	18
2.2 Επιλεκτική ροή	19
2.2.1 Κορεσμένη Ροή Ύδατος.....	20
2.2.2 Ακόρεστη Ροή Ύδατος.....	21
2.3 Εξατμισοδιαπνοή και Υδρολογικός Κύκλος.....	22
2.3.1 Εξάτμιση.....	23
2.3.2 Διαπνοή	23
2.3.3 Εξατμισοδιαπνοή.....	24
2.3.4 Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή	25
2.3.5 Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή.....	25
2.4 Χρήση Ύδατος από Ριζικό Σύστημα.....	26
2.5 Μόνιμη υδατική ροή σε κορεσμένο έδαφος.....	27
2.5.1 Η εξίσωση Darcy	27
2.5.2 Υδραυλική αγωγιμότητα	29
2.6 Μέθοδος εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ETref – συντελεστή καλλιέργειας K_c	30
3 Εφαρμογές Λυσίμετρων	35
3.1 Τσιμεντένια Ζυγιστικά Λυσίμετρα	36
3.1.1 Τσιμεντένιο Ζυγιστικό Λυσίμετρο όγκου 16 m ³ με πρέμνα και ροδακινιές.....	36
3.1.2 Τσιμεντένιο ζυγιστικό λυσίμετρο όγκου 17 m ³ με αχλαδιές	39
3.2 Μεταλλικά Ζυγιστικά Λυσίμετρα	41

3.2.1	Μεταλλικό Ζυγιστικό Λυσίμετρο όγκου 5 m ³ με καλαμπόκι και σόγια.....	41
3.2.2	Κυλινδρικό μεταλλικό ζυγιστικό λυσίμετρο όγκου 1,5 m ³	45
3.2.3	Μεταλλικό ζυγιστικό λυσίμετρο με κατασκευαστικές παραλλαγές για Υδρολογική, Μετεωρολογική-Κλιματική, Επιστημονική και Αγρο-Γεωπονική χρήση	47
3.3	Στραγγιστικά Λυσίμετρα από Μέταλλο και Τσιμέντο	51
3.3.1	Κυλινδρικό στραγγιστικό λυσίμετρο όγκου 0,95 m ³ με Ασιατική αχλαδιά	51
3.3.2	Κυλινδρικό στραγγιστικό λυσίμετρο όγκου 1,5 m ³	53
3.4	Ζυγιστικά Λυσίμετρα από Μέταλλο και Τσιμέντο	54
3.4.1	Ζυγιστικό Λυσίμετρο όγκου 19,40 m ³ με Αμυγδαλιά	54
3.5	Στραγγιστικά Λυσίμετρα από Μέταλλο.....	57
3.5.1	Μεταλλικό Στραγγιστικό Λυσίμετρο όγκου 24 m ³	57
3.6	Στραγγιστικά Λυσίμετρα από Πλαστικό.....	61
3.6.1	Πλαστικό Στραγγιστικό Λυσίμετρο όγκου 0,60 m ³ με φυτά καλαμποκιού.....	61
3.7	Στραγγιστικά-ζυγιστικά λυσίμετρα από πλαστικό.....	63
3.7.1	Ελεύθερο Πλαστικό Στραγγιστικό-Ζυγιστικό Λυσίμετρο όγκου 2,5 m ³ με φυτό ελιάς...	63
3.8	Εμπορικά Λυσίμετρα έτοιμα για χρήση.....	65
3.8.1	Μικρά Μυζητικά Λυσίμετρα.....	65
3.8.2	Λυσίμετρα Ready-To-Go™ της εταιρείας UGT™.....	67
3.8.3	Λυσίμετρα οροφής κτιρίων της εταιρείας UGT™.....	68
3.8.4	Λυσίμετρο της εταιρείας METER ENVIRONMENT™	69
3.9	Σύνοψη.....	70
4	Στραγγιστικά Λυσίμετρα ΕΛΜΕΠΑ	71
4.1	Στραγγιστικά λυσίμετρα	71
4.2	Συλλογή δεδομένων και αυτοματισμοί.....	73
4.3	Δίκτυο άρδευσης.....	77
4.4	Αποτελέσματα λυσίμετρων.....	79
4.5	Δημοσιότητα.....	79
5	Συζήτηση και συμπεράσματα.....	80
	Βιβλιογραφία.....	82

1 Εισαγωγή

1.1 Το έδαφος

Το έδαφος αποτελεί ένα υλικό στο οποίο λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα μερικές από τις περισσότερο σημαντικές φυσικές διεργασίες που υποστηρίζουν την ζωή στον πλανήτη (Εικόνα 1). Μεταξύ των σπουδαιότερων από αυτές, είναι η απορρόφηση του ύδατος που προέρχεται είτε από τις κατακρημνίσεις είτε από την άρδευση και η μετακίνησή του στο εσωτερικό του, με συνέπεια μέρος από αυτό να αποδοθεί στα φυτά και στους υπόλοιπους οργανισμούς που ζουν μέσα ή επάνω σε αυτό. Μια ακόμη σημαντική διεργασία που συνδέεται με την κίνηση του νερού στο έδαφος είναι η κατάληξή του σε υπόγειες δεξαμενές (υδροφορέας) που λειτουργούν σαν φυσικός αποθηκευτικός χώρος των ποσοτήτων του νερού που χρησιμοποιείται από τους χερσαίους οργανισμούς και φυσικά από τον άνθρωπο.



Εικόνα 1. Οι Λειτουργίες του Εδάφους και η Δυναμική τους. Προσαρμογή από (Bonares, 2020).

Το έδαφος χαρακτηρίζεται ως κατάλληλο για κάθε δεδομένη χρήση, ανάλογα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των φυσικών του ιδιοτήτων όπως είναι η

υφή, η δομή, το ειδικό βάρος, το φαινόμενο ειδικό βάρος, το πορώδες και η ξηρή πυκνότητα του.

1.1.1 Υφή του εδάφους

Την υφή του εδάφους την χαρακτηρίζει το μέγεθος των σωματιδίων ή τεμαχιδίων που το αποτελούν. Το μέγεθος των σωματιδίων συνδέεται με το είδος τους και την προέλευσή τους, ενώ τα κυριότερα είδη εδαφικών σωματιδίων είναι η άμμος, η ιλύς και η άργιλος (Εικόνα 2). Σύμφωνα με την επικρατέστερη σε αριθμό τάξη μεγέθους ομάδα σωματιδίων που περιέχονται σε ένα έδαφος, αυτό χαρακτηρίζεται ως χονδρόκοκκο, ενδιάμεσο ή λεπτόκοκκο.



Εικόνα 2. Οι τρεις Βασικοί Τύποι Εδάφους. Προσαρμογή από Rainmachine (2020)

Τα χονδρόκοκκα εδάφη έχουν ως κύριο συστατικό την άμμο (2-0,05 mm), αποκαλούνται αμμώδη εδάφη, παρουσιάζουν εύκολη αποστράγγιση, δεν συγκρατούν ικανοποιητικές για τα φυτά ποσότητες θρεπτικών συστατικών, επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, ενώ δεν παρουσιάζουν συνοχή μεταξύ των σωματιδίων που τα αποτελούν. Η χαμηλή συγκράτηση νερού από τα σωματίδια της άμμου οφείλεται στην μικρή ειδική επιφάνεια που διαθέτουν σε σχέση με το βάρος τους.

Τα ενδιάμεσα εδάφη αποτελούνται κυρίως από σωματίδια ιλύος (0,05-0,002 mm) τα οποία παρουσιάζουν μικρή ή μηδενική πλαστικότητα. Τα μικρότερα σωματίδια της ιλύος μπορούν να συγκρατούν αρκετή ποσότητα νερού λόγω της μεγαλύτερης ειδικής επιφάνειας που διαθέτουν σε σχέση με το βάρος τους.

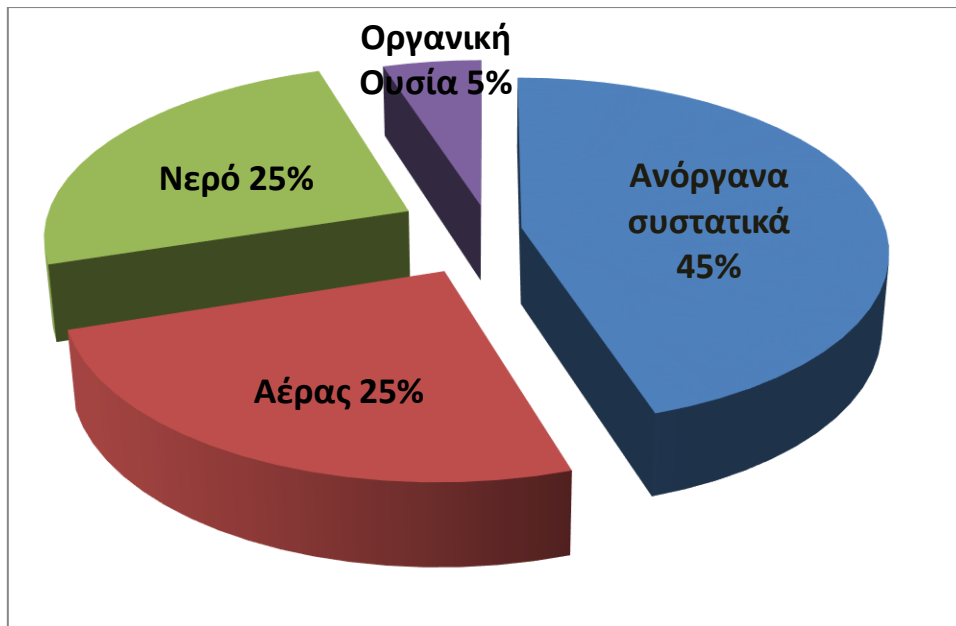
Τα λεπτόκοκκα εδάφη περιέχουν κυρίως σωματίδια αργίλου (<0,002 mm), τα οποία παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια ανά μονάδα βάρους, σε σύγκριση με τα σωματίδια της άμμου και της ιλύος. Έτσι η παρουσία της αργίλου στα εδάφη συνδέεται με την ιδιότητα αυτών να συγκρατούν μεγάλες ποσότητες νερού ενώ η άργιλος δίνει στα εδάφη υψηλή πλαστικότητα. Από την άλλη πλευρά, σε πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις τα σωματίδια της αργίλου προκαλούν μικρή διαπερατότητα στο έδαφος για τον αέρα και το νερό. Το γεγονός της συγκράτησης μεγαλύτερων ποσοτήτων νερού κάνει επιθυμητή την παρουσία της αργίλου σε καλλιεργούμενα εδάφη, σε ποσοστά που δεν προκλούν προβλήματα διαπερατότητας του εδάφους.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα στοιχεία, η ποσοστιαία συμμετοχή σωματιδίων της άμμου, της ιλύος και της αργίλου, προσδιορίζουν την μηχανική ή κοκκομετρική σύνθεση ή σύσταση των εδαφών. Αξίζει να αναφερθεί ότι η μηχανική σύσταση του εδάφους παίζει σημαντικό ρόλο όχι μόνο στις μηχανικές ιδιότητες αλλά και στις χημικές ιδιότητές του, γιατί όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των μικρότερων σωματιδίων του εδάφους, π.χ. αυτών της αργίλου, τόσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του εδάφους που έρχεται σε επαφή με το νερό και τον αέρα που εισχωρεί στο εσωτερικό του (Μουσουλιώτης, 2019).

1.1.2 Δομή του εδάφους

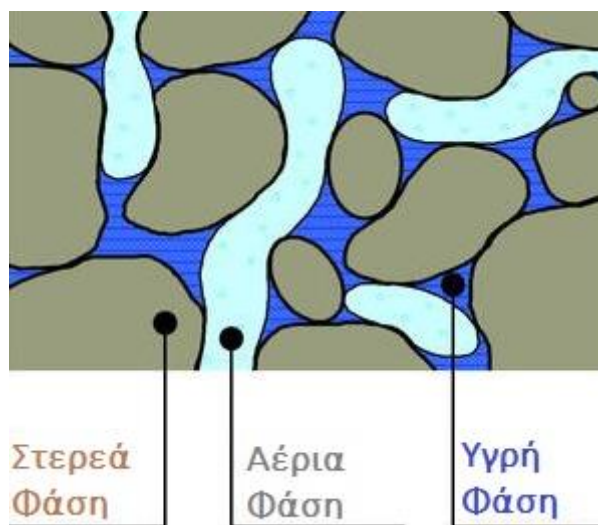
Η δομή του εδάφους περιγράφει ουσιαστικά τον τρόπο που είναι τοποθετημένα τα δομικά σωματίδια που συνθέτουν το έδαφος. Τα σωματίδια αυτά, που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο, και αποτελούν τα στοιχεία για τον χαρακτηρισμό της υφής του εδάφους, σχηματίζουν μεταξύ τους υπό την επίδραση διάφορων παραγόντων μεγαλύτερα και πιο σύνθετα συσσωματώματα με αποτέλεσμα η διάταξη αυτών καθώς και το μέγεθος τους να είναι το κύριο κριτήριο της ποιότητας της δομής του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, ένα έδαφος με καλή σχετικά δομή είναι αυτό που περιέχει μικρούς, μεσαίους και μεγάλους πόρους. Οι μεγάλοι πόροι εξασφαλίζουν καλή αποστράγγιση και ικανοποιητική κίνηση του αέρα στο έδαφος. Οι πόροι μεσαίου μεγέθους είναι οι αγωγοί των θρεπτικών συστατικών που βρίσκονται διαλυμένοι στο έδαφος. Στους μικρότερους πόρους του εδάφους αποθηκεύονται τα θρεπτικά συστατικά και το νερό και είναι διαθέσιμα όταν απαιτηθούν από τα φυτά.

Η δομή του εδάφους, σύμφωνα με τα παραπάνω, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την γονιμότητά του, εφόσον συντελεί στην συγκράτηση ικανοποιητικών ποσοτήτων νερού αλλά ταυτόχρονα συμβάλλει και στην ορθή αποστράγγιση του. Επιπρόσθετα, η επαρκής περιεκτικότητα του εδάφους σε θρεπτικά στοιχεία και η διευκόλυνση της ανάπτυξης του ριζικού συστήματος των φυτών είναι διαδικασίες που επίσης οφείλονται σε ένα κατάλληλα δομημένο έδαφος. Η ιδανική σύσταση του εδάφους (Εικόνα 3) που το καθιστά κατάλληλο για καλλιέργεια και γενικά για την ανάπτυξη των φυτών αποτυπώνεται με αναφορά στα ποσοστά των βασικών του συστατικών στο παρακάτω σχεδιάγραμμα (Λαζαρίδου-Αθανασιάδου, 2012):



Εικόνα 3. Μέση Σύσταση Εδάφους Κατάλληλου για την Ανάπτυξη Φυτών.

Τα ανόργανα συστατικά του εδάφους αποτελούνται κυρίως από O_2 , Al και Si και από διάφορα άλλα στοιχεία που περιέχονται στο έδαφος σε μικρότερες συγκεντρώσεις. Η οργανική ουσία είναι ουσιαστικά τα υπολείμματα των φυτικών και των ζωικών οργανισμών που η διαβίωση τους συνδέεται άμεσα με το έδαφος. Περιλαμβάνει κυρίως ενώσεις C , N , H_2 και O_2 . Ο αέρας του εδάφους περιέχει και αυτός τα κύρια συστατικά που γνωρίζουμε από τον ατμοσφαιρικό αέρα, όπως το O_2 , το N και το CO_2 . Τέλος, το νερό του εδάφους περιέχει διαλύματα των ανόργανων συστατικών που συναντάμε στο έδαφος. Όλα τα παραπάνω συστατικά μαζί με τα στερεά σωματίδια που προαναφέρθηκαν, αποτελούν συνολικά την Στερεά, Υγρή και Αέρια φάση του εδάφους (Εικόνα 4) (Αργυράκη, 2015).



Εικόνα 4. Στερεά, Υγρή και Αέρια φάση Εδάφους. Πηγή: ΕΛΜΕΠΑ-Διάλεξη 1 Αρδεύσεων

Οι παράγοντες που οδηγούν στην σύσταση και δημιουργία της δομής του εδάφους είναι οι ελκτικές δυνάμεις συνοχής και συνάφειας. Οι πρώτες δρουν όταν τα σωματίδια πλησιάζουν μεταξύ τους έτσι η ένταση τους είναι ανάλογη της απόστασης μεταξύ τους και του εμβαδού της επιφάνειας των σωματιδίων. Οι δυνάμεις συνάφειας οφείλουν την ύπαρξη τους στη παρουσία του νερού και δρουν στην επιφάνεια των σωματιδίων καθώς το νερό μπαίνει ανάμεσα τους σχηματίζοντας μια μεμβράνη.

Οι παράγοντες που δύναται να επηρεάσουν την δομή του εδάφους είναι η παρουσία νερού μέσω των κατακρυσμησμάτων ή/και της άρδευσης, η απομάκρυνση του με αποξήραση, οι μεταβολές που υπόκειται από ένα πιθανό παγετό (πήξη και έπειτα η τήξη αυτού), το ποσοστό της οργανικής ύλης που περιέχει και η ποσότητα και ποιότητα των μικροοργανισμών που διαβιούν μέσα σε αυτό.

1.1.3 Ειδικό και φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους

Το ειδικό βάρος του εδάφους ή αλλιώς η πυκνότητα του, αποτελείται από το πραγματικό ειδικό βάρος και το φαινόμενο ειδικό βάρος. Το πραγματικό ειδικό βάρος $E\pi$ δείγματος εδάφους δίνεται από την σχέση:

$$E\pi = \frac{G_s}{V_s}$$

όπου G_s είναι το ξηρό βάρος του εδαφικού υλικού και V_s είναι ο όγκος της στερεάς μάζας του εδαφικού υλικού.

Για την εκτίμηση της καλλιεργητικής ικανότητας ενός εδάφους, ο υπολογισμός του πραγματικού ειδικού βάρους (πραγματική πυκνότητα) δεν είναι αρκετός καθώς δεν μας δίνει επαρκή εικόνα για την καλλιεργητική του ικανότητα και την γονιμότητα του.

Απεναντίας, με τον υπολογισμό του φαινομένου ειδικού βάρους $E\varphi$ μπορεί να γίνει εκτίμηση της δομής του εδάφους καθώς και χαρακτηριστικών όπως η ποιότητα του αερισμού, η δυνατότητα του να διηθεί και να αποστραγγίζει το νερό καθώς και του πορώδους n (σύνολο αγωγών ή πόρων) που διαθέτει το έδαφος (αναφέρεται στην επόμενη παράγραφο). Το φαινόμενο ειδικό βάρος δίνεται από την σχέση:

$$E\varphi = \frac{G_s}{V_t}$$

όπου G_s είναι το ξηρό βάρος του εδαφικού υλικού και V_t είναι ο συνολικός όγκος του εδαφικού υλικού και των πόρων που περιέχει.

Το φαινόμενο ειδικό βάρος του εδάφους εξαρτάται από την δομή του εδάφους, από τον βαθμό συμπίεσης των εδαφικών μαζών, από το ποσοστό της αργίλου που περιέχεται στο έδαφος και από το ποσοστό του νερού που έχει συγκρατήσει το έδαφος, κυρίως όμως από το

ποσοστό των πόρων που περιέχει το έδαφος. Πχ ένα έδαφος που περιέχει μεγάλα σωματίδια και περισσότερη οργανική ύλη έχει μικρότερο φαινόμενο ειδικό βάρος από ένα έδαφος περισσότερο συμπιεσμένο και αποτελούμενο από μικρότερα σωματίδια.

Το φαινόμενο ειδικό βάρος υπολογίζεται από δείγμα εδάφους το οποίο ξηραίνεται στο εργαστήριο σε θερμοκρασία 105-110 °C μέχρι σταθερού βάρους, του οποίου στη συνέχεια ζυγίζεται το ξηρό βάρος και έπειτα διαιρείται δια του όγκου του αρχικού δείγματος εδάφους. Εκφράζεται σε gr/cm^3 ως το βάρος ξηρής μάζας εδάφους ανα μονάδα όγκου του εδάφους.

1.1.4 Πορώδες του εδάφους

Το πορώδες του εδάφους n αναφέρεται στον όγκο του συνόλου των πόρων που διαθέτει το έδαφος. Το ποσοστό των πόρων του εδάφους καταλαμβάνεται από την υγρή και από την αέρια φάση του (Εικόνα 5). Εκφράζεται είτε ως ποσοστό που καταλαμβάνουν οι πόροι του εδάφους σε δεδομένο όγκο εδάφους ή ως όγκος. Τα χονδρόκοκκα εδάφη (αμμώδη εδάφη) έχουν μικρότερο πορώδες (35-50%) ενώ αντίθετα τα λεπτόκοκκα (αργιλώδη εδάφη) έχουν μεγαλύτερο πορώδες (40-60% έως και 65%).



Εικόνα 5. Σχηματοποιημένη απεικόνιση του Εδάφους ως Σύστημα τριών Φάσεων για την κατανόηση του εδαφικού Πορώδους. Πηγή: ΕΛΜΕΠΑ-Διάλεξη 1 Αρδεύσεων

Το εδαφικό πορώδες, συνδέεται και καθορίζει την συμπεριφορά και την ποιότητα ενός εδάφους καθώς από το πορώδες εξαρτάται η κίνηση (εμπλουτισμός-εφοδιασμός με νερό και αποστράγγιση αυτού) και η συγκράτηση του νερού στο έδαφος καθώς και η κίνηση του αέρα, επομένως ο επαρκής αερισμός του εδάφους δηλαδή αυτό που συνολικά ονομάζεται διαπερατότητα του εδάφους (ΕΛΜΕΠΑ, 2019). Το ποσοστό των πόρων n στο έδαφος

υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις τιμές του ειδικού βάρους E_π και του φαινομένου ειδικού βάρους E_φ .

Για την εκτίμηση του εδαφικού πορώδους n , παίρνουμε ως δεδομένο ότι το ειδικό βάρος (πυκνότητα) των ανόργανων τύπων εδαφών, ισούται με $2,65 \text{ gr/cm}^3$. Η τιμή αυτή αναφέρεται ουσιαστικά στην πραγματική πυκνότητα του εδάφους και συγκεκριμένα στην πυκνότητα των στερεών σωματιδίων που το αποτελούν (particle density) (ΕΛΜΕΠΑ, 2019).

Η τιμή του φαινομένου ειδικού βάρους υπολογίζεται σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναφέρεται στην προηγούμενη παράγραφο. Ακολουθώντας, προβαίνουμε στον υπολογισμό της τιμής της στερεάς φάσης S_p του εδάφους που δίνεται από την σχέση:

$$S_p = \frac{E_\varphi}{E_\pi} 100$$

όπου E_φ το φαινόμενο ειδικό βάρος και E_π το πραγματικό ειδικό βάρος του εδάφους.

Έχοντας υπολογίσει την τιμή της στερεάς φάσης του εδάφους S_p , στην συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό των πόρων n του εδάφους (εδαφικό πορώδες) από την σχέση:

$$n = 100 - S_p$$

Κατά συνέπεια το ποσοστό των πόρων του εδάφους είναι η διαφορά του ποσοστού της στερεάς φάσης του εδάφους από το συνολικό ποσοστό του εδαφικού όγκου που περιλαμβάνει και τις τρεις φάσεις (Υγρή, Αέρια και Στερεή). Στο έδαφος ενός αγρού το οποίο θεωρείται αδιατάρακτο η αέρια και η υγρή φάση εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και τις καλλιεργητικές επεμβάσεις (ΕΛΜΕΠΑ, 2019).

1.2 Ροή στο έδαφος

1.2.1 Μόνιμη υδατική ροή

Η ποσότητα και η ποιότητα του νερού στο περιβάλλον επηρεάζεται σημαντικά από την θεμελιώδη διαδικασία της κίνησης του νερού στο έδαφος. Η οποιαδήποτε απόπειρα για την ποσοτική μελέτη των διαλυμένων ουσιών που μεταφέρονται στο εσωτερικό του εδάφους, προϋποθέτει την εκτίμηση και τον υπολογισμό του πολύπλοκου φαινομένου της ροής του νερού τόσο στην επιφάνεια του εδάφους, όσο και στο εσωτερικό του. Αυτό συμβαίνει διότι από την εδαφική ροή του νερού εξαρτάται η μεταφορά των διαλυμένων ουσιών επάνω και εντός του εδάφους. Κάτω από το ανώτερο όριο του υδροφόρου ορίζοντα, όπου το πορώδες του εδάφους είναι κορεσμένο με νερό, συμβαίνει η **κορεσμένη ροή** του εδαφικού νερού ενώ αξίζει να αναφερθεί ότι το νερό κινείται κατά κύριο λόγο σε οριζόντια διεύθυνση, με πολύ μικρά ποσοστά νερού να εμφανίζουν κατακόρυφες μετακινήσεις (ροές). Απεναντίας, στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους (vadoze zone), που απαντάται στην περιοχή που εκτείνεται

πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα έως και την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους, η κίνηση του νερού χαρακτηρίζεται ως **ακόρεστη ροή**. Στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους, η ροή του νερού διαγράφει κυρίως κάθετη κίνηση, ενώ πολλές φορές μεγάλο ποσοστό καταλαμβάνει και η ροή του νερού προς πλαϊνές θέσεις ή σημεία. Να σημειωθεί ότι στην ακόρεστη ζώνη πολλές φορές δημιουργούνται περιοχές κορεσμένες σε νερό είτε λόγω άρδευσης, βροχής ή κάποιου υποκείμενου στρώματος του εδάφους που αποτελείται από κάποιο αδιαπέραστο υλικό από την υγρασία (Radcliffe & Simunek, 2010).

Όταν οι πόροι (πορώδες) του εδάφους καταληφθούν πλήρως από υγρασία, τότε το έδαφος βρίσκεται στην φάση κορεσμού. Ένα κορεσμένο έδαφος, περιέχει ποσότητα υγρασίας κορεσμού θ_s που ισούται ουσιαστικά, σε όγκο, με το πορώδες του n , απουσία εγκλωβισμένου αέρα στο δίκτυο των αγωγών του πορώδους. Συνήθως τα πλήρως κορεσμένα σε υγρασία εδάφη βρίσκονται κάτω από το όριο του υδροφόρου ορίζοντα, ενώ πάνω από αυτόν, τα εδάφη που θεωρούνται “κορεσμένα” (π.χ. λόγω έντονων φαινομένων κατακρήμνισης) κατά κανόνα περιέχουν ποσοστά εγκλωβισμένου αέρα, ειδικά κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (Radcliffe & Simunek, 2010).

Η εδαφική ροή διακρίνεται στην σταθερή και την μη σταθερή. Κατά την σταθερή ροή του νερού στο έδαφος, τόσο η ποσότητα του νερού όσο και ο ρυθμός της ροής του (μεταβλητές) παραμένουν σταθερά σε σχέση με τον χρόνο. Αντίθετα, στην μη σταθερή ροή, τουλάχιστον μια από τις παραπάνω μεταβλητές μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου.

1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την κορεσμένη ροή του νερού

Το εδαφικό νερό, υφίσταται σε διάφορες μορφές και φάσεις, κάτω από την επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας αλλά και λόγω της αλληλεπίδρασης του με στοιχεία της δομής, της υφής και του εδαφικού πορώδους. Υπάρχει το βαρυτικό νερό, που κινείται στο υπέδαφος υπό την δράση της βαρύτητας, κατευθυνόμενο είτε κάθετα είτε πλάγια μέσω των μεγάλων σε μέγεθος πόρων (διάμετρος μακροπόρων > 50 μm). Αυτό δεν διατηρείται στην ανώτερη στήλη του υπεδάφους και δεν χρησιμοποιείται από τα φυτά. Ακολούθως υπάρχει το τριχοειδές νερό που διατηρείται στην στήλη του υπεδάφους υπό την επίδραση της επιφανειακής τάσης, αντιστεκόμενο στην βαρύτητα. Αποτελεί την κύρια πηγή εφοδιασμού των φυτών με νερό για την ανάπτυξή τους. Το υγροσκοπικό νερό που συγκρατείται από τις δυνάμεις των μορίων υπό την μορφή λεπτής μεμβράνης γύρω και επάνω στην επιφάνεια των εδαφικών σωματιδίων. Το νερό αυτό δεν μετακινείται εκτός αν βρίσκεται με την μορφή υδρατμών ενώ επίσης δεν είναι απορροφήσιμο από τα φυτά. Έχει ελάχιστη σημασία στην αποθήκευση νερού στο υπέδαφος. Τέλος, το νερό σε αέρια κατάσταση με την μορφή υδρατμών, το οποίο παραμένει ακίνητο και δεν απορροφάται από τα φυτά.

Η ροή του νερού εξαρτάται από την υφή του εδάφους. Είναι δηλαδή ανάλογη με το μέγεθος των σωματιδίων που αποτελούν το έδαφος. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των

σωματιδίων, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα μετακίνησης του νερού. Τα αμμώδη εδάφη γενικά έχουν υψηλότερες κορεσμένες αγωγιμότητες από τα αργιλώδη εδάφη.

Τα εδάφη με σταθερή κοκκώδη δομή διοχετεύουν νερό πολύ πιο γρήγορα από εκείνα των ασταθών δομικών μονάδων. Σε επίπεδη δομή εδάφους η κορεσμένη ροή νερού δεν είναι καλή σε σύγκριση με τη σφαιροειδή δομή του εδάφους. Η οργανική ύλη βοηθά στη διατήρηση ενός υψηλού ποσοστού μακρο-πόρων στα εδάφη που αυξάνει την κορεσμένη ροή του νερού.

Μερικοί τύποι πηλού είναι ιδιαίτερα ευνοϊκοί για τους λεπτούς πόρους. Τα εδάφη με υψηλή περιεκτικότητα σε μοντοριλλονίτη (2:1) έχουν γενικά χαμηλή αγωγιμότητα σε σύγκριση με τα εδάφη με άργιλο τύπου 1:1.


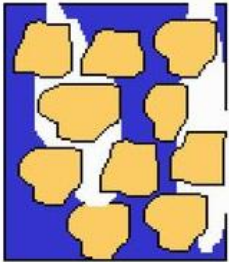
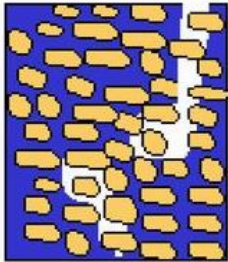



Η κίνηση του βαρυντικού νερού επηρεάζεται επίσης από την αντίσταση που προβάλλει ο παγιδευμένος αέρας στο έδαφος. Ως αποτέλεσμα των θυλάκων αέρα, η πίεση του αέρα-εδάφους αυξάνεται και η διήθηση μειώνεται και αυτό συνήθως συναντάται στους οριζόντες των υπογείων εδαφών.

1.3.1 Διήθηση

Η διήθηση (infiltration) είναι η διαδικασία κατά την οποία το νερό που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους εισχωρεί βαθειά στο έδαφος με κατεύθυνση προς το κέντρο της Γης. Το νερό εισέρχεται εντός του εδάφους και κινείται στο εσωτερικό του κάτω από την επίδραση των δυνάμεων της βαρύτητας και της τριχοειδούς δράσης (Εικόνα 6).

Η διήθηση του νερού στο έδαφος εξαρτάται καταρχήν από την φυσική κατάσταση της επιφάνειας του εδάφους και κατά πόσον αυτή διευκολύνει ή εμποδίζει την είσοδο του επιφανειακού νερού στο εσωτερικό του. Για παράδειγμα, φερτά υλικά που δημιουργούνται κυρίως από την δράση των σταγόνων της βροχής στο έδαφος, δύνανται να προκαλέσουν απόφραξη των επιφανειακών ανοιγμάτων των πόρων του εδάφους, με αποτέλεσμα την παραμπόδιση της εισόδου του νερού. Ακολούθως, σημαντικό ρόλο στον βαθμό διήθησης παίζει το μέγεθος των διαθέσιμων πόρων (δομή) και των σωματιδίων (υφή) που συνθέτουν το έδαφος. Οι μεγαλύτερες ρωγμές και οι πόροι του εδάφους, προσφέρουν μια μεγάλη δεξαμενή για την αρχική έκπλυση του νερού. Αυτό επιτρέπει μια γρήγορη διείσδυση.

Οι μικρότεροι πόροι χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να γεμίσουν και αυτό εξαρτάται από τις τριχοειδείς δυνάμεις καθώς και από την βαρύτητα. Οι μικρότεροι πόροι παρέχουν όλο και μικρότερη διείσδυση του νερού καθώς το χώμα γίνεται πιο κορεσμένο. Όπως θα δούμε παρακάτω στην ενότητα 2.1.1, η ταχύτητα διήθησης είναι ανάλογη με το μέγεθος των σωματιδίων του εδάφους (Εικόνα 6 & 9).

Εδαφική Υφή	Άμμος	Ιλύς	Άργιλος
Μέγεθος Σωματιδίων (mm)	2-0,05	0,05-0,002	<0,002
			
Μακροπόροι	+++	++	(+)
Μεσαίου Μεγέθους π.	++	++	++
Μικροπόροι	(+)	++	+++
Διήθηση			
Αποστράγγιση			

Εικόνα 6. Διήθηση και Υφή του Εδάφους. Προσαρμογή από Mrgscience (2020)

1.3.2 Ροή Μητρώου δυναμικού-Τριχοειδής πίεση

Η εναλλακτική οδός αποστράγγισης περιλαμβάνει την ροή **μητρώου** δυναμικού (Matrix potential) (Εικόνα 7) η οποία είναι αργή και χρησιμοποιεί το πορώδες του εδάφους για να κινηθεί (Abdou & Flury, 2004).

Η τριχοειδής πίεση (Capillary Pressure) σε έδαφος που περιέχει υγρασία καθορίζει την κατανομή κορεσμού των πόρων του εδάφους σε νερό και συνεπώς τους τελικούς όγκους νερού και αέρα σε κάθε σημείο του εδάφους. Η τριχοειδής πίεση P_c ορίζεται ως η διαφορά πίεσης μεταξύ της πίεσης του αέρα P_a που υπάρχει στο έδαφος και της πίεσης P_w του εδαφικού νερού,

$$P_c = P_a - P_w$$

Η διαφορά πίεσης εκφράζεται με όρους πιέσεων υγρής φάσης και μη υγρής (αέριας) φάσης σε ύψος στήλης του νερού h (σε cm) και δίνεται από την σχέση:

$$h = \frac{P_c}{\rho_w g}$$

όπου ρ_w η πυκνότητα του νερού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Το ύψος της στήλης του νερού έχει θετικές τιμές στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους, στην επιφάνεια του εδάφους

είναι ουδέτερο (μηδενικές τιμές) και στην ακόρεστη ζώνη είναι αρνητικό. Το αρνητικό ύψος της πίεσης του νερού στο έδαφος καλείται **μύζηση** (suction) ψ , όπου

$$\psi = -h$$

και το δυναμικό της μύζησης ή δυναμικό αρνητικής πίεσης ή τριχοειδές δυναμικό ονομάζεται και **μητρώο δυναμικό** (Matrix potential) (Στεριοπούλου, 1998; Κατσαρός, 2005). Το μητρώο δυναμικό εξαρτάται από τις δυνάμεις του τριχοειδούς και τις δυνάμεις προσρόφησης (Κατσαρός, 2005).



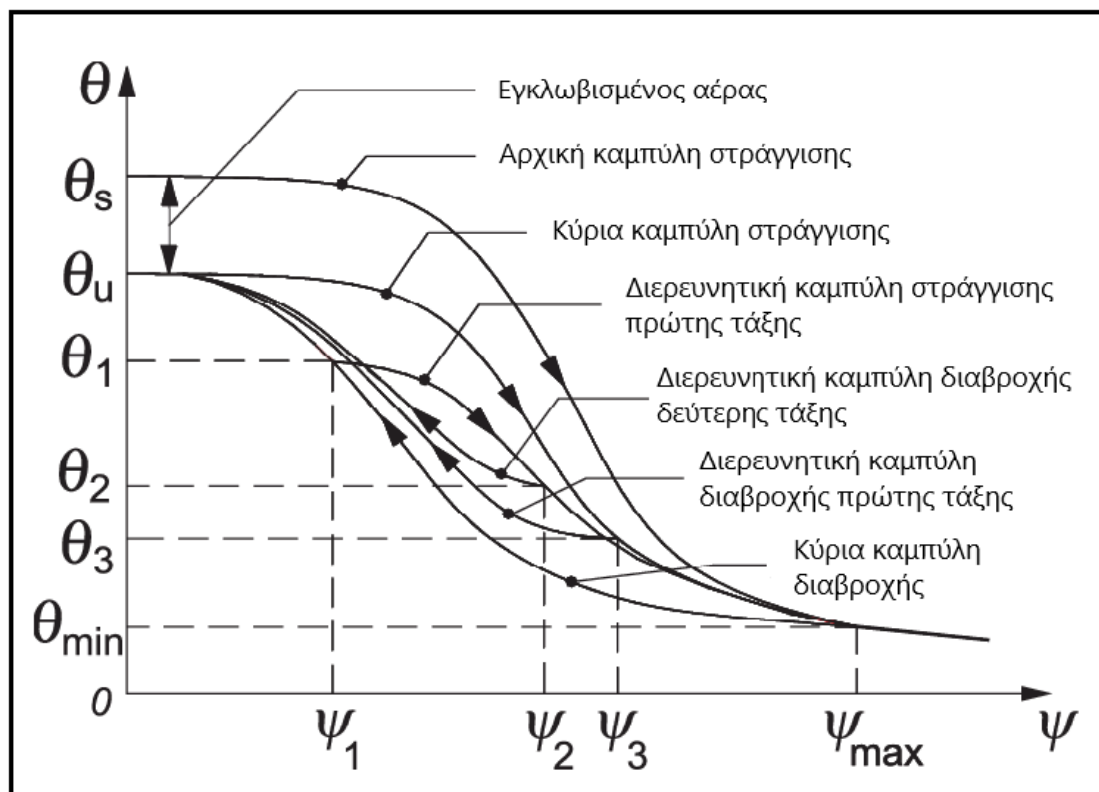
Εικόνα 7. Ροή Μητρώου Δυναμικού. Προσαρμογή από Soilandwater (2020).

1.3.3 Επιφανειακή Τάση

Η επιφανειακή τάση που αναπτύσσεται μεταξύ δύο διαφορετικών υλικών υπολογίζεται ότι ισούται με το έργο που απαιτείται για τον διαχωρισμό των δύο αυτών υλικών. Η επιφανειακή τάση των μορίων του νερού, συμβάλλει στην δημιουργία του φαινομένου της τριχοειδούς τάσης δηλαδή της τριχοειδούς κίνησης του νερού στο έδαφος. Σαν αποτέλεσμα, το νερό κινείται στους μικρής διαμέτρου αγωγούς του εδάφους, που είναι κατάλληλοι για την ανάπτυξη τριχοειδούς τάσης, ακόμη και αντίθετα στην δράση της βαρύτητας, ακολουθώντας τις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των μορίων του και της επιφάνειας των τριχοειδών αγωγών του εδαφικού πορώδους.

1.3.4 Χαρακτηριστική καμπύλη

Η χαρακτηριστική καμπύλη είναι η καμπύλη της περιεκτικότητας του εδάφους σε νερό σε συνάρτηση με την μύζηση (Αναγνωστούλης, 2013). Περιγράφει την δυναμική σχέση που υπάρχει μεταξύ της υγρασίας του εδάφους και της πίεσης ή/και των πιέσεων (πχ εδαφική μύζηση) που ασκούνται ή υπό την οποία βρίσκεται το νερό του εδάφους. Είναι σιγμοειδούς μορφής και οι τιμές που παίρνει διαφέρουν για τα αργιλώδη, πηλώδη και τα αμμώδη εδάφη.



Εικόνα 8: Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους-νερού. Προσαρμογή από (Pham et al., 2005).

Αυτό σημαίνει ότι τα αμμώδη εδάφη συγκρατούν λιγότερη υγρασία, τα πηλώδη μέτρια και τα αργιλώδη περισσότερη υγρασία για την ίδια τιμή μύζησης (Αναγνωστούλης, 2013).

Η χαρακτηριστική καμπύλη παρουσιάζει υστέρηση, δηλαδή, για δεδομένη τιμή μύζησης, το υδατικό ποσοστό του εδάφους στην διαδρομή διύγρανσης αυτού είναι λιγότερο από το εδαφικό ποσοστό κατά την διαδρομή αποξήρανσης του ίδιου εδάφους, έτσι οι καμπύλες διύγρανσης (sorption) και αποστράγγισης (desorption) δεν ακολουθούν το ίδιο μονοπάτι. Με άλλα λόγια, το έδαφος κατά την φάση αποστράγγισης διατηρεί περισσότερο νερό από ότι κατά την φάση διύγρανσης, πάντα για δεδομένη τιμή μύζησης.

Η διαφορά στο ποσοστό εδαφικού ύδατος μεταξύ των φάσεων αποξήρανσης και διύγρανσης του εδάφους, οφείλεται:

A) στην ανομοιομορφία που παρουσιάζει η δομή του εδαφικού πορώδους (μεγάλοι και μικροί πόροι συνδέονται ακανόνιστα, δημιουργώντας πολλαπλές παρακάμψεις στην κίνηση του νερού κατά την διύγρανση και αποξήρανση του εδάφους). Απαιτείται μεγαλύτερη μύζηση για να αδειάσουν οι μεγαλύτεροι πόροι και οι τριχοειδείς πόροι που συγκοινωνούν με τους μεγαλύτερους.

Ενώ κατά την διύγρανση, για το ίδιο ύψος μύζησης, το νερό εισέρχεται στους μικρότερους πόρους και οι μεγαλύτεροι παραμένουν άδειοι.

B) Η γωνία επαφής του μηνίσκου με την επιφάνεια του αγωγού είναι μεγαλύτερη στην διύγρανση, άρα στην ίδια πίεση, το νερό κατά την διύγρανση είναι λιγότερο. Μια δεδομένη

ποσότητα νερού θα παρουσιάσει μεγαλύτερη μύζηση στην καμπύλη αποστράγγισης λόγω αύξησης της γωνίας επαφής

Η γωνία καμπυλότητας θα είναι μεγαλύτερη για τον μηνίσκο της φάσης διύγρανσης από αυτόν της φάσης αποστράγγισης.

Γ) Ο εδαφικός αέρας που εγκλωβίζεται στους πόρους σε ένα ξηρό έδαφος, δημιουργεί πίεση στο εισερχόμενο νερό. Αυτή η πίεση απουσιάζει από ένα υγρό έδαφος. Έτσι, σε δεδομένη τιμή μύζησης, οι υγροί πόροι έχουν περισσότερο νερό από τους κενούς πόρους.

Όταν η ποσότητα του εδαφικού νερού είναι μικρή τότε η ένταση της μύζησης μεγαλώνει. Επίσης για δεδομένης έντασης μύζησης, σε διαφορετικά είδη εδαφών, συγκρατούνται διαφορετικές ποσότητες νερού.

Όταν το έδαφος αποστραγγίζεται, μειώνεται η περιεκτικότητα του σε νερό και μαζί μειώνεται και το δυναμικό του νερού που παραμένει στο έδαφος, με αποτέλεσμα να περιγράφεται με μεγαλύτερο αρνητικό αριθμό. Σε αυτές τις συνθήκες η μύζηση μεγαλώνει. Αντίθετα, όταν το νερό επιστρέφει στο έδαφος (διύγρανση) αυξάνεται το δυναμικό του (εδαφική πίεση του νερού) και το φαινόμενο της διύγρανσης περιγράφεται με μικρότερες αρνητικές τιμές. Σε αυτή την φάση η μύζηση του εδάφους μειώνεται (Εικόνα 8).

1.4 Λυσίμετρα

Τα λυσίμετρα είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται στην συλλογή και μέτρηση του νερού που διηθείται στο έδαφος και στην συλλογή δείγματος νερού από το έδαφος, με σκοπό την χημική του ανάλυση. Η μέθοδος αποστράγγισης που εφαρμόζεται στα λυσίμετρα μπορεί να εξαρτάται είτε από την βαρύτητα, ή από την εφαρμογή κενού αέρος. Επίσης σε κάποιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η δημιουργία και διατήρηση υδροφόρου ορίζοντα στο εσωτερικό του δείγματος εδάφους του λυσίμετρου (Howell et al., 1991).

Η πιθανότερη εκδοχή για το ποιός υπήρξε ο πρώτος μελετητής που κατασκεύασε και χρησιμοποίησε συσκευή Λυσίμετρου, αναφέρεται ότι ήταν ο μαθηματικός και μετεωρολόγος de La Hire (1640-1718). Ο de La Hire ξεκίνησε την κατασκευή του Λυσίμετρου το 1688 στο Παρίσι με σκοπό να μελετήσει και να προσδιορίσει την προέλευση των πηγών ύδατος (Kohnke et al., 1940).

Τα λυσίμετρα ως μεθοδολογικά πειραματικά εργαλεία, χρησιμοποιούνται στην μελέτη της ροής του ύδατος και των διαλυμένων σε αυτό ουσιών, στην ακόρεστη από υγρασία ζώνη του εδάφους, Συμβάλλουν στην παρακολούθηση της κίνησης των χημικών ρύπων καθώς η μελέτη του βαθμού ρύπανσης του εδάφους παρουσιάζει μεγάλο περιβαλλοντικό ενδιαφέρον (Pütz et al., 2018).

Τα λυσίμετρα, επίσης, χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της μεταβολής (κυρίως της μείωσης) του βάρους ορισμένου όγκου εδάφους, που οφείλεται στην απομάκρυνση ποσοστού υγρασίας που περιέχει, λόγω της δράσης της Εξατμισοδιαπνοής. Το έδαφος που περιέχεται

στα Λυσίμετρα μπορεί να φέρει βλάβηση για τις ανάγκες των ερευνών ή και όχι (Johnson & Odin, 1978).

Αποτελούν μια αποτελεσματική μέθοδο για την ακριβή μέτρηση των αρδευτικών αναγκών με τον έμμεσο υπολογισμό της Εξατμισοδιαπνοής μιας καλλιέργειας σε πραγματικό χρόνο. Αυτό επιτυγχάνεται με την λεπτομερή καταγραφή παραμέτρων όπως του αποστραγγιζόμενου νερού από το έδαφος, όσο και του νερού που απομακρύνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον (Stein et al., 1995). Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να υπολογιστούν οι αρδευτικές ανάγκες μιας καλλιέργειας ενώ η μέτρηση του αποστραγγιζόμενου νερού συμβάλλει στην δημιουργία και βελτίωση των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται στην μελέτη του ρυθμού αποστράγγισης του εδαφικού νερού.

Μια πρωτότυπη χρήση των Λυσίμετρων που σχετίζεται με την μελέτη του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής, χρησιμοποιεί τα Λυσίμετρα ως Μεσόκοσμους (τεχνητό περιβάλλον που αντιγράφει την φύση). Στο εσωτερικό περιβάλλον των Λυσίμετρων-Μεσόκοσμων, το έδαφος, η βλάβηση και οι μικροοργανισμοί δύνανται να βρίσκονται σε κλιματολογικές συνθήκες διαφορετικές από τις εξωτερικές χάρη στην παρέμβαση του ανθρώπου. Με αυτό τον τρόπο, παράγοντες με μελλοντικές συνέπειες στο περιβάλλον και στο κλίμα σχετιζόμενες με το έδαφος, τα φυτά, το υδατικό ισοζύγιο, την δυναμική του O_2 και του CO_2 , μπορούν να μελετηθούν στις τεχνητές συνθήκες των Μεσόκοσμων, σήμερα, προβλέποντας πιθανές επιπτώσεις σε καλλιέργειες και στο διαθέσιμο εδαφικό νερό (Metergroup, 2020).

Στην διάρκεια των περασμένων ετών, για τις επιστημονικές και παραγωγικές ανάγκες διάφορων καλλιεργειών, κατασκευάστηκαν Λυσίμετρα σε διαφορετικά μεγέθη αλλά και σχήματα. Υπάρχουν λοιπόν τετράγωνα, κυκλικά και παραλληλόγραμμα ενώ το εμβαδόν τους κυμαίνεται από λίγα dm^3 μέχρι και $30 m^2$ (Payero & Irmak, 2008).

Τα λυσίμετρα, σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας τους και τη μέθοδο αποστράγγισης του εισερχόμενου και περιεχόμενου σε αυτά νερού, κατανέμονται σε δύο κύριες (Abdou & Flury, 2004) κατηγορίες:

- α) στα λυσίμετρα ελεύθερης αποστράγγισης (Free-drainage Lysimeters), όπου η αποστράγγιση του νερού βασίζεται στην κάθετη κυρίως κίνηση του υπό την επίδραση της βαρύτητας σε αυτό και
- β) στα λυσίμετρα αναρρόφησης όπου το νερό κινείται και απομακρύνεται από το έδαφος που περιέχουν τα λυσίμετρα λόγω της δράσης δυνάμεων αναρρόφησης όπως ακριβώς συμβαίνει στην τριχοειδή κίνηση του νερού. Με άλλα λόγια το νερό κινείται λόγω διαφοράς δυναμικού πίεσης μεταξύ δύο διαφορετικών σημείων του εδάφους, και συγκεκριμένα από το σημείο της υψηλότερης πίεσης προς το σημείο της χαμηλότερης πίεσης.

Τα λυσίμετρα διακρίνονται επίσης σε δύο ακόμη βασικές κατηγορίες, στα ζυγιστικά και στα λυσίμετρα ελεύθερης αποστράγγισης που το μέγεθος τους ποικίλει, από μικρά δοχεία σε

μέγεθος μικρής λεκάνης μέχρι μεγάλες τσιμεντένιες ή μεταλλικές κατασκευές που μπορούν να φέρουν φυτά ή ακόμη και μεγάλα δέντρα.

Ο πρώτος τύπος Λυσίμετρων, τα ζυγιστικά, είναι συνήθως ογκώδεις κατασκευές. Δύνανται να υπολογίζουν την πραγματική Εξατμισοδιαπνοή ET του συστήματος έδαφος-φυτά, μέσω ζύγισης και υπολογισμού της μεταβολής του βάρους του παραπάνω συστήματος και μάλιστα μεταξύ μικρών χρονικών διαστημάτων (10 min). Τα πιο σύγχρονα ζυγιστικά Λυσίμετρα περιέχουν αδιατάρακτο εδαφικό δείγμα (μονολιθικό), είναι εξοπλισμένα με μηχανισμούς ελεγχόμενης πίεσης στο κατώτερο τμήμα τους (*lower boundary*) ώστε να προσομοιάζουν όσο το δυνατόν περισσότερο στις πραγματικές συνθήκες πίεσης του εδάφους. Επιπλέον, διαθέτουν ζυγούς ακριβείας που επιτρέπουν τη λεπτομερή μέτρηση των υδατικών εισροών (βροχόπτωση, αποστράγγιση, εξατμισοδιαπνοή, δροσιά και παγετό) με υψηλή ακρίβεια (Putz et al., 2018).

Ο δεύτερος τύπος Λυσίμετρων, τα μη ζυγιστικά, είναι συνήθως απλές και μικρού μεγέθους κατασκευές. Συμβάλλουν στην εκτίμηση της δυναμικής Εξατμισοδιαπνοής ET_p μέσω της μέτρησης της διαφοράς της ποσότητας του νερού/υγρασίας που προστίθεται στο σύστημα του εδάφους και της ποσότητας που συλλέγεται επακολούθως από την αποστράγγιση αυτού (Johnson & Odin, 1978) αλλά και στην ανάλυση του εδαφικού διαλύματος (θρεπτικά συστατικά, διαλυμένες ουσίες, ρυπαντές κλπ). Περιλαμβάνουν τα απλά δοχεία συλλογής του βαρυντικού νερού (Pan Lysimeters) τα οποία συλλέγουν παθητικά την υγρασία του εδάφους χωρίς την άσκηση προσρόφησης. Ακόμη σε αυτή την κατηγορία συγκαταλέγονται οι συνθετικοί (ριτινούχοι) σάκκοι και οι μεμβράνες που αντιγράφουν την λειτουργία των ριζών (Plant Root Simulators) ανταλλάσσοντας ανιόντα ή/και κατιόντα με το εδαφικό διάλυμα. Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφερθεί ότι στα μικρά μη ζυγιστικά λυσίμετρα ανήκουν συσκευές που λειτουργούν με την άσκηση τάσης για την προσρόφηση της εδαφικής υγρασίας. Σε αυτά συγκαταλέγονται τα λυσίμετρα με φυτίλι (κορδόνια κατασκευασμένα από υαλοβάμβακα, πετροβάμβακα ή άλλο συνθετικό ινώδες υλικό) και τα προσροφητικά δοχεία (suction cups, suction plates).

Σήμερα πλέον, τα Λυσίμετρα είναι αρκετά εξελιγμένα. Προσφέρουν στον μελετητή συνθήκες που προσομοιάζουν σε μεγάλο βαθμό αυτές που επικρατούν στο υπο μελέτη έδαφος. Έτσι τα δεδομένα που συλλέγονται παράγουν αποτελέσματα που βρίσκονται πολύ κοντά στην πραγματικότητα δηλαδή στο φυσικό περιβάλλον του εδάφους. Χρησιμοποιούνται στους τομείς της εδαφολογίας, μετεωρολογίας, υδρολογίας και διαχείρισης υδατικών αποθεμάτων, ακόμη και στην αποκατάσταση των ριπασμένων εδαφών. Μπορούν να ανιχνεύσουν ακόμη και την ελάχιστη μεταβολή στο υδατικό ισοζύγιο ενός συστήματος όπως αυτήν που προκαλεί η δρόσος ή ο παγετός. Τα δεδομένα συλλέγονται από ευαίσθητους αισθητήρες και καταγράφονται σε υψηλής ανάλυσης υπολογιστές.

Στην ενότητα 3 γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση διαφορετικών ειδών λυσίμετρων, κυρίως ζυγιστικών, που οι διαφορές τους στο μέγεθος και τον τρόπο κατασκευής οφείλονται στην διαφορετική χρήση του καθενός. Μεταξύ άλλων, δίνονται πληροφορίες σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους και τον σκοπό που εξυπηρετούν κάθε ένα από αυτά.

1.5 Σκοπός της διπλωματικής

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάζει το φυσικό και το μαθηματικό υπόβαθρο της κίνησης του ύδατος στο έδαφος. Επίσης να περιγράψει τα λυσίμετρα που αποτελούν τα κύρια όργανα που χρησιμοποιούνται στην συλλογή και μελέτη του εδαφικού διαλύματος και την κίνηση του νερού στο έδαφος. Μεταξύ άλλων γίνεται μια σύντομη αναδρομή στην εξέλιξη των λυσίμετρων από το 1720 (de la Hire) ως σήμερα. Αναλύονται οι διαφορετικοί τύποι λυσίμετρων ανάλογα με τα ουσιώδη τεχνικά χαρακτηριστικά του όπως το σχήμα, το βάθος, το είδος του εδαφικού προφίλ που περιέχουν, τα υλικά κατασκευής τους, τους μηχανισμούς και αισθητήρες που περιέχουν για την πετύχουν τη μέτρηση των απαραίτητων παραμέτρων με την κατάλληλη ακρίβεια για την χρήση που προορίζονται, κάνοντας μια ανασκόπηση στην διαθέσιμη σχετική βιβλιογραφία.

Περιγράφονται κυρίως τα μεγάλα ζυγιστικά λυσίμετρα που δύνανται να φέρουν στο εσωτερικό τους δέντρα για την μελέτη των υδατικών αναγκών μιας δενδρώδους καλλιέργειας. Μέσω και της παρουσίασης των μαθηματικών σχέσεων που αξιοποιούν τα συλλεγόμενα δεδομένα, γίνεται κατανοητό με ποιόν τρόπο τα λυσίμετρα συμβάλλουν στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας.

2 Μεθοδολογία

2.1 Κίνηση ύδατος στο έδαφος

Η κίνηση του νερού στο έδαφος, μπορεί να περιγραφεί με απλά λόγια, ότι είναι αποτέλεσμα της δράσης δύο βασικών διαδικασιών ή δυνάμεων. Αυτών της βαρύτητας και της διαφοράς της υδροστατικής πίεσης μεταξύ των σημείων που θέλουμε να μελετήσουμε την ροή του νερού. Αυτές οι δυο δυνάμεις αποτελούν αυτό που ονομάζουμε **υδραυλικό φορτίο** της ροής του νερού στο έδαφος (water potential head). Το υδραυλικό φορτίο μπορεί να έχει σταθερή ή μεταβαλλόμενη ροή (Θεοχάρης, 2015). Επιπροσθέτως, η κίνηση του νερού στο έδαφος εξαρτάται και από την αντίσταση στην ροή του, την οποία προβάλλει σε αυτό το πορώδες του εδάφους. Συμπληρωματικά, κίνηση σε υδατικό όγκο μπορούν επίσης να προκαλέσουν και άλλοι φυσικοί παράγοντες όπως είναι η διαφορετική συγκέντρωση του εδαφικού διαλύματος καθώς και η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δυο σημεία του εδάφους (Αναγνωστούλης, 2013)

Σχετικά με το υδραυλικό φορτίο, η συνολική ενέργεια της μονάδας βάρους νερού που ρέει στο εσωτερικό του εδάφους δίνεται τελικά από την σχέση

$$h = z + \frac{p}{\rho} g$$

Η παραπάνω σχέση λαμβάνει υπόψιν την δυναμική ενέργεια της μονάδας βάρους του νερού z , η οποία ισούται με την διαφορά ύψους του σημείου που βρίσκεται το νερό από το σημείο που ελήφθη ως αφετηρία της ροής του. Επίσης, το δεύτερο σκέλος της πρόσθεσης δεν είναι παρά η ενέργεια πίεσης του νερού που ρέει και οι μονάδες είναι p η πίεση του νερού στο σημείο μελέτης του εδάφους, ρ είναι η πυκνότητα του νερού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Αυτός ο τύπος μας θυμίζει τον τύπο του δυναμικού της πίεσης του νερού h . Η συνολική ενέργεια h αντιστοιχεί στο υδραυλικό φορτίο του νερού.

Η κίνηση του νερού στο εσωτερικό του εδάφους πραγματοποιείται με πολύ μικρή ταχύτητα. Έτσι, κατά την μελέτη της κίνησης του νερού στο έδαφος, η κινητική ενέργεια δεν λαμβάνεται υπόψιν. Αντίθετα, υπολογίζεται και χρησιμοποιείται η τιμή της δυναμικής ενέργειας και αυτό διότι για την κίνηση του νερού στο έδαφος είναι υπεύθυνη η διαφορά της δυναμικής ενέργειας μεταξύ των διαφορετικών σημείων που εξετάζονται. Η δυναμική ενέργεια στα σημεία υπολογίζεται ώστε να καταλήξουμε στην διαφορά της όπου αυτή είναι υπεύθυνη για την κίνηση του νερού. Το νερό τελικά θα κινηθεί προς την περιοχή που έχει μικρότερο δυναμικό ή μικρότερη δυναμική ενέργεια.

2.1.1 Ροή ύδατος σε άμμο, ιλύ και άργιλο

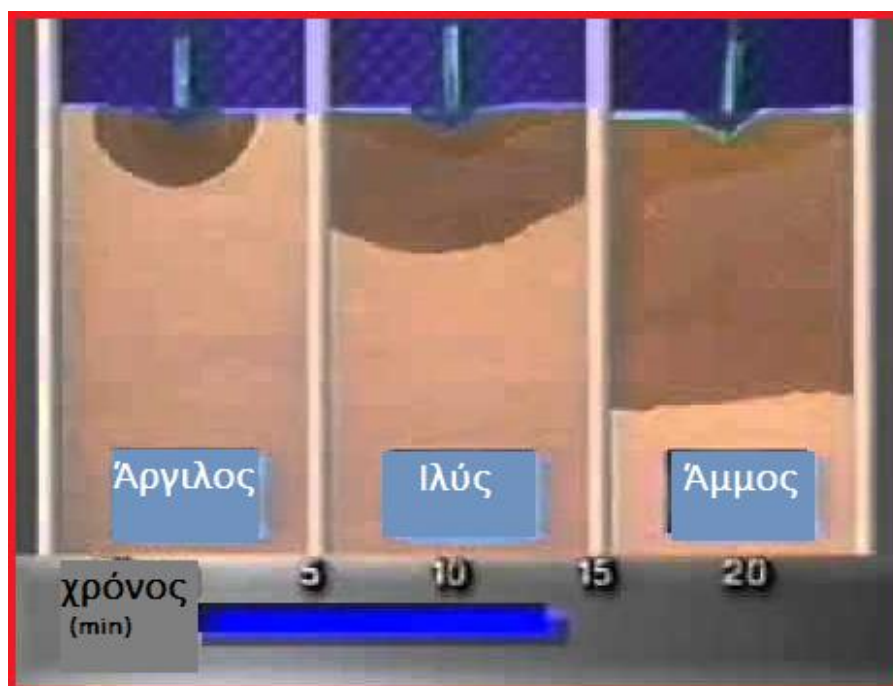
Το μέγεθος των στοιχείων που συνθέτουν την δομή του εδάφους, έχουν καθοριστική σημασία καθώς από αυτά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η κίνηση του νερού μέσα στο έδαφος (Καρακατσούλης, 1997), όπως φαίνεται στην εικόνα 9.

Η ροή του νερού ανάμεσα στα σωματίδια της άμμου πραγματοποιείται εύκολα καθώς οι κόκκοι της άμμου δημιουργούν μεταξύ τους μεγάλους χώρους. Κατά συνέπεια τα μεγάλα διαστήματα μεταξύ των κόκκων της άμμου διευκολύνουν την παραπάνω κίνηση, ενώ απεναντίας, από τα συγκεκριμένα εδάφη τα οποία έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε σωματίδια άμμου, δεν συγκρατείται αξιόλογη ποσότητα νερού από τους πόρους ανάμεσα στους κόκκους της άμμου εφόσον το νερό αποστραγγίζεται εύκολα.

Η ροή του νερού στους πόρους εδαφών με περιεκτικότητα σε σωματίδια ιλύος, είναι περισσότερο αργή από την προηγούμενη περίπτωση και η δυνατότητα αυτών των εδαφών σε συγκράτηση σημαντικών ποσοτήτων νερού μεγαλώνει, λόγω ακριβώς της ιδιότητας των σωματιδίων ιλύος να συγκρατούν μεγαλύτερες ποσότητες νερού από τα σωματίδια της άμμου.

Τέλος, η ροή του νερού σε εδάφη που περιέχουν μεγάλες ποσότητες αργίλου είναι ακόμη περισσότερο αργή, ενώ τα σωματίδια της αργίλου συγκρατούν αρκετά σημαντικές ποσότητες νερού γύρω τους με την μορφή λεπτής μεμβράνης.

Στην παρακάτω εικόνα, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι στο ίδιο διάστημα χρόνου (14 λεπτά) το νερό (σκούρο καφέ χρώμα) έχει κινηθεί με διαφορετική ταχύτητα στο εσωτερικό των τριών διαφορετικής σύστασης υποστρωμάτων (Αργίλος, Ιλύς και Άμμος με ανοιχτό καφέ χρώμα). Στην άμμο κινείται με μεγαλύτερη ευκολία (ταχύτητα), στην ιλύ με μια ενδιάμεση ενώ στην άργιλο με μικρότερη (Εικόνα 9).



Εικόνα 9. Διαφορά Ταχύτητας Ροής Νερού σε τρία διαφορετικά Υποστρώματα.

Τα εδάφη που περιέχουν μεγάλες ποσότητες χούμο επιτρέπουν στο νερό και τον αέρα να κυκλοφορούν με μεγαλύτερη ευκολία από εδάφη διαφορετικής σύστασης (Καρακατσούλης, 1997). Αντίθετα, τα κολλοειδή συστατικά του εδάφους μπορεί να καταστήσουν το έδαφος αδιαπέρατο, καθώς διαθέτουν μεγάλου βαθμού υγροσκοπικότητα, κατά την οποία προσροφούν νερό και διογκώνονται. Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι να γεμίζουν τους πόρους του εδάφους, εμποδίζοντας την κίνηση του νερού. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει παρουσία αλάτων όπως τα Na_2CO_3 , NaCl και NaNO_3 που επιδρούν στα κολλοειδή και καθιστούν το έδαφος αδιαπέρατο (Θεοχάρης, 2015).

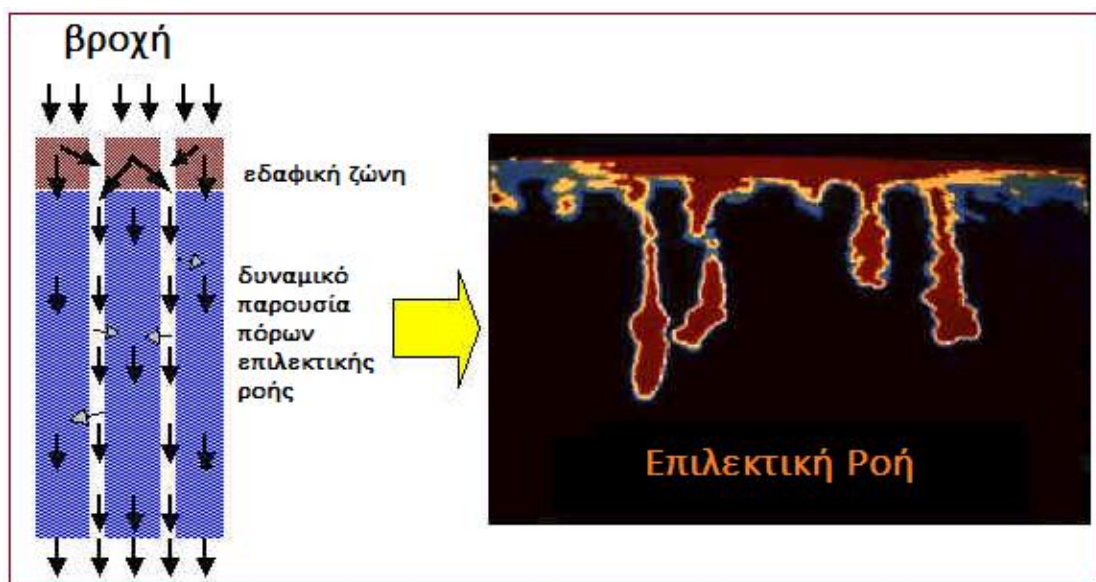
2.2 Επιλεκτική ροή

Η κίνηση του νερού στο έδαφος πραγματοποιείται κυρίως μέσω δύο διαφορετικών σε ταχύτητα και φύση ροών, της επιλεκτικής ροής και της ροής του Μητρικού δυναμικού που αναλύθηκε παραπάνω.

Η επιλεκτική ροή (**Preferential Flow**), που αποτελεί και τον επικρατέστερο τύπο υδατικής ροής στο υπόστρωμα των περισσότερων καλλιεργούμενων συστημάτων (Nektarios et al., 2007), οδηγεί το εδαφικό νερό μέσω οδών που είτε φέρουν μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας απο παραπλήσια σημεία, είτε πάλι δύνανται να μεταφέρουν από το εσωτερικό τους, μεγαλύτερες ποσότητες νερού και διαλυμένων ουσιών από κάποιες παράπλευρες σε αυτές ξηρότερες περιοχές. Το φαινόμενο της επιλεκτικής ροής του νερού, παρατηρείται στην ακόρεστη από υγρασία ζώνη του εδάφους (vadoze zone) και οφείλεται είτε στην ανομοιογένεια της εδαφικής δομής είτε στην αστάθεια που ενδεχομένως παρουσιάζει το έδαφος (Ritsema et al., 1998). Τα μέτωπα του νερού στην επιλεκτική ροή έχουν την μορφή δάκτυλων όπως φαίνονται στην Εικόνα 10, είναι κατά κανόνα κάθετες, σχεδόν σωληνοειδείς περιοχές που περιέχουν νερό και που μοιάζουν να “αναρτώνται” από την επιφάνεια του εδάφους και ονομάζονται “fingers”, με συνέπεια η ροή αυτής της μορφής να ονομαστεί “finger flow”.

Μια από αυτές τις οδούς, που διευκολύνουν περισσότερο την ταχύτερη αποστράγγιση του εδαφικού νερού και συνδέονται με την ανομοιογένεια της εδαφικής δομής, αποτελούν οι μακροπόροι του εδάφους. Στην περίπτωση αυτή το νερό κινείται μέσα από σήραγγες γαιωσκολήκων, σήραγγες ριζικού συστήματος φυτών και μικρά ρήγματα του εδάφους (Abdou & Flury, 2004) (Εικόνα 10). Άλλη περίπτωση κατά την οποία το νερό κινείται μέσω επιλεκτικής ροής ή fingered flow, παρατηρείται σε εδάφη με χονδρόκοκη υφή, όπως τα αμμώδη εδάφη. Σε αυτά τα εδάφη, όταν νερό διαφεύγει από περιοχές που είτε παρουσιάζουν μειωμένη απορροφητικότητα σε υγρασία είτε είναι κορεσμένες από υγρασία, καταλήγει να σχηματίσει μονοπάτια επιλεκτικής ροής (fingered flow) σε παραπλήσιες περιοχές/σημεία

όπου το επιτρέπει συνήθως η ξηρή κατάσταση (ή χαμηλή υγρασία) στην οποία βρίσκονται (Ritsema & Dekker, 2000). Ακόμη, εδάφη που λόγω της σύστασης τους παρουσιάζουν χαμηλή ή καθόλου απορροφητικότητα, οδηγούν τον νερό μέσω μονοπατιών επιλεκτικής ροής με την μορφή δάκτυλων. Τα εδάφη αυτά ονομάζονται υδρόφοβα και η αδυναμία που παρουσιάζουν στην απορρόφηση της υγρασίας οφείλεται συνήθως σε ουσίες που περιβάλλουν τα εδαφικά σωματίδια των οποίων η φύση απωθεί το νερό (πχ εστέρες, υπολείμματα αποδόμησης φυτικών οργανισμών) (Nektarios et al., 2007). Τέλος, σε εδάφη με έντονη διαστρωμάτωση, όπου τα διαφορετικής σύστασης στρώματα τους είναι διατεταγμένα με μια σχετική κλίση, είναι δυνατόν να εμφανιστούν σημεία όπου το νερό κινείται μέσω οδών επιλεκτικής ροής (Nektarios et al., 2003). Αυτό συμβαίνει όταν ένα υποκείμενο στρώμα εδάφους που παρουσιάζει χαμηλή διαπερατότητα, αναγκάζει το νερό που κινείται κάθετα μέσω του προφίλ του συγκεκριμένου εδάφους, όταν φτάσει σε επαφή με το αδιαπέρατο στρώμα, να κινηθεί πάνω σε αυτό, δημιουργώντας αρκετές φορές περιοχές αυξημένης ροής νερού (επιλεκτικής ροής) (Walter et al., 2000).



Εικόνα 10. Επιλεκτική Ροή. Προσαρμογή από Soilandwater (2020)

Έτσι, η επιλεκτική ροή περιγράφει την ανομοιόμορφη και συχνά ταχεία μετακίνηση νερού και διαλυμένων ουσιών μέσω του πορώδους του εδάφους, σε περιοχές που διευκολύνουν την αυξημένη και αναμπόδιση υδατική ροή. Έχει σαν αποτέλεσμα, το εδαφικό νερό και τα διαλυμένα στοιχεία μέσα σε αυτό, να προσπερνάνε με μεγάλη ταχύτητα έναν σημαντικό όγκο του εδάφους, χωρίς να διαχέονται μέσα σε αυτόν, καταλήγοντας στον υδροφόρα απουσία κάποιας προηγούμενης διαδικασίας φιλτραρίσματος αυτών από το έδαφος.

2.2.1 Κορεσμένη Ροή Ύδατος

Το υπόγειο νερό κατανέμεται σε δύο διακριτές, σύμφωνα με τον βαθμό κορεσμού των πόρων, περιοχές μέσα στο έδαφος. Στην χαμηλότερη ή βαθύτερη ζώνη/περιοχή όπου οι πόροι

του εδάφους είναι κορεσμένοι από νερό και ονομάζεται ζώνη κορεσμού. Μέσα σε αυτή τη ζώνη η ροή του νερού ονομάζεται κορεσμένη ροή.

Το νερό κινείται λόγω των διαβαθμίσεων στο δυναμικό του μέσα στο έδαφος, οι οποίες προκαλούνται κυρίως από τη βαρύτητα, την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό και αλάτι. Επίσης από τον ρυθμό άρδευσης και την παρουσία κατακρημνισμάτων. Το εδαφικό νερό εν γένει κατευθύνεται από μια ζώνη υψηλότερου δυναμικού, προς μια ζώνη χαμηλότερου δυναμικού υγρασίας. Όταν το νερό του εδάφους κινείται κυρίως λόγω της βαρύτητας, όπου σε αυτές τις συνθήκες το δυναμικό της υγρασίας είναι μεγαλύτερο από $-1/3$ bar, η κίνηση αυτή επίσης ονομάζεται κορεσμένη ροή.

Η κορεσμένη ροή ξεκινά με την διήθηση του νερού, η οποία είναι η κίνηση νερού στο έδαφος όταν το νερό από τις κατακρημνήσεις ή το νερό της άρδευσης βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους. Όταν το προφίλ του εδάφους είναι πλήρως κορεσμένο με νερό, η κίνηση της περίσσειας νερού που ρέει μέσα από το κορεσμένο χώμα είναι ουσιαστικά διηθητική (percolation). Η ροή του νερού υπό κορεσμένες συνθήκες καθορίζεται από δύο κύριους παράγοντες: την υδραυλική δύναμη που οδηγεί το νερό μέσω του εδάφους και την ευκολία με την οποία οι πόροι του εδάφους επιτρέπουν την κίνηση του νερού που ονομάζεται υδραυλική αγωγιμότητα. Η υδραυλική αγωγιμότητα (ενότητα 2.4.2) ή η διαπερατότητα του κορεσμένου εδάφους είναι ουσιαστικά σταθερή εξαρτώμενη από το μέγεθος και τη διαμόρφωση των πόρων του εδάφους. Η κινητήρια δύναμη, δηλαδή η υδραυλική διαβάθμιση, είναι η διαφορά ύψους του νερού πάνω και κάτω από τη στήλη του εδάφους (hydraulic head difference).

Ο όγκος του νερού που μετακινείται κατακόρυφα προς το κέντρο της Γης, μέσα στο έδαφος, εξαρτάται από τις δυνάμεις που οφείλονται στην κινητήρια δύναμη και την υδραυλική αγωγιμότητα των εδαφών. Σε αυτή τη ροή νερού, εμφανίζεται περισσότερη κατακόρυφη ροή από αυτή της οριζόντιας ροής, επειδή η δύναμη της βαρύτητας δεν βοηθά την πλάγια (οριζόντια) ροή.

2.2.2 Ακόρεστη Ροή Ύδατος

Η ακόρεστη από υγρασία ζώνη του εδάφους, βρίσκεται πάνω από την ζώνη κορεσμού και φτάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους. Στους πόρους του εδάφους αυτής της ζώνης συνυπάρχουν αέρας, νερό και υδρατμοί, ονομάζεται ζώνη αερισμού και η ροή του νερού σε αυτή την περιοχή καλείται ακόρεστη ροή.

Οι δύο δυνάμεις που είναι υπεύθυνες για την κίνηση του νερού στην ακόρεστη ζώνη είναι α) οι δυνάμεις συνάφειας μεταξύ των σωματιδίων του εδάφους και του νερού και β) οι τριχοειδείς δυνάμεις, οι οποίες λειτουργούν σαν το όριο μεταξύ του ύδατος και του αέρα. Σε συνθήκες πεδίου, αυτή η κίνηση συμβαίνει όταν οι μεγαλύτεροι τριχοειδείς πόροι του εδάφους γεμίζουν με αέρα και οι μικρότεροι τριχοειδείς πόροι γεμίζουν με νερό και εν μέρει με αέρα.

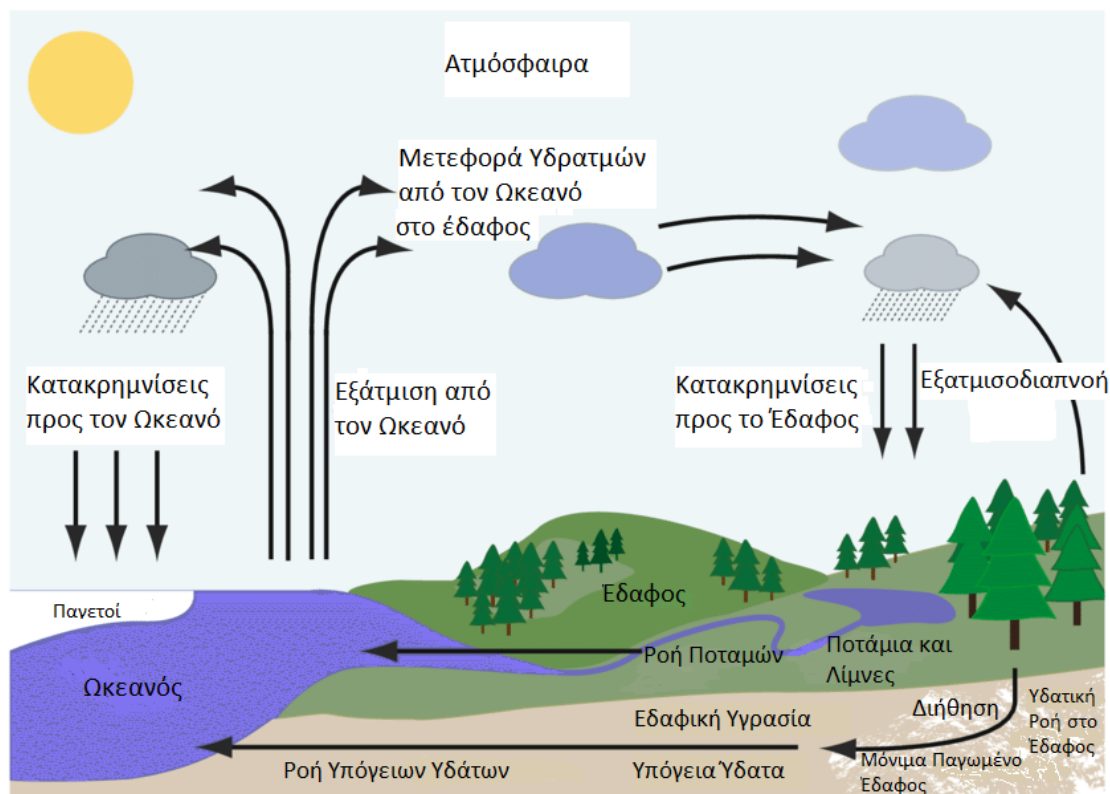
Η ακόρεστη ροή του νερού παρατηρείται σε δυναμικό νερού μικρότερο από $-1/3$ bar. Το νερό κινείται από την περιοχή με το μεγαλύτερο δυναμικό νερού ή την μικρότερη τριχοειδή τάση προς την περιοχή που διαθέτει χαμηλότερο δυναμικό νερού άρα υψηλότερη τριχοειδή τάση ή με απλά λόγια προς την περιοχή που ασκεί την μεγαλύτερη έλξη στην εδαφική υγρασία. Σε ένα αδιατάρακτο έδαφος αυτό σημαίνει ότι το νερό μετακινείται από τις περισσότερο υγρές περιοχές προς τις λιγότερο υγρές ή αλλιώς τις ξηρότερες περιοχές. Ωστόσο, η κίνηση του νερού στην ακόρεστη ζώνη μπορεί να γίνει προς οποιαδήποτε κατεύθυνση (πάνω-κάτω-δεξιά-αριστερά κλπ).

Ο ρυθμός ακόρεστης ροής γίνεται μεγαλύτερος καθώς η διαφορά του δυναμικού της υγρασίας δηλαδή η διαφορά στο δυναμικό μεταξύ υγρής και ξηρής περιοχής, αυξάνεται, όπως επίσης καθώς αυξάνεται και το μέγεθος των πόρων του εδάφους μέσα από τους οποίους περνά το νερό.

Η ακόρεστη ροή επηρεάζεται επίσης με τρόπο παρόμοιο με αυτόν της κορεσμένης ροής. Η ποσότητα υγρασίας στο έδαφος επηρεάζει την ακόρεστη ροή. Όσο υψηλότερη είναι η εκατοστιαία αναλογία νερού στο υγρό έδαφος, τόσο μεγαλύτερη είναι η βαθμίδα αναρρόφησης και τόσο ταχύτερη είναι η παροχή του προς τις ξηρότερες περιοχές.

2.3 Εξατμισοδιαπνοή και Υδρολογικός Κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος (Εικόνα 11) ξεκινά με τη διαρκή τροφοδότηση νερού από την ατμόσφαιρα στην επιφάνεια της γης, υπό τη μορφή υετού που καταλήγει στους ποταμούς, στις λίμνες και στις θάλασσες από υπόγειες και επιφανειακές διαδρομές. Ο κύκλος κλείνει με την επιστροφή του νερού στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης και της εξατμισοδιαπνοής (Δαλιακόπουλος, 2019).



Εικόνα 11. Υδρολογικός Κύκλος και Εξατμισοδιαπνοή. Προσαρμογή από (Launiainen et al., 2013)

2.3.1 Εξάτμιση

Η Εξάτμιση αποτελεί βασικό τμήμα του υδρολογικού κύκλου. Κατά το φαινόμενο αυτό, τα μόρια ενός σώματος μεταπίπτουν από την υγρή ή τη στερεά φάση, στην αέρια. Με αυτόν τον τρόπο μεταφέρονται ποσότητες νερού από την επιφάνεια της Γης (ωκεανούς, λίμνες, ποτάμια, έλη, έδαφος και υγρές καλλιέργειες) προς την ατμόσφαιρα υπό την μορφή υδρατμών. Η εξάτμιση του νερού στην ατμόσφαιρα γίνεται κυρίως υπό την δράση της ηλιακής ενέργειας και εξαρτάται εκτός από την ηλιακή ακτινοβολία και από άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, την πίεση των υδρατμών, την ταχύτητα του ανέμου στο σημείο καθώς και την φύση της επιφάνειας από όπου συμβαίνει η εξάτμιση. Η εξάτμιση είναι το αποτέλεσμα της συνισταμένης των παραπάνω παραγόντων με αποτέλεσμα να είναι αδύνατη η εκτίμηση της συμβολής καθενός παράγοντα ξεχωριστά στο φαινόμενο της εξάτμισης (Δαλιακόπουλος, 2019).

Η εξάτμιση μετριέται ως μάζα νερού ανα μονάδα επιφάνειας και χρόνου. Στις υδάτινες επιφάνειες είναι απεριόριστη ενώ στις ξηρές είναι περιορισμένη ή μηδενική (Δαλιακόπουλος, 2019).

2.3.2 Διαπνοή

Η διαπνοή αποτελεί μια φυσιολογική λειτουργία των φυτών. Κατά την διαπνοή αποβάλλεται από την φυλλική επιφάνεια των φυτών μέρος της υγρασίας που έχει εισέλθει στο εσωτερικό τους από το ριζικό σύστημα, για να χρησιμοποιηθεί στις μεταβολικές τους ανάγκες. Το νερό

αποβάλλεται από τα οργανίδια των φύλλων που ονομάζονται στόματα ή στομάτια, και βρίσκεται με την μορφή υδρατμών όταν αποδίδεται στο περιβάλλον. Τα στομάτια των φύλλων έχουν την ικανότητα να ανοίγουν και να κλείνουν ρυθμιζόμενα από το φυτό ανάλογα με τις ανάγκες του, έτσι η διαπνοή καθίσταται ελεγχόμενη από το ίδιο το φυτό. Ο ρυθμός της διαπνοής εξαρτάται τόσο από επιδράσεις του περιβάλλοντος (πχ η θερμοκρασία, η ένταση του φωτός, το διαθέσιμο CO², το ποσοστό της υγρασίας αέρα αλλά και εδάφους) αλλά και από παράγοντες που συνδέονται με την φυσιολογία του φυτού (ηλικία, τύπος και μέγεθος φύλλου, παραγωγή ορμονών κλπ) αλλά και με την παρουσία εχθρών. Η δράση του ήλιου (ηλιακή ακτινοβολία) θεωρείται η κύρια πηγή ενέργειας που συντηρεί την διαπνοή (Δαλιακόπουλος, 2019).

2.3.3 Εξατμισοδιαπνοή

Η εξατμισοδιαπνοή του νερού στο φυσικό περιβάλλον είναι από τις σημαντικότερες συνιστώσες του υδρολογικού κύκλου. Αποτελεί το άθροισμα της εξάτμισης και της διαπνοής του νερού από την επιφάνεια της Γής, των ωκεανών των ποταμών και των λιμνών, είτε από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες, είτε από γυμνές ή καλυμμένες από βλάστηση επιφάνειες της γης. Μέσω της εξατμισοδιαπνοής, επιστρέφει στην ατμόσφαιρα περίπου το 60% του συνόλου των κατακρημνισμάτων, σε μια περιοχή καλυμμένη από βλάστηση. Τα φυτά λοιπόν, μέσω της διαπνοής, φαίνεται να παίζουν τον ρόλο του φυσικού ρυθμιστή των υδατικών ροών μεταξύ του εδάφους και της ατμόσφαιρας (Javaux et al., 2013)

Η εξατμισοδιαπνοή είναι ένα μέγεθος δύσκολα υπολογίσιμο, ενώ αποτελεί σημαντικό μέρος του υδρολογικού κύκλου. Η εξατμισοδιαπνοή που αντιστοιχεί σε φυτοκαλυμμένες περιοχές καθώς και η εξάτμιση από υδατικές λεκάνες, αποτελούν μεγέθη που ανέκαθεν απασχολούσαν τους επιστήμονες ως προς τον ορθότερο υπολογισμό τους. Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής και της εξάτμισης χρησιμοποιείται η σχέση που υπολογίζει το υδατικό ισοζύγιο ενός υδρολογικού συστήματος, εφόσον μετρηθούν προηγουμένως και είναι γνωστές οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων:

$$E = I + P - O - O_s + \Delta S$$

Στην παραπάνω σχέση, E είναι η ποσότητα του νερού εξάτμισης, I είναι η ποσότητα νερού που εισρέει στο έδαφος, P το ποσό του νερού των κατακρημνήσεων, O το νερό που εκκρέει, O_s η ποσότητα νερού διήθησης και ΔS η διαφορά στο νερό που βρίσκεται αποθηκευμένο στο σύστημα.

Μια από τις μεθόδους που εφαρμόζονται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αποτελούν τα ζυγιστικά λυσίμετρα. Με την χρήση των ζυγιστικών λυσίμετρων πραγματοποιείται ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής με ακρίβεια, μέσω της ζύγισης του εδαφικού δείγματος και της βλάστησης που περιέχονται στο λυσίμετρο. Σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο, λαμβάνονται συνεχείς μετρήσεις οι οποίες στην συνέχεια επεξεργάζονται

και δίνουν την τιμή της διαφοράς του αποθηκευμένου νερού του συστήματος. Η μέθοδος με την χρήση των λυσίμετρων έχει υψηλό κόστος, καθώς τα λυσίμετρα είναι ακριβά τόσο στην κατασκευή όσο και στην λειτουργία τους. Έτσι πολλές φορές χρησιμοποιούνται μέθοδοι αρκετά φθηνότερες με δυνατότητα εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής κατά προσέγγιση (Δαλιακόπουλος, 2019).

2.3.4 Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή

Η εξάτμιση της εδαφικής υγρασίας αλλά και η αποβολή της υγρασίας από τα φυτά μέσω της λειτουργίας της διαπνοής είναι διαδικασίες που συμβαίνουν κατά την ίδια στιγμή μέσα στο φυσικό περιβάλλον. Επομένως ο διαχωρισμός των υδρατμών από αυτές τις δύο παράλληλες διαδικασίες είναι μια δύσκολη υπόθεση για τους μελετητές. Για την περιγραφή συνολικά της διαδικασίας που λαμβάνει χώρα όταν δρουν η εξάτμιση και η διαπνοή ως ταυτόχρονες διεργασίες που μετεφέρουν νερό στην ατμόσφαιρα υπό την μορφή υδρατμών, χρησιμοποιείται ο όρος Εξατμισοδιαπνοή (Evapotranspiration - *ET*) (Δαλιακόπουλος, 2019).

Ο όρος εξατμισοδιαπνοή αναφέρεται πάντοτε σε ένα συγκεκριμένο τύπο καλλιέργειας και εκφράζει τις πραγματικές τιμές της υγρασίας που μετακινείται προς την ατμόσφαιρα από το σύστημα έδαφος-φυτό και αναφέρεται ως πραγματική εξατμισοδιαπνοή. Σύμφωνα με τον *FAO*, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή μιας καλλιέργειας εκφράζει τον πραγματικό ρυθμό πρόσληψης νερού από το φυτό, ο οποίος εξαρτάται από την ποσότητα του διαθέσιμου νερού στο έδαφος, ενώ όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, συνδυάζει τις ταυτόχρονες απώλειες υγρασίας από την εξάτμιση που συμβαίνει από την επιφάνεια του εδάφους και από τη διαπνοή που προκαλείται μέσω της φυλλικής επιφάνειας του φυτού (*FAO*, 2020)

2.3.5 Δυνητική Εξατμισοδιαπνοή

Με τον όρο δυνητική εξατμισοδιαπνοή ET_p (potential evapotranspiration περιγράφεται η ποσότητα εξατμισοδιαπνοής που πραγματοποιείται σε πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες με βλάστηση επιφάνειες όπως πχ αγρός με χλόη χαμηλού και ομοιόμορφου ύψους, όταν η διάθεση του νερού της καλλιέργειας είναι συνεχής και η ποσότητα του θεωρείται πάντοτε επαρκής για τις ανάγκες των φυτών της καλλιέργειας. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή ET_p αποτελεί ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται στη μελέτη της εξάτμισης και της εξατμισοδιαπνοής είτε από φυτοκαλυμμένη επιφάνεια είτε από κάποια δεξαμενή νερού. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι συνηθέστερα μεγαλύτερη ή ίση με την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, εφόσον εκφράζει την μέγιστη δυνατή αναμενόμενη απώλεια υγρασίας από μια καλλιέργεια που δεν στερείται νερό, ενώ η τιμή της μπορεί να υπολογιστεί μέσω της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας, εφόσον γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις που αφορούν στην αλλαγή της διάρκειας της ημέρας. Τον όρο δυνητική εξατμισοδιαπνοή ET_p επινόησε ο

Thornthwaite (1948) προκειμένου να ορίσει τον βαθμό εξάτμισης από επιφάνεια με επαρκή τροφοδοσία νερού η οποία φέρει βλάστηση. Ο Penman (1948) αντίστοιχα την ίδια χρονική περίοδο, περιέγραψε και υπολόγισε τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή με την βοήθεια κλιματικών παραμέτρων όπως η μέση ημερήσια θερμοκρασία, η βαρομετρική πίεση και η ηλιακή ακτινοβολία (Δαλιακόπουλος, 2019).

2.4 Χρήση Ύδατος από Ριζικό Σύστημα

Τα φυτά χρησιμοποιούν το νερό για την επίτευξη των βιοχημικών αντιδράσεων που είναι απαραίτητες για την επιβίωση και την ανάπτυξη τους. Το νερό σε αυτή την περίπτωση παίζει τον ρόλο του διαλύτη αλλά και του μέσου διατήρησης της σπαργής των κυττάρων των φυτών.

Το ριζικό σύστημα των φυτών παίζει έναν σημαντικό ρόλο ανάμεσα σε πολλούς άλλους, αυτόν της εξαγωγής μέσω της απορρόφησης και της μεταφοράς του εδαφικού νερού στο εσωτερικό του φυτού για την υποστήριξη των φυσιολογικών λειτουργιών του. Αν και η σημασία του νερού στην επιβίωση των φυτών είναι τεράστια, εντούτοις τα φυτά δεν συγκρατούν παρά μικρές ποσότητες από το ποσοστό του νερού που εισέρχεται στο εσωτερικό τους από το ριζικό τους σύστημα. Αντίθετα διαπνέουν το μεγαλύτερο από το ποσοστό του νερού μέσω των στομάτων του φυλλώματός τους.

Τα φυτά λοιπόν επηρεάζουν σημαντικά τον κύκλο του νερού στο έδαφος, μέσω της εξατμισοδιαπνοής. Η προσρόφηση του νερού από τις ρίζες τους ρυθμίζει σε μεγάλο βαθμό την δυναμική του εδαφικού νερού έχοντας συνέπειες στην διαθεσιμότητα ύδατος για την ανάπτυξη των φυτών και στον βαθμό αναπλήρωσης του υπεδάφιου νερού (Courveur et al., 2012).

Ο υπολογισμός της πρόσληψης εδαφικού ύδατος από τις ρίζες (RWU) μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση διατήρησης του νερού σε δεδομένο όγκο εδάφους. Η κίνηση του νερού στο έδαφος συνήθως θεωρείται ότι έχει μόνον κατακόρυφη κατεύθυνση z . Ας θεωρήσουμε έναν όγκο εδάφους με ομοιογενή σύσταση σε καταμήκος τομή στο οριζόντιο επίπεδο, ο οποίος φέρει βλάστηση. Το κατώτερο όριο του βρίσκεται στο σημείο $z=0$ ενώ το ανώτερο όριο ορίζεται στην επιφάνεια στο σημείο $z=z$ (θετικό). Ο συγκεκριμένος όγκος εδάφους διατρέχεται μερικώς από το ριζικό σύστημα των υπερκείμενων φυτών. Σε αυτή την περίπτωση η εξίσωση διατήρησης νερού για κάθε σημείο z στο εσωτερικό του εδάφους και για χρονικό διάστημα t_2-t_1 μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\int_0^z \bar{S}_z dz = \bar{v}_0 - \int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz - \bar{v}_z$$

$$\bar{v}_\rho = \bar{v}_\sigma - \bar{v}_\varepsilon$$

όπου \bar{S}_z είναι ο μέσος όγκος νερού που απορροφούν οι ρίζες ανα μονάδα δεδομένου χρόνου ανα μονάδα όγκου εδάφους, η τιμή του είναι θετική με κατεύθυνση από το έδαφος προς τις ρίζες και οι μονάδες μέτρησης: $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$. Το \bar{v}_0 είναι η πυκνότητα ροής νερού που περνάει από το χαμηλότερο όριο του συστήματος ανά μονάδα χρόνου και μετριέται σε: cm day^{-1} . Το θ είναι το περιεχόμενο νερό στον δεδομένο όγκο εδάφους του συστήματος υπολογιζόμενο σε: $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Το \bar{v}_z είναι η πυκνότητα ροής νερού που περνάει από το ανώτερο όριο του συστήματος ανά μονάδα χρόνου και μετριέται σε: cm day^{-1} και μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση :

$$\bar{v}_z = -k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)$$

Πρόκειται για τον νόμο του Darcy (ενότητα 2.4.1) όπου ο συντελεστής $k(h)$ είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (ενότητα 2.4.2) του εδάφους μετριέται σε cm day^{-1} , ενώ το h όπως έχει αναφερθεί ήδη είναι το υδραυλικό φορτίο του εδάφους. Εν τέλει, για να υπολογιστεί η τιμή της ποσότητας νερού που προσροφάται από τις ρίζες (RWU) υπολογίζεται με την βοήθεια της καμπύλης συγκράτησης υγρασίας όπου δίνει τις τιμές του θ ή του h . Η ροή στο κατώτερο σημείο \bar{v}_0 είναι εφικτό να υπολογιστεί από μετρήσεις με την χρήση **λυσίμετρων** (Feddes & van Dam, 2005).

Η πρόσληψη εδαφικού νερού από τις ρίζες ενός φυτού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους, το βάθος όπου φθάνει η ρίζα, η κατανομή ή η πυκνότητα της ρίζας, το υδραυλικό φορτίο του εδάφους, η ζήτηση υγρασίας από την ατμόσφαιρα που αφαιρείται από το φυτικό σύστημα (διαπνοή) και η παρουσία ενός υδροφόρου ορίζοντα. Είναι φανερό ότι η πρόσληψη νερού από τις ρίζες είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο, με αποτέλεσμα η μοντελοποίηση του με την βοήθεια των μαθηματικών να είναι δύσκολη υπόθεση. Επίσης δεν μπορεί να υπάρξει ερμηνία του φαινομένου της πρόσληψης εδαφικού νερού επικεντρώνοντας στην επίδραση ενός μόνο από τους παραπάνω παράγοντες στη ριζική ζώνη (Feddes & van Dam, 2005).

2.5 Μόνιμη υδατική ροή σε κορεσμένο έδαφος

2.5.1 Η εξίσωση Darcy

Είναι δύσκολο ή καλύτερα αδύνατο να προσδιοριστεί και να καθοριστεί από τον παρατηρητή η κατανομή του μεγέθους των πόρων του εδάφους αλλά και η διάταξη του δικτύου που σχηματίζεται από την μεταξύ τους σύνδεση και επικοινωνία (Radcliffe & Simunek, 2010). Και αυτό διότι οι πόροι του εδάφους στην φυσική τους κατάσταση άλλωτε επιτρέπουν την διαμπερή κίνηση του νερού καθώς είναι ενωμένοι μεταξύ τους σε ένα δίκτυο με εξόδους ή διόδους διαφυγής και κίνησης του νερού ενώ άλλωτε αποτελούν μια ασυνεχή διαδρομή

έχοντας το ένα άκρο τους κλειστό (Αναγνωστούλης, 2013). Έτσι, υιοθετείται μια μακροσκοπική ή αλλιώς χονδρική προσέγγιση για να περιγραφεί και να υπολογισθεί η εδαφική ροή του νερού μέσα στο δίκτυο του εδαφικού πορώδους. Η παραπάνω μέθοδος, αναπτύχθηκε και χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον μηχανικό Henry Darcy (Radcliffe & Simunek, 2010).

Ο Darcy, έπειτα από πειραματισμούς, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο ρυθμός του όγκου υδατικής ροής Q (volumetric flow rate) ή παροχή ανα μονάδα επιφάνειας εγκάρσιας διατομής A σε φίλτρο νερού από άμμο, δεδομένου μήκους L , είναι ανάλογος του ολικού υδραυλικού φορτίου $\Delta H/L$ ή αλλιώς κλίση υδραυλικού φορτίου του εδάφους (total soil water potential head gradient) κατά μήκος (του φίλτρου αυτού) της άμμου (Radcliffe & Simunek, 2010). (άρα αντιστόφως ανάλογος του μήκους L της διαδρομής του νερού).

Ο Darcy όρισε επίσης μια σταθερά ανάλογη του όγκου υδατικής ροής Q ανα μονάδα επιφάνειας εγκάρσιας διατομής A , την οποία ονόμασε **Κορεσμένη Υδραυλική Αγωγιμότητα** k , εφόσον το δοχείο (φίλτρο) που χρησιμοποίησε στα πειράματα του ήταν κορεσμένο σε νερό. Έτσι δημιούργησε την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{Q}{A} = k \frac{\Delta H}{L}$$

που ονομάζεται **νόμος του Darcy**. Θεωρούμε ότι η διαφορά φορτίου

$$\Delta H = H_2 - H_1$$

όπου H_2 βρίσκεται σε υψηλότερο σημείο από το H_1 προκειμένου για κάθετη ροή, ενώ H_2 δεξιά από το H_1 προκειμένου για οριζόντια ροή. Ο όρος Q/A έχει τιμές ταχύτητας (μήκος αναμονάδα χρόνου), ενώ η υδραυλική αγωγιμότητα k μετريέται και αυτή σε μονάδες ταχύτητας μιας και ο λόγος $\Delta H/L$ είναι αδιάστατος (Radcliffe & Simunek, 2010).

Ο συντελεστής K ονομάζεται επίσης και **συντελεστής υδατοπερατότητας** ο οποίος εκφράζεται σε cm ύψους νερού ανα ώρα (cm/h) ή σε μέτρα ανα ημέρα (m/day) και ορίζεται ως η φαινομενική ταχύτητα ροής με κλίση υδραυλικού φορτίου $\Delta H/L$ ίση με την μονάδα (Καρακατσούλης, 1997). Η υδατοπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα εκφράζει την ιδιότητα του εδάφους να επιτρέπει την κίνηση του νερού διαμέσω του συνολικού του πορώδους, ή αλλιώς περιγράφει την ευκολία με την οποία κινείται το εδαφικό νερό μέσω του δικτύου του εδαφικού πορώδους. Η κίνηση αυτή του νερού, όταν το έδαφος είναι πλέον υδατικά κορεσμένο, πραγματοποιείται κάτω από την επίδραση της βαρύτητας (Καρακατσούλης, 1997).

Αν ο λόγος Q/A οριστεί ως η παροχή του νερού J_w ανα δεδομένη επιφάνεια εγκάρσιας διατομής αγωγού, τότε ο τύπος μπορεί να γραφτεί:

$$Jw = -K \left(\frac{\Delta H}{L} \right)$$

και το Jw έχει τιμές ταχύτητας (μήκος ανα χρόνο), ενώ εκφρασμένος σε παραγώγους ο τύπος γίνεται:

$$Jw = -K \left(\frac{dH}{dz} \right)$$

Η υδατική ροή ή παροχή Jw όταν έχει θετικές τιμές και πρόκειται για κάθετη κίνηση, τότε αντιστοιχεί σε ανοδική ροή του νερού, ενώ αντίστοιχα στην οριζόντια κίνηση περιγράφει ροή που κινείται από αριστερά προς τα δεξιά. Το αρνητικό πρόσημο της σχέσης

$$Jw = -K \left(\frac{dH}{dz} \right)$$

που περιγράφει τον νόμο του Darcy, σημαίνει ότι το νερό κινείται από την περιοχή που έχει το μεγαλύτερο υδραυλικό δυναμικό προς την περιοχή με το μικρότερο υδραυλικό δυναμικό (Radcliffe & Simunek, 2010). Η παράγωγος στην σχέση

$$Jw = -K \left(\frac{dH}{dz} \right)$$

ισχύει εφόσον το H είναι συνάρτηση του z . Επομένως, ο υπολογισμός της εδαφικής υδατικής ροής με την βοήθεια παραγώγου ισχύει μονάχα για μια ανεξάρτητη μεταβλητή, όπως παραπάνω την z . Επίσης, η συνθήκη αυτή είναι αληθής όταν πρόκειται για σταθερή ροή νερού με κάθετη διεύθυνση.

Το υδραυλικό φορτίο είναι, όπως έχει προηγουμένως αναφερθεί, αποτέλεσμα της δράσης δύο βασικών διαδικασιών ή δυνάμεων. Αυτών της βαρύτητας και της διαφοράς της υδροστατικής πίεσης μεταξύ δυο σημείων που μελετάμε την ροή του νερού. Η ροή μπορεί να είναι σταθερή ή ασταθής. Η κίνηση μπορεί να μελετάται αναλογα την περίπτωση κατά την μια διάσταση άρα έχουμε μονοδιάστατη ροή, κατά τις δυο διαστάσεις όπου έχουμε επίπεδη ροή και τέλος στις τρεις διαστάσεις όπου η ροή ονομάζεται τρισδιάστατη (Καρακατσούλης, 1997).

2.5.2 Υδραυλική αγωγιμότητα

Για την κίνηση του νερού στο έδαφος εκτός από τις κινητήριες δυνάμεις που δρουν στο νερό και το αναγκάζουν να κινηθεί, υπάρχει άλλος ένας παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η παραπάνω κίνηση και έχει να κάνει με την δομή και την υφή του εδάφους δηλαδή το μέγεθος και τον αριθμό των διαθέσιμων εδαφικών πόρων. Πρόκειται για την Υδραυλική Αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι η ιδιότητα του εδάφους που περιγράφει την ευκολία με την οποία το νερό μπορεί να κινηθεί μέσα από τους πόρους που είναι σχηματισμένοι στο έδαφος. Όσο μικρότεροι πόροι υπάρχουν στο έδαφος, τόσο μικρότερη είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται το νερό στο εσωτερικό τους λόγω της μεγάλης αντίστασης που παρουσιάζουν απέναντι σε αυτό.

Για να υπάρξει ροή νερού στο εσωτερικό κορεσμένου εδάφους, μεταξύ δύο σημείων, θα πρέπει να υπάρχει μεταξύ τους διαφορά υδραυλικού φορτίου. Ως υδραυλικό φορτίο σε ένα σημείο του εδάφους ορίζεται το άθροισμα της απόστασης από το επίπεδο αναφοράς και του ύψους της υπερκείμενης στήλης του νερού ή η απόσταση της στάθμης από το επίπεδο αναφοράς (Ανδρεαδάκης, 2018). Εξαρτάται από τη διαπερατότητα του εδάφους, εδαφικό πορώδες n των πόρων, τον βαθμό συμπίεσης του εδάφους και από το βαθμό κορεσμού του εδάφους. Όταν η κίνηση του νερού συμβαίνει στην ακόρεστη ζώνη τότε ονομάζεται *τριχοειδής ή ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα*. Αντίστοιχα στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους, ονομάζεται *κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα*. Η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να μετρηθεί σε οποιαδήποτε κατάσταση και αν βρίσκεται το έδαφος.

Μπορεί να εκτιμηθεί από πολυάριθμα είδη εξοπλισμού. Για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας χρησιμοποιείται ο νόμος του Darcy. Η χρήση του νόμου εξαρτάται από τον κορεσμό του εδάφους και το χρησιμοποιούμενο όργανο

Ο Darcy δήλωσε ότι ο ρυθμός ροής του νερού αυξάνεται αρχικά σε αυξημένο βάθος νερού κοντά στον πυθμένα του εδάφους μέσω του οποίου ρέει αυτή η ποσότητα νερού. Η ροή σταδιακά μειώνεται στο αντίστοιχο βάθος του εδάφους όταν αυτό κορεστεί λόγω της ροής νερού.

Η υδραυλική αγωγιμότητα θα είναι διαφορετική για τους διαφορετικούς τύπους εδαφών, και είναι γενικά μεγαλύτερη στα χονδρόκοκκα εδάφη και μικρότερη στα λεπτόκοκκα.

2.6 Μέθοδος εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_0 – συντελεστή καλλιέργειας K_c

Η μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή καλλιέργειας K_c και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_{ref} αναπτύχθηκε ούτως ώστε η εκτίμηση των απαιτήσεων σε νερό μιας καλλιέργειας να πραγματοποιείται με εύκολο και πρακτικό τρόπο. Είναι μια απλή μέθοδος υπολογισμού των υδατικών αναγκών της καλλιέργειας και της εξατμισοδιαπνοής της, που με την ευκολία της εφαρμογής της βοηθάει τον χρήστη να αποφύγει την υπερεκτίμηση ή/και την υποεκτίμηση της τιμής της Εξατμισοδιαπνοής (Pereira et al., 2015).

Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_{ref} ορίζεται σύμφωνα με τον FAO ως ο ρυθμός της εξατμισοδιαπνοής από μια μεγάλης έκτασης καλλιεργούμενη επιφάνεια που καλύπτεται από γλόη (γρασίδι), η οποία έχει ομοιόμορφο ύψος το οποίο κυμαίνεται από 8 έως 15 cm,

βρίσκεται σε ανάπτυξη, σκιάζει εντελώς το καλλιεργούμενο έδαφος και δεν στερείται παροχής διαθέσιμου νερού.

Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο, η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_{ref} εκφράζει τις πρωτογενείς επιπτώσεις που προκαλούνται από τις καιρικές συνθήκες στην κατανάλωση νερού από το έδαφος και την καλλιέργεια. Ο συντελεστής καλλιέργειας K_c ερμηνεύει και τοποθετεί την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_{ref} ως την αιτία για τις επιδράσεις της καλλιέργειας στις τιμές της Εξατμισοδιαπνοής και τις διαφοροποιήσεις των επιδράσεων αυτών κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Pereira et al, 2015).

Η σχέση που υιοθετήθηκε από τον *FAO* για να εκφράσει την εξατμισοδιαπνοή αναφοράς ET_{ref} για εικοσιτετράωρη χρονική περίοδο αλλά και για ωριαία ή/και μικρότερα διαστήματα έχει την μορφή:

$$ET_{ref} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma (C_n/T + 273) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)}$$

όπου ET_{ref} είναι η τυποποιημένη τιμή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς για καλλιεργούμενες επιφάνειες καλυμμένες από κουρεμένο γρασίδι (ET_0) ή καλλιέργεια Μηδικής (ET_r), υπολογιζόμενη σε μονάδες mm d^{-1} όταν πρόκειται για ημερήσια χρονικά διαστήματα και σε mm h^{-1} όταν αφορά ωριαία ή μικρότερα χρονικά διαστήματα. R_n είναι η ολική (μακρά και βραχέα κύματα) ακτινοβολία (Net radiation) που υπολογίζεται ότι απορροφάται και εκπέμπεται από την ελεύθερη επιφάνεια της καλλιέργειας, μετριέται σε $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ για ημερήσια διαστήματα και σε $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ για υπολογισμό ωριαίων ή μικρότερων χρονικών διαστημάτων. G είναι η πυκνότητα ροής της θερμοκρασίας εδάφους μετρούμενη στην καλλιεργούμενη εδαφική επιφάνεια πάλι σε τιμές $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ για ημερήσια διαστήματα και σε $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ για τον υπολογισμό ωριαίων ή μικρότερων χρονικών διαστημάτων. T είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα σε ύψος 1,5 m έως 2,5 m πάνω από την καλλιέργεια, υπολογιζόμενη σε $^{\circ}\text{C}$. u_2 είναι η μέση ημερήσια ή ωριαία τιμή της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 2 m από την επιφάνεια, σε τιμές m s^{-1} . e_s είναι η πίεση κορεσμού των υδρατμών σε ύψος 1,5 m έως 2,5 m πάνω από την καλλιέργεια, σε τιμές kPa, υπολογιζόμενη σε ημερήσια χρονικά διαστήματα ως ο μέσος όρος της πίεσης κορεσμού των υδρατμών της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής θερμοκρασίας αέρα και σε ωριαία διαστήματα με την χρήση ωριαίων μέσων τιμών θερμοκρασίας αέρα. e_a είναι η μέση πραγματική πίεση των υδρατμών σε ύψος 1,5 m έως 2,5 m πάνω από την καλλιέργεια, σε τιμές kPa. Δ είναι η κλίση της συνάρτησης/καμπύλης της πίεσης κορεσμού των υδρατμών και της θερμοκρασίας του αέρα, σε τιμές $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$. γ είναι ψυχομετρική σταθερά, σε τιμές $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$. C_n είναι μια σταθερά στον αριθμητή που μεταβάλλεται ανάλογα με τον τύπο της καλλιέργειας τα χρονικά διαστήματα των καταμετρήσεων και μετριέται σε $\text{K mm s}^3 \text{Mg}_{-1} \text{d}^{-1}$ ή σε $\text{K mm s}^3 \text{Mg}_{-1} \text{h}^{-1}$.

Αντίστοιχα για τον παρονομαστή υπάρχει η σταθερά C_d . (Pereira et al., 2015). Οι τιμές των C_n και C_d δίνονται από τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Τιμές C_n και C_d . Πηγή: Allen et al., 2005a.

Χρονικό βήμα	Αναφοράς για χαμηλή βλάστηση ET_{os}		Αναφοράς για υψηλή βλάστηση ET_{rs}		Μονάδες ET_{os}, ET_{rs}	Μονάδες για R_n, G
	C_n	C_d	C_n	C_d		
Ημερήσιο	900	0,34	1600	0,38	mm d ⁻¹	MJ m ⁻² d ⁻¹
Ωριαίο κατά τη διάρκεια της ημέρας	37	0,24	66	0,25	mm h ⁻¹	MJ m ⁻² d ⁻¹
Ωριαίο κατά τη διάρκεια της νύκτας	37	0,96	66	1,7	mm h ⁻¹	MJ m ⁻² d ⁻¹

Η βασική σχέση που ορίζει τον συντελεστή καλλιέργειας σύμφωνα με τον *FAO* είναι ο λόγος της εξατμισοδιαπνοής της (εκάστοτε) καλλιέργειας προς την Εξατμισοδιαπνοή αναφοράς όπως αυτή καθορίζεται και από τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής καλλιέργειας (Allen et al., 2005b):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0}$$

Ο συντελεστής καλλιέργειας K_c κατά την διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου παίρνει ποικίλλες τιμές καθώς τα φυτά αναπτύσσονται με διαφορετικό ρυθμό μέσα σε αυτή την περίοδο, καθώς το ποσοστό του εδάφους που καλύπτεται από την βλάστηση μεταβάλλεται με την ανάπτυξη των φυτών αλλά και κοντά στο πέρας της καλλιέργειας. Επίσης, ο K_c μεταβάλλεται σύμφωνα και με το ποσοστό της εδαφικής υγρασίας, με έντονες αλλαγές στην μικρή κάλυψη του εδάφους από την υπερκείμενη βλάστηση. Έτσι, στο γυμνό έδαφος η τιμή του K_c είναι μεγάλη παρουσία υγρασίας και μειώνεται σταθερά καθώς η υγρασία εξατμίζεται και το έδαφος στεγνώνει (Allen et al., 2005b).

Η εξέλιξη του συντελεστή καλλιέργειας K_c παρέχει την δυνατότητα εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c υπό διαφορετικές συνθήκες ανάπτυξης των φυτών καθώς και διαφορετικές καλλιεργητικές πρακτικές που έχουν επιρροή στην πορεία της καλλιέργειας σε κάθε στάδιο ανάπτυξης των φυτών, στο μέγεθος της βλάστησης και στην ποικιλία του καλλιεργούμενου φυτικού είδους, στους χρόνους που λαμβάνει χώρα η καλλιέργεια (ημερομηνία έναρξης/φύτευσης, διάρκεια καλλιεργητικής περιόδου και χρόνος ολοκλήρωσης της καλλιέργειας), στην χωροταξία της καλλιέργειας (σειρές φύτευσης, αποστάσεις μεταξύ των φυτών και διαμόρφωση/διαχείριση της κόμης τους), στην συχνότητα άρδευσης και στην συμμετοχή της αρδευτικής υγρασίας στην συνολική Εξατμισοδιαπνοή,

στην διαθεσιμότητα εδαφικής υγρασίας και στην πρόληψη μιας πιθανής έλλειψης νερού στην καλλιέργεια, την αλατότητα του εδάφους και του αρδευόμενου ύδατος καθώς και τις μη κατάλληλες ή μη βέλτιστες συνθήκες ή/και μεθόδους καλλιέργειας. Ο συντελεστής καλλιέργειας K_c , ο οποίος περιέχει ταυτόχρονα την έκφραση της διαπνοής της κάθε καλλιέργειας και τις διαδικασίες που περιλαμβάνει η εξάτμιση του καλλιεργούμενου εδάφους, εξελίχθηκε ώστε να είναι δυνατός ο μεμονωμένος υπολογισμός των παραπάνω περιεχόμενων διαδικασιών (Pereira et al., 2015).

Η καμπύλη του συντελεστή καλλιέργειας K_c αποδεικνύεται ένα ακριβές και χρήσιμο εργαλείο στην παρακολούθηση των παραγόντων που επηρεάζουν την Εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και συνδέονται με τον τύπο της καλλιέργειας και τις καλλιεργητικές πρακτικές, εφόσον για την δημιουργία της χρησιμοποιηθούν κατάλληλα καιρικά και καλλιεργητικά δεδομένα.

Ο κύριος σκοπός της εξέλιξης των μοντέλων υπολογισμού του συντελεστή καλλιέργειας K_c και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_{ref} είναι η δυνατότητα της εφαρμογής τους για τη διαχείριση και τον προγραμματισμό χρησιμοποίησης του παρεχόμενου νερού μιας καλλιέργειας, με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό καιρικών και υδατολογικών δεδομένων της περιοχής της καλλιέργειας. Αυτό θα επιτρέπει την προσομοίωση και την αξιολόγηση της απόκρισης του παρεχόμενου νερού της καλλιέργειας, σε μια ευρεία γκάμα προϋποθέσεων (καιρικών συνθηκών κλπ) και καλλιεργητικών πρακτικών.

Οι δυο τύποι βλάστησης που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_{ref} , είναι το γρασίδι όπου η εξατμισοδιαπνοή από το γρασίδι αναφέρεται ως ET_0 και η Μυδική όπου αντίστοιχα αναφέρεται ως ET_r . Η εξατμισοδιαπνοή αναφοράς της Μυδικής ET_r θεωρείται ότι εκφράζει καλύτερα τις μέγιστες τιμές που μπορεί να πάρει η δυναμική εξατμισοδιαπνοή μιας εκτεταμένης επιφάνειας που φέρει βλάστηση, όπως μιας αγροτικής έκτασης με καλλιέργεια.

Η μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή καλλιέργειας K_c και της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_{ref} θεωρείται μια αποτελεσματική μέθοδος που παρέχει την δυνατότητα άμεσης εφαρμογής μέσω της ανάγνωσης των καμπυλών του συντελεστή καλλιέργειας K_c , σε ένα ευρύ φάσμα τύπων κλίματος και περιοχών.

Η μέθοδος του διπλού συντελεστή καλλιέργειας K_c (FAO-56) καθιερώθηκε για να παρέχει στον μελετητή ημερήσιες εκτιμήσεις των τιμών της εξάτμισης υγρού εδάφους σε συνδυασμό με τον υπολογισμό της διαπνοής της καλλιέργειας. Η διαδικασία χρησιμοποιεί το ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο της επιφανειακής ζώνης του εδάφους και ερμηνεύει το κλάσμα της επιφάνειας του εδάφους που βρέχεται από άρδευση ή από κατακρημνήσεις και το οποίο εκτίθεται σε ακτινοβολία και φυσικό αερισμό (Pereira et al, 2015). Ο διπλός συντελεστής καλλιέργειας δίνεται από την σχέση:

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

όπου K_{cb} είναι ο θεμελιώδης συντελεστής καλλιέργειας και K_e είναι ο συντελεστής εξάτμισης. Στην μέθοδο διπλού συντελεστή καλλιέργειας, το K_{cb} εκφράζει τον λόγο ET_c/ET_0 υπό συνθήκες ξηρής επιφάνειας του εδάφους, αλλά ταυτόχρονα η μέση ποσότητα υγρασίας στην περιοχή του ριζικού συστήματος του φυτού είναι αρκετή για να υποστηρίξει την λειτουργία της διαπνοής του φυτού. Επίσης, υπό κανονικές συνθήκες καλλιέργειας, οι μικρές ποσότητες της εδαφικής υγρασίας που εξατμίζονται μέσω της διαδικασίας της διάχυσης, περιλαμβάνονται και αυτές στον συντελεστή K_{cb} . Ο συντελεστής εξάτμισης K_e , εκφράζει την πλειονότητα του νερού που εξατμίζεται και το οποίο προέρχεται από κατακρημνήσεις και αρδευτικές εφαρμογές.

Η μέθοδος του διπλού συντελεστή καλλιέργειας K_c (FAO-56) επιτρέπει την εκτίμηση των επιπτώσεων της επιφανειακής διαβροχής του εδάφους, είτε με βροχόπτωση είτε με άρδευση, απέναντι στην εξάτμιση από το έδαφος αλλά και στον συνολικό ρυθμό εξατμισοδιαπνοής, ειδικά κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των φυτών και κατά τη διάρκεια περιόδων αδρανούς βλάστησης όπως κατά τη διάρκεια του χειμώνα σε ακραία γεωγραφικά πλάτη (Pereira et al., 2015).

3 Εφαρμογές Λυσίμετρων

Για την ορθή λειτουργία τους, τα λυσίμετρα είναι απαραίτητο να περιέχουν μεγάλες ποσότητες χώματος/εδάφους όσο το δυνατόν περισσότερο αδιατάρακτα ειλημμένες και έπειτα τοποθετημένες, ούτως ώστε η κίνηση της θερμοκρασίας και του νερού στο εσωτερικό του όγκου του χώματος που περιέχουν (τα λυσίμετρα) να είναι παρόμοια με την αντίστοιχη κίνηση στο παρακείμενο φυσικό και αδιατάραχτο έδαφος. Επιπρόσθετα, όταν τα λυσίμετρα φέρουν υπερκείμενη βλάστηση, τότε η κατασκευή τους και η διάταξη του εδάφους σε αυτά θα πρέπει να επιτρέπει την φυσιολογική ανάπτυξη του ριζικού συστήματος για το εκάστοτε φυτικό είδος (Johnson & Odin, 1978).

Σχετικά με τα παραπάνω, οι Singh et al. (2018) αναφέρουν ότι η τοποθέτηση αδιατάρακτων δειγμάτων εδάφους στα Λυσίμετρα είναι απαραίτητη όταν επιδιώκεται η αποφυγή φαινομένων επιλεκτικής ροής του νερού, καθώς σε αυτή την περίπτωση το νερό κινείται ανομοιόμορφα και συγκεντρώνεται κατά μεγάλες ποσότητες σε συγκεκριμένα σημεία του εδάφους.

Στην μελέτη της Εξατμισοδιαπνοής, τα λυσίμετρα είναι κατασκευές που μοιάζουν με δοχεία που περιέχουν έναν δεδομένο όγκο εδάφους. Το έδαφος αυτό μπορεί να είναι είτε αδιατάραχτο τμήμα/δείγμα του εδάφους της περιοχής μελέτης, είτε αναδομημένο δείγμα εδάφους με συγκεκριμένο προφίλ που προκύπτει από επιλογή και φυσικά δεν ανταποκρίνεται στα φυσιολογικά δομικά χαρακτηριστικά του αρχικού/μητρικού εδάφους. Όπως προαναφέρθηκε η αποστράγγιση μπορεί να γίνεται με δύο τρόπους, ήτοι με την επιδραση της βαρύτητας ή με αναρρόφηση. Τα λυσίμετρα κατατάσσονται σύμφωνα με τη δομή του εδάφους που περιέχουν, σύμφωνα με τον τρόπο της επιφανειακής αποστράγγισης και σύμφωνα με τις μεθόδους μέτρησης του νερού που περιέχουν. Έτσι και σύμφωνα με όλα τα προηγούμενα στοιχεία, τα λυσίμετρα υπολογισμού εξατμισοδιαπνοής χωρίζονται σε λυσίμετρα συμπαγούς ή αναδομημένου εδαφικού προφίλ, σε λυσίμετρα ζύγισης ή μη ζυγιστικά/ζυγιζόμενα και σε ελεύθερης (βαρυτικής) αποστράγγισης ή σε αποστράγγισης με απορρόφηση (Howell et al., 1991).

Η χρήση αδιατάρακτου δείγματος εδάφους σε λυσίμετρα, για την μελέτη της ροής του νερού στο έδαφος είναι αναμενόμενο να δίνουν αποτελέσματα που αντικατοπτρίζουν περισσότερο την πραγματική εικόνα της κατάστασης του φυσικού εδάφους και της κίνησης του νερού μέσα σε αυτό σε σχέση με την χρήση τεχνητών πειραματικών στηλών προφίλ εδάφους σε εργαστηριακούς χώρους. Τα λυσίμετρα που περιέχουν αδιατάρακτο προφίλ εδάφους και εκτίθενται στις ίδιες περιβαλλοντικές συνθήκες με την περιοχή υπό μελέτη, είναι δυνατόν και αναμενόμενο να αναπαριστούν σε μεγάλο βαθμό τις φυσικές συνθήκες από τα εργαστηριακά πειραματικά μέσα για την ίδια μελέτη (Abdou & Flury, 2004).

3.1 Τσιμεντένια Ζυγιστικά Λυσίμετρα

3.1.1 Τσιμεντένιο Ζυγιστικό Λυσίμετρο όγκου 16 m³ με πρέμνα και ροδακινιές

Το νερό αποτελεί έναν σημαντικό φυσικό πόρο εν γένει, αλλά και στις καλλιέργειες είναι εξίσου σημαντική η συμβολή του. Έτσι η παροχή της ορθής ποσότητας νερού στα φυτά μιας καλλιέργειας, εξασφαλίζει την σωστή υγεία τους και συνάμα την αποτελεσματική παραγωγικότητα τους (Johnson et al., 2005). Η έλλειψη νερού οδηγεί τα φυτά σε μειωμένη παραγωγή ή ακόμη και στον θάνατο. Από την άλλη πλευρά, τα προβλήματα που προκύπτουν από την χορήγηση περίσσειας νερού, δεν είναι αμελητέα, καθώς προκαλούν ασθένειες και ανεπαρκή θρέψη των φυτών ενώ το κορεσμένο σε νερό χώμα, αποτελεί αιτία καταστροφής του ριζικού συστήματος (ανοξία, μύκητες) και θανάτωση των φυτών.

Οι Johnson et al. (2005), προτείνουν στην εργασία τους την χρήση ζυγιστικού Λυσίμετρου για την μέτρηση με ακρίβεια της υγρασίας που χάνεται από το έδαφος και τα υπερκείμενα, σε αυτό, φυτά. Η μελέτη τους αφορά σε καλλιέργεια πολυετών φυτών (ροδακινιές και αμπέλια) και μεταξύ άλλων αναφέρουν ότι η κατασκευή και συντήρηση τέτοιων Λυσίμετρων (εφαρμογή σε πολυετείς καλλιέργειες) είναι αρκετά ακριβή διαδικασία. Από την άλλη πλευρά, η χρήση τους, παρέχει στοιχεία για τον καθορισμό σταθερών που αφορούν στην ανάπτυξη των καλλιεργειών αυτών, συμβάλλουν στην μελέτη των επιπτώσεων που έχει η έλλειψη του νερού στα φυτά αλλά και στην αξιολόγηση διαφορετικών τεχνικών που αποσκοπούν στην ορθή χρήση του νερού.

Τα λυσίμετρα που χρησιμοποίησαν οι Johnson et al. (2005), κατασκευάστηκαν το 1986 στο Κέντρο Αγροτικής Έρευνας και Ανάπτυξης Kearney του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια (UC Kearney Research & Extension Center, 9240 S Riverbend Ave, Parlier, CA 93648, United States, <http://kare.ucanr.edu/>). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των παραπάνω Λυσίμετρων είναι τα εξής: Καθένα αποτελείται από έναν υπόγειο τσιμεντένιο θάλαμο (Εικόνα 12) που στον πυθμένα του φιλοξενεί έναν μεγάλης κλιμακας ζυγό.



Εικόνα 12. Κατασκευή Τσιμεντένιου Θαλάμου, πηγή: Johnson et al. (2005)



Εικόνα 13. Τοποθέτηση Δοχείου που φέρει έδαφος και φυτά στον Τσιμεντένιο Θάλαμο, πηγή: Johnson et al. (2005)

Επάνω στον ζυγό στηρίζεται το παραλληλεπίπεδο δοχείο που φέρει το δείγμα του εδάφους και τα υπο μελέτη φυτά (πρέμνα ή δέντρα), το οποίο είναι διαστάσεων 6,5 ft (2 m) πλάτους, 13 ft (4 m) μήκους και 6,5 ft (2 m) ύψους ή βάθους (Εικόνα 13). Το έδαφος στον υπόγειο χώρο όπου κτίστηκε/στήθηκε ο κάθε τσιμεντένιος θάλαμος, μετακινήθηκε σε κατά το δυνατόν ενιαία τμήματα/επίπεδα ύψους 6 in (15,2 cm). Στην συνέχεια τα τμήματα του εδάφους επανατοποθετήθηκαν στο εσωτερικό του δοχείου του λυσίμετρου στο ίδιο ύψος με τα αντίστοιχα τμήματα του εδάφους έξω και περίξ του λυσίμετρου.



Εικόνα 14. Τελική μορφή εγκατεστημένου Λυσίμετρου (Είσοδος Επιστημονικού Προσωπικού στο εσωτερικό του Λυσίμετρου από ειδικό αγωγό) Πηγή: Johnson et al. (2005)

Στο ένα λυσίμετρο φυτεύτηκαν δυο δέντρα ροδακινιάς (*Prunus persica*), ενώ στο άλλο δυο πρέμνα αμπέλου (*Vitis vinifera*). Κάθε λυσίμετρο φέρει δυο ανεξάρτητα δίκτυα άρδευσης, ένα υπόγειο και ένα υπέργειο. Το υπόγειο δίκτυο είναι τοποθετημένο σε δύο σημεία, βάθους 12 (30,5 cm) και 24 in (61 cm) για τις Ροδακινιές και σε βάθος 16 in (40,6 cm) για τα πρέμνα. Σε κάθε πλευρά των φυτών, έχουν τοποθετηθεί σταλάκτες νερού ανά 12 in (30,5 cm) δυναμικότητας έκαστος και στις δυο περιπτώσεις 1 gal (3,8 l) νερού ανά ώρα. Τα επιφανειακά δίκτυα άρδευσης αποτελούνται από έναν μονό αγωγό σε ευθεία γραμμή που παρέχει ανα 12 in (30,5 cm) ποσότητα νερού ίση με 1 gal (3,8 l) σε ωριαία βάση, επίσης. Το επιφανειακό αρδευτικό δίκτυο των πρέμνων, δεν είναι τοποθετημένο επάνω στο έδαφος όπως εκείνο που αρδεύει τα δέντρα ροδακινιάς, αλλά είναι αναρτημένο σε ύψος 16 in (40,6 cm), πάνω από το έδαφος. Τα λυσίμετρα είναι επισκέψιμα στο εσωτερικό τους από το επιστημονικό και τεχνικό προσωπικό, για λόγους επιθεώρησης και συντήρησης από έναν επίγειο αγωγό που φαίνεται στην Εικόνα 14.

Τα συγκεκριμένα Λυσίμετρα λαμβάνουν τα ωριαία δεδομένα των μεταβολών του βάρους του συστήματος εδάφους-φυτών και των δεξαμενών νερού που τα τροφοδοτεί για τον υπολογισμό της απώλειας υγρασίας. Η υγρασία που απομακρύνεται από το σύστημα αντιστοιχεί στην (ωριαία/ημερήσια/ετήσια) εξάτμιση του νερού από το έδαφος και στην απώλεια υγρασίας λόγω της διαπνοής των φυτών (*ET*). Οι μετρήσεις αυτές, αποσκοπούν στο να υπολογίζουν τις ημερήσιες και ετήσιες χρήσεις και υδατικές ανάγκες των φυτών.

Η άρδευση των φυτών που περιλαμβάνουν τα Λυσίμετρα πραγματοποιείται αυτόματα. Από τις παραπάνω τιμές ζύγισης του συστήματος, το μηχάνημα υπολογίζει το ποσοστό υγρασίας που περιέχεται στο έδαφος. Όταν η υγρασία φτάσει το ελάχιστο όριο που έχει καθοριστεί από τους μελετητές, τότε το σύστημα έδαφος –φυτό αρδεύεται. Η παροχή νερού γίνεται κατά πολλά, μικρής κλίμακας, ποτίσματα έτσι ώστε η υγρασία του εδάφους στο Λυσίμετρο, κατά την διάρκεια της ημέρας, να διατηρείται σε ικανοποιητικά υψηλά επίπεδα, προσομοιάζοντας το ποσοστό υγρασίας του φυσικού εδάφους, και ελαχιστοποιώντας τα φαινόμενα πίεσης των φυτών από την έλλειψη νερού.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα αξιοποιούνται με σκοπό να υπολογιστεί η ημερήσια σταθερά Εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας K_c . Εφόσον υπάρξει ετήσια χρονοσειρά τιμών της K_c τότε οι πληροφορίες βοηθούν στον υπολογισμό των αρδευτικών αναγκών της καλλιέργειας.

Επίσης, τα παραπάνω Λυσίμετρα δύνανται να ελέγχουν το σύστημα άρδευσης, με παροχή μικρού όγκου νερού, στους αγρούς που βρίσκονται πέριξ του σημείου εγκατάστασης του Λυσίμετρου, καθώς θεωρείται ότι οι συνθήκες καλλιέργειας και οι ανάγκες των φυτών στους συγκεκριμένους αγρούς προσομοιάζονται από αυτές που συμβαίνουν μέσα στο σύστημα λυσίμετρου-φυτών.

3.1.2 Τσιμεντένιο ζυγιστικό λυσίμετρο όγκου 17 m³ με αχλαδιές

Οι υδατικές απαιτήσεις κάθε οπωρώνα και η κατανάλωση του νερού άρδευσης αποτελούν σε κάθε είδους καλλιέργεια ένα σημαντικό διαχειριστικό ζήτημα που απαιτεί σωστό υπολογισμό ώστε να επιτευχθεί ορθός προγραμματισμός της άρδευσης. Σε κάθε περίπτωση η γνώση του συντελεστή καλλιέργειας K_c βοηθάει στην εκτίμηση των υδατικών απαιτήσεων της καλλιέργειας. Υπολογίζεται γνωρίζοντας την τιμή της Εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c που προκύπτει από την χρήση Λυσίμετρων και από την τιμή της Εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_{ref} (Girona et al., 2004).

Για τον υπολογισμό του συντελεστή καλλιέργειας K_c σε οπωρώνα αχλαδιάς (*Pyrus communis*) της ποικιλίας “Conference” χρησιμοποιήθηκε το ένα εκ των δύο μεγάλων τσιμεντένιων ζυγιστικών λυσίμετρων που βρίσκονται εγκατεστημένα στον λυσιμετρικό σταθμό IRTA (Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries) στην Ισπανία. Το αγροτεμάχιο που βρίσκεται το ένα από αυτά τα όμοια μεταξύ τους Λυσίμετρα, φέρει καλλιέργεια με δέντρα αχλαδιάς φυτεμένα σε αποστάσεις 4 m x 1,6 m. Το λυσίμετρο λειτουργεί σε συνδυασμό με έναν μετεωρολογικό σταθμό τοποθετημένο σε απόσταση 20 m από τον οπωρώνα και την θέση του λυσίμετρου. Από τις τιμές της εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c που υπολογίζονται από την λειτουργία του λυσίμετρου και τις αντίστοιχες της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_{ref} που υπολογίζονται με βάση τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού, οι μελετητές δύνανται να υπολογίσουν τον συντελεστή καλλιέργειας K_c (Girona et al., 2004).

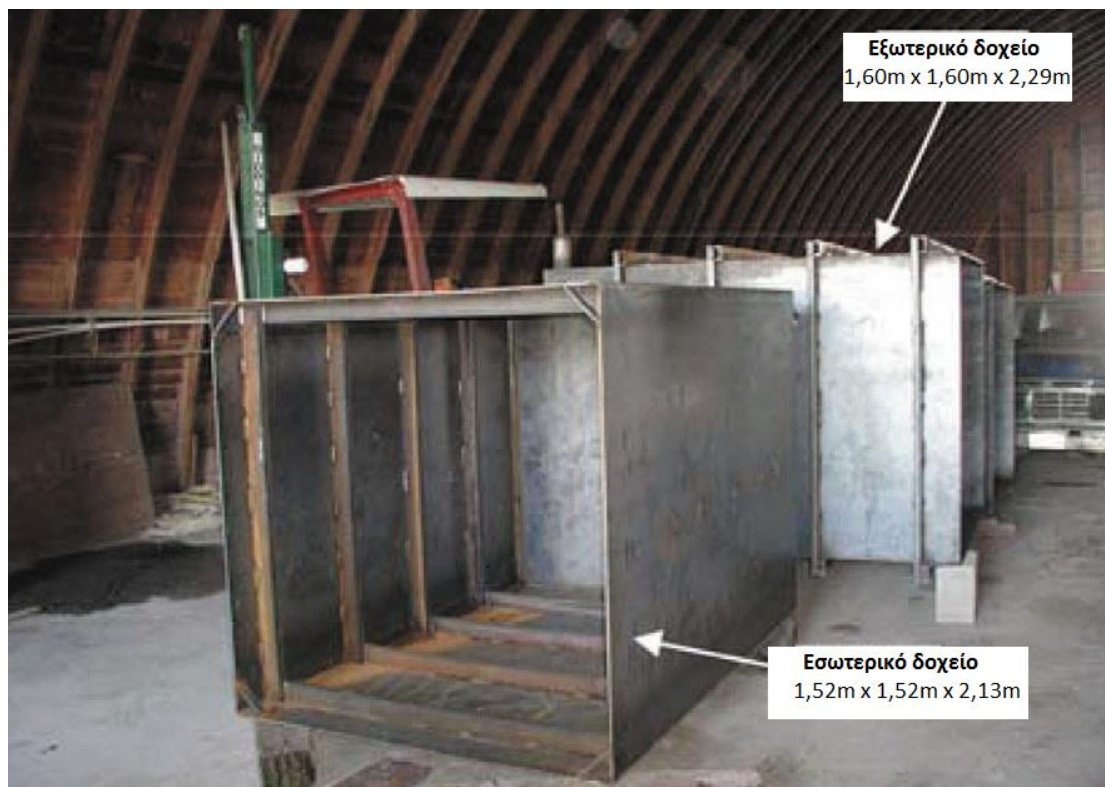
Το λυσίμετρο διαθέτει μια τσιμεντένια δεξαμενή όγκου 17 m^3 της οποίας το βάθος είναι $1,70 \text{ m}$ και η ελεύθερη επιφάνεια της έχει εμβαδόν $9,5 \text{ m}^2$ (2 m πλάτος και $4,8 \text{ m}$ μήκος). Η τσιμεντένια δεξαμενή του λυσίμετρου είναι τοποθετημένη επάνω σε τέσσερις ζυγούς καθένας από τους οποίους έχει ζυγιστική ικανότητα 15 t . Η συνολική ζυγιστική ικανότητα του λυσίμετρου ανέρχεται στους 60 t ενώ η ζυγιστική του ακρίβεια είναι της τάξεως του μισού κιλού ($0,5 \text{ kg}$). Αυτό σημαίνει ότι σύμφωνα με το εμβαδόν της οριζόντιας διατομής του λυσίμετρου, αυτό έχει την ικανότητα να υπολογίσει κατανάλωση νερού ίση με $0,053 \text{ mm}$. Το σύστημα κατασκευής του λυσίμετρου περιλαμβάνει έναν ενιαίο χώρο βάθους $2,40 \text{ m}$ ο οποίος φιλοξενεί την τσιμεντένια δεξαμενή που φέρει το δείγμα εδάφους και έναν χώρο δίπλα σε αυτήν όπου είναι προσβάσιμος από το προσωπικό παρακολούθησης του λυσίμετρου. Η πρόσβαση στον χώρο αυτό γίνεται από διαφορετικό άνοιγμα δίπλα στο άνοιγμα που φέρει την δεξαμενή με το έδαφος και τα δέντρα. Η δεξαμενή περιλαμβάνει το έδαφος που απομακρύνθηκε από το σημείο προκειμένου να εγκατασταθεί το σύστημα του λυσίμετρου. Οι στρώσεις του εδαφικού προφίλ, τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό της ζυγιζόμενης δεξαμενής με την ίδια σειρά που βρίσκονταν πριν από την εκσκαφή μέσα στο έδαφος, με την διαφορά ότι δεν έχουν συμπιεσθεί ώστε το χώμα να μην γίνει αδιαπέρατο. Η ζυγιζόμενη δεξαμενή του λυσίμετρου φέρει τρία δέντρα Αχλαδιάς όμοια με τα υπόλοιπα της καλλιέργειας, τα οποία έχουν φυτευτεί στις ίδιες αποστάσεις με αυτά του υπόλοιπου αγροκτήματος (Girona et al., 2004).

Οι ζυγοί του συστήματος είναι συνδεδεμένοι με ηλεκτρονικούς καταγραφείς δεδομένων. Το ζυγιζόμενο βάρος του συστήματος καταγράφεται σε ωριαία διαστήματα και υπολογίζεται η διαφορά βάρους εκφραζόμενη σε νερό που χρησιμοποιήθηκε από το σύστημα στο διάστημα της μιας ώρας. Αυτό περιλαμβάνει την υγρασία που απομακρύνθηκε από το σύστημα μέσω της εξάτμισης από το χώμα και της διαπνοής των δέντρων. Κάτω από την δεξαμενή του εδαφικού δείγματος υπάρχουν αναρτημένοι και ζυγίζονται ταυτόχρονα με το σύστημα έδαφος-δέντρα δύο δεξαμενές των 100 l που παρέχουν το νερό της άρδευσης στα δέντρα Αχλαδιάς και μια δεξαμενή 200 l η οποία συγκεντρώνει το αποστραγγιζόμενο νερό από το λυσίμετρο. Οι δεξαμενές άρδευσης γεμίζονται κάθε νύκτα με ποσότητα νερού ίση με αυτή που αντλήθηκε από αυτές για τις αρδευτικές ανάγκες των δέντρων κατά την διάρκεια της προηγούμενης ημέρας. Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας ET_c χωρίς παρεμβολές από τις ποσότητες του νερού της άρδευσης ή/και της αποστράγγισης (Girona et al., 2004).

3.2 Μεταλλικά Ζυγιστικά Λυσίμετρα

3.2.1 Μεταλλικό Ζυγιστικό Λυσίμετρο όγκου 5 m³ με καλαμπόκι και σόγια

Οι Payero & Irmak (2008), κατασκεύασαν, τοποθέτησαν και λειτούργησαν δυο μεταλλικά Λυσίμετρα, με σκοπό την μέτρηση της Εξατμισοδιαπνοής σε καλλιέργειες καλαμποκιού (*Zea mays*) και σόγιας (*Glycine max*), στην περιοχή της Δυτικής-Κεντρικής Νεμπράσκα των ΗΠΑ. Η τοποθέτηση των δυο Λυσίμετρων έδωσε στους ερευνητές την δυνατότητα να παρακολουθήσουν και να καταμετρήσουν την εξατμισοδιαπνοή των δυο διαφορετικών καλλεργειών ταυτόχρονα στην ίδια καλλιεργητική περίοδο. Τα Λυσίμετρα κατασκευάστηκαν και τοποθετήθηκαν τον Μάιο του 2004 σε ένα αγρόκτημα του Πανεπιστημίου της Νεμπράσκα (University of Nebraska-Lincoln West Central Research and Extension Center in North Platte, NE, USA <https://extension.unl.edu/statewide/westcentral/>). Για την κατασκευή τους χρησιμοποίησαν λαμαρίνα πάχους 6,4mm. Κάθε Λυσίμετρο αποτελείται από δύο μεταλλικά δοχεία ένα εξωτερικό και ένα εσωτερικό, τοποθετημένο μέσα στο εξωτερικό. Οι διαστάσεις του εξωτερικού δοχείου είναι 1,60 m x 1,60 m x 2,29 m βάθος. Το εσωτερικό είναι ελάχιστα μικρότερο με εσωτερικές (ωφέλιμες) διαστάσεις 1,52 m x 1,52 m x 2,13 m βάθος (Εικόνα 15). Η διάσταση των 1,52 m επιλέχτηκε με γνώμονα τις αποστάσεις μεταξύ των σειρών φύτευσης της καλλιεργείας (ακέραιο πολλαπλάσιο) ενώ το βάθος με διάσταση 2,13 m θεωρείται ότι αφήνει αρκετό περιθώριο χώρου ώστε να αναπτυχθούν απρόσκοπτα οι ρίζες των φυτών του καλαμποκιού και ταυτόχρονα να απορροφούν το νερό με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα τοιχώματα των δοχείων έχουν ενισχυθεί με οριζόντιες κοιλοδοκούς 76 mm. Κοιλοδοκοί έχουν τοποθετηθεί και στον πυθμένα των δοχείων, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι οι κοιλοδοκοί του εσωτερικού δοχείου έχουν κολληθεί στο εσωτερικό του, αντίθετα με το εξωτερικό δοχείο.



Εικόνα 15. Εσωτερικό και εξωτερικό δοχείο του Λυσίμετρου στον χώρο κατασκευής τους, Πηγή: Payero & Irmak (2008).

Μεταξύ των δοχείων υπάρχει μια απόσταση μερικών εκατοστών, που εξυπηρετεί την ελεύθερη κάθετη μετακίνηση του εσωτερικού δοχείου. Επίσης, η διαφορά ύψους στα δύο δοχεία οφείλεται στον χώρο που πρέπει να υπάρχει κάτω από το εσωτερικό δοχείο για την τοποθέτηση του ζυγιστικού μηχανισμού.

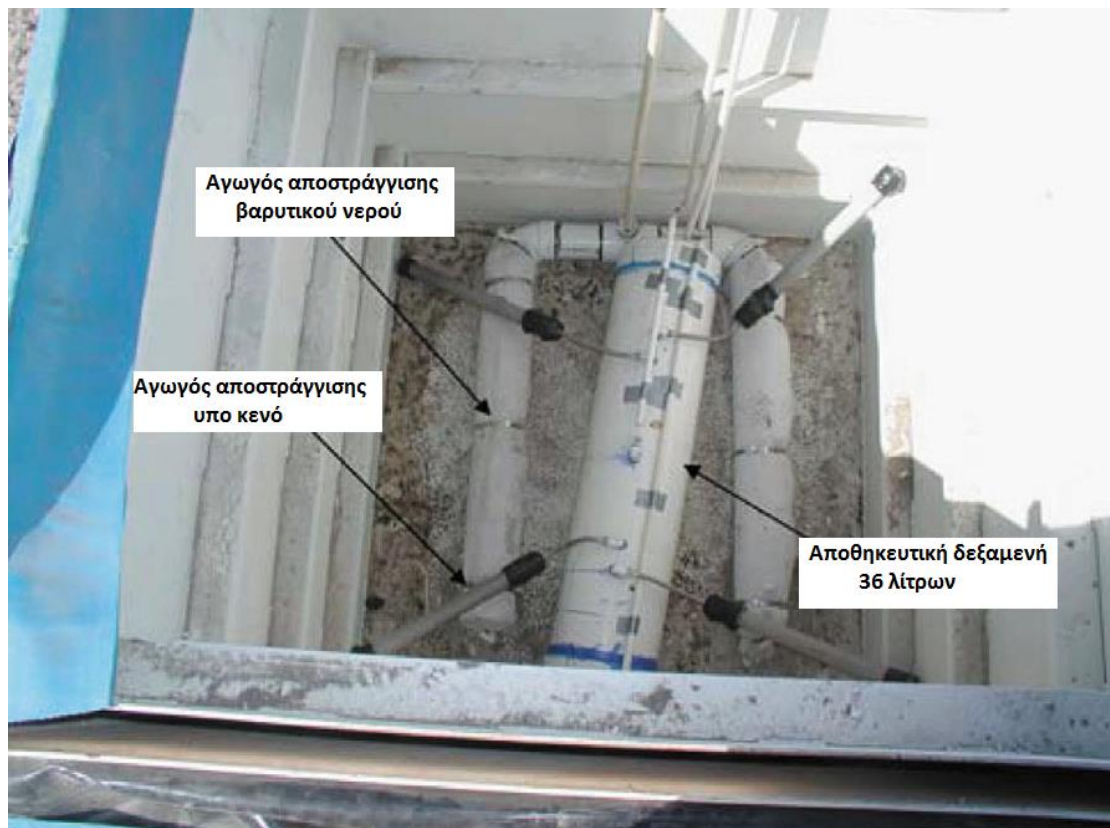
Στο εσωτερικό των Λυσίμετρων, τοποθετήθηκε δείγμα εδάφους, όχι μονολιθικά, αλλά σε στρώματα ποιοτικά αντίστοιχα με αυτά του αρχικού εδάφους, προσπαθώντας το σχηματισμένο προφίλ να αντιγράφει όσο το δυνατόν περισσότερο το φυσικό έδαφος του αγρού πέριξ των Λυσίμετρων, τόσο στην υφή όσο και στην πυκνότητα. Αυτό επιτεύχθηκε με την τοποθέτηση στρωμάτων εδάφους παρόμοιας ποιότητας σε όσο το δυνατόν αντίστοιχο βάθος με το αρχικό προφίλ, τα οποία κάθε 30cm καταβρέχονταν μέχρι κορεσμού χωρίς μηχανική συμπίεση.

Ο πυθμένας του ορύγματος όπου τοποθετήθηκε το κάθε Λυσίμετρο, καλύφθηκε από τσιμέντο, ούτως ώστε να παρέχεται οριζόντια και σταθερή βάση στήριξης.

Το σύστημα αποστράγγισης του περιεχόμενου νερού, λειτουργεί τόσο από αγωγούς με την δράση της βαρύτητας όσο και με μηχανισμούς που λειτουργούν υπο κενό. Έτσι η αποστράγγιση λειτουργεί είτε το χώμα είναι κορεσμένο σε νερό είτε όχι. Οι αγωγοί που αποστραγγίζουν το βαρυντικό νερό, είναι σωλήνες PVC, διαμέτρου 10,2 cm που φέρουν πολλαπλές σπές ώστε να εισέρχεται το νερό, καλυμμένες με δίχτυ που εμποδίζει την είσοδο χώματος στο εσωτερικό τους (αποφυγή απόφραξης από χώμα). Η απομάκρυνση του νερού

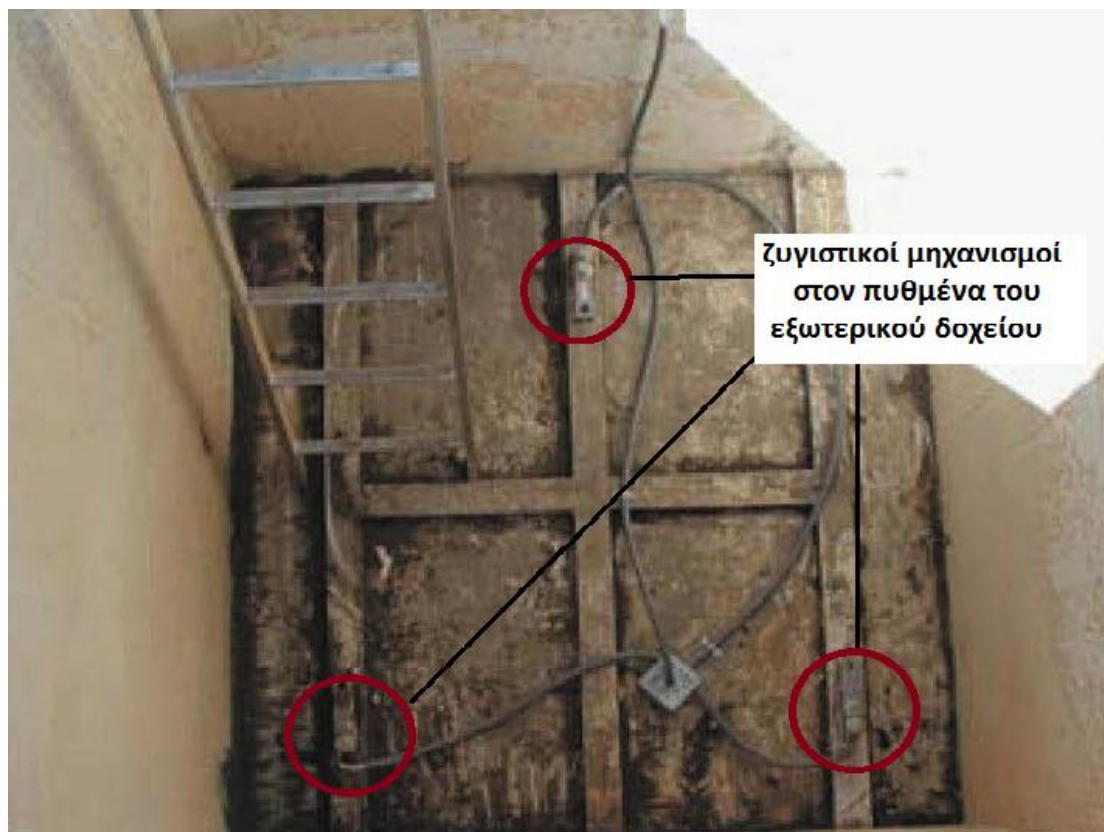
μέσα από τον αγωγό αποστράγγισης πραγματοποιείται μέσω ενός κάθετου, όρθιου χάλκινου σωλήνα διαμέτρου 6,4 mm που ξεκινάει από τον αγωγό συγκέντρωσης του βαρυντικού νερού στον πυθμένα του Λυσίμετρου και φτάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους που περιέχεται στο Λυσίμετρο.

Οι αγωγοί του αποστραγγιστικού συστήματος που λειτουργεί υπό κενό, είναι τέσσερις ανοξεϊδωτες πορώδεις σωλήνες με μέγεθος πόρων 0,5 μm που το μέγεθος τους είναι 64 mm μήκος και διαμέτρου 50 mm. Οι αγωγοί καταλήγουν σε μια αποθηκευτική δεξαμενή 36 l που είναι ουσιαστικά τμήμα σωλήνας PVC, κλεισμένης ερμητικά στα δυο άκρα. Στην δεξαμενή εφαρμόζεται αναρρόφηση (συνθήκες κενού) μέσα από σωλήνα που συνδέεται με την δεξαμενή και καταλήγει σε αντλία κενού (Εικόνα 16). Η αντλία έχει ικανότητα αναρρόφησης 3 έως 4 l/min. Ωστόσο, η μεταξύ του αποστραγγιστήρα και της αντλίας κενού παρεμβάλλεται μια μικρή δεξαμενή κενού, σε περίπτωση που απορροφηθεί νερό, να μην φτάσει στην αντλία και την καταστρέψει. Έτσι, στην δεξαμενή κενού συνδέονται επτά αγωγοί, δύο έρχονται από την αντλία κενού, ένας από τον πυθμένα του εξωτερικού δοχείου του Λυσίμετρου, ένας από τον αποστραγγιστήρα του βαρυντικού νερού, ένας από την κορυφή της αποθηκευτικής δεξαμενής της αποστράγγισης υπό κενού και δυο από τον πυθμένα της. Ένας σωλήνας PVC, τοποθετήθηκε επίσης στον κενό χώρο μεταξύ των δύο δοχείων, για την αποστράγγιση του νερού που θα εισερχόταν ατυχώς, σε αυτόν τον χώρο.



Εικόνα 16. Ο πυθμένας του εσωτερικού λυσίμετρου με το σύστημα αποστράγγισης του (διακρίνεται το χαλίκι στον πυθμένα), Πηγή: Payero & Irmak (2008)

Το σύστημα των ζυγιστικών μηχανισμών αποτελείται από τρεις ζυγούς, ικανότητας ζύγισης 4.536 kg έκαστος, οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί σε τριγωνική διάταξη όπως διακρίνονται στην Εικόνα 17. Οι ζυγοί δίνουν μετρήσεις βάρους του φερόμενου Λυσίμετρου ανα λεπτό της ώρας (1 min) και μέσου βάρους ανα 10 λεπτά (10 min) και ανα ώρα (60 min). Ωστόσο, το σύστημα ζύγισης καταγράφει και ξεχωριστά την ένδειξη βάρους του κάθε ζυγού, ταυτόχρονα με την καταγραφή του βάρους που προκύπτει από την συνολική πληροφορία των τριών ζυγών μαζί.



Εικόνα 17. Τριγωνική διάταξη των ζυγιστικών μηχανισμών στον πυθμένα του εξωτερικού δοχείου, Πηγή: Payero & Irmak (2008)

Για την μέτρηση της υγρασίας του εδάφους που περιέχει το Λυσίμετρο, χρησιμοποιούνται: μια συσκευή νετρονίων, η οποία ανιχνεύει την υγρασία κάθε 30 cm της στήλης του εδάφους και έξι διηλεκτρικά υδρόμετρα αυτόματης λειτουργίας σε απόσταση 30 cm μεταξύ τους από την επιφάνεια προς τον πυθμένα του Λυσίμετρου, τα οποία διευκολύνουν την συχνή καταμέτρηση της υγρασίας. Τα παραπάνω τοποθετήθηκαν ταυτόχρονα με τα διάφορα στρώματα εδάφους.

Οι Payero & Irmak (2008) αναφέρουν στην εργασία τους ότι η μέτρηση της υγρασίας του εδάφους που περιέχεται στο Λυσίμετρο μπορεί να χρησιμεύσει στην ανάπτυξη εναλλακτικής μεθοδολογίας υπολογισμού της Εξατμισοδιαπνοής. Επίσης, η συνεχής παρακολούθηση του ποσοστού της υγρασίας συμβάλλει στον προγραμματισμό του ρυθμού άρδευσης, έτσι ώστε

τα φυτά που βρίσκονται εντός του Λυσίμετρου να μην χρειαστεί να υποστούν συνθήκες έλλειψης νερού.

Έπειτα από την τοποθέτηση του αποστραγγιστικού συστήματος, στον πυθμένα του Λυσίμετρου τοποθετήθηκε χαλίκι σε στρώμα πάχους 15 cm ως χώρος υποδοχής της περίσσειας του νερού. Η παρουσία αυτού του στρώματος από χαλίκι επιτρέπει επίσης την ελεύθερη αποστράγγιση του βαρυντικού νερού. Εκτιμάται ότι το κόστος κάθε λυσίμετρου του παραπάνω τύπου, την εποχή κατασκευής τους (2004), ανέρχεται στις 12.500 \$ ΗΠΑ.

Κατά την χρήση τους, τα παραπάνω Λυσίμετρα αποδεικνύεται ότι λειτουργούν αποτελεσματικά καθώς αντιλαμβάνονται και μετρούν με μεγάλη ακρίβεια τις μικρές ή ελάχιστες αλλαγές στην συνολική μάζα του εδάφους, που οφείλεται στις μεταβολές της υγρασίας είτε λόγω της δράσης της Εξατμισοδιαπνοής, είτε της βροχόπτωσης και της άρδευσης. Η ακρίβεια των δεδομένων που καταγράφονται και αποθηκεύονται για ανάλυση από τους ψηφιακούς καταγραφείς των Λυσίμετρων, ανέρχεται στα 0,064-0,078 mm.

Η ακρίβεια των μετρήσεων περιέχει σφάλμα μικρότερο του 5% όταν πρόκειται για τιμές διαφοράς Εξατμισοδιαπνοής $> \delta = 3$ mm γεγονός που της κάνει αποδεκτές και χρήσιμες, ενώ αντίθετα όσο ελαχιστοποιείται η τιμή της διαφοράς Εξατμισοδιαπνοής κάτω από την παραπάνω τιμή, το σφάλμα μεγαλώνει ενώ γίνεται μη αποδεκτό για τιμές γύρω στα 0,3 mm. Έτσι, οι Paygo & Irmak (2008), παραδέχονται ότι τα λυσίμετρα που κατασκεύασαν είναι αποτελεσματικά για καταμέτρηση ημερήσιων μεταβολών των τιμών εξατμισοδιαπνοής, τουλάχιστον, αλλά και για μεγαλύτερης από μιας ημέρας και γενικά μακροπρόθεσμων παρατηρήσεων και καταγραφών.

3.2.2 Κυλινδρικό μεταλλικό ζυγιστικό λυσίμετρο όγκου 1,5 m³

Τα Λυσίμετρα αυτά αναφέρονται από τους Prasuhn et al. (2016), και σχετίζονται άμεσα με την αγροτική-γεωπονική έρευνα και παρέχουν την δυνατότητα στους μελετητές, της ανίχνευσης και του προσδιορισμού, της μεταφοράς και μετακίνησης του νερού και των θρεπτικών συστατικών μέσα στο έδαφος, κάτω από δεδομένες και ελεγχόμενες συνθήκες. Τα συγκεκριμένα Λυσίμετρα της παρούσας μελέτης έχουν κατασκευαστεί για να χρησιμοποιούνται σε γεωπονικά πειράματα που μελετούν την ροή του νερού και των θρεπτικών συστατικών σε διαφορετικές καλλιέργειες και διαφορετικούς τύπους εδαφών.

Οι Prasuhn et al. (2016) χρησιμοποίησαν 12 ζυγιστικά Λυσίμετρα του συγκεκριμένου τύπου, τα οποία κατασκευάστηκαν και τοποθετήθηκαν στον Γεωπονικό Ερευνητικό Σταθμό Agroscope, στο Reckenholz της Ζυρίχης, Ελβετία. Τα Λυσίμετρα βρίσκονται σε υπόστεγο καλυμμένο από πλαστικό νάυλον για τον έλεγχο του εισερχόμενου νερού στο έδαφος, κυρίως αυτό των κατακρημνήσεων (Εικόνα 18). Τα Λυσίμετρα αυτά περιέχουν αδιατάρακτο (μονολιθικό) δείγμα εδάφους.

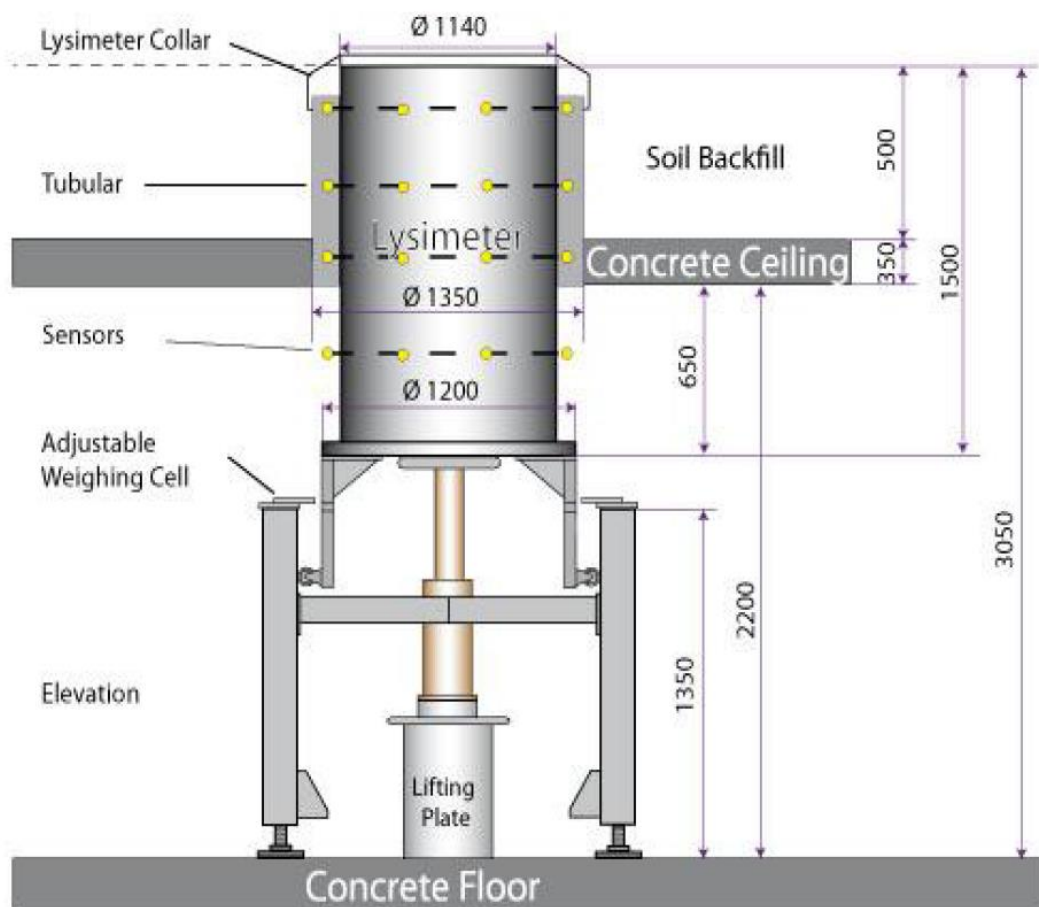


Εικόνα 18. Λυσίμετρα διατεταγμένα κάτω από την πλαστική στέγη, Πηγή: Prasuhn et al (2016)



Εικόνα 19. Τα ζυγιστικά Λυσίμετρα διατεταγμένα στον υπόγειο χώρο κάτω από το αγρόκτημα, Πηγή: Prasuhn et al. (2016).

Έχουν εμβαδόν επιφάνειας 1 m^2 και βάθος $1,5 \text{ m}$ και έχουν ωφέλιμο όγκο περιεχόμενου διαταραγμένου εδάφους $1,5 \text{ m}^3$. Διαθέτουν τενσιόμετρα, αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας, δοχεία απορρόφησης εδαφικής υγρασίας (suction cups) και καθετήρες οργάνων FDR (μετρητές μεταβολής ανακλώμενου κύματος) σε τέσσερα διαφορετικά βάρη της στήλης του Λυσίμετρου: στα 10 cm , 30 cm , 60 cm και 90 cm (Εικόνα 20). Η ζυγιστική ακρίβεια των ζυγών που διαθέτουν τα ζυγιστικά λυσίμετρα είναι 10 gr που αντιστοιχεί σε $0,01 \text{ mm}$ νερού (σ.σ. σε αντιστοιχία μονάδων κατακρίμνησης). Οι αισθητήρες καταγράφουν τις συνθήκες υγρασίας, θερμοκρασίας κλπ., στο Λυσίμετρο ανα 5 min . Τα Λυσίμετρα στηρίζονται σε ασάλινα τρίποδα από τα οποία μπορούν να κατέβουν με την βοήθεια παλάγκου προκειμένου να γίνουν εργασίες συντήρησης (Εικόνα 19).



Εικόνα 20. Σχέδιο των ζυγιστικών Λυσίμετρων, Πηγή: Prasuhn et al. (2016).

3.2.3 Μεταλλικό ζυγιστικό λυσίμετρο με κατασκευαστικές παραλλαγές για Υδρολογική, Μετεωρολογική-Κλιματική, Επιστημονική και Αγρο-Γεωπονική χρήση

Οι Unold & Fank (2008) περιγράφουν τις μεταβολές που απαιτούνται να γίνουν στην κατασκευή και λειτουργία ενός ζυγιστικού Λυσίμετρου για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες

διαφορετικών επιστημονικών τομέων. Όλοι οι παρακάτω τύποι Λυσίμετρων βρίσκονται στο Agro-Hydrological Research Field Wagna (Styria, Austria) (Lysimeter, 2020)

3.2.3.1 Υδρολογικό ζυγιστικό λυσίμετρο

Την βασική κατασκευή (Υδρολογικό Λυσίμετρο) (Εικόνα 21) αποτελεί ένα κυλινδρικό Λυσίμετρο εμβαδού επιφάνειας 1 m^2 και βάθους 1 m . Έτσι ο όγκος του μονολιθικά τοποθετημένου δείγματος εδάφους είναι 1 m^3 . Το Λυσίμετρο είναι κατασκευασμένο από ανοξείδωτο ατσάλι. Είναι τοποθετημένο σε σκάμμα που έχει δημιουργηθεί με απόλυτη καθετότητα έτσι ώστε να μην δημιουργούνται οδοί επιλεκτικής ροής του νερού στα όρια γύρω από την κατασκευή του Λυσίμετρου. Στο εσωτερικό του σκάμματος κατασκευάζεται κωνικός τσιμεντένιος θάλαμος (οι πλευρές του έχουν τέτοια κλίση έτσι ώστε ο κύκλος της βάσης είναι μεγαλύτερος από τον κύκλο του επάνω ελεύθερου ανοίγματος). Στον πυθμένα του θαλάμου, επάνω σε τσιμεντένια πλάκα, τοποθετούνται τρεις ζυγιστικοί μηχανισμοί (load cells). Οι αισθητήρες και τα όργανα για τις διάφορες μετρήσεις όπως της θερμοκρασίας, υγρασίας, μητρώου δυναμικού κλπ. ενσωματώνονται στην κατασκευή του Λυσίμετρου και ο κυλινδρικός σχηματισμός τοποθετείται επάνω στην ζυγιστική διάταξη. Για την οριζοντίωση και τον έλεγχο διάφορων άλλων λειτουργιών του Λυσίμετρου, τοποθετούνται κάθετες βέργες μεταξύ του Λυσίμετρου και του τσιμεντένιου χώρου που το περιβάλλει, που βοηθούν στους απαραίτητους χειρισμούς των σχετικών μηχανισμών. Η απόσταση μεταξύ του άνω χείλους του θαλάμου που τοποθετείται το Λυσίμετρο και του άνω χείλους του Λυσίμετρου είναι μικρότερη από 1 cm κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

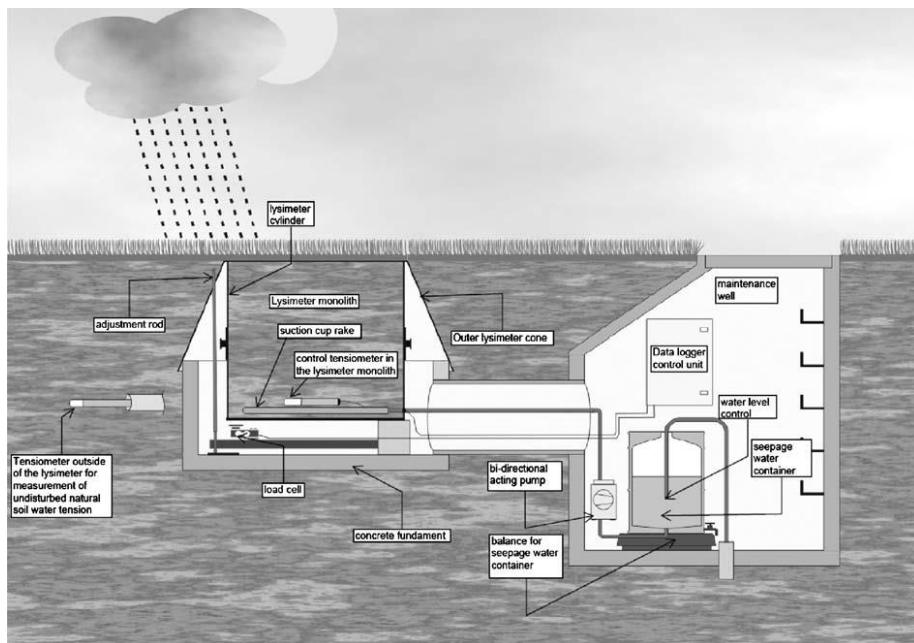
Δίπλα από το Λυσίμετρο και σε απόσταση 2 m κατασκευάζεται μικρή δεξαμενή (πηγάδι) όπου ο βοηθητικός αυτός χώρος χρησιμοποιείται για να φιλοξενήσει τα παρελκόμενα όργανα και μηχανισμούς για την λειτουργία και συντήρηση του Λυσίμετρου.

Το Λυσίμετρο έχει την δυνατότητα μέτρησης της μάζας του φερόμενου εδάφους με ανάλυση 10 gr που αντιστοιχεί σε $0,01 \text{ mm}$ νερού από κατακρημνίσεις ενώ η ακρίβεια του είναι 100 gr . Η μέτρηση του αποστραγγιζόμενου νερού από ένα δεύτερο ζυγιστικό σύστημα ή από ένα διαβαθμισμένο δοχείο συλλογής παρέχει δεδομένα υψηλής ακρίβειας, ενώ δίνει στο σύστημα αυτονομία λειτουργίας χωρίς παρακολούθηση και ανθρώπινη παρέμβαση μέχρι έναν μήνα.

Η ροή του νερού στο εσωτερικό του Λυσίμετρου ελέγχεται από το μητρώο δυναμικό του εδάφους του αγρού. Πως γίνεται αυτό: Το κατώτερο τμήμα της στήλης εδάφους του λυσίμετρου έχει διαμορφωθεί έτσι ώστε η ροή του νερού μέσα σε αυτή την περιοχή να αποκτά το ίδιο μητρώο δυναμικό με το εξωτερικό από αυτό, έδαφος. Με την τεχνική μεταφοράς των συνθηκών μητρικού δυναμικού του εδάφους στο Λυσίμετρο, το κατώτερο σημείο (bottom plate) του Λυσίμετρου δεν είναι αποκομμένο από την ροή της εδαφικής υγρασίας του Λυσίμετρου, αλλά αντίθετα ακολουθεί τις όποιες αυξομειώσεις παρουσιάζει η εδαφική υγρασία εκτός του Λυσίμετρου. Περιέχει ένα όργανο, με πολλές απολήξεις (rake) που αυξάνουν την ειδική επιφάνεια του, που συμβάλλει στον έλεγχο και στην διατήρηση της

επιθυμητής ροής εδαφικής υγρασίας. Η εξωτερική εδαφική τάση μετρείται από ένα μετρητή εδαφικής τάσης (tensionmeter) που βρίσκεται τοποθετημένος σε βάθος 90cm στο έδαφος δίπλα από το Λυσίμετρο. Στο κατώτερο τμήμα του Λυσίμετρου εφαρμόζεται κενό, που διατηρείται στα ίδια επίπεδα την εδαφική τάση έξω από το Λυσίμετρο, με χρήση αντλίας διπλής κατεύθυνσης. Όταν η ποσότητα εδαφικής υγρασίας του αγρού αυξηθεί από το νερό που διοχετεύεται στο έδαφος (άρδευση, κατακρημνίσεις) τότε και η υγρασία στο Λυσίμετρο αυξάνεται αντίστοιχα αντλώντας νερό από το δοχείο αποστράγγισης που βρίσκεται στο βοηθητικό χώρο δίπλα από το Λυσίμετρο για να εξισωθεί με τις συνθήκες μητρικού δυναμικού του αγρού.

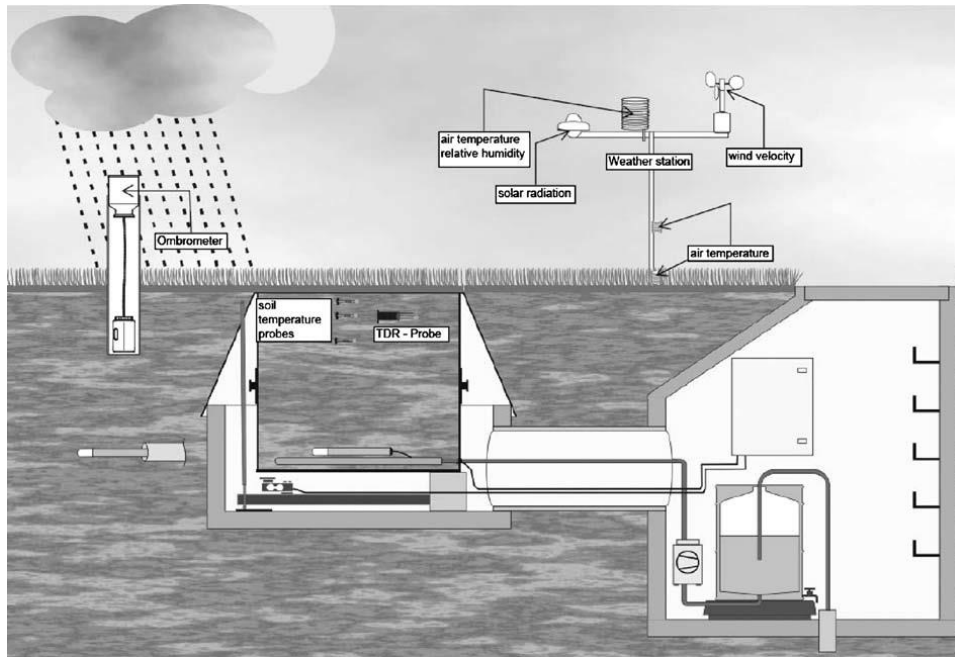
Το Λυσίμετρο που έχει κατασκευαστεί για τις ανάγκες της Υδρολογίας, μετρά το βάρος του μονολιθικού εδάφους του κυλίνδρου και του αποστραγγιζόμενου νερού.



Εικόνα 21. Σχέδιο Υδρολογικού Λυσίμετρου, Πηγή: Unold & Fank (2008)

3.2.3.2 Κλιματολογικό-Μετεωρολογικό ζυγιστικό λυσίμετρο

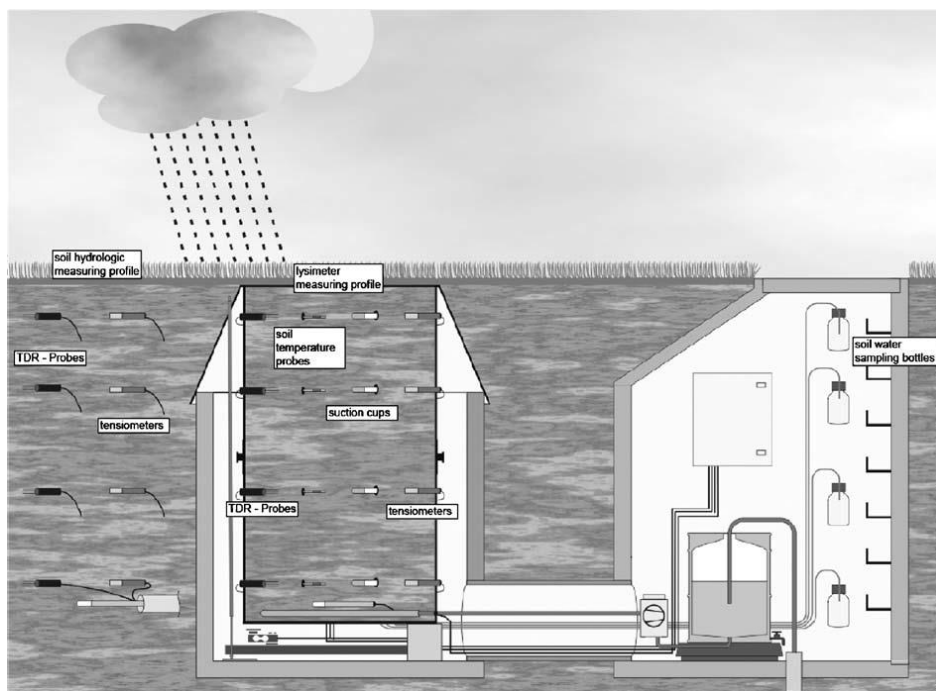
Το κλιματολογικό Λυσίμετρο (Εικόνα 22) είναι εξοπλισμένο επιπλέον με όργανα μετεωρολογίας. Υπολογίζει την εξατμισοδιαπνοή ET και την ET_0 , την αποστράγγιση και την κατακρήμνιση συνδυάζοντας τα δεδομένα από την ζύγιση του Λυσίμετρου και τα μετεωρολογικά δεδομένα. Μετρά την εδαφική υγρασία σε βάθος 10 cm, την θερμοκρασία του εδάφους με αισθητήρες σε βάθος 5 cm 10 cm και 20 cm, σε σχέση με τα μετεωρολογικά δεδομένα.



Εικόνα 22. Σχέδιο Μετεωρολογικού Λυσίμετρου, Πηγή: Unold & Fank (2008)

3.2.3.3 Επιστημονικό (Scientific) ζυγιστικό λυσίμετρο

Το επιστημονικό λυσίμετρο (Εικόν 23) έχει βάθος 2 m και οι μετρήσεις παίρνονται από αισθητήρες μέσα στην μονολιθική στήλη του σε βάθη 10, 30, 90 και 180 cm σε συνθήκες που προσομοιάζουν με αυτές του αγρού.

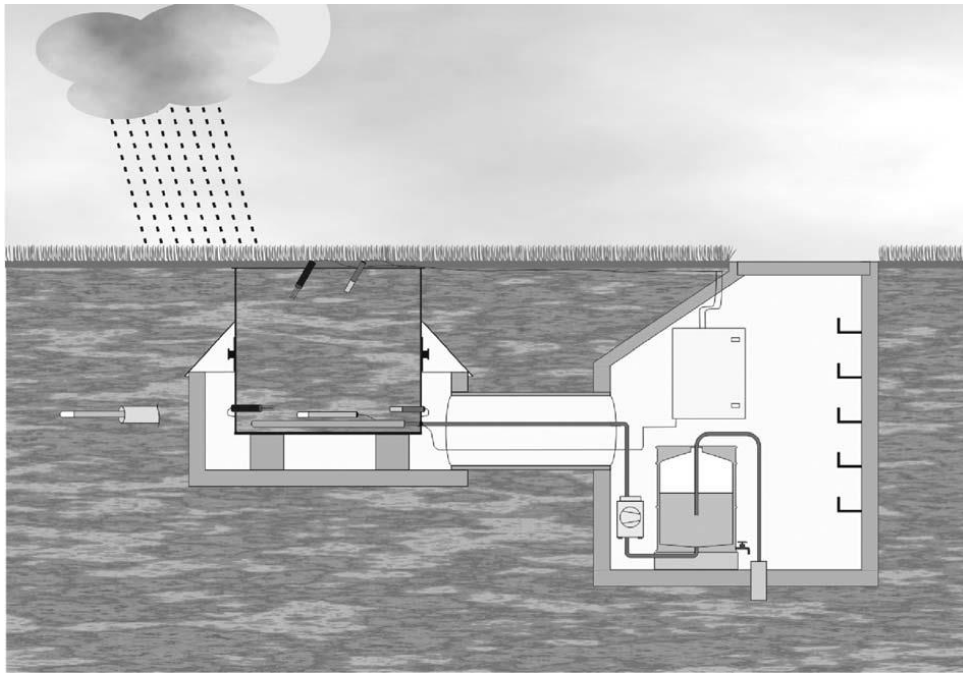


Εικόνα 23. Σχέδιο Επιστημονικού Λυσίμετρου, Πηγή: Unold & Fank (2008)

3.2.3.4 Αγρο-Γεωπονικό ζυγιστικό λυσίμετρο

Το αγρο-γεωπονικό λυσίμετρο (Εικόνα 24) μετρά την έλλειψη νερού του ριζικού συστήματος (root water stress) των φυτών, την ποσότητα του αποστραγγιζόμενου νερού και την ροή των διαλυμένων ουσιών του εδάφους σε μια κοινή καλλιέργεια σε συνθήκες αγρού.

Με εμβαδόν επιφάνειας 1m² και βάθος 1m, το Λυσίμετρο αυτό είναι κατασκευασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε το επάνω κυκλικό τμήμα του να απομακρύνεται έτσι ώστε το έδαφος που περιέχει να οργώνεται ταυτόχρονα με τον υπόλοιπο αγρό. Στην συνέχεια επανατοποθετείται ο ανώτερος δακτύλιος του Λυσίμετρου, για να λειτουργήσει σαν μεμονωμένος και ελεγχόμενος χώρος. Όπως και στο Υδρολογικό Λυσίμετρο, περιέχει το όργανο (rake), που συμβάλλει στον έλεγχο και στην διατήρηση της επιθυμητής ροής εδαφικής υγρασίας. Και εδώ, η εξωτερική εδαφική τάση μετριέται από ένα μετρητή εδαφικής τάσης (tensionmeter) που βρίσκεται τοποθετημένος σε βάθος 90cm στο έδαφος εκτός του Λυσίμετρου. Η βασική διαφορά του με τα υπόλοιπα Λυσίμετρα είναι ότι δεν είναι ζυγιστικό.



Εικόνα 24. Σχέδιο Αγρο-Γεωπονικού Λυσίμετρου, Πηγή: Unold & Fank (2008)

3.3 Στραγγιστικά Λυσίμετρα από Μέταλλο και Τσιμέντο

3.3.1 Κυλινδρικό στραγγιστικό λυσίμετρο όγκου 0,95 m³ με Ασιατική αχλαδιά

Σκοπός των Chalmers et al. (1992), ήταν να μελετήσουν και να υπολογίσουν τις υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας του δέντρου Ασιατικής αχλαδιάς (*Pyrus serotina* var. *Culta*), καθώς μέχρι τότε δεν υπήρχαν στοιχεία ή σχετικές μελέτες.

Τα Λυσίμετρα που χρησιμοποίησαν για τον παραπάνω σκοπό, κατασκευάστηκαν στο Πανεπιστήμιο Massey, στην Νέα Ζηλανδία (<https://www.massey.ac.nz/>). Τα μηχανήματα αυτά, λειτουργούν βασει της συλλογής και ζύγισης του αποστραγγιζόμενου νερού και όχι της ζύγισης ολόκληρου του συστήματος Λυσίμετρου/Περιεχόμενου εδάφους/Φερόμενων Φυτών. Είναι δηλαδή μη-ζυγιστικά, στραγγιστικά λυσίμετρα. Τα Λυσίμετρα αυτού του τύπου, αρχικά μετρούν το νερό που παρέχεται στα δέντρα μέσω της άρδευσης, έπειτα συλλέγουν και

ζυγίζουν το νερό που διηθείται και τέλος, υπολογίζεται έτσι η τιμή της Εξατμισοδιαπνοής μέσω της αρχής διατήρησης του υδατικού ισοζυγίου.

Δώδεκα Λυσίμετρα του παραπάνω τύπου, τοποθετήθηκαν σε αγρό έκτασης 1,1 ha, και συγκεκριμένα σε οπωρώνα του είδους της Ασιατικής αχλαδιάς *Pyrus serotina* var. *culta*.

Το δοχείο κάθε Λυσίμετρου που χρησιμοποίησαν, είναι κατασκευασμένο από μέταλλο, έχει κυλινδρικό σχήμα, με διάμετρο 1 m και βάθος 1,2 m. Το μεταλλικό του κέλυφος περιβάλλεται από μια θήκη τσιμέντου, προκειμένου να αφήνει ίση απόσταση 1,2 m, μεταξύ των δέντρων στην ίδια σειρά και απόσταση 5m μεταξύ των σειρών της καλλιέργειας. Το άνω χείλος του Λυσίμετρου προεξέχει του επιπέδου του εδάφους περίπου 10 cm.

Ο πυθμένας του Λυσίμετρου έχει σχήμα κώνου, ύψους 20 cm. Η κατάληξη του συνδέεται σε πλαστική σωλήνα, η οποία οδηγεί το αποστραγγιζόμενο νερό στην έξοδο του Λυσίμετρου για την συλλογή και ζύγιση αυτού.

Όσον αφορά στο εσωτερικό του Λυσίμετρου, ο πυθμένας του είναι καλυμμένος από ένα στρώμα άμμου ύψους 20 cm που λειτουργεί ως φίλτρο διευκολύνοντας την αποστράγγιση του υπερκείμενου χώματος. Σε οκτώ από τα Λυσίμετρα τοποθετήθηκε δείγμα εδάφους διαταραγμένο (όχι μονολιθικό) με πυκνότητα 1,44 g/cm³, σε αλληπάλληλα στρώματα των 5-10 cm. Στα υπόλοιπα Λυσίμετρα τοποθετήθηκε πάνω από το στρώμα της άμμου, χονδρόκοκκη άμμος ή χαλίκι σε στρώμα ύψους 40 cm και το υπόλοιπο στρώμα εδάφους 60 cm όμοιο με των άλλων Λυσίμετρων. Έχει παρατηρηθεί ότι το έδαφος μεικτού προφίλ, που απαντάται φυσικά στη γύρω περιοχή, περιορίζει την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος καλλιεργειών καλαμποκιού και κτηνοτροφικών φυτών και συγκεκριμένα στα σημεία πάνω από την χονδρόκοκκη άμμο.

Σε κάθε Λυσίμετρο φυτεύτηκε ένα δέντρο Ασιατικής αχλαδιάς. Το νερό στα δέντρα παρέχονταν από κλειστό σύστημα άρδευσης τροφοδοτούμενο από δεξαμενή 9.000 m³ στην οποία διαλύονταν τα απαραίτητα θρεπτικά για τη λίπανση των δέντρων. Οι σταλάκτες νερού ισαπέχουν μεταξύ τους σε κύκλο 0,3 m από τον κορμό. Για την αποφυγή της Θέρμανσης του εδάφους στην επιφάνεια του Λυσίμετρου και την αύξηση της εξατμίσης αλλά και την αποτροπή της εισόδου στο Λυσίμετρο νερού από κατακρημνίσεις, τοποθετήθηκε αδιαφανές υλικό που αντανακλούσε τις ακτίνες και την θερμότητα του ήλιου και εμπόδιζε το νερό της βροχής καλύπτοντας την ελεύθερη επιφάνεια.

Δίπλα σε κάθε Λυσίμετρο υπήρχε ένας υπόγειος χώρος όπου φιλοξενούσε από έναν ανατρεπόμενο κάδο συλλογής νερού (tipping-bucket gauge). Σε κάθε έναν από αυτούς τους κάδους καταλήγει μέσω πλαστικού σωλήνα το νερό του Λυσίμετρου που αποστραγγίζεται. Ο κάδος διαθέτει μηχανισμό καταγραφής όπου καταχωρεί μια εγγραφή (παλμό) για κάθε 5 ml νερού. Έπειτα, το νερό αυτό οδηγείται σε κάδο απόρριψης από όπου και αντλείται στην επιφάνεια του αγρού και απομακρύνεται.

Τα δεδομένα άρδευσης και αποστράγγισης μετρούνται από αισθητήρες μέτρησης ροής (flow meters) και στην συνέχεια καταγράφονται αυτόματα σε έναν multitasking καταγραφέα που ουσιαστικά ελέγχει την λειτουργία των Λυσίμετρων. Τα παραπάνω δεδομένα συλλέγονται σε ωριαία διαστήματα. Εφόσον συγκεντρωθούν τα ημερήσια στοιχεία που αφορούν στην ποσότητα άρδευσης και αποστράγγισης από κάθε Λυσίμετρο, αναλύονται ομαδοποιημένα ανά εβδομαδιαία διαστήματα.

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής πραγματοποιείται έμμεσα από την σχέση:

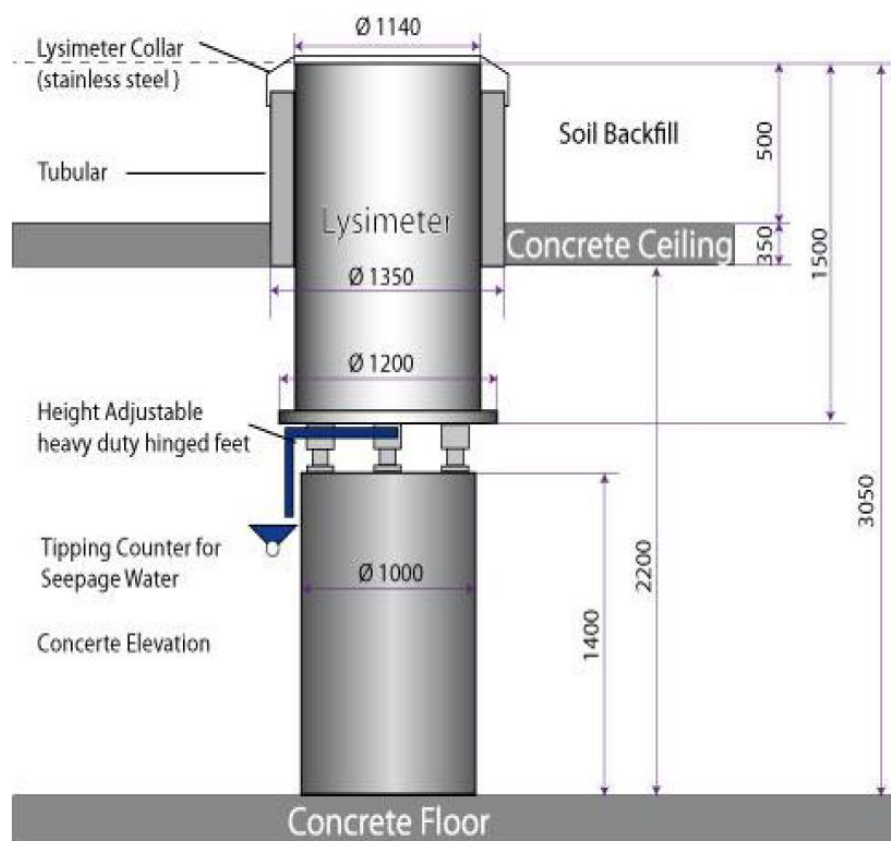
$$ET = I - \Delta W - D$$

όπου I είναι η ποσότητα νερού άρδευσης, ΔW είναι η μεταβολή της υγρασίας του εδάφους και D είναι η ποσότητα του νερού της αποστράγγισης. Ο υπολογισμός του ΔW πραγματοποιείται μέσω της μέτρησης της εδαφικής υγρασίας με την χρήση συσκευής νετρονίων Neutron Hydroprobe 503DR (Ward & Wittman, 2003). Οι καθετήρες της συσκευής νετρονίων τοποθετούνται σε απόσταση 0,5 m από τον κορμό του δέντρου και σε βάθος από 0,2 m έως 1,0 m ανά διαστήματα των 20 cm.

3.3.2 Κυλινδρικό στραγγιστικό λυσίμετρο όγκου 1,5 m³

Τα στραγγιστικά Λυσίμετρα που περιγράφονται σε αυτή την παράγραφο (Εικόνα 25), προέρχονται από την εργασία των Prasuhn et al. (2016). Τα Λυσίμετρα αυτά βρίσκονται στον Γεωπονικό Ερευνητικό Σταθμό Agroscope, στο Reckenholz της Ζυρίχης, Ελβετία.

Η επιφάνεια τους έχει εμβαδόν 1 m³ και το βάθος τους είναι 1,50 m. Ο όγκος τους είναι 1,50 m³. Τα λυσίμετρα αυτά περιέχουν μονολιθικό (αδιατάρακτο) δείγμα εδάφους από την επιφάνεια έως το βάθος των 1,35 m ενώ στο βαθύτερο σημείο που αντιστοιχεί στο υπόλοιπο τμήμα του στρώματος της στήλης του Λυσίμετρου υπάρχει ένα στρώμα 15 cm αποτελούμενο από χαλαζία και χαλίκια για την αποτελεσματική αποστράγγιση του υπερκείμενου εδάφους. Το αποστραγγιζόμενο νερό μετρείται με την βοήθεια υδρόμετρων και ογκομετρημένων δοχείων συλλογής νερού (υδατομετρητές) όγκου 100 ml. Στηρίζονται σε τσιμεντένιες κυλινδρικές βάσεις και οριζοντιώνονται με την βοήθεια τριών ρυθμιζόμενων καθ' ύψος βάσεων μεταξύ της τσιμεντένιας βάσης και του λυσίμετρου. Κάτω από τον χώρο που έχουν τοποθετηθεί τα λυσίμετρα, υπάρχει υπόγεια αίθουσα η οποία είναι επισκέψιμη και μπορεί κανείς εύκολα να παρατηρήσει και να επιθεωρήσει από κοντά τα λυσίμετρα και τα μηχανήματα που τα συνοδεύουν.



Εικόνα 25. Σχέδιο των στραγγιστικών Λυσίμετρων. Πηγή: Prasuhn et al. (2016)

3.4 Ζυγιστικά Λυσίμετρα από Μέταλλο και Τσιμέντο

3.4.1 Ζυγιστικό Λυσίμετρο όγκου 19,40 m³ με Αμυγδαλιά

Η αποτελεσματική διαχείριση του νερού είναι απαραίτητη για να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα της αρδευόμενης γεωργικής παραγωγής. Ο ακριβής προσδιορισμός των απαιτήσεων σε νερό μιας καλλιέργειας είναι το πρώτο βήμα για την επίτευξη του παραπάνω σκοπού. Η χρήση Λυσίμετρων θεωρείται μια από τις μεθόδους που παρέχει ακρίβεια για άμεση μέτρηση της Εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c (Lorite et al., 2012).

Στο Πειραματικό Γεωπονικό Κέντρο “Alameda del Obispo” στην Κόρντομπα της Ισπανίας, κατασκευάστηκε ζυγιστικό Λυσίμετρο όγκου 19,40 m³, για την μέτρηση της Εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας (ET_c) Αμυγδαλιάς (*Prunus dulcis* cv Guara) και τοποθετήθηκε σε αγρόκτημα όπου καλλιεργούνται δέντρα της παραπάνω ποικιλίας. Η θέση του Λυσίμετρου είναι περίπου στην μέση του αγροκτήματος. Οι διαστάσεις του λυσίμετρου είναι 3 m μήκος x 3 m πλάτος x 2.15 m βάθος. Το λυσίμετρο φέρει ένα δέντρο αμυγδαλιάς, της ίδιας ποικιλίας και ηλικίας με τα υπόλοιπα δέντρα του αγροκτήματος.

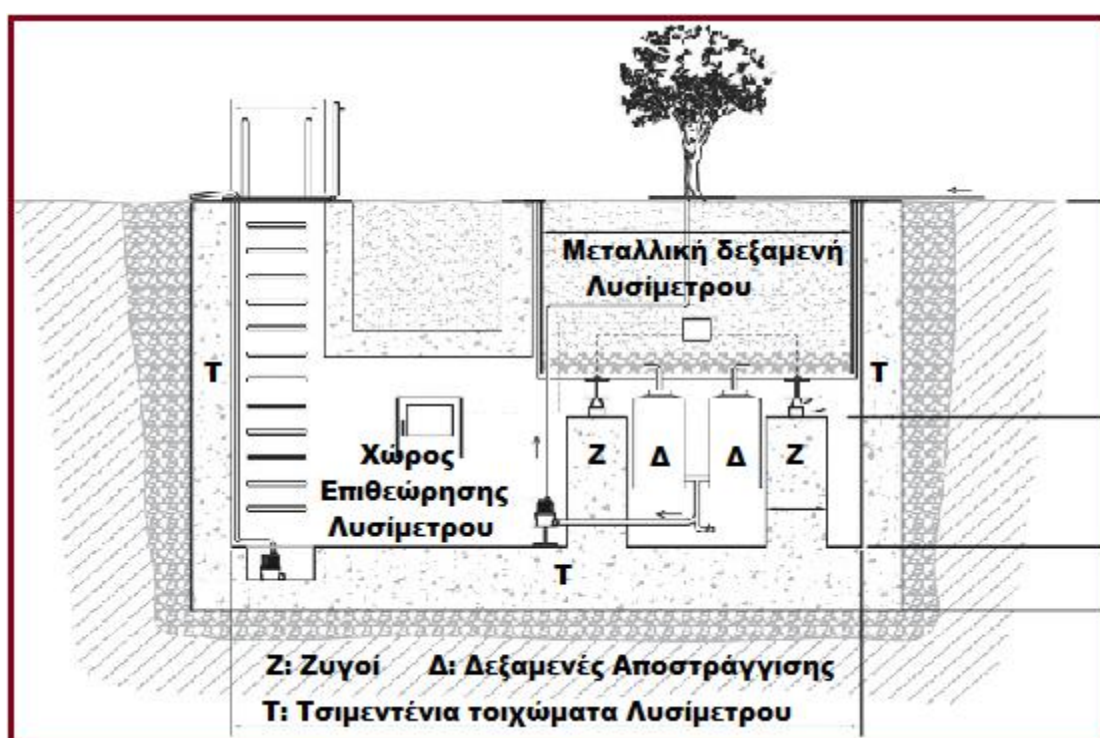
Η κατασκευή του λυσίμετρου μαζί με τον χρόνο ρύθμισης της λειτουργίας του διήρκεσε ένα έτος και τρεις μήνες. Το σκάμμα που δημιουργήθηκε για να φιλοξενήσει ολόκληρη την

κατασκευή του λυσιμετρικού συστήματος είχε όγκο περίπου 100 m³. Λόγω της εκτεταμένης ομοιογένειας της σύστασης του εδάφους στην περιοχή, δεν ήταν απαραίτητη η διατήρηση αδιατάρακτου του εδαφικού δείγματος που τοποθετήθηκε στην συνέχεια στο εσωτερικό του λυσίμετρου. Η πρακτική αυτή ενισχύεται από την άποψη ότι αν τα φερόμενα δέντρα σε ένα λυσίμετρο έχουν ανεπτυγμένο ριζικό σύστημα και η παροχή νερού και θρεπτικών είναι επαρκής, τότε δεν επηρεάζεται από την σύνθεση του εδαφικού δείγματος η πρόσληψη του νερού και των θρεπτικών από το ριζικό σύστημα του δέντρου αυτού. Τελικά εκτός από το στρώμα της επιφάνειας ύψους 20 cm, το υπόλοιπο εδαφικό δείγμα τοποθετήθηκε τυχαία με την διαφορά ότι καταβρέχονταν μέχρι κορεσμού ανά στρώματα των 30-40 cm έτσι ώστε να επιτευχθεί η αρχική του πυκνότητα (Lorite et al., 2012).

Ο κύριος χώρος που φιλοξενεί το λυσίμετρο, τους μηχανισμούς ζύγισης, τα όργανα καταγραφής και την αίθουσα που μπορεί το προσωπικό να επιθεωρήσει το σύστημα του λυσίμετρου, είναι κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι συνολικές του διαστάσεις είναι 4.3 m μήκος x 3.9 m πλάτος x 4 m βάθος. Η δεξαμενή του εδαφικού δείγματος του λυσίμετρου είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο ατσάλι και έχει όγκο 19.40 m³ (διαστάσεις 3 m x 3 m x 2,15 m). Το βάθος από το οποίο το ριζικό σύστημα ενός δέντρου, δύναται να αντλεί νερό ενδεχομένως να φτάνει ή/και να ξεπερνά τα 2 m βάθος. Για το λόγο αυτό, το βάθος του λυσίμετρου φτάνει τα 2,15 m. Στον πυθμένα του λυσίμετρου, κάτω από το κατώτερο τμήμα του εδαφικού δείγματος, τοποθετήθηκε σύστημα αποστράγγισης του εδαφικού νερού για την αποφυγή φαινομένων κορεσμού και δημιουργίας πλημμυρικών συνθηκών. Το σύστημα αποστράγγισης αποτελείται από δίκτυο διάτρητων σωλήνων διαμέτρου 2 cm, βρίσκεται μέσα σε ένα στρώμα από χαλίκια διαμέτρου 1-2 cm. Το στρώμα από χαλίκια έχει ύψος 20 cm και χωρίζεται από το εδαφικό δείγμα με ειδικό ύφασμα (geotextile). Το αποστραγγιζόμενο νερό, συλλέγεται από τις διάτρητες σωλήνες και οδηγείται σε δύο πλαστικές δεξαμενές που είναι αναρτημένες στην μεταλλική δεξαμενή του λυσίμετρου. Η κάθε μια πλαστική δεξαμενή έχει χωρητικότητα 200 l, είναι προσβάσιμες από τον χώρο επιθεώρησης και συνδέονται με σωληνώσεις στο σύστημα άρδευσης του λυσίμετρου (Εικόνα 26).

Το κενό μεταξύ του τσιμεντένιου τοιχώματος και της μεταλλικής δεξαμενής είναι μικρότερο του 1 cm, ώστε να αποφεύγεται η αλλοίωση της ενεργειακής ισορροπίας του συστήματος. Στην επιφάνεια του εδάφους, το κενό αυτό έχει καλυφθεί από εύκαμπτη και αδιαπέρατη πλαστική μεμβράνη PVC. Ολόκληρη η μεταλλική δεξαμενή του λυσίμετρου με το εδαφικό δείγμα, στηρίζεται σε τέσσερις ζυγούς, ικανότητας ζύγισης 10 t έκαστος, συνδεδεμένους μεταξύ τους σειριακά και τοποθετημένους σε ακτινωτή συμμετρία γύρω από το κέντρο βάρους της δεξαμενής. Η διάταξη αυτή των ζυγών, βοηθά να αντισταθμίζεται η λειτουργία τους καθώς όταν από τον άνεμο το σύστημα ωθείται προς μια πλευρά, η ζύγιση να δύναται να πραγματοποιηθεί από τους ζυγούς αυτούς πάνω στους οποίους ρέπει το βάρος του

συστήματος. Τα δεδομένα της ζύγισης μεταφέρονται σε ηλεκτρονικά όργανα που διαθέτουν οθόνη παρακολούθησης και ψηφιακούς καταγραφείς για την αποθήκευσή τους. Η ζύγιση πραγματοποιείται ανά δευτερόλεπτο, ενώ στη συνέχεια υπολογίζεται αυτόματα και καταγράφεται η μέση τιμή ζύγισης ανά διαστήματα 5 min. Επίσης υπολογίζεται η τυπική απόκλιση για κάθε 300 συνεχόμενες μετρήσεις για την εξάλειψη τυχόν παρεμβολές από την δράση του ανέμου στις τιμές ζύγισης. Το λυσίμετρο αυτό έχει ζυγιστική ανάλυση ίση με 0.056mm ύψους νερού. Δεδομένου ότι το σχετικό σφάλμα της μέτρησης μειώνεται με το μέγεθος της μετρούμενης Εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c , το μέγεθος της ανάλυσης που προκύπτει από αυτό το λυσίμετρο είναι επαρκές για τη μέτρηση ημερήσιων μεταβολών της ET_c , αλλά ακόμη θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για μικρότερα χρονικά διαστήματα (Lorite et al., 2012).



Εικόνα 26. Σχέδιο Μεταλλικού Ζυγιστικού Λυσίμετρου. Πηγή: Lorite et al (2012)

Τα δέντρα αμυγδαλιάς μέσα στο αγρόκτημα έχουν φυτευτεί σε σειρές με αποστάσεις 7 m x 6 m, και έτσι το αγρόκτημα περιέχει συνολικά 1300 αμυγδαλιές οι οποίες είναι αρδευόμενες από σύστημα στάγδην άρδευσης που διαθέτει, κάθε ένα μέτρο απόστασης, ένα σταλάκτη με παροχή ύδατος 2 l/h. Επομένως αντιστοιχούν έξι σταλάκτες για κάθε δέντρο. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο αρδεύεται και το δέντρο αμυγδαλιάς που φέρει το λυσίμετρο.

Σε απόσταση 600 m από την θέση του λυσίμετρου, εντός έκτασης φυτεμένης με χλόη ύψους 12 cm, υπάρχει εγκατεστημένος ένας αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός για την καταγραφή βασικών μετεωρολογικών δεδομένων (ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία, σχετική υγρασία και θερμοκρασία περιβάλλοντος). Τα δεδομένα που

καταγράφει ο σταθμός χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_{ref} (Lorite et al., 2012).

3.5 Στραγγιστικά Λυσίμετρα από Μέταλλο

3.5.1 Μεταλλικό Στραγγιστικό Λυσίμετρο όγκου 24 m³

Η ακρίβεια στους υπολογισμούς και στον προγραμματισμό των αρδευτικών εφαρμογών μιας καλλιέργειας παίζει σημαντικό ρόλο στην εξοικονόμηση νερού και στην αποφυγή της ρύπανσης των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων από την περίσσεια των λιπασμάτων Αζώτου και Φωσφόρου. Ο υπολογισμός και η χρήση της Εξατμισοδιαπνοής Καλλιέργειας ET_c σκοπεύει στον προγραμματισμό της άρδευσης της εκάστοτε καλλιέργειας. Εντούτοις, η ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων της άρδευσης σχετικά με την κυκλοφορία των θρεπτικών συστατικών από λιπάσματα ή/και των βλαβερών για το περιβάλλον ουσιών από τα φυτοφάρμακα, είναι μια δύσκολη διαδικασία. (Shukla et al., 2006).

Η πολιτεία της Φλόριντα, ΗΠΑ, αποτελεί μια σημαντική περιοχή για την αγροτική παραγωγή της χώρας. Λόγω της μεγάλης αστικοποίησης και των αυξημένων αναγκών σε νερό για την άρδευση των καλλιεργειών οπωροκηπευτικών, η πολιτεία πρόκειται στο εγγύς μέλλον να έρθει αντιμέτωπη με την έλλειψη νερού αλλά και με προβλήματα που άπτονται της ποιότητας του διαθέσιμου νερού, τόσο για ανάγκες ύδρευσης όσο και άρδευσης. Στην παρούσα χρονική περίοδο, οι παραγωγοί προγραμματίζουν τις αρδευτικές τους εφαρμογές σύμφωνα με τις τιμές της ET_c , από την καλλιεργητική τους εμπειρία, από προηγούμενα ημερολογιακά και εποχικά συμβάντα και από την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας με τενσιόμετρα.

Η ανάγκη για βελτίωση του αρδευτικού προγραμματισμού της καλλιέργειας καρπουζιού, η οποία αποτελεί την δεύτερη σε έκταση μεγαλύτερη καλλιέργεια στην Φλόριντα, οδήγησε στην χρήση στραγγιστικών λυσίμετρων μεγάλου όγκου για την συλλογή περισσότερων δεδομένων της ET_c της συγκεκριμένης καλλιέργειας. Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν στην ποσοτικοποίηση της ET_c της καλλιέργειας καρπουζιού στην περιοχή με σκοπό την βελτίωση της απόδοσης της στάγδην άρδευσης και του περιορισμού της άσκοπης διήθησης θρεπτικών ουσιών από την λίπανση της καλλιέργειας στο εσωτερικό του εδάφους. Τα Λυσίμετρα κατασκευάστηκαν και τοποθετήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Southwest Florida Research Center, University of Florida στην πόλη Immokalee (Shukla et al., 2006).

Κάθε ένα από τα Λυσίμετρα αυτά είχε διαστάσεις 4.85 m μήκος x 3.65 m πλάτος x 1.35 m βάθος. Ο συνολικός όγκος τους ανέρχεται σε περίπου 24 m³. Κατασκευάστηκαν λαμβάνοντας υπόψιν τις καλλιεργητικές πρακτικές και τις ανάγκες της καλλιέργειας καρπουζιού στην Νότια Φλόριντα η οποία γίνεται σε υπερυψωμένα παρτέρια (raised beds) που καλύπτονται από πλαστικό υλικό. Οι αποστάσεις μεταξύ των παρτερίων είναι 1.2 m x 1.8 m. Το λυσίμετρο λόγω του μεγάλου εμβαδού της ελεύθερης επιφάνειας του φιλοξένησε δύο

τέτοια παρτέρια (Εικόνα 28). Σε κάθε παρτέρι φυτεύτηκαν τρία φυτά καρπουζιάς και συνολικά στο λυσίμετρο έξι φυτά, με σκοπό την διαθεσιμότητα αρκετών φυτών σε περίπτωση απώλειας ενός ή περισσότερων από ασθένειες. Τα έξι αυτά όμοια μεταξύ τους λυσίμετρα τοποθετήθηκαν στην μέση ενός αγροκτήματος έκτασης 83 στρεμμάτων (0,83 ha).

Η κατασκευή του Λυσίμετρου έγινε από ασάλινη λαμαρίνα πάχους 3,175 mm. Η κατασκευή ενισχύθηκε τόσο στα πλαϊνά όσο και στον πυθμένα από εξωτερικό μεταλλικό σκελετό. Στην λαμαρίνα του πυθμένα του λυσίμετρου δόθηκε κλίση ώστε όλο το αποστραγγιζόμενο νερό να καταλήγει στο κέντρο της κατασκευής και από εκεί να απομακρύνεται μέσω ενός συστήματος συλλογής και απομάκρυνσης του αποστραγγιζόμενου νερού. Έτσι, το νερό που συλλέγεται αποτελεί την συνολική αποστραγγιζόμενη ποσότητα νερού του λυσίμετρου (Shukla et al., 2006).

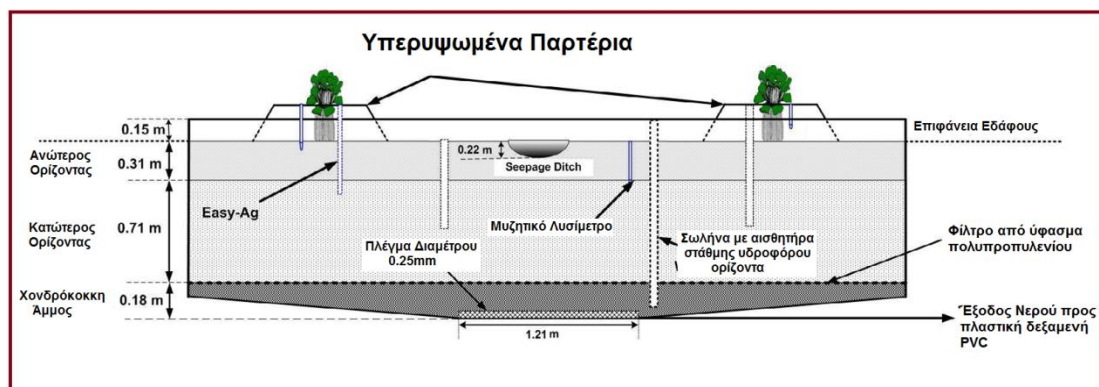
Στη βάση του μεταλλικού λυσίμετρου κολλήθηκαν μεταλλικά πόδια ώστε να πατήσει σταθερά κατά την τοποθέτηση του στο σκάμμα που το φιλοξένησε (Εικόνα 27). Για την συλλογή του επιφανειακού νερού απορροής από πλυμμηρικά φαινόμενα βροχόπτωσης, κατασκευάστηκαν στην εξωτερική πλευρά του λυσίμετρου δύο συλλογείς νερού από λαμαρίνα ίδιου πάχους με το λυσίμετρο διαστάσεων 0,46 m x 0,46 m x 0,46 m. Η είσοδος τους ευθυγραμμίζεται με την επιφάνεια του εδάφους στο λυσίμετρο επιτρέποντας την απορροή του επιφανειακού νερού στο εσωτερικό τους.



Εικόνα 27. Μεταλλικό Στραγγιστικό Λυσίμετρο: διακρίνεται η κλίση του πυθμένα για την συγκέντρωση του αποστραγγιζόμενου νερού. Πηγή: Shukla et al. (2006)

Τα λυσίμετρα αυτά αποστραγγίζονται με την δράση της βαρύτητας. Η απομάκρυνση του νερού από το λυσίμετρο γίνεται μέσα από μια μεταλλική σωλήνα μήκους 1,22 m και διαμέτρου 5,1 cm που ξεκινά από μια λεκάνη συλλογής νερού με πλέγμα 0,25 mm στο επάνω άνοιγμα της, τοποθετημένη στον πυθμένα του λυσίμετρου (Εικόνα 27). Η σωλήνα αποστράγγισης καταλήγει σε μια δεξαμενή κατασκευασμένη από πλαστική σωλήνα PVC διαμέτρου 20 cm, κλεισμένη στο κάτω άκρο της από ένα κάλυμμα PVC. Ο πυθμένας της μικρής αυτής δεξαμενής PVC, βρίσκεται στο ίδιο ύψος με την λεκάνη συλλογής νερού στον πυθμένα του λυσίμετρου. Η άντληση του νερού από την δεξαμενή PVC γίνεται με μια ηλεκτρική αντλία 12 V, με ρυθμό άντλησης 6.25 l/min, η λειτουργία της οποίας ελέγχεται αυτόματα από έναν αισθητήρα στάθμης νερού τοποθετημένο σε μια κατακόρυφη διάτρητη σωλήνα που βρίσκεται μέσα στο εδαφικό δείγμα του λυσίμετρου. Η στάθμη του νερού στην σωλήνα PVC ορίζεται σύμφωνα με το επιθυμητό επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα στο εσωτερικό του λυσίμετρου.

Το αποστραγγιζόμενο νερό και το νερό της επιφανειακής απορροής, συγκεντρώνονται σε διαφορετικά αποθηκευτικά συστήματα. Ο τελικός τους όγκος σε ένα υποτιθέμενο επεισόδιο έντονης βροχόπτωσης θα μπορούσε να φτάσει τα 2.100 l και 900 l αντίστοιχα μέσα σε 24 h. Για να μειωθεί ο όγκος του νερού που αποθηκεύεται, κατασκευάστηκε και τοποθετήθηκε στο σύστημα συλλογής νερού ένας διαχωριστής νερού, που διαιρούσε το αποστραγγιζόμενο νερό και το νερό της απορροής σε δέκα ισότιμα κλάσματα, κρατώντας το ένα δέκατο της αρχικής ποσότητας του νερού. Το υπόλοιπο απορρίπτονταν μέσω ενός υδρόμετρου που μετρούσε τον όγκο του. Τελικά μια δεξαμενή 210 l ήταν αρκετή για την αποθήκευση του αποστραγγιζόμενου νερού και του νερού της επιφανειακής απορροής. Οι μελετητές θεώρησαν ότι ο τελικός όγκος του συλλεγόμενου νερού είχε τα στοιχεία N και P στις ίδιες αναλογίες με τον αρχικό όγκο νερού πριν αυτός διαχωριστεί σε κλάσματα. Θα μπορούσαν έτσι να εξάγουν ασφαλή συμπεράσματα από τις αναλύσεις τους, για τις αρχικές συγκεντρώσεις αυτών των στοιχείων στο νερό και στο έδαφος του Λυσίμετρου και με την βοήθεια των μετρήσεων του υδρόμετρου, με αναγωγή της συγκέντρωσης των N και P στον συνολικό όγκο του απορριπτόμενου νερού (Shukla et al., 2006).



Εικόνα 28. Σχέδιο Στραγγιστικού Λυσίμετρου. Πηγή: Shukla et al (2006)

Πριν την τοποθέτηση του Λυσίμετρου, ο πυθμένας του σκάμματος στρώθηκε με χαλίκι. Το στρώμα αυτό είχε ύψος 8 cm και αποτέλεσε σταθερό υπόβαθρο για την τοποθέτηση του λυσίμετρου. Τα πόδια του λυσίμετρου πάτησαν επάνω σε τσιμεντόλιθους που τοποθετήθηκαν επάνω στο χαλίκι και οριζοντιώθηκαν με την βοήθεια μηχανήματος αλφαδιάσματος laser. Στην συνέχεια χύθηκε υγρό τσιμέντο για να καλυφθεί το κενό μεταξύ του στρώματος χαλικιού και της κάτω πλευράς του μεταλλικού πυθμένα του λυσίμετρου (Shukla et al., 2006).

Το δείγμα εδάφους που τοποθετήθηκε στο λυσίμετρο έπρεπε να περιλαμβάνει τους πλέον γόνιμους οριζοντες εδάφους της περιοχής, οι οποίοι φθάνουν μέχρι το βάθος του 1 m. Χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί εδαφικοί οριζοντες. Ο ανώτερος ήταν 30 cm και ο βαθύτερος 70 cm. Επιπλέον τοποθετήθηκε ένα τελικό στρώμα χονδρόκοκκου υλικού κάτω από το εδαφικό δείγμα του λυσίμετρου το οποίο θα εξυπηρετούσε την αποστράγγιση του υπερκείμενου εδάφους. Επιλέχτηκε να τοποθετηθεί ένα στρώμα χονδρόκοκκης άμμου πάχους 18cm, που θα λειτουργούσε σαν αποστραγγιστικό υλικό. Επάνω από την άμμο τοποθετήθηκε ένα φύλλο συνθετικού υφάσματος μονόκλωνου νήματος από πολυπροπυλένιο, ώστε τα σωματίδια του εδάφους να μην εισέρχονται στο αποστραγγιστικό σύστημα (Εικόνα 28). Στην συνέχεια, η τοποθέτηση του δείγματος εδάφους έγινε σταδιακά και συνοδεύτηκε με επαρκή κατάβρεξή του, ώστε το έδαφος να αποκτήσει έναν βαθμό πυκνότητας όμοιο με αυτόν του αδιατάρακτου, γύρω από το λυσίμετρο.

Για την μέτρηση της εδαφικής υγρασίας στο εσωτερικό του λυσίμετρου, τοποθετήθηκαν ειδικοί σταθεροί αισθητήρες υγρασίας στα 10 cm, 20 cm, 30 cm και 50 cm βάθος του εδαφικού προφίλ του λυσίμετρου, ενώ χρησιμοποιήθηκαν και φορητοί αισθητήρες που τοποθετούνταν επιτόπου στο επιθυμητό βάθος του εδάφους. Επίσης, για την ανάλυση της ποιότητας του εδαφικού νερού στην περιοχή του ριζικού συστήματος των φυτών, χρησιμοποιήθηκαν 2 μυζητικά λυσίμετρα, που τοποθετήθηκαν κοντά στις ρίζες φυτών σε δύο παρτέρια, και ένα μυζητικό λυσίμετρο μάρτυρας σε σημείο εκτός των φυτεμένων παρτεριών. Για την μέτρηση του όγκου του αρδευόμενου νερού χρησιμοποιήθηκε υδρόμετρο.

Οι μετρήσεις καταγράφονταν από ηλεκτρονικά ψηφιακά όργανα και οι υπολογισμοί των ποσοτήτων του νερού άρδευσης, του νερού απορροής και αποστράγγισης καθώς και οι αναλύσεις για τον προσδιορισμό των ποσοστών N και P στο συλλεγόμενο δείγμα νερού γίνονταν σε 14ήμερη βάση (Shukla et al, 2006).

3.6 Στραγγιστικά Λυσίμετρα από Πλαστικό

3.6.1 Πλαστικό Στραγγιστικό Λυσίμετρο όγκου 0,60 m³ με φυτά καλαμποκιού

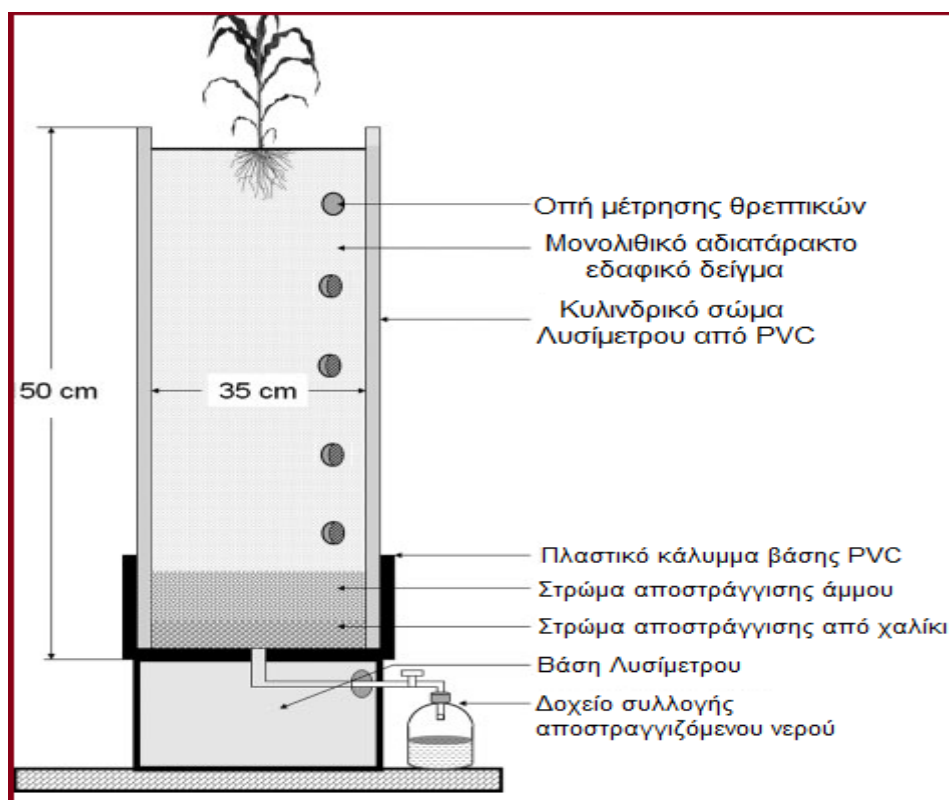
Σε ξηρές περιοχές ή περιοχές με μικρή διαθεσιμότητα νερού, η γεωργική παραγωγικότητα και η βιωσιμότητα του περιβάλλοντος εξαρτάται από την ορθολογική χρήση του ελάχιστου διαθέσιμου νερού. Σε αντίστοιχες περιοχές της βόρειας Κίνας, η πληθυσμιακή και η οικονομική άνοδος, προκαλεί αυξανόμενη ζήτηση νερού. Οι παραγωγοί καλλιεργειών καλαμποκιού, προκειμένου να κάνουν αποτελεσματικότερη χρήση του διαθέσιμου νερού, αλλά και να περιορίσουν την άσκοπη χρήση χημικών λιπασμάτων, δείχνουν αυξανόμενο ενδιαφέρον στην εφαρμογή μιας νέας μεθόδου αποθήκευσης και σταδιακής παροχής του νερού άρδευσης και των θρεπτικών συστατικών από τα λιπάσματα, τοποθετώντας μέσα στο έδαφος πολυμερή υπεραπορροφητικά υλικά νερού και θρεπτικών συστατικών (super absorbent polymer-SAP) Τα υλικά αυτά απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού και θρεπτικών, δεν τα αφήνουν να χαθούν ανεκμετάλλευτα στο έδαφος, και τα αποδίδουν σταδιακά στο φυτό, όταν αυτό τα έχει ανάγκη (Islam et al., 2011).

Τα λυσίμετρα που αναλύονται στην παρούσα ενότητα, χρησιμοποιήθηκαν σε πειράματα για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της χρήσης SAP στην αύξηση της αποδοτικότητας των λιπασμάτων και του νερού στις καλλιέργειες. Εφόσον ισχύει η παραπάνω υπόθεση, τότε αυτό θα σήμαινε ότι η ανάπτυξη των φυτών μπορεί να βελτιωθεί με μειωμένες ποσότητες νερού και θρεπτικών (Islam et al., 2011).

Για τις ανάγκες του πειράματος των Islam et al. (2011), χρησιμοποιήθηκαν 36 πλαστικά κυλινδρικά λυσίμετρα όγκου 0,60 m³ τα οποία τοποθετήθηκαν στις εγκαταστάσεις του National Experimental Station for Precision Agriculture στο Πεκίνο, Κίνα. Το κυρίως τμήμα τους ήταν κατασκευασμένο από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), είχε ύψος 1,50 m και εσωτερική διάμετρο 35 cm. Η ελεύθερη επιφάνεια καθενός είχε εμβαδόν 0,963 m² ενώ το περιεχόμενο εδαφικό δείγμα έχει ληφθεί μονολιθικά και επομένως είναι αδιατάρακτο δείγμα εδάφους (Εικόνα 29). Η διαδικασία λήψης του μονολιθικού δείγματος έγινε με την βοήθεια ενός κυλινδρικού καλουπιού το οποίο εισχωρούσε σταδιακά στο έδαφος ενώ ταυτόχρονα απομακρύνονταν το χώμα γύρω από αυτό με προσεκτική εκσκαφή. Όταν το καλούπι έφτανε σε βάθος 1,45 m το χώμα στο τέλος του, κόβονταν προσεκτικά και το κυλινδρικό δείγμα εδάφους λαμβάνονταν χωρίς να διαταραχτεί η συνοχή του. Για την διευκόλυνση της αποστράγγισης του εδαφικού δείγματος, στον πυθμένα των λυσίμετρων είχε τοποθετηθεί

αρχικά ένα στρώμα χαλικιού, πάχους 10 cm και επάνω από αυτό ένα στρώμα άμμου 15 cm. Στην συνέχεια, τοποθετούνταν με προσοχή το μονολιθικό δείγμα εδάφους. Η βάση του λυσίμετρου έκλεινε με ένα πλαστικό κάλυμμα από PVC.

Τα λυσίμετρα τοποθετήθηκαν επάνω σε πλαστικές βάσεις ύψους 50 cm, μέσα σε σκάμμα βάθους 2 m, έτσι ώστε η ελεύθερη επιφάνεια του εδαφικού δείγματος στο εσωτερικό τους, να βρίσκεται στο ίδιο ύψος με το παρακείμενο έδαφος. Αυτό θα εξασφάλιζε ομοιόμορφη ανάπτυξη των φυτών που βρίσκονται μέσα σε αυτά και των φυτών της υπόλοιπης καλλιέργειας. Στον πυθμένα του κάθε λυσίμετρου τοποθετήθηκε εύκαμπτη πλαστική σωλήνα που κατέληγε σε πλαστικό δοχείο, για την απομάκρυνση του αποστραγγιζόμενου νερού. Για την μέτρηση της κατάστασης των θρεπτικών στο εσωτερικό του λυσίμετρου, χρησιμοποιήθηκαν ανακλασίμετρα TDR (όργανα μέτρησης της ισχύος ανάλκασης στο πεδίο του χρόνου), τα οποία τοποθετούνταν μέσα στο κάθε λυσίμετρο από πλάγιες οπές, σε ύψος από την κορυφή προς τον πυθμένα στα 30 cm, στα 50 cm, στα 70 cm, στα 90 cm και στα 110 cm. Οι οπές διατηρούνταν κλειστές με λαστιχένιες τάπες, όταν δεν χρησιμοποιούνταν. Τα πολυμερή υλικά απορρόφησης νερού και θρεπτικών (SAP) τοποθετήθηκαν στα λυσίμετρα σε βάθος 20 cm (Εικόνα 29).



Εικόνα 29. Σχέδιο Πλαστικού Στραγγιστικού Λυσίμετρου. Πηγή: Islam et al. (2011)

Σε κοντινή απόσταση από το σημείο εγκατάστασης των λυσίμετρων, λειτουργούσε ένας αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός που χρησίμευε στην μέτρηση και την καταγραφή της

θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας και των κατακρημνίσεων σε καθημερινή βάση (Islam et al., 2011).

3.7 Στραγγιστικά-ζυγιστικά λυσίμετρα από πλαστικό

3.7.1 Ελεύθερο Πλαστικό Στραγγιστικό-Ζυγιστικό Λυσίμετρο όγκου 2,5 m³ με φυτό ελιάς

Η καλλιέργεια της ελιάς (*Olea europaea*) λόγω της άρδευσης, έχει αυξήσει την παραγωγικότητα της τόσο ανά δέντρο όσο και ανά μονάδα έκτασης καλλιέργειας, ενώ έχει επεκταθεί και σε ξηρές περιοχές όπου η έλλειψη επαρκών βροχοπτώσεων δεν θα υποστήριζαν την αποδοτικότητα ή/και την βιωσιμότητα της καλλιέργειας αυτής. Ωστόσο, παρόλο που η άρδευση αυξάνει την παραγωγή καρπού και παράλληλα τις αποδόσεις σε ελαιόλαδο σε μια ελαιοκαλλιέργεια, πολλές φορές οι αυξημένες αρδευτικές εφαρμογές έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην ποιότητα του παραγόμενου ελαιόλαδου. Αντίθετα, οι συνθήκες περιορισμένης διάθεσης νερού σε κάποια στάδια της ανάπτυξης του καρπού της ελιάς, βελτιστοποιούν την παραγωγή της καλλιέργειας και ταυτόχρονα εξασφαλίζουν ελαιόλαδο υψηλής ποιότητας (Ben-Gal et al., 2010).

Ως εκ τούτου, η μελέτη της βελτιστοποίησης του ρυθμού και της έντασης των αρδευτικών εφαρμογών στην καλλιέργεια της ελιάς, κρίθηκε απαραίτητη, καθώς τα αποτελέσματα της θα βελτιώσουν την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος και θα οδηγήσουν στην αποτελεσματικότερη χρήση του νερού, ιδίως στις περιοχές που η διαθεσιμότητα του είναι περιορισμένη. Οι Ben-Gal et al. (2010) στο πείραμα τους είχαν σκοπό τον υπολογισμό της πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής των δέντρων ελιάς (*Olea europaea* cv Barnea) και την χρησιμοποίηση των τιμών αυτών στην ανάπτυξη μεθόδων μελέτης της συμπεριφοράς των δέντρων ελιάς σε ένα εύρος συνθηκών επάρκειας και έλλειψης νερού.



Εικόνες 30 & 31. Η ελεύθερη (εκτός εδάφους) διάταξη των ζυγιστικών-στραγγιστικών λυσίμετρων Πηγή: Ben-Gal et al. (2010)

Για τις πειραματικές ανάγκες αυτής της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν στραγγιστικά-ζυγιστικά λυσίμετρα, όγκου 2,5 m³, κατασκευασμένα από πλαστικά κυλινδρικά δοχεία πολυαιθυλενίου, που είχαν ύψος 1,4 m και διάμετρο 1,5 m. Το πείραμα έλαβε χώρα στο Gilat Research Center, στην βορειοδυτική πλευρά του Νεγκέβ, Ισραήλ. Το εσωτερικό του κάθε λυσίμετρου ήταν γεμισμένο με αμμοπηλώδες (Loamy sand) έδαφος. Στον πυθμένα του κάθε λυσίμετρου τοποθετήθηκε ένα στρώμα από πετροβάμβακα, ένα πορώδες υλικό με υψηλή υδατική αγωγιμότητα, το οποίο ερχόταν σε άμεση επαφή με το υπερκείμενο εδαφικό δείγμα. Στο κατώτερο τμήμα του λυσίμετρου, συνδέθηκαν τρεις εύκαμπτες πλαστικές σωλήνες για την έξοδο του νερού απορροής, οι οποίες περιείχαν στο εσωτερικό τους πετροβάμβακα. Το σύστημα αποστράγγισης με χρήση πετροβάμβακα, εξασφαλίζει συνεχή απομάκρυνση του αποστραγγιζόμενου νερού από το κατώτερο όριο του εδαφικού δείγματος του λυσίμετρου και συλλογή αυτού, ενώ αποφεύγονται τα φαινόμενα υπερκορεσμού ύδατος (πλημμυρισμός) στον πυθμένα του λυσίμετρου. Η ελεύθερη επιφάνεια των λυσίμετρων σκεπάστηκε με ένα αδιαπέρατο από υγρασία πλαστικό υλικό ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες νερού από το σύστημα του λυσίμετρου λόγω εξάτμισης (Ben-Gal et al., 2010).

Κάθε ένα από τα ζυγισόμενα λυσίμετρα, ήταν χωριστά τοποθετημένο επάνω σε πλατφόρμα ζύγισης, η οποία περιλάμβανε τέσσερις ηλεκτρονικούς ζυγούς συνδεδεμένους μεταξύ τους. Η ρύθμιση των ζυγών στο ζυγιστικό εύρος των 4-5 t, έδιναν στο σύστημα ζύγισης ακρίβεια της τάξης ±15,5 gr. Τα λυσίμετρα και το σύστημα ζύγισης τους, ήταν τοποθετημένα ελεύθερα επάνω στην επιφάνεια του εδάφους. Κάθε λυσίμετρο έφερε στο εσωτερικό του ένα μικρό δέντρο ελιάς (*Olea europaea* cv Barnea) που βρισκόταν εκτός περιόδου καρποφορίας (Εικόνες 30 & 31). Τα φυτά ελιάς αρδεύονταν καθημερινά με ποσότητα νερού που υπερέβαινε τον ρυθμό διαπνοής της προηγούμενης ημέρας κατά περίπου 20%, σύμφωνα με τις τιμές ζύγισης των λυσίμετρων. Την περίοδο διεξαγωγής του πειράματος, δεν υπήρξαν καθόλου βροχοπτώσεις, επομένως δεν εισήλθε στο σύστημα των λυσίμετρων ποσότητα υγρασίας προερχόμενη από κατακρημνίσεις. Η τιμή της *ET* υπολογίζονταν καθημερινά από τις τιμές της άρδευσης *I*, της αποστράγγισης *D*, και της μεταβολής της εδαφικής υγρασίας ΔW , σύμφωνα με την σχέση:

$$ET = I - D - \Delta W$$

Τα μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής συλλέγονταν και καταγράφονταν από έναν σταθμό που βρισκόταν σε απόσταση 200 m από το σημείο εγκατάστασης των λυσίμετρων (Ben-Gal et al., 2010).

3.8 Εμπορικά Λυσίμετρα έτοιμα για χρήση

3.8.1 Μικρά Μυζητικά Λυσίμετρα

Η ρύπανση των εδαφικών υδάτων αποτελεί μεγάλο κίνδυνο στις μέρες μας. Τα μόρια των ρυπογόνων ουσιών μετακινούνται μέσω του εδάφους παρασυρόμενα από το νερό, και μπορούν εύκολα να καταλήξουν σε υδροφορείς τους οποίους θα επιβαρύνουν επικίνδυνα. Τα μικρά μυζητικά λυσίμετρα, αποτελούν ένα σύστημα δειγματολήπτη εδαφικού διαλύματος, εύκολο στην χρήση, που βοηθούν τους επιστήμονες να ελέγχουν την ύπαρξη και την μετακίνηση χημικών ουσιών στο εσωτερικό του εδάφους. Τα μυζητικά λυσίμετρα ανήκουν στην κατηγορία των μικρών, χαμηλού κόστους, λυσίμετρων που χρησιμοποιούνται για την συλλογή του τριχοειδούς νερού ή/και του εδαφικού διαλύματος της ακόρεστης από υγρασία εδαφικής ζώνης του εδάφους (vadoze zone). Τα λυσίμετρα αυτής της κατηγορίας, τοποθετούνται εύκολα στο έδαφος. Απαιτείται όμως προσοχή κατά την τοποθέτησή τους έτσι ώστε το κεραμικό πορώδες δοχείο (ceramic suction cup) συλλογής του δείγματος νερού που διαθέτουν αυτά τα Λυσίμετρα, να είναι σε απόλυτη επαφή με το έδαφος, χωρίς να δημιουργείται κενό μεταξύ τους.

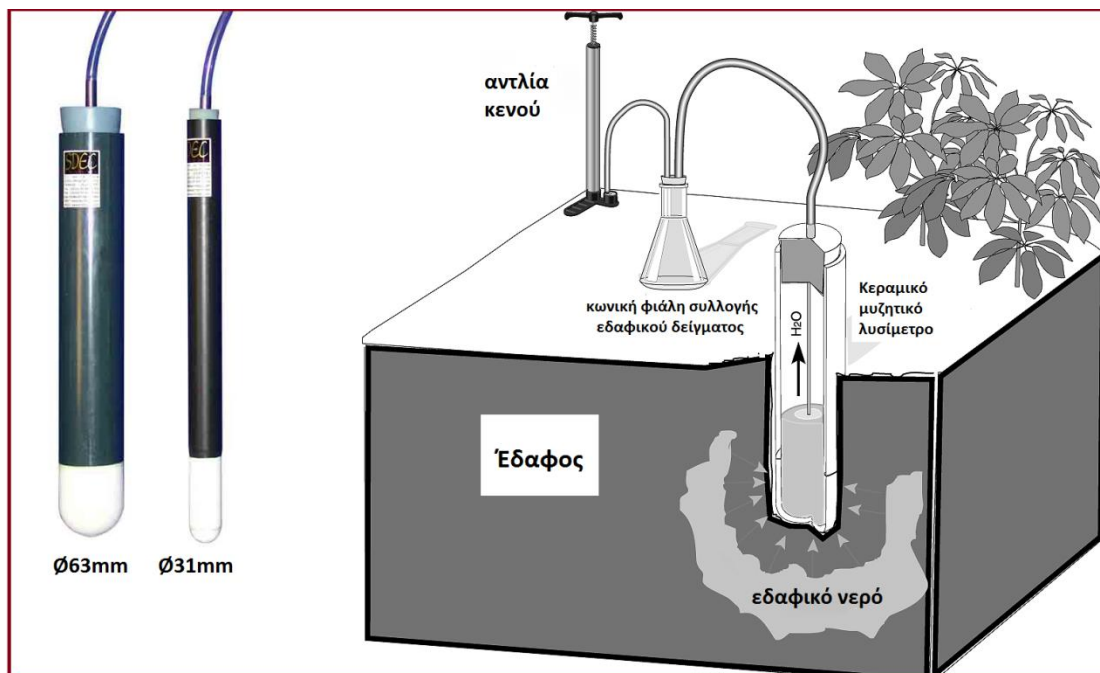
Η εταιρεία Rickly™ (Rickly, 2020) κατασκευάζει δύο τύπους μικρού μυζητικού Λυσίμετρου (Εικόνα 32Α). Ο ένας τύπος συλλέγει δείγμα εδαφικού νερού από βάθος 91 m και ονομάζεται *Deep-Sampling Lysimeter*. Ο δεύτερος τύπος ονομάζεται *Shallow-Sampling Lysimeter* και συλλέγει δείγμα από βάθος 6 m. Τα λυσίμετρα τοποθετούνται μόνιμα στο έδαφος, διαθέτουν διπλό αγωγό στο εσωτερικό τους και η μύζηση της εδαφικής υγρασίας πραγματοποιείται με την εφαρμογή κενού στο λυσίμετρο, χρησιμοποιώντας μια φορητή χειροκίνητη αντλία αέρα. Το μέγεθος των πόρων του κεραμικού δειγματολήπτη είναι 0.446 μm.

Αρχικά απομυζείται το δείγμα εδαφικού νερού υπό συνθήκες κενού. Στην συνέχεια εφαρμόζεται πίεση στον ένα από τους δύο αγωγούς του λυσίμετρου με την χειροκίνητη αντλία, προκειμένου να ανέβει στην επιφάνεια του εδάφους το δείγμα αυτό (Εικόνα 32Β). Η δυνατότητα δειγματοληψίας του Λυσίμετρου ανέρχεται στα 400ml εδαφικού διαλύματος. Σε περίπτωση που η δειγματοληψία πραγματοποιείται από μεγάλο βάθος, η άσκηση πίεσης μπορεί να γίνει με την χρήση μηχανικής αντλίας για καλύτερα αποτελέσματα.



Εικόνα 32. A: Μυζητικό Λυσίμετρο Rickly™ B: Χειροκίνητη Αντλία. Πηγή: Rickly (2020)

Τα κεραμικά μυζητικά λυσίμετρα της εταιρείας SDEC™, αποτελούν ένα σύστημα λυσίμετρου, απλό στην χρήση, για τον έλεγχο των χημικών ουσιών στο εσωτερικό του εδάφους. Η αρχή λειτουργίας τους είναι απλή, όσο και η χρήση τους και το κόστος αγοράς τους πολύ χαμηλό. Το σώμα του λυσίμετρου αποτελείται από έναν κενό σωλήνα PVC, το μήκος του οποίου κυμαίνεται από 15 cm έως 235 cm και εξαρτάται από το επιθυμητό βάθος δειγματοληψίας. Στο άκρο της σωλήνας εφαρμόζεται το σύστημα δειγματοληψίας που φέρει πορώδες κεραμικό εξάρτημα για την αναρρόφηση του εδαφικού διαλύματος. Υπάρχει δυνατότητα επιλογής μεταξύ του τύπου SPS-200-63™ που έχει διάμετρο 63 mm και του τύπου SPS-200-31™ διαμέτρου 31 mm και σχετίζεται με τις ανάγκες σε όγκο δείγματος του εδαφικού ύδατος. Με την εφαρμογή κενού αέρος με αντλία, στο εσωτερικό του λυσίμετρου, το εδαφικό διάλυμα εισέρχεται σε αυτό μέσω του πορώδους κεραμικού άκρου. Έπειτα το δείγμα εδαφικού διαλύματος με την χρήση της αντλίας, μετακινείται σε κωνική φιάλη και μεταφέρεται στο εργαστήριο για ανάλυση (Εικόνα 33).



Εικόνα 33. Τύποι Κεραμικού Μυζητικού Λυσίμετρου SDECTM και τρόπος χρήσης τους. Προσαρμογή από SDEC-france (2020).

3.8.2 Λυσίμετρα Ready-To-GoTM της εταιρείας UGTTM

Το Λυσίμετρο Ready-To-GoTM που έχει εμβαδόν επιφάνειας μέχρι 0,5 m² και βάθος μέχρι 1 m (Εικόνα 34). Τα μικρού μεγέθους Λυσίμετρα είναι εύκολα στην τοποθέτηση και χρησιμοποιούνται ευρέως για τον άμεσο προσδιορισμό της πραγματικής Εξατμισοδιαπνοής στο πεδίο. Επίσης μπορούν να μετρήσουν με ακρίβεια την λανθάνουσα ροή θερμότητας στο έδαφος. Λειτουργεί το ίδιο αποτελεσματικά τόσο με μονολιθικό δείγμα εδάφους, όσο και με διαταραγμένο δείγμα εδάφους. Το δοχείο του Λυσίμετρου είναι κατασκευασμένο από πολυπροπυλένιο (PP), φέρει ζυγιστικό μηχανισμό, διαβαθμισμένο δοχείο συλλογής αποστραγιζόμενου νερού, μετεωρολογικό σταθμό, αισθητήρες μέτρησης υδρολογικών παραμέτρων του εδάφους και ηλεκτρονικό καταγραφέα δεδομένων. Η εταιρεία αναφέρει ότι η χρήση του είναι τόσο απλή που το χαρακτηρίζει ως plug-and-play. Τα συλλεγόμενα δεδομένα είναι άμεσα και εύκολα προσβάσιμα από τον παρατηρητή μέσω της δυνατότητας σύνδεσης του Λυσίμετρου με το διαδίκτυο. Το λυσίμετρο Ready-To-GoTM της UGT μπορεί επίσης να λειτουργήσει συμπληρωματικά με έναν ήδη υπάρχων μετεωρολογικό σταθμό για τον άμεσο προσδιορισμό της Εξατμισοδιαπνοής.

Γενικά, το συγκεκριμένο όργανο, αποτελεί μια ολοκληρωμένη, αποτελεσματική και λιγότερο κοστοβόρα λύση για την παρακολούθηση πολλών διαφορετικών διαδικασιών μετακίνησης του νερού στο έδαφος.

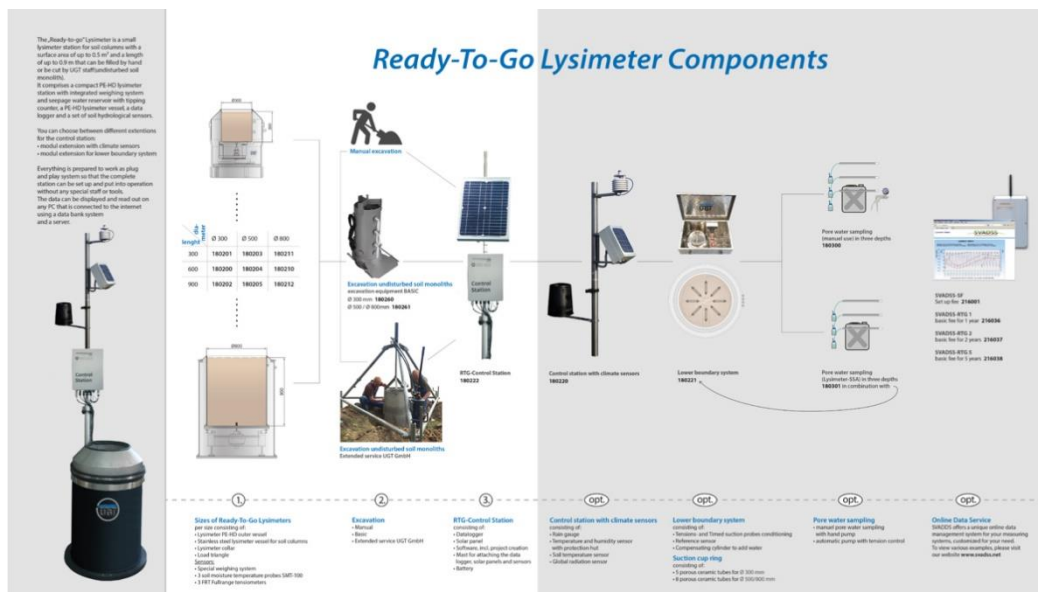


Εικόνα 34. Το Λυσίμετρο Ready-To-Go™, της εταιρείας UGT. Πηγή: UGT (2020)

Ακόμη, η ίδια εταιρεία, κατασκευάζει Λυσίμετρα χιονιού, για τον προσδιορισμό της ποσότητας νερού που είναι αποθηκευμένη σε μια δεδομένη ποσότητα χιονιού, προκειμένου να προληφθούν πλημμυρικά φαινόμενα, ο κίνδυνος χιονοστιβάδας αλλά και να γίνει διαχείριση των αποθηκευμένων ποσοτήτων νερού που βρίσκονται μέσα στο χιόνι.

3.8.3 Λυσίμετρα οροφής κτιρίων της εταιρείας UGT™

Ένας άλλος τύπος Λυσίμετρων της UGT, είναι τα λυσίμετρα οροφής ενεργειακών και οικολογικών κτηρίων που φέρουν κάλυψη από βλάστηση, όπου με την βοήθεια τους ελέγχεται η ποσότητα της υγρασίας που περιέχεται στο στρώμα χώματος της οροφής. Επιπρόσθετα, στην γκάμα των προϊόντων περιλαμβάνονται Λυσίμετρα εργαστηρίου για την διεξαγωγή πειραμάτων με ακρίβεια, αλλά και Λυσίμετρα μελέτης αστικού περιβάλλοντος που σκοπό έχουν την επιβεβαίωση με ακριβή καταγεγραμμένα δεδομένα, των οικονομικών και οικολογικών πλεονεκτημάτων που έχουν οι χώροι πρασίνου εν γένει μέσα στον αστικό ιστό (Εικόνα 35).



Εικόνα 35. Διαφημιστικό φυλλάδιο για το Λυσίμετρο Ready-To-Go™, της εταιρείας UGT. Πηγή: UGT (2020)

3.8.4 Λυσίμετρο της εταιρείας METER ENVIRONMENT™

Το Λυσίμετρο της εταιρείας METER ENVIRONMENT™ (Metergroup, 2020) με ονομασία SMART FIELD LYSIMETER, είναι ένα μικρής κλίμακας λυσίμετρο με πολλές δυνατότητες. Είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα Λυσίμετρου, με δυνατότητα ζύγισης του περιεχόμενου εδάφους. Διαθέτει тенσιόμετρα, αισθητήρες υγρασίας, ηλεκτρονικό καταγραφέα δεδομένων και δυνατότητα γεωεντοπισμού μέσω του συστήματος GPRS. Λειτουργεί με ηλιακή ενέργεια, ενώ η εγκατάσταση του είναι ευκολότερη και οικονομικότερη από τα μεγάλης κλίμακας λυσίμετρα (Εικόνα 36). Η κατασκευή του παρέχει την δυνατότητα τοποθέτησης του σε διάφορα βάθη μέσα στο έδαφος. Δίνει ακριβή μέτρηση της εξατμισοδιαπνοής, και άμεση μέτρηση του εδαφικού υδατικού ισοζυγίου.



Εικόνα 36. Το Λυσίμετρο SMART FIELD LYSIMETER της εταιρείας METER ENVIRONMENT™

Πηγή: Metergroup (2020)

3.9 Σύνοψη

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει συνοπτικά τα λυσίμετρα που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική. Με βάση τη βιβλιογραφία εξάγαμε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη βέλτιστη μορφή και χαρακτηριστικά των λυσιμέτρων. Με οδηγό τα συμπεράσματα αυτά κατασκευάστηκαν τα λυσίμετρα που εγκαταστάθηκαν στον χώρο του ΕΛΜΕΠΑ και παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

Πίνακας 2. Σύνοψη βιβλιογραφικών και άλλων πηγών λυσιμέτρων

Σύντομη Περιγραφή λυσιμέτρων	Βιβλιογραφική Πηγή ή Εμπορική Προβολή
3.1.1 Τσιμεντένιο Ζυγιστικό λυσίμετρο όγκου 16 m ³ με πρέμνα & ροδακινιές	Johnson et al. (2005)
3.1.2 Τσιμεντένιο Ζυγιστικό λυσίμετρο όγκου 17 m ³ με αχλαδιές	Girona et al. (2004)
3.2.1 Μεταλλικά Ζυγιστικό λυσίμετρο όγκου 5 m ³ με καλαμπόκι & σόγια	Payero & Irmak (2008)
3.2.2 Κυλινδρικό μεταλλικό ζυγιστικό λυσίμετρο όγκου 1,5 m ³	Prasuhn et al. (2016)
3.2.3 Μεταλλικό ζυγιστικό λυσίμετρο με κατασκευαστικές παραλλαγές για Υδρολογική, Μετεωρολογική-Κλιματική, Επιστημονική και Αγρο-Γεωπονική χρήση	Unold & Fank (2008)
3.3.1 Κυλινδρικό στραγγιστικό λυσίμετρο όγκου 0,95 m ³ με Ασιατική αχλαδιά (<i>Pyrus serotina</i> var. <i>culta</i>)	Chalmers et al. (1992)
3.3.2 Κυλινδρικό στραγγιστικό λυσίμετρο όγκου 1,5 m ³	Prasuhn et al. (2016)
3.4.1 Ζυγιστικό λυσίμετρο όγκου 19,40 m ³ με Αμυγδαλιά από μέταλλο και τσιμέντο	Lorite et al. (2012)
3.5.1 Μεταλλικό Στραγγιστικό λυσίμετρο όγκου 24 m ³	Shukla et al. (2006)
3.6.1 Πλαστικό Στραγγιστικό λυσίμετρο όγκου 0.60 m ³	M Robiul et al. (2011)
3.7.1 Ελεύθερο Πλαστικό Στραγγιστικό-Ζυγιστικό λυσίμετρο όγκου 2,5 m ³ με φυτό ελιάς	Ben-Gal et al. (2010).
3.8.1 Μικρά Μυζητικά λυσίμετρα	Rickly (2020), SDEC-France (2020)
3.8.2 λυσίμετρα Ready-To-Go™ της εταιρείας UGT™	UGT (2020)
3.8.3 λυσίμετρα Οροφής Κτιρίων της εταιρείας UGT™	UGT (2020)
3.8.4 λυσίμετρο της εταιρείας METER ENVIRONMENT™	Metergroup (2020)

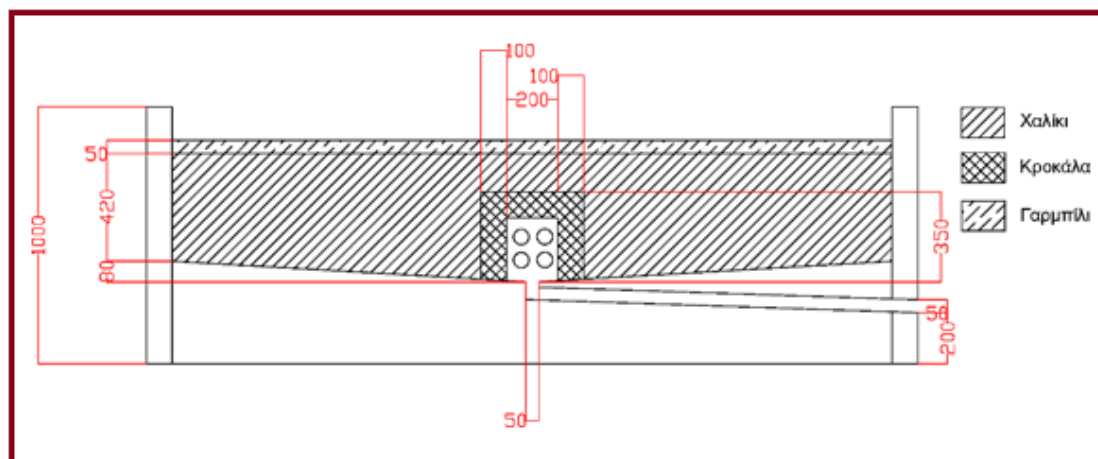
4 Στραγγιστικά Λυσίμετρα ΕΛΜΕΠΑ

4.1 Στραγγιστικά λυσίμετρα

Στις εγκαταστάσεις του αγροκτήματος του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου (ΕΛΜΕΠΑ), στα πλαίσια της Ενιαίας Δράσης Κρατικών Ενισχύσεων Έρευνας, Τεχνολογικής Ανάπτυξης και Καινοτομίας «ΕΡΕΥΝΩ – ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ», και υπό το έργο με τίτλο: «Ανάπτυξη Στάγδην Άρδευσης Υψηλής Ακρίβειας για Δενδρώδεις Καλλιέργειες» (ακρωνύμιο: Drip Irrigation Precise – DR.I.P) και κωδικό: Τ1ΕΔΚ-03372, σχεδιάστηκαν, κατασκευάστηκαν και λειτουργούν πέντε στραγγιστικά λυσίμετρα (Petousi et al., 2018).

Κάθε ένα από τα λυσίμετρα έχει όγκο λίγο μεγαλύτερο των 18 m³ και αποτελείται από 3 προκατασκευασμένα κυλινδρικά τμήματα από οπλισμένο σκυρόδεμα, διαμέτρου 3 m και ύψους 1 m. Τα τσιμεντένια κυλινδρικά τμήματα που αποτέλεσαν τον κύριο κορμό των λυσίμετρων, τοποθετήθηκαν το ένα επάνω στο άλλο δημιουργώντας τελικά μια κυλινδρική τσιμεντένια κατασκευή ύψους τριών μέτρων. Τα λυσίμετρα εδράσθησαν στο έδαφος ελεύθερα, χωρίς να υπάρχει σκάμμα κάτω από αυτά.

Εσωτερικά, κάθε λυσίμετρο περιλαμβάνει στο κατώτερο τμήμα του ένα φρεάτιο διαμέτρου 20 cm και μια πλαστική σωλήνα απομάκρυνσης του αποστραγγιζόμενου νερού διαμέτρου 5 cm η οποία έχει τοποθετηθεί υπό κλίση (Εικόνα 37). Περιλαμβάνει επίσης το φίλτρο του λυσίμετρου που είναι κατασκευασμένο από ένα στρώμα κροκαλών γύρω από το φρεάτιο αποστράγγισης, από ένα παχύτερο στρώμα χαλικιών πάνω και γύρω από το φρεάτιο και τέλος από ένα λεπτότερο στρώμα αποτελούμενο από γαρμπίλι πάνω από το στρώμα του χαλικιού. Η κατασκευή του κατώτερου τμήματος του λυσίμετρου φαίνεται στην Εικόνα 38.



Εικόνα 37. Σχέδιο κατώτερου τμήματος λυσίμετρου με το φίλτρο και το φρεάτιο απορροής.

Σε κάθε λυσίμετρο μεταφυτεύθηκε ένα δέντρο ελιάς (*Olea europaea* cv *Koroneiki*) ηλικίας 10 ετών από τα δέντρα που προϋπήρχαν στο αγρόκτημα του ΕΛΜΕΠΑ (Εικόνα 40). Πριν την τοποθέτηση των δέντρων στα λυσίμετρα υπολογίστηκε και μεταφέρθηκε κατάλληλη ποσότητα χώματος ώστε στην τελική τους θέση τα δέντρα να βρίσκονται στην κορυφή τους. Τα δέντρα τοποθετήθηκαν επί του όγκου αυτού και στο κέντρο της διαμέτρου του λυσίμετρου.



Εικόνα 40. Εκσκαφή για την μεταφορά των δέντρων.

4.2 Συλλογή δεδομένων και αυτοματισμοί

Η συλλογή και μεταφορά των δεδομένων από τα λυσίμετρα γίνεται με τη βοήθεια ασύρματου δικτύου αισθητήρων και εργαλείων IoT (Internet of Things). Οι κόμβοι μετάδοσης των δεδομένων τοποθετήθηκαν στα λυσίμετρα (Εικόνα 41) και το ασύρματο δίκτυο προδιαγράφηκε ώστε να μπορεί να μεταφέρει δεδομένα απευθείας από τα λυσίμετρα στους χώρους γραφείων του Αγροκτήματος του ΕΛΜΕΠΑ (απόσταση περίπου 150 m σε ευθεία) και από εκεί σε μια online πλατφόρμα (Εικόνα 42). Τα nodes μαζί με τον edge-gateway σχηματίζουν ένα τοπικό ασύρματο δίκτυο βασισμένο στο πρωτόκολλο 6LoWPAN τοπολογίας mesh. Το 6LoWPAN (ακρωνύμιο του «IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks») χρησιμοποιείται σε ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και αποτελεί παγκόσμιο πρότυπο. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να υποστηρίξει και δευτερεύοντες αισθητήρες για άλλες περιβαλλοντικές μεταβλητές όπως βροχόπτωση, ηλιοφάνεια, κλπ., ή μπορεί να αντλήσει μη-διαθέσιμα δεδομένα από πηγές μετεωρολογικής πληροφορίας πραγματικού χρόνου.

Το σύστημα σήμερα αποτελείται από 15 τηλεπικοινωνιακούς κόμβους (nodes) με 5 θύρες διεπαφής έκαστος ώστε να επιτυγχάνεται ενσύρματη επικοινωνία με:

- 60 αισθητήρες εδαφική υγρασίας
- 1 αισθητήρα θερμοκρασίας/υγρασίας αέρα
- 5 tipping buckets- βροχόμετρα για τη μέτρηση της απορροής.



Εικόνα 41. Κόμβοι τοποθετημένοι στις δεξαμενές πριν την τοποθέτηση των δέντρων.



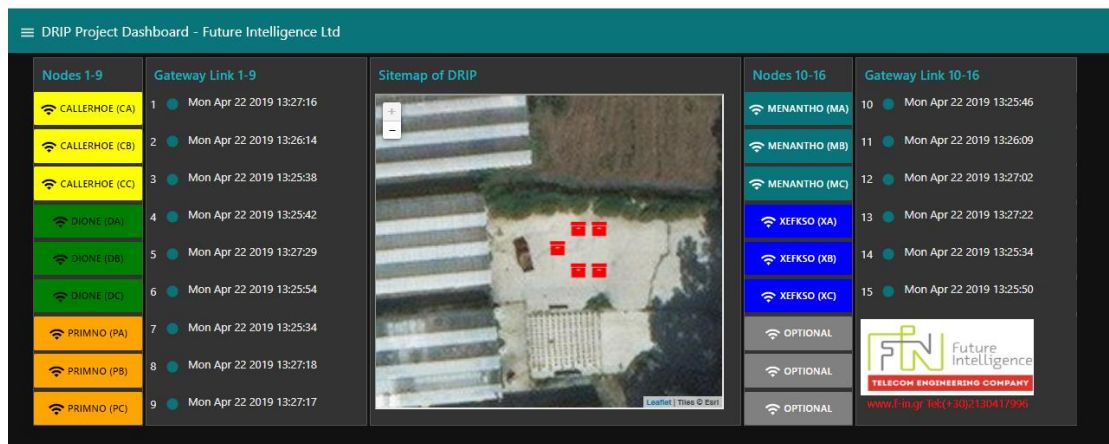
Εικόνα 42: Μετάδοση δεδομένων από τα λυσίμετρα στο edge-gateway. Πηγή Daliakopoulos et al. (2020).

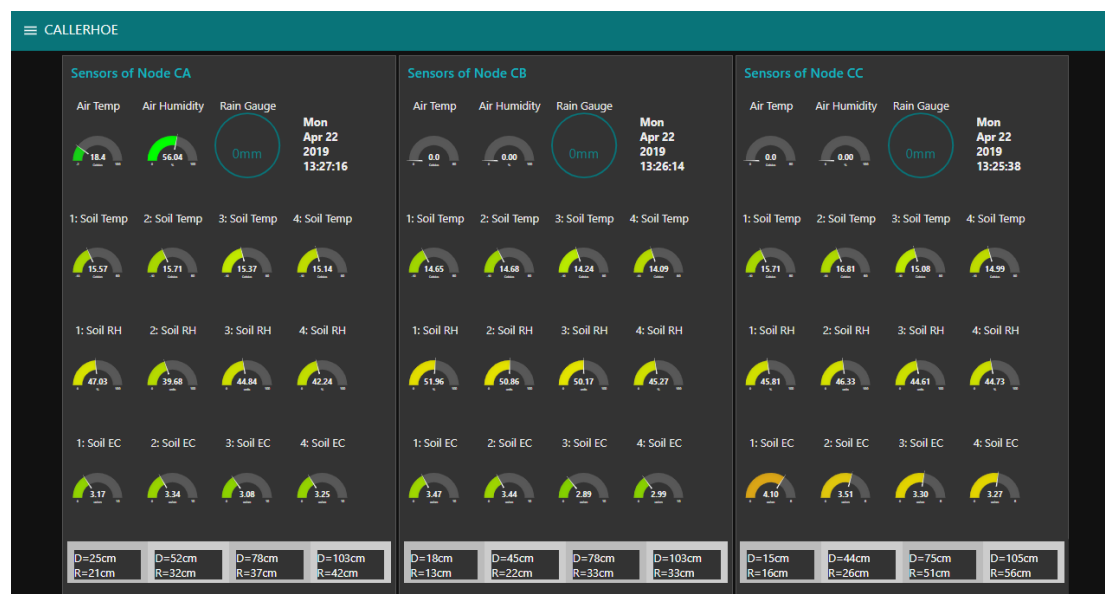
Στο εδαφικό δείγμα του κάθε λυσίμετρου, μετά την φύτευση των δέντρων και κατά την πλήρωση του με το δείγμα εδάφους, τοποθετήθηκαν 12 αισθητήρες εδαφικής υγρασίας FDR. Μετά την τοποθέτηση έγινε η εγκατάσταση των 12 αισθητήρων ακτινικά και περιμετρικά του κορμού του κάθε δέντρου, σε τέσσερα διαφορετικά βάθη: στα 15, 30, 75 και 100 cm από την επιφάνειά του λυσίμετρου και σημειώθηκαν οι συντεταγμένες εγκατάστασής τους (Εικόνα 43, αριστερά). Στη συνέχεια συμπληρώθηκε χώμα περιμετρικά ώστε οι αισθητήρες να καλυφθούν πλήρως (Εικόνα 43, δεξιά).



Εικόνα 43. Αριστερά: Τοποθέτηση των αισθητήρων. Δεξιά: Το λυσίμετρο με το δέντρο ελιάς

Οι μετρήσεις των αισθητήρων καταγράφονται στην ψηφιακή πλατφόρμα που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του έργου DRIP (Εικόνα 40) κάνοντας χρήση ενός διαδεδωμένου εργαλείου οπτικοποίησης IoT δεδομένων στην κοινότητα, του Node-RED (Εικόνα 44).





Εικόνα 44. Σύστημα απομακρυσμένης παρακολούθησης της FINT. Διακρίνονται η εποπτική εικόνα των αισθητήρων (επάνω), η παρακολούθηση όλων των αισθητήρων ενός λυσίμετρου σε πραγματικό χρόνο (μέση).

Παράλληλα υπάρχει ένα πρόγραμμα-διεπαφή υπολογισμού άρδευσης που έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί είτε αυτόνομα είτε να καλείται από έναν προγραμματιστή άρδευσης επιστρέφοντας μια «συμβουλή» βέλτιστη εφαρμογή άρδευσης (Εικόνα 45). Τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος-διεπαφή είναι τα ακόλουθα:

- Γεωγραφική θέση (σε επίπεδο νομού ή περιοχής)
- Είδος δενδρώδους καλλιέργειας
- Ύψος καλλιέργειας
- Βάθος ριζικού συστήματος
- Διάμετρος κόμης
- Τύπος εδάφους (είτε ως κατηγορία εδάφους είτε με ορισμό υδραυλικών παραμέτρων)
- Εδαφική υγρασία
- Ρυθμός άρδευσης ανά σταλάκτη
- Αριθμός σταλακτών ανά δέντρο

Από πλευράς μεθοδολογίας υπολογισμού, η εφαρμογή αξιοποιεί τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας υπολογισμού των αναγκών άρδευσης κατά FAO-56. Στην παρούσα φάση, η εφαρμογή είναι λειτουργική και ελεύθερα προσβάσιμη στη διεύθυνση <https://drip.gr/api/>. Κατά την παραμετροποίηση, το πρόγραμμα υπολογίζει την απαιτούμενη άρδευση για την κάλυψη των αναγκών εξατμισοδιαπνοής καλλιέργειας ET_c τόσο σε χιλιοστά όσο και σε χρόνο άρδευσης. Επίσης, το πρόγραμμα παράγει αυτόματα ένα σύνδεσμο (url) ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί από προγραμματιστές άρδευσης για να λάβουν την έξοδο σε κωδικοποίηση JSON.



API url

https://drip.gr/api/irrigation_v1.php?&loc=261741&cr=1&ch=4&cd=3&rz=0.5&st=1&sm=0.15&fc=0.23&wp=0.11&rew=6&er=4&en=10

Location

Irakleion

Crop

Olives

Crop height [m]

- 4,0 +

Root zone depth [m]

- 0,50 +

Canopy diameter [m]

- 3,0 +

Soil type

Sandy loam

Soil moisture [%]

- 0,15 +

Field capacity [%v]

- 0,23 +

Wilting point [%v]

- 0,11 +

Readily evap [mm]

- 6,00 +

Emitter rate [l/h]

- 4 +

Emitters per tree [#]

- 10 +

API result

```
{
  "precipitation": {
    "2020-06-11": 0,
    "2020-06-12": 0,
    "2020-06-13": 0,
    "2020-06-14": 0
  },
  "evapotranspiration": {
    "2020-06-11": 6.23,
    "2020-06-12": 5.75,
    "2020-06-13": 5.24,
    "2020-06-14": 5.37
  },
  "irrigation_mm": {
    "2020-06-11": 10.26,
    "2020-06-12": 9.49,
    "2020-06-13": 8.67,
    "2020-06-14": 8.74
  },
  "irrigation_seconds": {
    "2020-06-11": 6527,
    "2020-06-12": 6037,
    "2020-06-13": 5516,
    "2020-06-14": 5560
  }
}
```

Το Έργο DRIP υλοποιείται με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

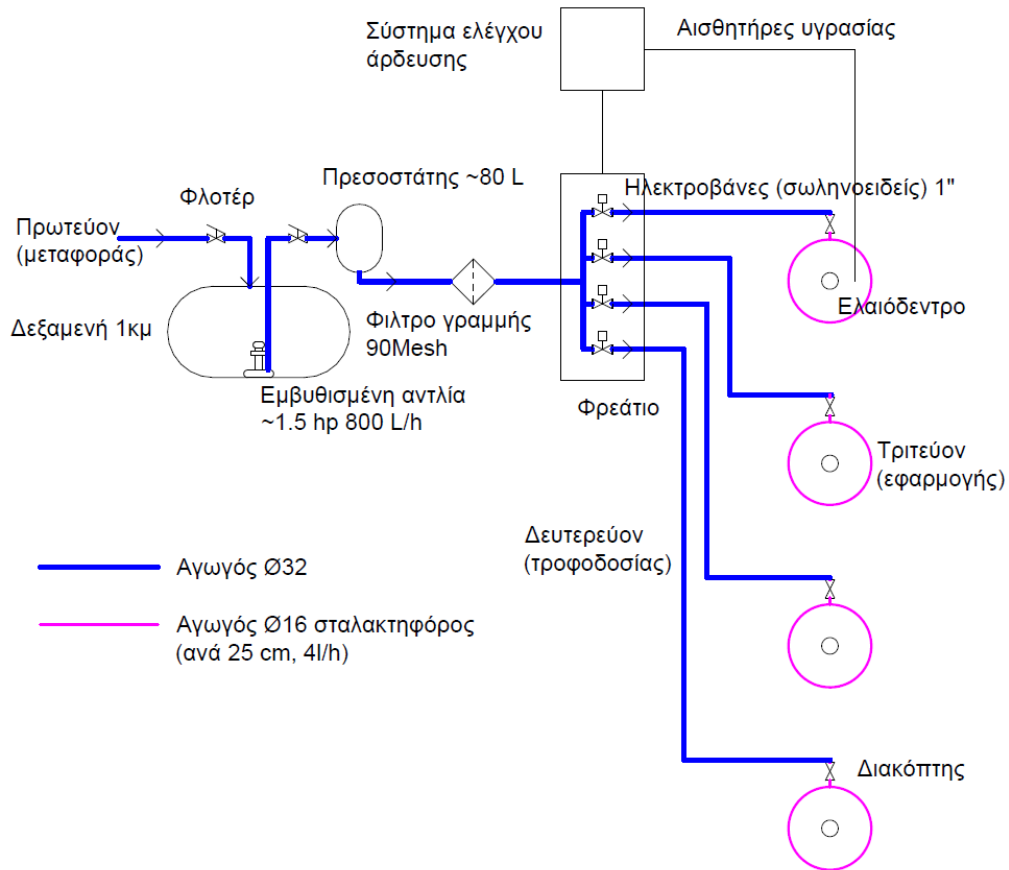
Εικόνα 45. Πρόγραμμα-διαπαφή υπολογισμού άρδευσης DRIP.

4.3 Δίκτυο άρδευσης

Ο σχεδιασμός του αρδευτικού δικτύου έγινε με γνώμονα:

- την στάθμη της τεχνικής
- την ρεαλιστικότερη προσομοίωση των συνθηκών της Κρητικής υπαίθρου –
- προσαρμοστικότητα σε διαφορετικές συνθήκες άρδευσης

Με βάση τα παραπάνω, το αρδευτικό δίκτυο σχεδιάστηκε και ξενικά από πρωτεύον δίκτυο το οποίο μεταφέρει το νερό μέχρι δεξαμενή 1 m³. Η πλήρωση της δεξαμενής ελέγχεται από ένα απλό φλοτέρ τύπου φούσκα που διακόπτει την παροχή του πρωτεύοντος δικτύου. Από την δεξαμενή το νερό αντλείται με εμβαπτιζόμενη αντλία και στη συνέχεια ένας πρεσοστάτης διατηρεί την πίεση του νερού στις 5 Atm. Μετά τον πρεσοστάτη υπάρχει φίλτρο γραμμής σίτας για την συγκράτηση της άμμου. 4 ηλεκτροβάνες 1” παίρνουν εντολή από το σύστημα ελέγχου άρδευσης. Το αρδευτικό δίκτυο προσαρμόζεται στα λυσίμετρα αλλά μπορεί να προσαρμοστεί εύκολα και σε εμπορικούς αγρούς το αρδευτικό σύστημα των οποίων άλλωστε προσομοιάζει. Ο σχεδιασμός του δικτύου φαίνεται στην Εικόνα 46 και η εγκατάστασή του στην Εικόνα 47.



Εικόνα 46. Άρδεντικό δίκτυο λυσίμετρων.



Εικόνα 47: Εγκατάσταση αρδεντικού εξοπλισμού στα λυσίμετρα.

4.4 Αποτελέσματα λυσίμετρων

Στην παρούσα φάση γίνεται συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων από το δίκτυο αισθητήρων των λυσιμέτρων. Από τα δεδομένα που συλλέγονται (Εικόνα 48) είναι εμφανές είναι ότι μεταξύ αισθητήρων που βρίσκονται στο ίδιο βάθος αλλά διαφορετική πλευρά του δέντρου υπάρχει ιδιαίτερα μεγάλη μεταβλητότητα στις μετρήσεις. Συνεπώς, είναι εμφανές ότι το αντικείμενο του έργου για ορθή εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας από ένα σύνολο συχνά αντιφατικών μετρήσεων έχει ουσιαστική αξία.



Εικόνα 48: Μετρήσεις εδαφικής υγρασίας για 4 βάθη (χρώματα) και 3 πλευρές του ελαιόδεντρου που βρίσκεται στο λυσίμετρο 1 για το διάστημα Φεβρουάριος-Μάιος 2019.

4.5 Δημοσιότητα

Ο χώρος εγκατάστασης των λυσίμετρων είναι επισκέψιμος και για πρακτική εκπαίδευση και άσκηση, μαθητών και φοιτητών (Εικόνα 49).



Εικόνα 49. Στιγμιότυπο από επίδειξη λειτουργίας των λυσίμετρων σε μαθητές.

5 Συζήτηση και συμπεράσματα

Τα λυσίμετρα είναι πολυχρηστικά εργαλεία και, όπως φαίνεται στην ενότητα 3, χρησιμοποιούνται σε μια ποικιλία περιπτώσεων, που έχουν να κάνουν με επιστημονικά πειράματα, με την συνδρομή σε αποφάσεις δημόσιων περιβαλλοντικών οργανισμών και με την εκπαίδευση επιστημόνων περιβάλλοντος. Αξίζει να επισημανθεί ότι ο σωστός προγραμματισμός για οποιαδήποτε επιτυχημένη έρευνα παίζει πρωταρχικό ρόλο στην αξιοπιστία των δεδομένων που θα προκύψουν, επομένως πρέπει εξαρχής να γίνει η σωστή επιλογή του κατάλληλου τύπου λυσίμετρου.

Η τεχνογνωσία των Λυσίμετρων έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, επιτρέποντας στους κατασκευαστές να σχεδιάζουν και να εφαρμόζουν συστήματα λυσίμετρων που αντιγράφουν όλο και περισσότερο το φυσικό έδαφος. Ωστόσο, η τεχνογνωσία αυτή έχει την δυνατότητα να βελτιστοποιηθεί περαιτέρω, ιδίως όσον αφορά την προσέγγιση και την κατανόηση της κίνησης της υγρασίας στα Λυσίμετρα, με σκοπό τον έλεγχο των συνθηκών που επικρατούν στα ακραία όρια του εσωτερικού εδαφικού δείγματος των Λυσίμετρων που έχουν να κάνουν με την αλλαγή της κίνησης της εδαφικής υγρασίας σε εκείνα τα οριακά σημεία και που πιθανόν να επηρεάζουν σε μικρό ή σε μεγάλο βαθμό, τις μετρήσεις που προκύπτουν. Επίσης, η μέθοδος δειγματοληψίας των μη διαταραγμένων δειγμάτων εδάφους για τα μονολιθικά λυσίμετρα, χρειάζεται περαιτέρω μελέτη και βελτίωση των μηχανημάτων και των συσκευών με τα οποία πραγματοποιείται η λήψη καθώς δεν υπάρχει επικυρωμένη μέθοδος η οποία να έχει δοκιμαστεί εκτεταμένα και να έχει αξιολογηθεί για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Η δυναμική του υδατικού ισοζυγίου και της θερμοκρασίας εντός του λυσίμετρου μπορεί να μετρηθεί σωστά και στην συνέχεια να ποσοτικοποιηθεί με ακρίβεια εφόσον έχει επιτευχθεί ο πραγματικός έλεγχος της κατάστασης του κατώτερου ορίου (lower boundary) του εδαφικού δείγματος στο λυσίμετρο (Abdou and Flury, 2004). Περαιτέρω, υπάρχει ανάγκη για την δημιουργία και βελτίωση μαθηματικών μοντέλων που θα εξαλείφουν τις οποιεσδήποτε παρεμβολές από το περιβάλλον (πχ άνεμος) ή τις ανθρωπογενείς (πχ βιομηχανία) στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής και δύνανται να έχουν επίδραση στην εξατμισοδιαπνοή μιας περιοχής. Τα Λυσίμετρα θα συνεχίζουν να παίζουν σημαντικό ρόλο στις μελέτες εκτίμησης και της χωρικής διασποράς των δεδομένων του ποσοστού Εξατμισοδιαπνοής καθώς και στις έρευνες για την κατανόηση και τον προσδιορισμό των εδαφικών διεργασιών, είτε ως αυτόνομες μονάδες είτε ως τμήμα επίγειων μετεωρολογικών σταθμών-παρατηρητηρίων. Τα λυσίμετρα μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό των τάσεων στο έδαφος που συνδέονται με την κλιματική αλλαγή. Η ανάπτυξη και εφαρμογή του διπλού συντελεστή καλλιέργειας K_c , σύμφωνα με τον FAO-56, καθιερώθηκε για να παρέχει καθημερινά τις τιμές εκτίμησης της εξάτμισης από υγρό έδαφος σε συνδυασμό με την εκτίμηση των αντίστοιχων τιμών της διαπνοής της υπερκείμενης καλλιέργειας. Για να

υπολογιστεί με σχετική ακρίβεια ο συντελεστής καλλιέργειας K_c σύμφωνα με τον *FAO-56*, απαιτούνται ημερήσιες καταμετρήσεις και καταγραφές των μεταβλητών του ύψους των βροχοπτώσεων και των τιμών της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς ET_{ref} έτσι όπως διαμορφώνονται δυναμικά και καταγράφονται από μετεωρολογικούς σταθμούς και λυσίμετρα. Η ακρίβεια στον υπολογισμό του συντελεστή καλλιέργειας παίζει σημαντικό ρόλο στην κατανόηση της σημασίας των συνεπειών που έχουν στην υγρασία του εδάφους η άρδευση και οι κατακρημνίσεις σε μια περιοχή σε συνδυασμό με τις κλιματολογικές συνθήκες, ενώ η καμπύλη του συντελεστή καλλιέργειας αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τους παραπάνω υπολογισμούς, στην εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής μέσα σε ένα ευρύ σύνολο περιοχών και καλλιεργειών.

Η εκτίμηση του συντελεστή καλλιέργειας K_c χρησιμοποιώντας την πραγματική εξατμισοδιαπνοή ET που μετράται με τα **λυσίμετρα**, θα πρέπει να συνεχιστεί καθώς τα λυσίμετρα αποτελούν κύριο εργαλείο συλλογής φυσικών υδρολογικών δεδομένων. Η τηλεπισκόπηση επίσης αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο στην πραγματική εκτίμηση του συντελεστή καλλιέργειας K_c . Τα συστήματα φυσικής μέτρησης των περιβαλλοντικών και υδρολογικών παραμέτρων, χρησιμεύουν ως σημαντικές συσκευές εκτίμησης και κατανόησης των φυσικών διεργασιών, καθώς αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν φυσικές αρχές και εμπλέκονται σε πραγματικό χρόνο και τις συνθήκες της διαδικασίας της βλάστησης, με αποτέλεσμα οι μελετητές παρατηρούν την εξέλιξη της βλάστησης και τον έλεγχο της εξάτμισης και της διαπνοής σε κάθε φάση της ανάπτυξης μιας καλλιέργειας, με σκοπό τον σωστό προγραμματισμό των αρδευτικών επεμβάσεων και της αποτελεσματικής και πλέον αποδοτικής χρήσης του διαθέσιμου νερού προς κατανάλωση

Ο τομέας της εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί για εφαρμογή σε ευρύτερες περιοχές όπως είναι μια μεγάλης έκτασης λεκάνη απορροής, για την επικράτεια μιας ολόκληρης χώρας ή και για ακόμη μεγαλύτερες περιοχές στον πλανήτη, γεγονός που θα παρείχε πολύτιμες πληροφορίες για την κατανόηση του τρόπου που χρησιμοποιείται και καταναλώνεται το νερό. Είναι τεχνικά δύσκολο να υπάρξουν τόσοι σταθμοί εφοδιασμένοι με λυσίμετρα για την επίτευξη του παραπάνω σκοπού. Εντούτοις, η πιθανή κατασκευή και η χρήση φτηνών φορητών συσκευών-λυσίμετρων σε συνδυασμό με την αναβάθμιση των μέσων και των τεχνικών Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών που θα μπορούσαν να συνδυαστούν με τις πληροφορίες των επίγειων σταθμών και των λυσίμετρων, να αποτελέσει μια μελλοντική λύση καθώς και ένα χρήσιμο εργαλείο στους μελετητές, στους παραγωγούς αγροτικών προϊόντων και στα κρατικά στελέχη που χαράσσουν πολιτικές σχετικές με την κατανάλωση του νερού.

Βιβλιογραφία

- Abdou, H., and M. Flury., 2004. Simulation of water flow and solute transport in free-drainage lysimeters and field soils with heterogeneous structures. *Eur. J. Soil Sci.* 55:229–241. doi:10.1046/j.1365-2389.2004.00592.x
- Abdulkareem, J.H., Abdulkadir, A. and Abdu, N., 2015. A Review of Different Types of Lysimeter Used in Solute Transport Studies. *International Journal of Plant and Soil Science.* Vol 8(3): 1-14. doi:10.9734/IJPSS/2015/18098
- Allen, G.R., Walter, A.I., Elliott, R.L., Howell, T.A., Itenfisu, D. and Jensen, M.E., 2005a. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. *Environmental Science.* doi:10.1061/9780784408056
- Allen, G.R., Pereira, S.L., Smith, M., Raes, D. and Wright, L.J., 2005b. FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering.* Vol 131(1): 2-13. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2)
- Ben-Gal, A., and U. Shani. 2002. A highly conductive drainage extension to control the lower boundary condition of lysimeters. *Plant Soil* 239:9– 17 doi: 10.1023/a:1014942024573
- Benettin, P., Queloz, P., Bensimon, M., McDonnell, J.J. and Rinaldo, A., 2019. Velocities, Residence Times, Tracer Breakthroughs in a Vegetated Lysimeter: A Multitracer Experiment. *Water Resources Research.* Vol 55: 21-33. doi: 10.1029/2018WR023894
- BonaRes, 2020. Soil as a sustainable resource for the bioeconomy: Soil functions and their dynamics. [online] available from: <<https://www.bonares.de/soil-functions>> [accessed May 2020]
- Chalmers,D., Andrews, P., Harris, K., Cameron, E., and Caspari, H., 1992. Performance of Drainage Lysimeters for the Evaluation of Water Use by Asian Pears. *HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science.* 27. 10.21273/HORTSCI.27.3.263.

- Courveur, V., Javaux, M. and Vanderborght, J., 2012. A simple three-dimensional macroscopic root water uptake model based on the hydraulic architecture approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 2957–2971. doi:10.5194/hess-16-2957-2012
- Daliakopoulos, I.N., Papadimitriou, D.M., Matsoukas, T., Zotos, N., Moysiadis, T., Anastasopoulos, K., Mavrogiannis, I., Manios, T., 2019. Development and Preliminary Results from the Testbed Infrastructure of the DRIP Project. TerraEnVision 2019 Conference, Barcelona, Spain, 2-6 September, 2019.
- Derby, N.E., Knighton, R.E. and Montgomery, B.R., 2002. Construction and Performance of Large Soil Core Lysimeters. *Soil Science Society American Journal*. Vol 66: 1446-1453
- FAO, 2020. AQUASTAT. Actual evapotranspiration. [online] available from: <<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/glossary/search.html?termId=7599&submitBtn=s&cls=yes>> [accessed July 2020]
- Feddes, R.A. and van Dam, J.C. Plant-Soil-Water Relations, 2005. In: *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Academic Press. ISBN:9780080547954
- FINT, 2020. Future Intelligence. Innovative Telecom Engineering Products and Services. [online] available from: <<http://www.f-in.gr/>> [accessed June 2020]
- Germann, P.F. and Prasuhn, V., 2018. Viscous Flow Approach to Rapid Infiltration and Drainage in a Weighing Lysimeter. *Vadoze Zone Journal*. 17:170020. doi:10.2136/vzj2017.01.0020
- Gifford, H.H., Whitehead, D., Thomas, R.S. and Jackson, D.S., 1982. Design of a New Weighing Lysimeter for Measuring Water Use by Individual Trees. *New Zealand Journal of Forestry Science*. Vol 12(3): 448-456
- Girona, J., Marsal, J., Mata, M. and del Campo, J., 2004. Pear Crop Coefficients Obtained in a Large Weighing Lysimeter. *Acta Hort.* Vol 664: 277-281. doi: 10.17660/ActaHortic.2004.664.33
- Hendrickx, J.M.H. and Flury, M., 2001. Uniform and Preferential Flow Mechanisms in the Vadose Zone. In: National Research Council. 2001. *Conceptual Models of Flow and*

Transport in the Fractured Vadose Zone. Washington, DC: The National Academies Press. pp.149-187 doi.org/10.17226/10102

Howell, A.T., Schneider, D.A. and Jensen, E.M., 1991. History of Lysimeter Design and Use for Evapotranspiration Measurements. Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements, Honolulu, 1991, pp:3-9

Islam, MR., Mao, S., Xue, X., Eneji, AE., Zhao, X. and Hu, Y., 2011. A lysimeter study of nitrate leaching, optimum fertilization rate and growth responses of corn (*Zea mays* L.) following soil amendment with water-saving super-absorbent polymer. Applied Engineering in Agriculture. Vol 27(5): 757-764. doi: 10.13031/2013.39575

Javaux, M., Courveur, V., Vanderborght, J. and Vereecken, H., 2013. Root Water Uptake: From Three-Dimensional Biophysical Processes to Macroscopic Modeling Approaches. Vadose Zone Journal. Anniversary Issue: 2-16, doi: 10.2136/vzj2013.02.0042

Johnson, T. and Odin, H., 1978. Measurements of evapotranspiration using a dynamic lysimeter. Studia Forestalia Suecica, 146: 5-28

Johnson, R. Scott, Williams, Larry E., Ayars, James E. and Trout, Tom J., 2005. Weighing lysimeters aid study of water relations in tree and vine crops. California Agriculture, Vol 59(2):133-136, Available online: <https://escholarship.org/uc/item/0f8700jj>

Kohnke, H., F. Dreibelbis, and J. Davidson. 1940. A survey and discussion of lysimeters and a bibliography on their construction and performance. US Department of Agriculture Misc. Publications. 372. US Gov. Print. Office, Washington, DC.

Lanthaler, C. 2004. Lysimeter stations and soil hydrology measuring sites in Europe: Purpose, equipment, research results, future developments. Ph.D. diss. Karl Franzens University of Graz, Graz, Austria

Launiainen, S., Futter, M., Ellison, D., Clarke, N., Finér, L., Högbom, L., Laurén, A. and Ring, E., 2013. Is the Water Footprint an Appropriate Tool for Forestry and Forest Products: The Fennoscandian Case. Ambio. doi: 43. 10.1007/s13280-013-0380-z

- Libardi, L.G.P., de Faria, R.T., Dalri, A.B., Rolim, G.de S. and Palaretti, L.F., 2018. High Precision Weighing Lysimeters for Evapotranspiration Measurements of Sugarcane pre-sprouted Plantlets. *Engenharia Agricola*. Vol 38(2): 208-216. doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n2p208-216/2018
- Lorite, J.I., Santos, C., Testi, L. and Fereres, E., 2012. Design and construction of a large weighing lysimeter in an almond orchard. *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol 10(1): 238-250. doi: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2012101-243-11>
- Lovett, A., 2015. Arable lysimeter review and design – Part 1. GNS Science Consultancy Report 2015/146. 24 p. [online] available from: <<https://www.hbrc.govt.nz/assets/Document-Library/Publications-Database/Arable-lysimeter-review-and-design-Part-1.pdf>> [accessed May 2020]
- Lysimeter, 2020. Lysimeter Station of Wagna, Austria [online] available from: <<http://www.lysimeter.com/index.html>> [accessed January 2020]
- Matušek, Ivan and Reth, S & Heerdt, Christian & Hrcckova, Katarina & Gubis, Jozef. (2016). Lysimeter - a unique tool for monitoring the interactions among the components of environment. *Proceedings of the National Aviation University*. N 2. 69–75. doi:10.18372/2306-1472.67.10436
- Meißner, R., Rupp, H. and Seyfarth, M., 2008. Advances in Out Door Lysimeter Techniques. *Water Air Soil Pollution: Focus*. Vol 8: 217-225. doi:10.1007/s11267-007-9166-2
- Meißner, R, Prasad, M.N.V., Du Laing, G. and Rinklebe J., 2010. Lysimeter application for measuring the water and solute fluxes with high precision. *Current Science*. Vol 99(5): 601-607
- Metergroup, 2020. METER ENVIRONMENT. Small-scale Lysimeters Measuring Parameters for Complete and Accurate Water Balance. [online] available from: <<https://www.metergroup.com/environment/products/smart-field-lysimeter/>> [accessed May 2020]
- Mrgscience, 2020. Environmental Systems and Societies: Introduction to Soil Systems. [online] available from: <<https://www.mrgscience.com/ess-topic-51-introduction-to-soil-systems.html>> [accessed May 2020]

- Muller, J. and Bolte, A., 2009. The use of lysimeters in forest hydrology research in north-east Germany. *Agriculture and Forestry Research*. Vol 59: 1-10
- Nektarios, A.P., Petrovic, A.M. and Steenhuis, S.T., 2007. Preferential Flow in Simulated Greenhouse Golf Putting Green Profiles as Affected by Aeration and Two Soil Moisture Regimes. *Soil Science*. Vol 172(2): 108-123
- Nektarios, P.A., A.M. Petrovic, and T.S. Steenhuis. 2003. Aeration type affects preferential flow in golf putting greens. 1 st International Conference on Turfgrass Management and Science for Sport Fields. 2-7 June 2003, Athens, Greece. *Acta Horticulturae*. 661:421-425
- Parisi, S., Mariani, L., Cola, G. and Maggiore, T., 2009. Mini-Lysimeters Evapotranspiration Measurements on Suburban Environment. *Italian Journal of Agrometeorology*. Vol 3: 13-16
- Payero, O.J. and Irmak, S., 2008. Construction, installation, and performance of two repacked weighing lysimeters. *Irrigation Science*. Vol 26: 191-202 doi:10.1007/s00271-007-0085-9
- Pereira, S.L., Allen, G.R., Smith, M. and Raes, D., 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*. Vol 147: 4-20
- Petousi, I., Daliakopoulos, I.N., Matsoukas, T., Zotos, N., Mavrogiannis, I., Manios., T. 2018. DRIP: Development of an Advanced Precision Drip Irrigation System for Tree Crops. TerraEnVision Conference, Barcelona, Spain, January 29 – February 2, 2018.
- Pham, H., Fredlund, D. and Barbour, S., 2005. A Study of hysteresis models for soil-water characteristic curves. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol 42: 1548-1568 doi:10.1139/t05-071.
- Prasuhn, Volker, Humphrys, Clay & Spiess, Ernst. (2016). *Seventy-two Lysimeters for Measuring Water Flows and Nitrate Leaching under Arable Land*. NAS International Workshop on Applying the Lysimeter Systems to Water and Nutrient Dynamics, National Institute of Agricultural Sciences, Korea. ISBN 978-89-480-4055-5 93520

- Pütz, T., J. Fank, and M. Flury. 2018. Lysimeters for vadose zone research. *Vadose Zone Journal*. 17:180035. doi:10.2136/vzj2018.02.0035
- Radcliffe, D. and Simunek, J. (2010). *Soil Physics with Hydrus, Modeling and Applications*. Boca Raton, FL, USA: CRCPress. ISBN 978-1-4200-7380-5
- Rainmachine, 2020. Soil Zones and Soil Types. [online] available from: <<https://support.rainmachine.com/hc/en-us/articles/228001248-Soil-Types>> [accessed May 2020]
- Rickly, 2020. Measuring the World's Water. Ceramic cup Lysimeters for vadose zone monitoring. [online] available from: <https://rickly.com/search.php?search_query=suction+cup+lysimeter&x=0&y=0> [accessed February 2020]
- Ritsema, C., Dekker, L., Nieber, J. and Steenhuis, T., 1998. Modeling and field evidence of finger formation and recurrence in a water repellent soil. *Water Resources Research*. 34(4): 555-567. doi: 10.1029/97WR02407
- Ritsema, C.J and Dekker, L.W., 2000. Preferential flow in water repellent sandy soils: principles and modeling implications. *Journal of Hydrology*. Vol 231-232: 308-319
- Schneider, A.D., Ayars, J.E and Phene, C.J., 1996. Combining Monolith and Repacked Soil Tanks for Lysimeters from High Water Table Sites. *Applied Engineering in Agriculture*. Vol 12(6): 649-654
- Schuhmann, A., Gans, O., Weiss, S., Fank, J., Klammler, G., Haberhauer, G. and Gerzabek, M.H., 2016. A long-term Lysimeter experiment to investigate the environmental dispersion of the Herbicide Chloridazon and its Metabolites-comparison of Lysimeter types. *Journal of Soils Sediments*. Vol 16: 1032-1045. doi: 10.1007/s11368-015-1311-3
- SDEC-France, 2020. Applications for Environment and Monitoring of Natural Enviroments. Ground Water Pollution Sampling Systems. [online] available from: <<https://environnement.sdec-france.com/ceramic-succion-lysimeters-31-63-mm-for-crop-science.html>> [accessed February 2020]

Shreeja, D. Movement of Water in Soil: 3 Types. Available online: <http://www.soilmanagementindia.com/soil-water/movement-of-water-in-soil-3-types/1818>

Shukla, S., Srivastava, S. and Hardin, D.J., 2006. Design, Construction and Instalation of Large Drainage Lysimeters for Water Quantity and Quality Studies. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Vol 22(4): 529-540

Singh, G., Kaur, G., Williard, K., Schoonover, J. and Kang, J., 2018. Monitoring of water and solute transport in the vadose zone: A review. Vadose Zone J. 17:160058. doi:10.2136/vzj2016.07.0058

Soilandwater, 2020. Preferential Flow: Why Preferential Flow is Important. [online] available from: <<http://soilandwater.bee.cornell.edu/Research/pfweb/educators/intro/why.htm>> [accessed April 2020]

Stein, J., Caissy, R., Plamondon, P.A. and Bernier, Y.P., 1995. Estimation of potential evapotranspiration with shallow lysimeters in a forest tree nursery. The Forestry Chronicle. Vol 71(6): 755-758

Titus, B., and M. Mahendrappa. 1996. Lysimeter system designs used in soils research: A review. Vol. 301. Canadian Forest Service, St. John's, Newfoundland, Canada.

Tripathi, R.P., Kushwaha, H.S. and Agrawal, A., 1987. A Simple non-weighing Lysimeter Installation with Rain Shelter. Agricultural and Forest Meteorology. Vol 41: 275-288

UGT, 2020. Lysimeter Solutions for Research Projects. [online] available from: <<http://www.ugt-online.de/en/products/lysimeter-technology/>> [accessed April 2020]

Unold, G.v. and Fank, J., 2008. Modular Design of Field Lysimeters for Specific Application Needs. Water, Air & Soil Pollution: Focus, Vol 8:233-242 doi 10.1007/s11267-007-9172-4

Walter, M.T., Kim, J.S., Steenhuis, T.S., Parlange, J.Y., Heilig, A., Braddock, R.D., Selker, J.S. and Boll, J., 2000. Funneled flow mechanisms in a sloping layered soil: Laboratory investigation. Water Resources Research. Vol 36(4): 841-849

- Ward, A.L. and Wittman, R., 2009. Calibration of a Neutron Hydroprobe for Moisture Measurements in Small-Diameter Steel-Cased Boreholes. U.S. Department of Energy-Pacific Northwest National Laboratory. [online] available from: <https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-18539.pdf> [accessed February 2020]
- Weihermüller, L., J. Siemens, M. Deurer, S. Knoblauch, H. Rupp, A. Göttlein, and T. Pütz. 2007. In: situ soil water extraction: A review. J. Environ. Qual. 36:1735–1748. doi:10.2134/jeq2007.0218
- Wright, I.R., 1990. A Lysimeter for the Measurement of Evaporation from High Altitude Grass. Hydrology in Mountainous Regions. Proceedings of the Lausanne Symposia, August 1990. IAHS Publications no. 93.
- Αναγνωστούλης, Β., 2013. Πειραματικός προσδιορισμός του φαινομένου της υστέρησης. Πτυχιακή Εργασία. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής. Βόλος.
- Ανδρεαδάκης, Εμμ., 2018. Υδραυλικό φορτίο - Υδροφόροι ορίζοντες - Ν. Darcy - Υπόγεια αποστράγγιση. Εργαστήριο Υδρογεωλογίας, ΕΚΠΑ. Διαθέσιμο online: http://users.uoa.gr/~eandreadk/index_files/Hydrogeology05.pps. Τελευταία πρόσβαση 07/10/2019.
- Αργυράκη, Α., 2015. Γεωχημεία. Γεωχημικές διεργασίες στην επιφάνεια της Γης. Έκδοση 1.0 Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Διαθέσιμο online: <http://opencourses.uoa.gr/courses/GEOL2/>. Τελευταία πρόσβαση 24/04/2020
- Βουδούρης (ΑΠΘ) Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων: Διαθέσιμο online: <http://www.geo.auth.gr/courses/ggg/ggg887e/>
- Δαλιακόπουλος, Ι., 2019. Σημειώσεις του Μαθήματος: Περιβαλλοντική Υδρολογία- Διαχείριση Υδατικών Πόρων. ΠΜΣ: Εφαρμοσμένη Επιστήμη και Τεχνολογία στη Γεωπονία, Τμήμα Γεωπονίας, ΕΛΜΕΠΑ

ΕΛΜΕΠΑ (2019), Διάλεξη 1 : Αρδεύσεις, Διαθέσιμο online:
https://eclass.hmu.gr/modules/document/file.php/TGH222/Lecture_1_Ardeuseis_2019.pdf Τελευταία πρόσβαση 24/04/2020

Θεοχάρης Μενέλαος, (2015). Στραγγίσεις (Θεωρία). Ενότητα 5: Κίνηση του νερού στο έδαφος I. ΤΕΙ Ηπείρου. Διαθέσιμο online: <http://eclass.teiep.gr/courses/TEXG107/>

Καρακατσούλης, Π., 1997. «Γενικές Έννοιες για την Κίνηση του Νερού στο Έδαφος» από το βιβλίο «Αρδεύσεις, Στραγγίσεις και Προστασία Εδαφών». Ίδρυμα Ευγενίδου, Γ΄ Έκδοση, Αθήνα. Διαθέσιμο online: https://www.eef.edu.gr/media/2396/e_h00050.pdf Τελευταία πρόσβαση 20/10/2019

Κατσαρός, Δ., 2005. Μελέτη της κίνησης του νερού στο έδαφος κατά τη διάρκεια της διήθησης. Πτυχιακή Διατριβή. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής. Νέα Ιωνία.

Λαζαρίδου-Αθανασιάδου, Μ., 2012. Φυσικές Ιδιότητες Εδάφους, Εργαστήριο Εδαφολογίας, Τμήμα Δασοπονίας και Διαχείρισης Φυσικού Περιβάλλοντος, ΤΕΙ Καβάλας. Διαθέσιμο Διαθέσιμο online:
http://www.teidasoponias.gr/site/news/xtra/morfologia/fisikes_idiotites_edafous.pdf Τελευταία πρόσβαση 25/04/2020

Μουσουλιώτης, Α., 2019. Σύσταση, Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες του Εδάφους. Τμήμα Γεωργίας, Κλάδος χρήσης Γής και Ύδατος. Διαθέσιμο online:
[http://www.moa.gov.cy/moa/da/da.nsf/All/C671EB1BE83C1E28C225804800349C68/\\$file/%CE%A3%CE%A5%CE%A3%CE%A4%CE%91%CE%A3%CE%97,%CE%A6%CE%A5%CE%A3%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3%20&%20%CE%A7%CE%97%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3%20%CE%99%CE%94%CE%99%CE%9F%CE%A4%CE%97%CE%A4%CE%95%CE%A3%20%CE%A4%CE%9F%CE%A5%20%CE%95%CE%94%CE%91%CE%A6%CE%9F%CE%A5%CE%A3.pdf](http://www.moa.gov.cy/moa/da/da.nsf/All/C671EB1BE83C1E28C225804800349C68/$file/%CE%A3%CE%A5%CE%A3%CE%A4%CE%91%CE%A3%CE%97,%CE%A6%CE%A5%CE%A3%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3%20&%20%CE%A7%CE%97%CE%9C%CE%99%CE%9A%CE%95%CE%A3%20%CE%99%CE%94%CE%99%CE%9F%CE%A4%CE%97%CE%A4%CE%95%CE%A3%20%CE%A4%CE%9F%CE%A5%20%CE%95%CE%94%CE%91%CE%A6%CE%9F%CE%A5%CE%A3.pdf) Τελευταία πρόσβαση 25/09/2019

Πάντζαλης, Δ., 2011. Μαθηματική προσομοίωση της δυναμικής του εδαφικού νερού στην περίπτωση άρδευσης με υπόγειους σταλακτηφόρους σωλήνες σε διαστρωμένα εδάφη. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα

Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής. ΠΜΣ Αειφορική Διαχείριση Υδατικών Πόρων. Αθήνα.

Στεριοπούλου, Σ. 1998. Μέτρηση υδροδυναμικών παραμέτρων κατά την στράγγιση αμμωδών εδαφών. Πτυχιακή Διατριβή. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Φυτικής Παραγωγής, Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής. Βόλος.