



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Καλλιέργειες υπό κάλυψη- Υδροπονία

Διπλωματική Εργασία

**Μελέτη στρατηγικών διαχείρισης της άρδευσης σε υδροπονικές
καλλιέργειες τομάτας και αγγουριού που αναπτύσσονται σε
διάφορα υποστρώματα**

Ιωάννης Κόκκινος

Επιβλέπων καθηγητής: Δημήτριος Σάββας

Πάτρα, Δεκέμβριος 2024

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.

**«Μελέτη στρατηγικών διαχείρισης της άρδευσης σε
υδροπονικές καλλιέργειες τομάτας και αγγουριού που
αναπτύσσονται σε διάφορα υποστρώματα»**

Ιωάννης Κόκκινος

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

«Δημήτριος Σάββας»

«Καθηγητής, Γεωπονικό
Πανεπιστήμιο Αθηνών»

Συν-Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

«Γεωργία Ντάτση»

«Καθηγήτρια, Γεωπονικό
Πανεπιστήμιο Αθηνών»

Πάτρα, Δεκέμβριος 2024

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον υπεύθυνο καθηγητή μου, Δημήτρη Σάββα, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την αμέριστη υποστήριξη και την ενθάρρυνση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας. Η εμπειρία και οι γνώσεις του αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα για την ολοκλήρωση αυτής της μελέτης, ενώ οι πολύτιμες συμβουλές και η συνεχής διαθεσιμότητά του με βοήθησαν να ξεπεράσω κάθε δυσκολία και να εξελιχτώ τόσο ακαδημαϊκά όσο και προσωπικά.

Αφιερώνω αυτή τη διπλωματική εργασία στους αγαπημένους μου γονείς, που με την αγάπη, τη στήριξη και την αδιάκοπη πίστη τους στις δυνατότητές μου αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης και δύναμης σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης, αφιερώνω αυτό το έργο σε όλους εκείνους που πιστεύουν στη συνεχή μάθηση και εξέλιξη, υπενθυμίζοντας ότι με επιμονή, σκληρή δουλειά και αφοσίωση μπορούμε να επιτύχουμε κάθε στόχο

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εξετάζει τις στρατηγικές άρδευσης στην υδροπονική καλλιέργεια τομάτας και αγγουριού, εστιάζοντας στα υποστρώματα πετροβάμβακα, κοκοφοίνικα, περλίτη και ελαφρόπετρας. Η υδροπονία αποτελεί μια σύγχρονη και καινοτόμο μέθοδο καλλιέργειας που προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως τη βελτιωμένη διαχείριση των φυσικών πόρων, τη μείωση της κατανάλωσης νερού και την αύξηση της παραγωγικότητας. Παράλληλα, η δυνατότητα ελέγχου των καλλιεργητικών παραμέτρων συμβάλλει στη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών και στη διασφάλιση της ποιότητας της παραγωγής. Η εργασία αυτή είναι καθαρά βιβλιογραφική και βασίζεται στην ανάλυση επιστημονικών πηγών για την κατανόηση των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών των τεσσάρων υποστρωμάτων. Συγκεκριμένα, εστιάζει στον τρόπο με τον οποίο τα υποστρώματα αυτά επηρεάζουν τις στρατηγικές άρδευσης, τη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων και τη συνολική απόδοση των καλλιεργειών. Μέσα από τη μελέτη, διερευνώνται οι διαφορές στην απορρόφηση και αποστράγγιση του νερού, καθώς και η αποτελεσματικότητα των υποστρωμάτων σε διαφορετικά συστήματα υδροπονίας. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι ο πετροβάμβακας, χάρη στη σταθερότητά του, είναι κατάλληλος για συστήματα ακριβείας που απαιτούν ακριβή διαχείριση του νερού. Ο κοκοφοίνικας, ως οργανικό πορώδες μέσο προερχόμενο από ανανεώσιμες πρώτες ύλες που υφίστανται ελάχιστη επεξεργασία (κομποστοποίηση), είναι το πλέον φιλικό προς το περιβάλλον υπόστρωμα υδροπονικής καλλιέργειας. Επιπλέον, χάρη στο υψηλό πορώδες του, την πολύ καλή ικανότητα συγκράτησης υγρασίας και την σχετικά υπέρτερη υδραυλική του αγωγιμότητα, επιδεικνύει πολύ καλή καλλιεργητική συμπεριφορά. Ο περλίτης, χάρη στις αποστραγγιστικές του ιδιότητες, είναι ιδανικός για την παροχή επαρκούς αερισμού στις ρίζες των φυτών, ενώ η ελαφρόπετρα πλεονεκτεί ως προς το κόστος αγοράς της ενώ επιδεικνύει ικανοποιητική καλλιεργητική συμπεριφορά. Η μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η σωστή επιλογή υποστρώματος και στρατηγικής άρδευσης είναι καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη βιώσιμης και αποδοτικής υδροπονικής καλλιέργειας. Τα συμπεράσματα παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες στους καλλιεργητές, οι οποίοι μπορούν να εφαρμόσουν τις βέλτιστες πρακτικές για να επιτύχουν μέγιστη παραγωγικότητα και αειφορία.

Λέξεις – Κλειδιά

Υδροπονία, Στρατηγικές άρδευσης, Τομάτα, Αγγούρι, Υποστρώματα, Πετροβάμβακας, Κοκοφοίνικας, Περλίτης, Ελαφρόπετρα

Study of Irrigation Management Strategies in Hydroponic Cultivation of Tomatoes and Cucumbers Grown on Different Substrates

Ioannis Kokkinos

Abstract

This study examines irrigation strategies in hydroponic cultivation of tomatoes and cucumbers, focusing on the substrates rockwool, coconut coir, perlite, and pumice stone. Hydroponics is a modern and innovative cultivation method that offers significant advantages, such as improved management of natural resources, reduced water consumption, and increased productivity. Additionally, the ability to control cultivation parameters contributes to optimal plant growth and ensures production quality.

This work is purely bibliographic and relies on the analysis of scientific sources to understand the physical and chemical characteristics of the four substrates. Specifically, it focuses on how these substrates affect irrigation strategies, the availability of nutrients, and the overall performance of crops. The study investigates differences in water absorption and drainage, as well as the efficiency of the substrates in different hydroponic systems.

The findings indicate that rockwool, due to its stability, is suitable for precision systems requiring accurate water management. Coconut coir, as an organic porous medium derived from renewable raw materials that undergo minimal processing (composting), is the most environmentally friendly hydroponic cultivation substrate. Furthermore, due to its high porosity, excellent moisture retention capacity, and relatively superior hydraulic conductivity, it exhibits very good cultivation performance. Perlite, owing to its drainage properties, is ideal for providing adequate aeration to plant roots, while pumice stone has the advantage of lower purchase cost and demonstrates satisfactory cultivation performance.

The study concludes that the proper selection of substrate and irrigation strategy is crucial for achieving sustainable and efficient hydroponic cultivation. The conclusions provide valuable

insights for growers, enabling them to apply best practices to maximize productivity and sustainability.

Keywords

Hydroponics, Irrigation strategies, Tomato, Cucumber, Substrates, Rockwool, Coconut coir, Perlite, Pumice stone

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1 Παρουσίαση του Θέματος.....	10
1.2 Ιστορία της Υδροπονίας.....	11
1.3 Διεθνής Εξάπλωση της Υδροπονίας.....	11
1.4 Η Εξέλιξη της Υδροπονίας στην Ελλάδα.....	12
1.5 Σημασία της Μελέτης.....	12
1.6 Στόχος της Εργασίας.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ	
ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	14
2.1 Εισαγωγή στα Υποστρώματα	14
2.1.1 Ο ρόλος των υποστρωμάτων στην υδροπονία.....	14
2.1.2 Σημασία της επιλογής του κατάλληλου υποστρώματος.....	15
2.1.3 Γενικές πληροφορίες για τον περλίτη, τον πετροβάμβακα, την ελαφρόπετρα και τον κοκοφοίνικα	16
2.2 Φυσικά χαρακτηριστικά των υποστρωμάτων	20
2.2.1 Κοκκομετρική Κατανομή.....	20
2.1.2 Ολικό Πορώδες και Ενεργό Πορώδες.....	21
2.1.3 Φαινόμενο Ειδικό Βάρος	22
2.1.4 Περιεκτικότητα του υποστρώματος σε στερεά, υγρή και αέρια ύλη	23
2.1.5 Ειδική Επιφάνεια.....	24
2.1.6 Υδατοχωρητικότητα Φυτοδοχείου.....	25
2.1.7 Αεροπερατότητα Φυτοδοχείου	25
2.1.8 Υδραυλική Αγωγιμότητα.....	26
2.1.9 Γενικές πληροφορίες	27
2.3 Χημικά χαρακτηριστικά υποστρωμάτων.....	31
2.3.1 Χημική Σύσταση	31
2.3.2 Ανταλλακτική Ικανότητα Υποστρωμάτων.....	32
2.3.3 Οξύτητα (pH) των Υποστρωμάτων.....	34
2.3.4 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα των Υποστρωμάτων	34
2.3.5 Περιεκτικότητα Υποστρωμάτων σε Διαθέσιμα Θρεπτικά Στοιχεία	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΟΣΗ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ	37
3.1 Ο ρόλος της άρδευσης στις υδροπονικές καλλιέργειες.....	37
3.2 Δοση άρδευσης	39
3.3 Συχνότητα άρδευσης	44
3.3.1 Προγραμματισμός άρδευσης με χρονοδιακόπτη	46
3.3.2 Προγραμματισμός άρδευσης μέσω ηλιακής ακτινοβολίας	46

3.3.3 Άρδευση με βάση την υγρασία στο υπόστρωμα	48
3.3.4 Άρδευση με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα στο υπόστρωμα	51
3.3.5 Άρδευση με προσομοίωση της διαπνοής	52
3.3.6 Άρδευση με αισθητήρες μέτρησης φυσιολογικών παραμέτρων του φυτού	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΦΥΤΟΥ ΜΕΣΩ ΑΡΔΕΥΣΗΣ	58
4.1 Εισαγωγή	58
4.2 Παράμετροι άρδευσης για ισορροπία	59
4.2.1 Περιεκτικότητα σε υγρασία στο περιβάλλον της ρίζας	59
4.2.2 Ηλεκτρική αγωγιμότητα στο υπόστρωμα	59
4.3 Δόση και Συχνότητα Κύκλων Άρδευσης	60
4.4 Ώρα Έναρξης και Διακοπής Άρδευσης	61
4.5 Πρόγραμματισμός άρδευσης	62
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πρόλογος

Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και οι περιορισμένοι φυσικοί πόροι καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή καινοτόμων τεχνικών γεωργίας. Η υδροπονία, ως μια μέθοδος καλλιέργειας που βασίζεται στη χρήση θρεπτικών διαλυμάτων και ειδικών υποστρωμάτων, προσφέρει λύσεις για τη βιώσιμη παραγωγή τροφίμων, ειδικά σε περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση σε νερό ή κατάλληλο έδαφος. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία εξετάζει τη σημασία και την εφαρμογή στρατηγικών άρδευσης στις υδροπονικές καλλιέργειες τομάτας και αγγουριού, δύο από τις πιο σημαντικές καλλιέργειες στην υδροπονική γεωργία.

1.1 Παρουσίαση του Θέματος

Η υδροπονία αποτελεί μία από τις πιο εξελιγμένες μεθόδους καλλιέργειας, η οποία αναπτύσσεται διαρκώς ως απάντηση στις αυξανόμενες ανάγκες για βιώσιμη γεωργία και διατροφική ασφάλεια. Βασίζεται στην καλλιέργεια φυτών χωρίς τη χρήση εδάφους, με τη χορήγηση υδατικών διαλυμάτων πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά και την χρήση εξειδικευμένων υποστρωμάτων. Η μέθοδος αυτή προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως, μείωση της κατανάλωσης νερού έως και 90% σε σύγκριση με τις συμβατικές καλλιέργειες και βελτίωση της απόδοσης. Δίνει επίσης την δυνατότητα να καλλιεργήσει κάποιος σε περιοχές με περιορισμένους υδάτινους πόρους (Stanghellini et al., 2019, Κωσταρέλου, 2014). Οι καλλιέργειες τομάτας και αγγουριού αποτελούν από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές της υδροπονικής γεωργίας. Χαρακτηρίζονται από υψηλή εμπορική αξία αλλά και αυξημένες απαιτήσεις σε θρεπτικά στοιχεία και διαχείριση υδάτινων πόρων. Η επιλογή κατάλληλων υποστρωμάτων, όπως ο πετροβάμβακας, ο κοκοφοίνικας, ο περλίτης και η ελαφρόπετρα, είναι καθοριστική για τη επιτυχία της καλλιέργειας. Κάθε υπόστρωμα διαθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά απορρόφησης, αποστράγγισης και αερισμού, επηρεάζοντας άμεσα τη διαθεσιμότητα νερού και θρεπτικών στοιχείων (Sharma et al., 2022, Κωσταρέλου, 2014). Η διαχείριση της άρδευσης στις υδροπονικές καλλιέργειες παίζει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη, την παραγωγικότητα και την ποιότητα των τελικών προϊόντων. Προηγμένες στρατηγικές άρδευσης, όπως με την χρήση αισθητήρων υγρασίας, την προγραμματισμένη άρδευση βάσει ηλιακής ακτινοβολίας και τα αυτοματοποιημένα συστήματα, μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα χρήσης νερού, μειώνοντας παράλληλα τη σπατάλη νερού και λιπασμάτων (Stanghellini et al., 2019, Κωσταρέλου, 2014). Η παρούσα εργασία εστιάζει στη διερεύνηση των ιδιοτήτων των υποστρωμάτων και των στρατηγικών άρδευσης στις

υδροπονικές καλλιέργειες τομάτας και αγγουριού. Στόχος είναι η ανάδειξη βέλτιστων πρακτικών που συνδυάζουν υψηλή παραγωγικότητα με βιώσιμη χρήση των πόρων, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα της υδροπονικής γεωργίας.

1.2 Ιστορία της Υδροπονίας

Η υδροπονία, αν και θεωρείται σύγχρονη τεχνολογία, έχει τις ρίζες της βαθιά στην ιστορία. Οι πρώτες ενδείξεις υδροπονικής καλλιέργειας μπορούν να εντοπιστούν στους Κρεμαστούς Κήπους της Βαβυλώνας (περίπου 600 π.Χ.), ένα από τα Επτά Θαύματα του Αρχαίου Κόσμου, όπου χρησιμοποιούνταν συστήματα ροής νερού για την άρδευση φυτών. Παρόμοια συστήματα βρέθηκαν στους πλωτούς κήπους των Αζτέκων, γνωστοί ως Chinampas, που ανέπτυσαν καλλιέργειες σε τεχνητές νησίδες. Η επιστημονική μελέτη της υδροπονίας ξεκίνησε τον 17ο αιώνα με τον Jan Baptista van Helmont, που απέδειξε ότι τα φυτά δεν παίρνουν τη θρεπτική τους αξία αποκλειστικά από το έδαφος, και τον John Woodward, που ερεύνησε τη σύνθεση των θρεπτικών διαλυμάτων. Η υδροπονία πήρε τη σύγχρονη μορφή της τον 20ό αιώνα, με πρωτοπόρο τον William F. Gericke από το Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνιας, που ανέδειξε τη μέθοδο ως βιώσιμη για τη γεωργία μεγάλης κλίμακας. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, οι Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποίησαν υδροπονικά συστήματα για να παράγουν φρέσκα προϊόντα σε απομονωμένα νησιά, σηματοδοτώντας την αρχή της εμπορικής χρήσης της τεχνολογίας (Resh, 2013).

1.3 Διεθνής Εξάπλωση της Υδροπονίας

Η υδροπονική καλλιέργεια έχει γνωρίσει εντυπωσιακή εξάπλωση τις τελευταίες δεκαετίες, ιδιαίτερα σε χώρες με έντονη αγροτική δραστηριότητα και περιορισμένους φυσικούς πόρους. Στην Ευρώπη, χώρες όπως η Ολλανδία και η Ισπανία έχουν πρωτοστατήσει, ενσωματώνοντας προηγμένα θερμοκήπια που χρησιμοποιούν τεχνολογίες αιχμής. Η Ολλανδία, ειδικότερα, αποτελεί παγκόσμιο κέντρο υδροπονικής καλλιέργειας, με σημαντικές επενδύσεις σε καινοτομία και βιωσιμότητα. Στην Ασία, χώρες όπως η Ιαπωνία και η Νότια Κορέα έχουν προωθήσει την υδροπονία ως απάντηση στις αυξημένες ανάγκες για διατροφική ασφάλεια και μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα προϊόντα. Η Ινδία, από την άλλη, αν και νέα στην

υδροπονία, παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη, με την τεχνολογία να κερδίζει έδαφος χάρη στη δυνατότητα παραγωγής σε ξηρές περιοχές (Sharma et al., 2022). Στις Ηνωμένες Πολιτείες, οι υδροπονικές καλλιέργειες αντιπροσωπεύουν σημαντικό ποσοστό της τοπικής παραγωγής λαχανικών, ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές όπου η ζήτηση για φρέσκα και τοπικά προϊόντα είναι υψηλή. Με την αγορά υδροπονικών προϊόντων να φτάνει τα 9 δισεκατομμύρια δολάρια το 2021, η τεχνολογία αυτή θεωρείται ορόσημο στη βιώσιμη γεωργία (Resh, 2013, Sharma et al., 2022).

1.4 Η Εξέλιξη της Υδροπονίας στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, η υδροπονία έκανε την εμφάνισή της τη δεκαετία του 1980, αρχικά ως πειραματική μέθοδος για την καλλιέργεια τομάτας και αγγουριού σε θερμοκήπια. Η ανάγκη για μείωση της κατανάλωσης νερού και βελτίωση της ποιότητας των αγροτικών προϊόντων οδήγησε σε αυξημένο ενδιαφέρον για την υδροπονική καλλιέργεια, ιδιαίτερα σε περιοχές όπως η Κρήτη και η Βόρεια Ελλάδα, όπου οι υδάτινοι πόροι είναι περιορισμένοι. Η Ελλάδα πλέον διαθέτει σημαντικές υδροπονικές μονάδες, κυρίως για την καλλιέργεια τομάτας και πιπεριάς, οι οποίες χρησιμοποιούν υποστρώματα όπως ο περλίτης και ο κοκοφοίνικας. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση αισθητήρων και αυτοματοποιημένων συστημάτων άρδευσης έχει βελτιώσει την αποδοτικότητα των καλλιεργειών, μειώνοντας τις απώλειες νερού και θρεπτικών στοιχείων (Κωσταρέλου, 2014, Μπλέτσας, 2016). Παρά τα εμπόδια, όπως το υψηλό κόστος εγκατάστασης, η υδροπονία κερδίζει συνεχώς έδαφος στη χώρα, με αυξανόμενο αριθμό επενδύσεων στον τομέα αυτό.

1.5 Σημασία της Μελέτης

Η μελέτη των στρατηγικών άρδευσης και της επιλογής του κατάλληλου υποστρώματος είναι κρίσιμη για την επιτυχία των υδροπονικών καλλιεργειών. Οι ανάγκες σε νερό, θρεπτικά στοιχεία και αερισμό των ριζών ποικίλουν ανάλογα με το υπόστρωμα και την καλλιέργεια, επηρεάζοντας άμεσα την παραγωγικότητα και την ποιότητα των προϊόντων. Η κατανόηση της σχέσης μεταξύ των υποστρωμάτων (πετροβάμβακα, κοκοφοίνικα, περλίτη και ελαφρόπετρας) και των στρατηγικών άρδευσης συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της χρήσης

πόρων, στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και στη διασφάλιση της βιωσιμότητας της υδροπονικής γεωργίας.

1.6 Στόχος της Εργασίας

Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι η διερεύνηση και αξιολόγηση των στρατηγικών άρδευσης στην υδροπονική καλλιέργεια τομάτας και αγγουριού που αναπτύσσονται σε διαφορετικά υποστρώματα. Αρχικά, επιδιώκεται η ανάλυση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων των υποστρωμάτων, καθώς και η διερεύνηση της επίδρασής τους στις ανάγκες άρδευσης των καλλιεργειών. Παράλληλα, πραγματοποιείται σύγκριση των στρατηγικών άρδευσης για κάθε υπόστρωμα, λαμβάνοντας υπόψη τη διαχείριση του νερού και των θρεπτικών συστατικών. Τέλος, στόχος είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επιλογή των βέλτιστων πρακτικών, οι οποίες θα συμβάλλουν στην ενίσχυση της παραγωγικότητας και της βιωσιμότητας των υδροπονικών καλλιεργειών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΦΥΣΙΚΑ ΚΑΙ ΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

2.1 Εισαγωγή στα Υποστρώματα

Με την πάροδο των ετών, η αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή έχει εντείνει την αναζήτηση για πιο βιώσιμα συστήματα παραγωγής τροφίμων, ιδίως όταν χρησιμοποιούνται μη ανανεώσιμοι πόροι, όπως το νερό (Rosa-Rodriguez, 2020). Αυτή η διαδικασία οδήγησε σε αύξηση των καλλιεργούμενων εκτάσεων σε προστατευμένα περιβάλλοντα, καθώς προσφέρουν πλεονεκτήματα, όπως καλύτερο έλεγχο των κλιματικών συνθηκών, που έχει ως αποτέλεσμα φυτά με ανώτερη ανάπτυξη (Raviv and Lieth, 2008), σε σύγκριση με τις συνθήκες ανοιχτού αγρού. Η καλλιέργεια σε προστατευμένα περιβάλλοντα συνδέεται με τη χρήση φυτοδοχείων και, κατ' επέκταση, με τη χρήση υποστρωμάτων (Raviv, 2017). Η καλλιέργεια φυτών θερμοκηπίου σε υποστρώματα θεωρείται μια αποδοτική εναλλακτική λύση αντί της αποστείρωσης του εδάφους, ειδικά μετά την κατάργηση του βρωμιούχου μεθυλίου σύμφωνα με το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, λόγω των αρνητικών του επιπτώσεων στο περιβάλλον. Επιπλέον, η καλλιέργεια θερμοκηπιακών φυτών σε υποστρώματα είναι δυνατή ακόμη και σε αλατούχα, νατρίουχα ή άγονα εδάφη με κακή δομή, τα οποία αποτελούν σημαντικό ποσοστό της καλλιεργήσιμης γης παγκοσμίως (Bougoul et al., 2005, Savvas, 2003). Υπάρχουν διάφορες έννοιες για τα υποστρώματα των φυτών, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί από διαφορετικούς συγγραφείς. Ο Fonteno (1996) υποστηρίζει ότι οποιοδήποτε υλικό τοποθετείται σε ένα δοχείο, γίνεται υπόστρωμα για φυτά, ενώ ο Kämpf (2005) δηλώνει ότι τα "μέσα καλλιέργειας" είναι το περιβάλλον όπου αναπτύσσονται οι ρίζες των φυτών σε καλλιέργεια χωρίς έδαφος. Ο Vence (2008), στην βιβλιογραφική του ανασκόπηση, συγκεντρώνει διάφορες έννοιες και τις συνοψίζει ως εξής: "Ως υπόστρωμα για τα φυτά μπορεί να οριστεί το οποιοδήποτε πορώδες υλικό, που χρησιμοποιείται μόνο του ή σε μείγμα, το οποίο, όταν τοποθετείται σε δοχείο, παρέχει στήριξη και επαρκή επίπεδα νερού και οξυγόνου για τη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών".

2.1.1 Ο ρόλος των υποστρωμάτων στην υδροπονία

Οι βασικές λειτουργίες ενός υποστρώματος για τα φυτά είναι να παρέχει στήριξη στις ρίζες, να συγκρατεί και να καθιστά διαθέσιμο το νερό, να διαθέτει χώρο για αερισμό ακόμη και σε

κατάσταση κορεσμού, να έχει δομική σταθερότητα, ικανότητα προσρόφησης και ρυθμιστική ικανότητα έναντι αλλαγών του pH. Να έχει προβλέψιμη δυναμική θρεπτικών στοιχείων και ηλεκτρική αγωγιμότητα, να παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά υπό το καθεστώς ίδιας διαχείρισης, να έχει περιορισμένη βιολογική δραστηριότητα, να μην περιέχει ασθένειες και ουσίες που μπορούν να βλάψουν την ανάπτυξη των φυτών και να έχει καλή ικανότητα επαναυδάτωσης μετά από ξήρανση.

2.1.2 Σημασία της επιλογής του κατάλληλου υποστρώματος.

Οι βασικές ιδιότητες των υποστρωμάτων σχετίζονται με τα φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά τους (Schafer et al., 2015). Όσον αφορά τα φυσικά χαρακτηριστικά, που θεωρούνται τα πιο σημαντικά, περιλαμβάνονται η κοκκομετρική κατανομή, το φαινόμενο ειδικό βάρος, η περιεκτικότητα σε στερεά, υγρή και αέρια φάση, η ειδική επιφάνεια, η υδατοχωρητικότητα και αεροπερατότητα φυτοδοχείου και η υδραυλική αγωγιμότητα. Τα πιο σημαντικά χημικά χαρακτηριστικά των υποστρωμάτων περιλαμβάνουν την χημική σύνθεση του υποστρώματος, την οξύτητα (pH), την ηλεκτρική αγωγιμότητα, την ανταλλακτική ικανότητα και την περιεκτικότητα των υποστρωμάτων σε διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία. Η σωστή επιλογή και διαχείριση του υποστρώματος είναι κρίσιμη για την επιτυχία μιας καλλιέργειας. Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι αυτή η επιτυχία εξαρτάται από την αλληλεπίδραση διαφόρων παραγόντων, όπως αυτήν μεταξύ του υποστρώματος, των φυτοδοχείων και των ειδικών χαρακτηριστικών κάθε είδους/ποικιλίας, που θα καθορίσουν το σύστημα διαχείρισης της καλλιέργειας. Τα κύρια υποστρώματα που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως είναι ο κοκκοφοίνικας, ο πετροβάμβακας, ο περλίτης και η ελαφρόπετρα (Σάββας, 2011). Η διάταξη του συστήματος καλλιέργειας σε υποστρώματα μπορεί να διαφέρει, κυρίως ανάλογα με τον υποδοχέα του υποστρώματος (Van Os et al., 2008). Οι υποδοχείς του υποστρώματος μπορεί να είναι σάκοι, γλάστρες, άλλοι τύποι δοχείων ή αυλάκια (Savvas et al., 2013). Παρόλο που το κόστος του υποστρώματος είναι υψηλότερο όταν συσκευάζεται σε σάκους, η καλλιέργεια σε σάκους αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο καλλιέργειας, καθώς οι σάκοι μπορούν να τυποποιηθούν και να είναι ομοιόμορφοι και εύχρηστοι, μειώνοντας έτσι το κόστος των εργατικών και τα σφάλματα κατά την εγκατάσταση. Οι σάκοι κατασκευάζονται από πολυαιθυλένιο ανθεκτικό στην υπεριώδη ακτινοβολία, με λευκό εξωτερικό στρώμα που αντανακλά την ακτινοβολία, περιορίζοντας έτσι την υπερθέρμανση, και μαύρο εσωτερικό στρώμα για να μην μπορούν να αναπτυχθούν άλγη. Πριν από τη φύτευση μιας νέας καλλιέργειας το υπόστρωμα αρδεύεται μέχρι το σημείο κορεσμού χωρίς να υπάρχει αποστράγγιση, ώστε να διασφαλιστεί ο πλήρης κορεσμός των πόρων του με θρεπτικό διάλυμα

(Savvas et al., 2013). Αμέσως μετά τη φύτευση, πρέπει να επιτρέπεται πλήρης αποστράγγιση για την αποφυγή δυσμένων συνθηκών στη ριζόσφαιρα λόγω χαμηλής συγκέντρωσης οξυγόνου. Στην καλλιέργεια με σάκους, ανοίγονται σχισμές αποστράγγισης, οι οποίες μπορεί να είναι κάθετες, λοξές ή οριζόντιες, αλλά πρέπει να εκτείνονται μέχρι το κατώτερο επίπεδο του σάκου, ώστε να διευκολύνεται η πλήρης αποστράγγιση και να ελαχιστοποιείται η στασιμότητα του θρεπτικού διαλύματος στο χαμηλότερο τμήμα της ριζόσφαιρας.

2.1.3 Γενικές πληροφορίες για τον περλίτη, τον πετροβάμβακα, την ελαφρόπετρα και τον κοκοφοίνικα

Περλίτης

Ο περλίτης είναι ένα φυσικό υλικό ηφαιστειακής προέλευσης, αποτελούμενο κυρίως από υαλώδεις αργιλοπυριτικό πέτρωμα λευκού χρώματος, το οποίο περιέχει κρυσταλλικό νερό σε ποσοστό 2-6%. Ο περλίτης είναι ένα καθιερωμένο υπόστρωμα στην Ευρώπη, ενώ στη Μεσόγειο χρησιμοποιείται ευρύτερα λόγω του χαμηλότερου κόστους του (Grillas et al., 2001). Στην Ελλάδα, σημαντικά κοιτάσματα περλίτη εντοπίζονται στη Μήλο, την Αντίπαρο, τη Νίσυρο και την Κω. Το πρωτογενές ορυκτό υλικό θερμαίνεται για σύντομο χρονικό διάστημα στους 1.000°C, διαδικασία που προκαλεί τη διόγκωση του υλικού και τη δημιουργία μιας αφρώδους μάζας με όγκο 10 έως 20 φορές μεγαλύτερο από τον αρχικό. Αυτή η μεταβολή οφείλεται στην εξαέρωση του εγκλωβισμένου νερού και την ανάμιξή του με αέρα (Hanna, 2005). Με την ψύξη, οι κενές θέσεις όπου υπήρχε αέρας παραμένουν άδειες, προσδίδοντας στον περλίτη πορώδη υφή, η οποία ενισχύει την ικανότητά του να συγκρατεί νερό. Η δομή του διογκωμένου περλίτη χαρακτηρίζεται από κλειστούς και ανοιχτούς πόρους. Οι ανοιχτοί πόροι, ιδιαίτερα οι μικρότεροι, είναι υπεύθυνοι για τη συγκράτηση του νερού, ενώ στους μεγαλύτερους πόρους παραμένει αέρας ακόμη και μετά την ύγρανση. Αντίθετα, οι κλειστοί πόροι, που αποτελούν περίπου το 1-10% του συνολικού πορώδους, δεν συνεισφέρουν στη συγκράτηση νερού (Marfa et al., 1993). Η χημική σύσταση του περλίτη περιλαμβάνει κυρίως διοξείδιο του πυριτίου (περίπου 75%), οξείδιο του αργιλίου (14%) και μικρότερες ποσότητες οξειδίων νατρίου, καλίου και σιδήρου (Χαρίτος, 1989). Μετά τη θερμική επεξεργασία, η ανταλλακτική ικανότητα του περλίτη μειώνεται δραστικά, καθιστώντας τον χημικά αδρανές υλικό, με ΙΑΚ της τάξης των 22-24 meq/kg (Gizas et al., 2001). Ο περλίτης που χρησιμοποιείται σε υδροπονικές καλλιέργειες έχει κόκκους μεγέθους 0-2 mm ή 1,5-3 mm

(Raviv et al., 2002). Οι λεπτόκοκκοι τύποι περλίτη είναι προτιμότεροι λόγω της υψηλότερης ικανότητάς τους να συγκρατούν υγρασία (Marfa et al., 1993). Συνήθως, ο περλίτης χρησιμοποιείται σε σάκους καλλιέργειας διαφόρων μεγεθών, οι οποίοι είναι φτιαγμένοι από πλαστικό διπλής όψης: μαύρο στο εσωτερικό και λευκό στο εξωτερικό (Szmids et al., 1988). Αυτή η μορφή διάθεσης προτιμάται, καθώς επιτρέπει τη φύτευση των φυτών απευθείας πάνω στους σάκους, μειώνοντας τα κόστη εργασίας για μεταφορά και εγκατάσταση σε άλλα φυτοδοχεία. Στην ελληνική αγορά, ο περλίτης διατίθεται σε σάκους 33 και 45 λίτρων, με κόκκους μεγέθους 0,5-2,5 mm. Η δομή και οι φυσικές ιδιότητες του περλίτη τον καθιστούν ιδανικό υπόστρωμα για υδροπονικές καλλιέργειες, παρέχοντας αποτελεσματική συγκράτηση υγρασίας και ικανοποιητικό αερισμό για τις ρίζες των φυτών (Σάββας, 2011).

Πετροβάμβακας

Ο πετροβάμβακας είναι ένα ανόργανο υλικό με ινώδη δομή, που προκύπτει από την επεξεργασία ενός μείγματος πρώτων υλών όπως η διαβάση, ο ασβεστόλιθος και ο άνθρακας (Verwer, 1976). Το μείγμα θερμαίνεται στους 1600°C (Sonneveld, 1989), θερμοκρασία κατά την οποία ρευστοποιείται, και με τη βοήθεια περιστρεφόμενου τυμπάνου δημιουργούνται πολύ λεπτές ίνες. Αυτές οι ίνες, πάχους 0,004-0,006 mm και μήκους περίπου 3 mm, συγκολλούνται σε μια αραιή τρισδιάστατη πλέξη χρησιμοποιώντας ειδική ρητίνη, παράγοντας ένα ελαφρύ και εξαιρετικά πορώδες υλικό με βαμβακώδη όψη (Blaabjerg, 1983, Bougoul et al., 2005). Ο πετροβάμβακας αρχικά παραγόταν ως μονωτικό υλικό στη βιομηχανία κατασκευών. Λόγω του μικρού του βάρους και της ευκολίας χειρισμού του, έχει καταστεί το κυρίαρχο υπόστρωμα για την παραγωγή καρποφόρων λαχανικών σε θερμοκήπια παγκοσμίως (Gruda et al., 2016b). Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας παραγωγής του, ο πετροβάμβακας είναι πλήρως αποστειρωμένος, χωρίς παθογόνους μικροοργανισμούς, ζιζάνια ή άλλους εχθρούς. Ο πετροβάμβακας διατίθεται σε διάφορες μορφές, όπως κύβοι και πλάκες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την προβλάστηση ή την ανάπτυξη των φυτών, αντίστοιχα. Το ύψος των πλακών επιλέγεται βάσει των υδραυλικών τους ιδιοτήτων, ενώ η δυνατότητα προσαρμογής τους στις ανάγκες κάθε καλλιέργειας είναι σημαντική. Οι πρόσφατες ανισότροπες πλάκες πετροβάμβακα, που διαθέτουν πυκνότερη πλέξη στο ανώτερο τμήμα τους, παρέχουν ακόμα καλύτερη κατανομή της υγρασίας στο υπόστρωμα (Bougoul et al., 2005), ενώ η διάταξη των ινών, είτε σε κατακόρυφη είτε σε οριζόντια διεύθυνση, επηρεάζει την υδραυλική του συμπεριφορά. Οι ιδιότητες αυτές καθιστούν τον πετροβάμβακα ένα από τα πιο αξιόπιστα και

αποτελεσματικά υποστρώματα για υδροπονικές καλλιέργειες. Ο πετροβάμβακας αποτελείται κυρίως από οξείδια διαφόρων στοιχείων, όπως το πυρίτιο, το ασβέστιο, το μαγνήσιο, ο σίδηρος και το αργίλιο (Blaabjerg, 1983). Οι χημικές διαφορές ανάμεσα στους διάφορους τύπους πετροβάμβακα οφείλονται κυρίως στη μεταβλητή σύνθεση του ορυκτού διαβάση, που αποτελεί την κύρια πρώτη ύλη κατά την παραγωγή του. Επιπλέον, οι μέθοδοι επεξεργασίας που εφαρμόζονται σε κάθε εργοστάσιο συμβάλλουν επίσης σε αυτές τις διακυμάνσεις. Έρευνες από τους De Rijck και Schrevens (1998) αναφέρουν ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετροβάμβακα κυμαίνεται μεταξύ 0,05 και 0,1 dS/m. Αυτό το χαρακτηριστικό τον καθιστά χημικά αδρανές υλικό, γεγονός που επιτρέπει την ακριβή διαχείριση της θρέψης των φυτών μέσω της προσθήκης θρεπτικού διαλύματος με προσεκτικά επιλεγμένη σύσταση (Σάββας, 2011).

Ελαφρόπετρα

Η ελαφρόπετρα, γνωστή και ως κίσσηρη, είναι ένα ηφαιστειογενές αργιλοπυριτικό πέτρωμα με έντονα πορώδη υφή που εκτείνεται σε όλη τη μάζα, γεγονός που του προσδίδει χαμηλό ειδικό βάρος. Η πορώδης δομή της σχηματίζεται από την απότομη εξαέρωση υδρατμών και άλλων αερίων κατά την ψύξη του ηφαιστειακού μάγματος, από το οποίο προέρχεται (Raviv et al., 2002). Κατά την έξοδο του μάγματος στην ατμόσφαιρα, το νερό εξατμίζεται γρήγορα, προκαλώντας διόγκωση και δημιουργία πόρων καθώς το υλικό στερεοποιείται. Στην Ελλάδα, η ελαφρόπετρα βρίσκεται σε σημαντικά κοιτάσματα στα νησιά του Αιγαίου, με το μεγαλύτερο να εντοπίζεται στο Γυαλί της Νισύρου (Γκίζας κ.ά, 2003). Η επάρκεια του υλικού είναι πολύ μεγάλη, καλύπτοντας άνετα τις ανάγκες των υδροπονικών καλλιεργειών στη χώρα μας. Η ελαφρόπετρα διατίθεται σε διάφορους κοκκομετρικούς τύπους, όπως 0-3 mm, 0-8 mm, και 2-10 mm, με κάθε τύπο να εξυπηρετεί διαφορετικές εφαρμογές. Η ελαφρόπετρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους υποδοχείς, όπως φυτοδοχεία, σάκους καλλιέργειας και κανάλια, με τις διαστάσεις να ποικίλλουν ανάλογα με το είδος της καλλιέργειας και τον επιθυμητό όγκο υποστρώματος ανά φυτό. Ιδιαίτερη σημασία έχει η επιλογή του ύψους τοποθέτησης του υποστρώματος, η οποία εξαρτάται από τον κοκκομετρικό τύπο. Οι τύποι με μικρότερους κόκκους (0-2 mm και 0-5 mm) προσφέρουν υψηλότερες αποδόσεις όταν τοποθετούνται σε στρώματα μεγαλύτερου ύψους, ενώ ο τύπος 0-8 mm θεωρείται ο πιο ασφαλής για γενική χρήση σε καλλιέργειες εκτός εδάφους (Σάββας, 2011). Όπως επισημαίνουν οι Milks et al. (1989b) και Fonteno (1996), η μύζηση σε ένα σημείο μέσα στο πορώδες ενός υποστρώματος σε ένα

φυτοδοχείο μεταβάλλεται όχι μόνο σε σχέση με την υγρασία στο σημείο αυτό, αλλά και με το ύψος του σε σχέση με τον πυθμένα του δοχείου. Επομένως, καθώς τόσο το εύκολα διαθέσιμο νερό όσο και η υδραυλική αγωγιμότητα σχετίζονται με την μύζηση, η διαθεσιμότητα νερού και αέρα μεταβάλλεται σε διαφορετικά ύψη στο πορώδες του υποστρώματος μέσα στο δοχείο. Συνεπώς, η διαμόρφωση του ύψους ενός δεδομένου όγκου υποστρώματος, όταν τοποθετείται σε σάκο ή δοχείο, ρυθμίζοντας κατάλληλα τις οριζόντιες διαστάσεις του, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τη διαθεσιμότητα αέρα και νερού για τα φυτά και, συνεπώς, την απόδοση της καλλιέργειας. Πράγματι, όπως αναφέρουν οι Gizas και Savvas (2007), η τοποθέτηση ενός συγκεκριμένου τύπου ελαφρόπετρας σε γλάστρες ύψους 17 εκατοστών, αύξησε την αεροπερατότητα στο 11,2%, σε σύγκριση με εκείνη που μετρήθηκε σε σάκους ύψους 8 εκατοστών, η οποία ήταν μόλις 6,3%.

Κοκκοφοίνικας

Ο κόκος (συντά στην πράξη αναφερόμενος και ως κοκοφοίνικας) προέρχεται από την μερική αποσύνθεση (κομποστοποίηση) του ινώδους περικαρπίου της ινδικής καρύδας, το οποίο αποτελεί το μεσοκάρπιο του καρπού του κοκοφοίνικα. Οι κοκοφοίνικες καλλιεργούνται ευρέως σε τροπικές χώρες, με κύριες εξαγωγικές περιοχές τη Σρι Λάνκα, την Ινδία και την Ινδονησία. Ο κόκος χρησιμοποιείται κυρίως ως υπόστρωμα καλλιέργειας φυτών και προκύπτει από την κομποστοποίηση του περικαρπίου, το οποίο αποτελεί παραπροϊόν της εκμετάλλευσης της καρύδας. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ετήσια παραγωγή καρύδων φτάνει τους 50 εκατομμύρια τόνους, με το περικάρπιο να αποτελεί περίπου το 25% του συνολικού βάρους (Nichols, 2007). Από αυτό, το 1/3 είναι ίνες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για κατασκευή σχοινιών, ενώ τα υπόλοιπα 2/3 αποτελούν ένα κοκκώδες υλικό που παλαιότερα θεωρούνταν απόβλητο. Το κοκκώδες αυτό υλικό, λόγω των υδροφιλικών του ιδιοτήτων και της σταθερής του δομής, βρέθηκε να είναι κατάλληλο για καλλιέργεια φυτών (Verdonck et al., 1983), σε αντίθεση με το ινώδες τμήμα, το οποίο είναι υδρόφοβο (Raviv et al., 2002).

Η κομποστοποίηση του κόκου πραγματοποιείται υπό αερόβιες συνθήκες και διαρκεί από 2 έως 6 χρόνια. Συνήθως αφήνεται σε σωρούς στην ύπαιθρο, όπου υπόκειται σε φυσική κομποστοποίηση και παράλληλα εκτεταμένη έκπλυση από τροπικές βροχοπτώσεις. Η διαδικασία αυτή μειώνει την περιεκτικότητα του κόκου σε άλατα, καθιστώντας τον κατάλληλο για καλλιέργεια. Με την ολοκλήρωση της κομποστοποίησης, αυξάνεται η περιεκτικότητα σε

χουμικά οξέα, το συνολικό πορώδες και το εύκολα διαθέσιμο νερό. Ο κοκος αποξηραίνεται και συμπιέζεται σε μικρότερο όγκο, ώστε να διευκολυνθεί η μεταφορά του. Στην αγορά διατίθεται κυρίως σε μορφή τούβλων ή πλακών, οι οποίες διογκώνονται ξανά όταν διαβρέχονται. Λόγω της σύστασής του, ο κομποστοποιημένος κοκος είναι φιλικός προς το περιβάλλον, αφού προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές και απορρίπτεται χωρίς περιβαλλοντικούς περιορισμούς. Επιπλέον, τα υπολείμματα κόκου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εδαφοβελτιωτικά ή για αποκατάσταση υποβαθμισμένων τοπίων. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τον κοκοφοίνικα ένα εξαιρετικό υπόστρωμα καλλιέργειας, με εξαιρετική απόδοση και ποιότητα καρπών, προσφέροντας μεγάλες δυνατότητες περαιτέρω διάδοσης στο μέλλον (Σάββας, 2011).

2.2 Φυσικά χαρακτηριστικά των υποστρώματων

2.2.1 Κοκκομετρική Κατανομή

Η κοκκομετρική κατανομή ενός υποστρώματος καλλιέργειας αναφέρεται στη σύσταση του υλικού ως προς τα μεγέθη των κόκκων του. Όπως και στα εδάφη, τα περισσότερα πορώδη υλικά που χρησιμοποιούνται ως υποστρώματα αποτελούνται από μικρά τεμαχίδια, γνωστά ως κόκκοι, που μπορεί να είναι είτε συνενωμένα είτε ασύνδετα μεταξύ τους. Οι κόκκοι ενός υποστρώματος ενδέχεται να έχουν ποικίλα μεγέθη, τα οποία κατηγοριοποιούνται σε κοκκομετρικά κλάσματα. Η εκατοστιαία κατανομή αυτών των κλασμάτων στον συνολικό όγκο του υποστρώματος είναι γνωστή ως κοκκομετρική κατανομή. Η κατανομή αυτή επηρεάζει άμεσα τις φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος, όπως την υδατοϊκανότητα, την αποστράγγιση και τον αερισμό. Τα υποστρώματα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο βασικές κατηγορίες με βάση τη δομή τους. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα υποστρώματα σταθερού σχήματος, όπως ο πετροβάμβακας, όπου οι κόκκοι είναι συνενωμένοι σε ένα συμπαγές σώμα. Στα υποστρώματα αυτά, η έννοια της κοκκομετρικής κατανομής δεν έχει πρακτική αξία. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα κοκκώδη υποστρώματα, όπως ο περλίτης, η ελαφρόπετρα και ο κοκοφοίνικας, στα οποία οι κόκκοι είναι ασύνδετοι μεταξύ τους. Στα υποστρώματα αυτά, η κοκκομετρική κατανομή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επηρεάζει τη συμπεριφορά τους όσον αφορά την αποθήκευση και τη μεταφορά νερού, αέρα και θρεπτικών συστατικών. Η περιγραφή της κοκκομετρικής κατανομής μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι η παρουσίαση της κατανομής ως συνεχής γραμμική συνάρτηση, η οποία

προκύπτει από τη σύνθεση διαδοχικών κοκκομετρικών κλασμάτων (Drzal et al., 1999, Raviv et al., 2002). Σε αυτήν την περίπτωση, κάθε κλάσμα εκφράζεται ως ο λόγος της μάζας των κόκκων που είναι μικρότεροι από μια συγκεκριμένη διάμετρο προς τη συνολική μάζα των κόκκων. Ο δεύτερος τρόπος περιλαμβάνει την κατηγοριοποίηση των κόκκων σε κλάσεις με βάση τα μεγέθη τους. Ενώ στην εδαφολογία το ανώτατο όριο για τους κόκκους του εδάφους είναι τα 2 mm (Scheffer, 1984), στα κοκκώδη υποστρώματα τα μεγέθη συνήθως κυμαίνονται από 1 έως 2 mm. Η κοκκομετρική σύσταση έχει μεγαλύτερη σημασία για τα κοκκώδη υποστρώματα, καθώς επηρεάζει άμεσα την υδροδυναμική συμπεριφορά τους. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι κοκκομετρικές κλάσεις που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των εδαφών συχνά δεν είναι κατάλληλες για τα υποστρώματα, εξαιτίας των διαφορετικών χαρακτηριστικών που έχουν τα τελευταία, όπως το μεγαλύτερο μέγεθος κόκκων (Σάββας, 2011).

2.1.2 Ολικό Πορώδες και Ενεργό Πορώδες

Το ολικό πορώδες ενός υποστρώματος είναι ένας αδιάστατος δείκτης που αντιπροσωπεύει τον λόγο του συνολικού όγκου των πόρων προς τον συνολικό όγκο του υποστρώματος. Μαθηματικά εκφράζεται ως $P = V_p/V_s$, όπου V_p είναι ο όγκος των πόρων και V_s είναι ο συνολικός όγκος του υποστρώματος. Το πορώδες συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό, υπολογιζόμενο από τη σχέση $P (\%) = 100 \times V_p/V_s$, που αντιπροσωπεύει την εκατοστιαία αναλογία του όγκου των πόρων προς τον συνολικό όγκο του υποστρώματος. Στις υδροπονικές καλλιέργειες, το ολικό πορώδες των υποστρωμάτων κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 40% και 95%. Υλικά με υψηλό πορώδες παρέχουν καλύτερο αερισμό και αποστράγγιση, ενώ υποστρώματα με χαμηλότερο πορώδες τείνουν να συγκρατούν περισσότερο νερό. Το ενεργό πορώδες ενός υποστρώματος, από την άλλη, αναφέρεται μόνο στον όγκο των ανοιχτών πόρων που επιτρέπουν την είσοδο και την αποθήκευση νερού. Οι κλειστοί πόροι, οι οποίοι δεν επικοινωνούν με την επιφάνεια του υποστρώματος, εξαιρούνται από τον υπολογισμό (Bunt, 1988). Όταν το υπόστρωμα κορεσθεί πλήρως με νερό, ο όγκος του νερού που απαιτείται για τον πλήρη κορεσμό ισούται με τον όγκο των ανοιχτών πόρων. Το ενεργό πορώδες μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση $P_a = V_{νερού}/V_s$, όπου $V_{νερού}$ είναι ο όγκος του νερού που συγκρατείται σε κατάσταση κορεσμού, και σε ποσοστιαία μορφή ως $P_a (\%) = 100 \times V_{νερού}/V_s$. Το ολικό πορώδες περιλαμβάνει όλους τους πόρους, ανεξάρτητα από το αν είναι ανοιχτοί ή κλειστοί, ενώ το ενεργό πορώδες περιορίζεται μόνο στους ανοιχτούς πόρους που συμμετέχουν στη διαχείριση του νερού και του αέρα. Υλικά με υψηλό ολικό πορώδες προσφέρουν αυξημένη ικανότητα αερισμού και αποστράγγισης, γεγονός που είναι κρίσιμο για την ανάπτυξη των

ριζών. Παράλληλα, το ενεργό πορώδες καθορίζει την ποσότητα του νερού που μπορεί να αποθηκευτεί και να είναι διαθέσιμη για τα φυτά, διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στις υδροπονικές καλλιέργειες (Σάββας, 2011).

2.1.3 Φαινόμενο Ειδικό Βάρος

Το φαινόμενο ειδικό βάρος ενός υποστρώματος είναι ένας δείκτης που υπολογίζεται ως ο λόγος του βάρους μιας συγκεκριμένης ποσότητας υποστρώματος σε ξηρή κατάσταση προς τον συνολικό όγκο που καταλαμβάνει το υπόστρωμα όταν βρίσκεται σε τυποποιημένες συνθήκες πίεσης (Bunt, 1988). Μαθηματικά, εκφράζεται ως: $E_\phi = B_s / V_s$, όπου B_s είναι το βάρος της στερεάς μάζας και V_s ο συνολικός όγκος. Η μονάδα μέτρησής του είναι συνήθως g/cm³, αλλά μπορεί επίσης να εκφραστεί σε g/L, με τη σχέση 1 g/cm³ = 1000 g/L.

Η μέτρηση του φαινομένου ειδικού βάρους γίνεται με τη χρήση συγκεκριμένης ποσότητας υποστρώματος, η οποία τοποθετείται σε νωπή κατάσταση σε βαθμονομημένο κύλινδρο. Αφού κορεσθεί με υγρασία και στραγγιστεί σε τάση νερού 1 kPa, το υπόστρωμα αποξηραίνεται και ζυγίζεται για να προσδιοριστεί η στερεά μάζα (Wever, 1995). Το φαινόμενο ειδικό βάρος μειώνεται όσο αυξάνεται το συνολικό πορώδες του υποστρώματος, καθώς μεγαλύτερος όγκος αντιστοιχεί σε μικρότερη μάζα στερεάς ύλης.

Οι τιμές του φαινομένου ειδικού βάρους διαφέρουν ανάλογα με το είδος του υποστρώματος. Για παράδειγμα, ο περλίτης έχει φαινόμενο ειδικό βάρος από 0,06 έως 0,13 g/cm³ (Marfa et al., 1993), ο πετροβάμβακας από 0,05 έως 0,10 g/cm³ (Smith, 1987), η ελαφρόπετρα από 0,62 έως 0,95 g/cm³ (Gizas & Savvas, 2007), και ο κοκοφοίνικας από 0,04 έως 0,08 g/cm³ (Evans et al., 1996).

Το φαινόμενο ειδικό βάρος είναι κρίσιμο για τις υδροπονικές καλλιέργειες. Τα υποστρώματα με χαμηλό φαινόμενο ειδικό βάρος, όπως ο κοκοφοίνικας και ο πετροβάμβακας, είναι πιο ελαφριά, διευκολύνοντας τη μεταφορά και την εγκατάστασή τους, ενώ μειώνουν και τη μηχανική καταπόνηση των υδροπονικών συστημάτων. Αντίθετα, υλικά όπως η ελαφρόπετρα, που έχουν υψηλότερο ειδικό βάρος, παρέχουν μεγαλύτερη σταθερότητα, καθιστώντας τα κατάλληλα για καλλιέργειες με μακροχρόνια στήριξη. Το εκτεταμένο πορώδες σε υλικά όπως ο κοκοφοίνικας και ο πετροβάμβακας μειώνει το ειδικό βάρος τους λόγω του μεγαλύτερου λόγου όγκου προς στερεή μάζα. Συνολικά, το φαινόμενο ειδικό βάρος αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα στην επιλογή υποστρωμάτων, καθώς επηρεάζει τόσο την πρακτική

χρήση όσο και την απόδοση στις υδροπονικές καλλιέργειες. Χαμηλές τιμές του παρέχουν ευελιξία και μειώνουν τα κόστη, ενώ οι υψηλότερες τιμές σχετίζονται με μεγαλύτερη σταθερότητα και μακροχρόνια χρήση (Σάββας, 2011).

2.1.4 Περιεκτικότητα του υποστρώματος σε στερεά, υγρή και αέρια ύλη

Η περιεκτικότητα ενός υποστρώματος σε στερεά ύλη αναφέρεται στο ποσοστό του συνολικού όγκου του υποστρώματος που καταλαμβάνεται από τη στερεή φάση. Υπολογίζεται με τη σχέση:

$$S=1-P$$

όπου P είναι το ολικό πορώδες του υποστρώματος, δηλαδή ο λόγος του όγκου των πόρων προς τον συνολικό όγκο του υποστρώματος. Η στερεά ύλη αντιπροσωπεύει το υπόλοιπο ποσοστό που δεν καταλαμβάνεται από τους πόρους.

Η περιεκτικότητα σε υγρασία ενός υποστρώματος αναφέρεται στον λόγο του όγκου του νερού που συγκρατείται στο υπόστρωμα προς τον συνολικό όγκο του υποστρώματος. Η μαθηματική έκφραση είναι:

$$\Theta = \frac{V_W}{V_S}$$

όπου V_W είναι ο όγκος του νερού που περιέχεται στο υπόστρωμα και V_S ο συνολικός όγκος του υποστρώματος. Τα πορώδη υποστρώματα συγκρατούν νερό μέσω ηλεκτροστατικών ελκτικών δυνάμεων που ασκούνται από την επιφάνεια των πόρων τους στο νερό.

Η περιεκτικότητα σε αέρα ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του αέρα που περιέχεται στο υπόστρωμα προς τον συνολικό όγκο του υποστρώματος. Η μαθηματική της έκφραση είναι:

$$A = \frac{V_a}{V_S}$$

όπου V_a είναι ο όγκος του αέρα που περιέχεται στο υπόστρωμα. Το άθροισμα της περιεκτικότητας σε νερό (Θ) και σε αέρα (A) ισούται με το ενεργό πορώδες (P_a) του υποστρώματος, το οποίο περιλαμβάνει όλους τους ανοιχτούς πόρους:

$$P_a = \Theta + A$$

Η περιεκτικότητα σε υγρασία (θ) και σε αέρα (A) είναι μεταβλητές, καθώς επηρεάζονται από εξάτμιση, απορρόφηση ή παροχή νερού. Αντίθετα, η περιεκτικότητα σε στερεά ύλη (S) παραμένει σταθερή. Σε κατάσταση κορεσμού, όταν όλοι οι πόροι ενός υποστρώματος είναι γεμάτοι με νερό, η περιεκτικότητα σε νερό (θ_s) ισούται με το ενεργό πορώδες (P_a), ενώ η περιεκτικότητα σε αέρα (A) είναι μηδενική. Για να επιτευχθεί ο κορεσμός, το υπόστρωμα δεν πρέπει να βρίσκεται υπό την επίδραση της βαρύτητας και όλοι οι ανοιχτοί πόροι πρέπει να γεμίσουν με νερό. Συνοψίζοντας, οι περιεκτικότητες ενός υποστρώματος σε στερεά, υγρή και αέρια φάση μπορούν να εκφραστούν είτε ως αναλογίες είτε σε ποσοστά επί τοις εκατό. Αυτές οι ιδιότητες είναι θεμελιώδεις για την αξιολόγηση της καταλληλότητας ενός υποστρώματος για χρήση σε καλλιέργειες (Σάββας, 2011). Γενικά, ο αερισμός των ριζών σε οργανικά υποστρώματα φαίνεται να βελτιώνεται όταν αναμειγνύονται με χονδροειδή ανόργανα υλικά (Spomer, 1974). Ωστόσο, η ανάμειξη διαφορετικών υποστρωμάτων μπορεί να επηρεάσει όχι μόνο τη αεροπερατότητα στο προκύπτον μείγμα, αλλά και τη ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία είναι κρίσιμη για τη διαθεσιμότητα νερού στα φυτά που αναπτύσσονται σε αυτά (Wallach, 2008). Μέχρι σήμερα, δεν υπάρχουν πολλές αναφορές στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία που ασχολούνται με την επίδραση της ανάμειξης διαφορετικών υποστρωμάτων στην υδραυλική αγωγιμότητα (Papadopoulos et al., 2008). Δεδομένου ότι η ανάμειξη δύο ή περισσότερων διαφορετικών υποστρωμάτων μπορεί επίσης να τροποποιήσει το πορώδες και το μέσο μέγεθος των πόρων (Bureš et al., 1993), η βελτίωση της διαθεσιμότητας του νερού δεν συνοδεύεται απαραίτητα από περιορισμούς στον αερισμό των ριζών και αντίστροφα. Σε κάθε περίπτωση, η επίδραση της ανάμειξης διαφορετικών υποστρωμάτων εξαρτάται κυρίως από τον συγκεκριμένο συνδυασμό.

2.1.5 Ειδική Επιφάνεια

Η ειδική επιφάνεια ενός υποστρώματος αναφέρεται στον λόγο της συνολικής επιφάνειας των στερεών τεμαχιδίων του υποστρώματος προς τη μάζα του. Εκφράζεται μαθηματικά ως:

$$S_s \frac{S}{m}$$

όπου S είναι η συνολική επιφάνεια των στερεών τεμαχιδίων (m^2) και m η μάζα του υποστρώματος (g). Η ειδική επιφάνεια μετράται σε μονάδες m^2/g και παρέχει μια ποσοτική εκτίμηση της συνολικής επιφάνειας που είναι διαθέσιμη ανά μονάδα μάζας υποστρώματος. Η ειδική επιφάνεια επηρεάζεται από το μέγεθος των κόκκων. Υποστρώματα που αποτελούνται

από μικρότερους και περισσότερους κόκκους ανά μονάδα μάζας έχουν μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική, διότι μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια σημαίνει αυξημένη δυνατότητα του υποστρώματος να συγκρατεί νερό και θρεπτικά διαλύματα, καθώς και να προσφέρει μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με τις ρίζες των φυτών (Σάββας, 2011).

2.1.6 Υδατοχωρητικότητα Φυτοδοχείου

Η υδατοχωρητικότητα φυτοδοχείου (θ_{cc}) αναφέρεται στη μέγιστη περιεκτικότητα σε νερό που μπορεί να συγκρατήσει ένα υπόστρωμα τοποθετημένο σε φυτοδοχείο συγκεκριμένων διαστάσεων, όταν το νερό έχει στραγγιστεί πλήρως λόγω της βαρύτητας (Bunt, 1988). Στην κατάσταση υδατοϊκανότητας, το υπόστρωμα περιέχει τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να συγκρατήσει, ενώ η μύζηση ισούται με το ύψος από τον πυθμένα του φυτοδοχείου. Η υδατοχωρητικότητα ενός φυτοδοχείου εξαρτάται από το ύψος του δοχείου και τη φύση του πορώδους του υποστρώματος. Καθώς αυξάνεται το ύψος του δοχείου, η πίεση από τη βαρύτητα μειώνει την ποσότητα νερού που συγκρατείται, ειδικά στα ανώτερα στρώματα. Υλικά με περισσότερους μικρούς πόρους συγκρατούν περισσότερο νερό, ενώ αυτά με μεγαλύτερους πόρους αποστραγγίζονται πιο γρήγορα (Σάββας, 2011).

2.1.7 Αεροπερατότητα Φυτοδοχείου

Η αεροπερατότητα φυτοδοχείου (A_{cc}) είναι η περιεκτικότητα σε αέρα ενός υποστρώματος τοποθετημένου σε δοχείο, όταν βρίσκεται σε κατάσταση υδατοϊκανότητας (Bunt, 1988). Υπολογίζεται ως:

$$A_{cc} = P_a - \theta_{cc}$$

όπου P_a είναι το ενεργό πορώδες και θ_{cc} η υδατοχωρητικότητα φυτοδοχείου. Η αεροπερατότητα υποδηλώνει την ελάχιστη περιεκτικότητα σε αέρα που μπορεί να διατηρηθεί στο υπόστρωμα μετά από πλήρη άρδευση. Για τη σωστή ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, η αεροπερατότητα πρέπει να υπερβαίνει το 15%. Υποστρώματα με πολύ χαμηλή αεροπερατότητα μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπαρκή οξυγόνωση των ριζών, ενώ υποστρώματα με υψηλότερη αεροπερατότητα υποστηρίζουν καλύτερα την ισορροπία νερού-αέρα στο ριζικό περιβάλλον (Σάββας, 2011).

2.1.8 Υδραυλική Αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα (K) αναφέρεται στην ικανότητα ενός υποστρώματος να επιτρέπει την κίνηση του νερού μέσα από το πορώδες του και υπολογίζεται σύμφωνα με τον νόμο του Darcy (Wallach, 2008, Πουλοβασίλης 2010):

$$q = K \times \frac{dh}{dl}$$

όπου:

- q είναι η ταχύτητα ροής του νερού (m/s),
- dh η διαφορά υδραυλικού φορτίου (m),
- dl η απόσταση μεταξύ σημείων (m),
- K η υδραυλική αγωγιμότητα του υποστρώματος (m/s).

Η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται από τη φύση του πορώδους υλικού και διαφοροποιείται ανάλογα με το αν το υπόστρωμα είναι κορεσμένο (K_s) ή ακόρεστο. Σε συνθήκες μη κορεσμού, η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται καθώς μειώνεται η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε υγρασία (θ). Αυτό συμβαίνει διότι οι πόροι που περιέχουν αέρα διακόπτουν την υδραυλική συνέχεια, μειώνοντας την ενεργή διατομή που χρησιμοποιείται για τη ροή του νερού. Καθώς αυξάνεται η ποσότητα αέρα στους πόρους, μειώνεται ο αριθμός των πόρων που συμβάλλουν στη ροή, με αποτέλεσμα την πτώση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Το ύψος του υποστρώματος στο φυτοδοχείο επηρεάζει σημαντικά την υδραυλική αγωγιμότητα. Στον πυθμένα του φυτοδοχείου, όπου η μύζηση είναι μηδενική, η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη. Στην κορυφή, η αγωγιμότητα μειώνεται δραματικά λόγω της μικρότερης περιεκτικότητας σε νερό. Για παράδειγμα, σε υπόστρωμα ελαφρόπετρας ύψους 10 cm, η περιεκτικότητα σε νερό μπορεί να μειωθεί από 53% στον πυθμένα σε 33% στην κορυφή, ενώ η υδραυλική αγωγιμότητα μειώνεται κατά έναν συντελεστή τάξης μεγέθους 2×10^{-4} . Η υδραυλική αγωγιμότητα επηρεάζει τη διαθεσιμότητα νερού για τα φυτά, ειδικά σε μεγαλύτερα ύψη του υποστρώματος, όπου η παροχή νερού μειώνεται γρήγορα μετά το πότισμα. Για υποστρώματα με υψηλή πτώση της περιεκτικότητας σε νερό (θ) κατά την αποστράγγιση (π.χ., ελαφρόπετρα με κοκκομετρία 4–8 mm), συνιστάται η χρήση φυτοδοχείων με μικρό ύψος (<10 cm) για τη διατήρηση επαρκών ποσοτήτων νερού κοντά στο ριζικό σύστημα. Παράλληλα, απαιτούνται συχνές αρδεύσεις με μικρές δόσεις νερού για τη διατήρηση της υγρασίας. Η

υδραυλική αγωγιμότητα επηρεάζει άμεσα την ταχύτητα ροής του νερού προς τις ρίζες των φυτών. Καθώς μειώνεται η αγωγιμότητα, μειώνεται και η παροχή νερού στις ρίζες, με αποτέλεσμα τη μείωση της στοματικής αγωγιμότητας και της φωτοσύνθεσης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καταπόνηση των φυτών και περιορισμό της ανάπτυξης. Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι καθοριστικός δείκτης για την αξιολόγηση της καταλληλότητας ενός υποστρώματος. Η κατανόηση των μεταβολών της σε σχέση με την περιεκτικότητα σε νερό και το ύψος του υποστρώματος είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική διαχείριση της άρδευσης. Επιπλέον, η επιλογή κατάλληλων φυτοδοχείων και η προσαρμογή των στρατηγικών άρδευσης μπορούν να βελτιώσουν τη διαθεσιμότητα νερού, μειώνοντας την καταπόνηση των φυτών και αυξάνοντας την παραγωγικότητα (Σάββας, 2011).

2.1.9 Γενικές πληροφορίες

2.1.9.1 Συγκράτηση Νερού σε Πορώδη Υποστρώματα

Η συγκράτηση νερού σε πορώδη υποστρώματα γίνεται μέσω δυνάμεων συνάφειας, δηλαδή ελκτικών δυνάμεων ηλεκτροστατικής φύσης, που αναπτύσσονται μεταξύ του νερού και της επιφάνειας των πόρων του υποστρώματος. Οι δυνάμεις αυτές προκαλούν την προσκόλληση μιας λεπτής στοιβάδας νερού πάνω στα τοιχώματα των πόρων, ανεξάρτητα από την επίδραση της βαρύτητας. Η ποσότητα του νερού που μπορεί να συγκρατήσει ένα υπόστρωμα εξαρτάται από την ένταση της δύναμης συνάφειας ανά μονάδα επιφάνειας και από τη συνολική επιφάνεια των πορωδών τεμαχιδίων. Η μύζηση ενός υποστρώματος, δηλαδή η δύναμη που ασκεί το υπόστρωμα για να συγκρατήσει το νερό, σχετίζεται με το δυναμικό θεμελιώδους μάζας. Η μύζηση μετράται σε μονάδες Pascal (Pa), ύψος στηλής νερού (cm), ή bar/ατμόσφαιρες, με την ακόλουθη σχέση μετατροπής: $1 \text{ kPa} = 10 \text{ cm}$, και $1 \text{ bar} \approx 100 \text{ kPa}$. Όσο μεγαλύτερη είναι η μύζηση, τόσο ισχυρότερη είναι η συγκράτηση του νερού από το υπόστρωμα. Η μύζηση επηρεάζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά των υποστρωμάτων. Υλικά με μικρότερους κόκκους έχουν μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια, γεγονός που αυξάνει τη μύζηση και τη συγκράτηση νερού. Ορισμένα υποστρώματα, όπως ο κοκοφοίνικας και η ελαφρόπετρα, διαθέτουν πορώδεις κόκκους με μικρούς εσωτερικούς πόρους, κάτι που αυξάνει τη συνολική επιφάνεια και βελτιώνει την ικανότητα συγκράτησης υγρασίας. Από την άλλη, υλικά όπως ο περλίτης έχουν υψηλό εξωτερικό πορώδες και προσφέρουν καλό αερισμό, αλλά μέτρια συγκράτηση νερού. Η μύζηση και η περιεκτικότητα σε υγρασία (θ) είναι αντιστρόφως ανάλογες. Καθώς αυξάνεται η περιεκτικότητα σε υγρασία, μειώνεται η μύζηση. Αντίθετα, όταν

μειώνεται η περιεκτικότητα σε υγρασία, η μύζηση αυξάνεται, ασκώντας μεγαλύτερη δύναμη στο εναπομένον νερό (Σάββας, 2011).

2.1.9.2 Διαθεσιμότητα Νερού για τα Φυτά και Χαρακτηριστικές Καμπύλες Υγρασίας

Η διαθεσιμότητα του νερού για τα φυτά εξαρτάται από τη μύζηση που ασκεί το υπόστρωμα στο νερό. Τα φυτά απορροφούν νερό μέσω του ωσμωτικού δυναμικού των κυττάρων της ρίζας, το οποίο πρέπει να υπερβαίνει το δυναμικό του νερού που συγκρατείται στους πόρους του υποστρώματος. Όταν η μύζηση του υποστρώματος είναι υψηλή, το φυτό αναγκάζεται να αυξήσει το ωσμωτικό του δυναμικό, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση.

Η διαθεσιμότητα του νερού διακρίνεται στις εξής κατηγορίες:

1. **Εύκολα Διαθέσιμο Νερό (ΕΔΝ):** Το νερό που συγκρατείται με μύζηση μεταξύ 1 και 5 kPa (10–50 cm στήλης νερού). Είναι εύκολα προσβάσιμο από τα φυτά χωρίς να προκαλείται καταπόνηση.
2. **Σχετικά Διαθέσιμο Νερό:** Βρίσκεται σε μύζηση μεταξύ 5 και 10 kPa (50–100 cm στήλης νερού). Απαιτεί περισσότερη προσπάθεια από τα φυτά για απορρόφηση.
3. **Δύσκολα Διαθέσιμο Νερό:** Συγκρατείται με μύζηση άνω των 10 kPa. Τα φυτά δυσκολεύονται σημαντικά να το απορροφήσουν, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το ωσμωτικό τους δυναμικό και να προκαλείται καταπόνηση.
4. **Μη Διαθέσιμο Νερό:** Βρίσκεται σε μύζηση άνω των 1500 kPa, παραμένοντας αδρανές για τα περισσότερα καλλιεργούμενα φυτά.

Η ρυθμιστική χωρητικότητα νερού (WBC) υπολογίζεται ως η διαφορά στην περιεκτικότητα σε νερό ενός υποστρώματος μεταξύ τιμών μύζησης 5 και 10 kPa. Ο δείκτης αυτός αποτυπώνει την ικανότητα του υποστρώματος να διατηρεί σχετικά διαθέσιμο νερό. Όταν η μύζηση υπερβαίνει τα 10 kPa, το φυτό αντιμετωπίζει αυξημένη καταπόνηση λόγω ξηρασίας. Η μειωμένη ροή νερού προς τις ρίζες αναγκάζει το φυτό να μειώσει τη στοματική αγωγιμότητα, περιορίζοντας την απορρόφηση CO₂ και μειώνοντας τη φωτοσύνθεση και την παραγωγικότητά του.

2.1.9.3 Υδατοχωρητικότητα Φυτοδοχείου και Χαρακτηριστικές Καμπύλες Υγρασίας (ΧΚΥ)

Η υδατοχωρητικότητα φυτοδοχείου (θ_{cc}) προσδιορίζεται από τις ΧΚΥ του υποστρώματος και καθορίζεται από το ύψος του φυτοδοχείου και τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος. Μεγαλύτερο ύψος μειώνει την πραγματική υδατοχωρητικότητα λόγω της αυξημένης επίδρασης της βαρύτητας. Η πραγματική υδατοχωρητικότητα μπορεί να προσδιοριστεί είτε πειραματικά είτε θεωρητικά μέσω εξισώσεων που περιγράφουν τη ΧΚΥ του υποστρώματος. Η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας ενός υποστρώματος (Milks et al., 1989a) είναι σημαντική, όχι μόνο επειδή μπορούν να προβλεφθούν εύκολα μη μετρημένες τιμές, αλλά και επειδή η περιγραφή της μέσω μιας μαθηματικής εξίσωσης επιτρέπει την εκτίμηση της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας (da Silva et al., 1993, Wallach et al., 1992a). Για να αποφευχθεί η καταπόνηση των φυτών, η μύζηση πρέπει να διατηρείται σε επίπεδα 1–5 kPa (ΕΔΝ) ή, το πολύ, έως 10 kPa. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω συχνής άρδευσης με χαμηλές δόσεις νερού, διατηρώντας την περιεκτικότητα του υποστρώματος σε υγρασία σε υψηλά επίπεδα. Ένα ιδανικό υπόστρωμα συνδυάζει υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού (θ) και επαρκή αεροπερατότητα (A). Η συνολική περιεκτικότητα σε νερό και αέρα ισούται με το ενεργό πορώδες (P_a), συνεπώς, η αύξηση του θ συνεπάγεται μείωση του A και αντίστροφα. Για να εξασφαλιστεί ο επαρκής αερισμός των ριζών, η αεροπερατότητα πρέπει να υπερβαίνει το 15%, αν και ορισμένα φυτά μπορούν να αναπτυχθούν ακόμα και με χαμηλότερες τιμές. Η αεροπερατότητα φυτοδοχείου (A_{cc}) υπολογίζεται ως $A_{cc}=P_a-\theta_{cc}$, όπου P_a είναι το ενεργό πορώδες και θ_{cc} η υδατοχωρητικότητα. Αν A_{cc} είναι μικρότερο από 15%, το υπόστρωμα θεωρείται ανεπαρκές για αερισμό (Σάββας, 2011).

Παραδείγματα Διαθεσιμότητας Νερού και Αερισμού

Από τις ΧΚΥ υποστρωμάτων:

- Εύκολα διαθέσιμο νερό (Μύζηση 1 έως 5 kPa):
 - Κοκοφοίνικας: 36%
 - Πετροβάμβακας: 45%
 - Περλίτης: 9,2%
- Ρυθμιστική χωρητικότητα (Μύζηση 5 έως 10 kPa):
 - Κοκοφοίνικας: 3,3%
 - Πετροβάμβακας: 1,1%

- ο Περλίτης: 1,7%

Ο πετροβάμβακας εμφανίζει τη μεγαλύτερη διαθεσιμότητα νερού για τα φυτά, ενώ ο περλίτης έχει την υψηλότερη αεροπερατότητα. Η περιεκτικότητα σε νερό (θ) και αέρα (A) μεταβάλλονται με το ύψος του υποστρώματος. Στον πυθμένα, το θ είναι μέγιστο και το A μηδενικό. Καθώς αυξάνεται το ύψος, το θ μειώνεται, ενώ το A αυξάνεται. Τα χονδρόκοκκα υποστρώματα, όπως η ελαφρόπετρα, απαιτούν μικρότερο ύψος για τη διατήρηση επαρκούς υγρασίας. Για λεπτόκοκκα υποστρώματα, απαιτείται μεγαλύτερο ύψος φυτοδοχείου για επαρκή αερισμό. Τα χονδρόκοκκα υποστρώματα πρέπει να τοποθετούνται σε δοχεία μικρού ύψους, ενώ απαιτούν συχνότερη άρδευση με μικρότερες δόσεις. Η σωστή επιλογή υποστρώματος και η διαχείριση του ύψους του φυτοδοχείου είναι καθοριστικής σημασίας για τη διατήρηση της βέλτιστης ισορροπίας μεταξύ νερού και αέρα, εξασφαλίζοντας υγιή ανάπτυξη και παραγωγικότητα (Σάββας, 2011).

Πίνακας 1. Φαινόμενο ειδικό βάρος και το ολικό πορώδες του κάθε υποστρώματος (Pardossi et al., 2011)

Υπόστρωμα	Φαινόμενο ειδικό βάρος (kg/m ³)	Ολικό πορώδες (%)
Περλίτης	80-120	85-90
Πετροβάμβακας	80-90	94-97
Ελαφρόπετρα	650-900	65-75
Κοκοφοίνικας	40-80	86-94

Πίνακας 2. Υδατοχωρητικότητα και αεροπερατότητα φυτοδοχείου, καθώς και το διαθέσιμο νερό (AW) σε διαφορετικούς τύπους φυτοδοχείων γεμάτα με διάφορα υποστρώματα καλλιέργειας. (Pardossi et al., 2011)

Τύπος φυτοδοχείου							
Υπόστρωμα	Μέγεθος φυτοδοχείου	Μονάδα μέτρησης	Πλάκα	Σάκος (1)	Σάκος (2)	Γλάστρα 16	Γλάστρα 24
	Ύψος	m	0,075	0,15	0,2	0,14	0,21
	Μήκος	m	1	0,2	0,2	-	-

	Πλάτος	m	0,15	1	1	0,16	0,24
	Όγκος	L	11,25	30	40	2,81	9,5
Περλίτης	θ_{cc}	%		55	50	56	49
	A_{cc}	%		45	50	44	51
	AW	%		33	28	35	27
Ελαφρόπετρα	θ_{cc}	%		49	46	50	46
	A_{cc}	%		24	26	23	27
	AW	%		14	12	15	11
Πετροβάμβακας	θ_{cc}	%	90	85	81	86	80
	A_{cc}	%	11	17	21	16	22
	AW	%	88	82	77	83	76
Κοκοφοίνικας	θ_{cc}	%	84	77	74	78	73
	A_{cc}	%	14	21	24	20	25
	AW	%	50	42	39	43	39

2.3 Χημικά χαρακτηριστικά υποστρωμάτων

2.3.1 Χημική Σύνθεση

Η χημική σύνθεση των υποστρωμάτων ορίζεται ως το ποσοστό κατά βάρος των οργανικών και ανόργανων συστατικών που τα αποτελούν. Η προέλευση των υποστρωμάτων ποικίλλει, γεγονός που οδηγεί σε σημαντικές διαφορές στη χημική τους σύσταση. Σε γενικές γραμμές, τα υποστρώματα κατηγοριοποιούνται σε δύο κύριες ομάδες: οργανικά και ανόργανα. Τα οργανικά υποστρώματα προέρχονται κυρίως από την αποσύνθεση φυτικών ή ζωικών υπολειμμάτων. Περιέχουν υψηλές ποσότητες οργανικής ύλης (πάνω από 60%) και αποτελούνται από ουσίες όπως πολυσακχαρίτες των κυτταρικών τοιχωμάτων (κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, λιγνίνη), πρωτεΐνες και λιπίδια. Αυτά τα συστατικά είναι πλούσια σε άνθρακα και φτωχά σε άζωτο, γεγονός που τα καθιστά πιο ανθεκτικά στη βιοαποδόμηση. Υποστρώματα όπως η τύρφη και ο κοκοφοίνικας είναι αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας. Χαρακτηρίζονται από σταθερή δομή και μακρά διάρκεια ζωής, ενώ προσφέρουν καλές φυσικές ιδιότητες, όπως αυξημένη αεροπερατότητα. Αντίθετα, τα ανόργανα

υποστρώματα περιέχουν κυρίως ανόργανες ενώσεις, όπως οξείδια, άλατα και ανυδρίτες, που προέρχονται από ορυκτά ή πετρώματα. Μερικά από αυτά είναι θρυμματισμένα πορώδη πετρώματα, όπως η ελαφρόπετρα, ενώ άλλα προκύπτουν από θερμική επεξεργασία, όπως ο περλίτης και ο πετροβάμβακας. Η θερμική επεξεργασία αλλάζει τη φυσική τους δομή, δημιουργώντας πορώδεις υφές που τα καθιστούν ιδανικά για χρήση σε συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους. Οι ανόργανες ενώσεις αυτών των υποστρωμάτων είναι γενικά αδιάλυτες στο νερό και μη διαθέσιμες για τα φυτά, ιδιαίτερα στις συνήθεις τιμές pH του ριζικού περιβάλλοντος.

Η χημική σύνθεση των υποστρωμάτων επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά τους. Παρά την αδιάλυτη φύση των περισσότερων ανόργανων ενώσεων, ορισμένα ιόντα μπορεί να διαλυτοποιηθούν σε μικρές ποσότητες, ανάλογα με το pH, επηρεάζοντας τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων. Επιπλέον, η υψηλή περιεκτικότητα σε ίνες καθιστά τα οργανικά υποστρώματα πιο ανθεκτικά στη βιοαποδόμηση, ενώ τα ανόργανα υλικά, όπως ο περλίτης και ο πετροβάμβακας, προσφέρουν χημική σταθερότητα και ανθεκτικότητα.

Τα οργανικά υποστρώματα, όπως η τύρφη και ο κοκοφοίνικας, χαρακτηρίζονται από υψηλή ομοιογένεια και μικρή διακύμανση στη σύνθεσή τους. Αυτή η σταθερότητα τα καθιστά αξιόπιστη επιλογή για διάφορα συστήματα καλλιέργειας. Στην αντίθετη πλευρά, τα ανόργανα υποστρώματα, όπως ο περλίτης και ο πετροβάμβακας, είναι χημικά ουδέτερα και συμβάλλουν στη σταθεροποίηση του pH στο ριζικό περιβάλλον. Η γνώση της χημικής σύνθεσης των υποστρωμάτων είναι θεμελιώδης για την επιλογή του κατάλληλου υλικού. Υποστρώματα πλούσια σε οργανικές ενώσεις είναι ιδανικά για καλλιέργειες που απαιτούν υψηλή συγκράτηση νερού και θρεπτικών στοιχείων, ενώ τα ανόργανα υποστρώματα προσφέρουν καλύτερο αερισμό και φυσική σταθερότητα. Αυτή η επιλογή πρέπει να γίνεται με βάση τις ανάγκες της καλλιέργειας και τις συνθήκες του συστήματος καλλιέργειας (Σάββας, 2011).

2.3.2 Ανταλλακτική Ικανότητα Υποστρωμάτων

Η ανταλλακτική ικανότητα ενός υποστρώματος περιγράφει την ικανότητά του να συγκρατεί και να ανταλλάσσει κατιόντα. Ορισμένα πυριτικά κρυσταλλικά άλατα, παρόλο που δεν διαλύονται στο νερό, έχουν την ιδιότητα να απελευθερώνουν κατιόντα από συγκεκριμένες θέσεις τους, δημιουργώντας αρνητικά ηλεκτρικά φορτία σε αυτές τις θέσεις. Σε αντίθεση με τα ανιόντα που κινούνται ελεύθερα στο νερό, αυτά τα αρνητικά φορτία παραμένουν σταθερά στις θέσεις τους. Παρόμοια, στα οργανικά υποστρώματα δημιουργούνται μη διακινούμενα

αρνητικά φορτία λόγω της αποδέσμευσης κατιόντων από καρβοξυλικές ρίζες οργανικών ενώσεων, όπως οι δομικές ουσίες των κυτταρικών τοιχωμάτων.

Τα σταθερά αρνητικά φορτία στη στερεή φάση του υποστρώματος προσελκύουν άλλα κατιόντα, διατηρώντας την ηλεκτροχημική τους ισορροπία. Ωστόσο, η ισχύς προσρόφησης αυτών των κατιόντων εξαρτάται από το σθένος τους, με τα κατιόντα υψηλότερου σθένους να προσροφώνται ισχυρότερα και να εκτοπίζουν αυτά με μικρότερο σθένος. Αυτό το φαινόμενο προσρόφησης και ανταλλαγής κατιόντων επηρεάζει τόσο τη χημική σύσταση του θρεπτικού διαλύματος που περιέχεται στους πόρους του υποστρώματος όσο και την κατανομή των κατιόντων που παραμένουν προσροφημένα στο υπόστρωμα. Η ανταλλακτική ικανότητα των υποστρωμάτων παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά. Υποστρώματα με υψηλή ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων μπορούν να συγκρατούν μεγάλες ποσότητες θρεπτικών ιόντων όταν αυτά υπάρχουν σε περίσσεια στο διάλυμα και να τα αποδίδουν όταν οι συνθήκες το απαιτούν. Αυτά τα υποστρώματα χαρακτηρίζονται ως χημικά ενεργά και περιέχουν αργιλικά ορυκτά ή οργανική ύλη, παρουσιάζοντας συμπεριφορά παρόμοια με τα γόνιμα εδάφη. Ωστόσο, μειονεκτούν σε σχέση με το έδαφος λόγω του μικρότερου όγκου που διατίθεται ανά φυτό. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η χρήση χημικά αδρανών υποστρωμάτων, τα οποία δεν επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων. Αυτά τα υποστρώματα έχουν ελάχιστη ή μηδενική ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για πλήρη έλεγχο της θρέψης μέσω λιπάνσεων. Χημικά αδρανή υποστρώματα, όπως ο περλίτης και ο πετροβάμβακας, χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους.

Η ανταλλακτική ικανότητα των υποστρωμάτων μετράται ως:

- Χιλιοστοϊσοδύναμα (meq) κατιόντων ανά 100 g υποστρώματος,
- mmol κατιόντων ανά kg υποστρώματος (mmol_c/kg),
- meq ή mmol κατιόντων ανά μονάδα όγκου (L ή m^3).

Στα οργανικά υποστρώματα, η ανταλλακτική ικανότητα δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από το pH (Helling et al., 1964). Υποστρώματα με υψηλή ανταλλακτική ικανότητα προτιμώνται σε συστήματα που απαιτούν σταθερή παροχή θρεπτικών στοιχείων, ενώ τα αδρανή υλικά είναι κατάλληλα για καλλιέργειες όπου απαιτείται πλήρης έλεγχος των θρεπτικών συνθηκών (Σάββας, 2011).

2.3.3 Οξύτητα (pH) των Υποστρωμάτων

Το pH αποτελεί μέτρο της συγκέντρωσης ελεύθερων ιόντων υδρογόνου σε ένα υδατικό διάλυμα. Στα υποστρώματα, η μέτρηση του pH πραγματοποιείται όπως και στα εδάφη, χρησιμοποιώντας υδατικά εκχυλίσματα που παρασκευάζονται μέσω ανάδευσης και διήθησης ενός αιωρήματος υποστρώματος και αποσταγμένου νερού. Αυτά τα εκχυλίσματα χρησιμοποιούνται επίσης για την ανάλυση της περιεκτικότητας των υποστρωμάτων σε διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία. Η μέτρηση του pH είναι χρήσιμη μόνο για χημικά ενεργά υποστρώματα, καθώς τα χημικά αδρανή υποστρώματα δεν επηρεάζουν τις χημικές ιδιότητες και, συνεπώς, δεν τροποποιούν το pH των θρεπτικών διαλυμάτων που περιέχουν. Στα χημικά ενεργά υποστρώματα, το pH καθορίζεται από το είδος των ιόντων που είναι προσροφημένα στη στερεή τους φάση. Χαμηλό pH υποδηλώνει ότι μεγάλο ποσοστό των σταθερών αρνητικών φορτίων στη στερεά φάση του υποστρώματος έχει προσροφήσει ιόντα υδρογόνου. Αυτό το φαινόμενο είναι συχνό στα οργανικά υποστρώματα, τα οποία, κατά τη φυσική ή τεχνητή επεξεργασία τους, έχουν ξεπλυθεί εντατικά με νερό χαμηλής περιεκτικότητας σε ανόργανα άλατα, όπως το βρόχινο νερό. Το ξέπλυμα αυτό αφήνει τις επιφάνειες των οργανικών υλικών πιο ευάλωτες στην προσρόφηση υδρογόνου, μειώνοντας το pH. Υψηλές τιμές pH σε χημικά ενεργά υποστρώματα σχετίζονται με την προσρόφηση ιόντων ασβεστίου (Ca^{++}) στα σταθερά αρνητικά φορτία της στερεάς φάσης του υποστρώματος. Αυτή η κατάσταση είναι συχνή σε υλικά που έχουν έρθει σε επαφή με πηγές πλούσιες σε ασβέστιο, όπως σκληρά νερά ή ασβεστολιθικά πετρώματα. Η γνώση του pH των υποστρωμάτων είναι κρίσιμη για τη διαχείριση των θρεπτικών στοιχείων στο περιβάλλον της ρίζας. Το κατάλληλο pH επιτρέπει τη βέλτιστη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων και αποτρέπει την εμφάνιση τοξικότητας ή ελλείψεων. Επομένως, η επιλογή και η προσαρμογή των υποστρωμάτων με βάση το pH τους πρέπει να είναι προτεραιότητα στη διαμόρφωση στρατηγικών καλλιέργειας (Σάββας, 2011). Το pH παίζει σημαντικό ρόλο στα χημικά ενεργά υποστρώματα, καθώς καθορίζει τη διαθεσιμότητα των θρεπτικών στοιχείων. Για τα περισσότερα φυτά, η βέλτιστη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων επιτυγχάνεται όταν το pH στη ριζόσφαιρα κυμαίνεται μεταξύ 5,5 και 6,0 (Savvas, D., & Gruda, N., 2015).

2.3.4 Ηλεκτρική Αγωγιμότητα των Υποστρωμάτων

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα, διεθνώς γνωστή ως EC (Electrical Conductivity), είναι ένας δείκτης της συγκέντρωσης ανόργανων αλάτων σε ένα υπόστρωμα και εκφράζεται σε μονάδες dS/m

(deciSiemens ανά μέτρο). Η μέτρηση της EC πραγματοποιείται στα ίδια υδατικά εκχυλίσματα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του pH και της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε υδατοδιαλυτά θρεπτικά στοιχεία.

Γενικά, υποστρώματα με χαμηλή EC θεωρούνται καταλληλότερα για καλλιέργεια φυτών. Υψηλή EC υποδηλώνει την παρουσία αυξημένων ποσοτήτων υδατοδιαλυτών αλάτων, κυρίως χλωριούχου νατρίου (NaCl) και αλάτων ασβεστίου. Αυτά τα άλατα βρίσκονται σε στερεή μορφή στο υπόστρωμα όταν αυτό είναι ξηρό, αλλά διαλύονται στο νερό μόλις το υπόστρωμα διαβραχεί, απελευθερώνοντας ανόργανα ιόντα. Υψηλή EC σε ένα υπόστρωμα μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην καλλιέργεια φυτών, καθώς η αυξημένη συγκέντρωση αλάτων:

1. Μειώνει την πρόσληψη νερού από τις ρίζες λόγω ωσμωτικών πιέσεων.
2. Μπορεί να προκαλέσει τοξικότητα στα φυτά, κυρίως όταν υπάρχει υψηλή συγκέντρωση νατρίου (Na^+) και χλωρίου (Cl^-).

Εάν η EC ενός υποστρώματος είναι υπερβολικά υψηλή, τα άλατα μπορούν να απομακρυνθούν μέσω εκπλύσεων με νερό χαμηλής αλατότητας πριν από τη χρήση του υποστρώματος για καλλιέργεια (Raviv et al., 2002). Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε υποστρώματα με χαμηλή ανταλλακτική ικανότητα, όπου τα άλατα διαλύονται και απομακρύνονται εύκολα. Στην περίπτωση υποστρωμάτων με υψηλή ανταλλακτική ικανότητα, όπως οργανικά υλικά ή υποστρώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο, η απομάκρυνση των αλάτων μέσω εκπλύσεων είναι δυσκολότερη και απαιτεί μεγαλύτερες ποσότητες νερού, καθώς τα κατιόντα και ανιόντα προσροφώνται στην επιφάνεια της στερεάς φάσης του υποστρώματος. Η παρακολούθηση και ο έλεγχος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι κρίσιμη για τη διατήρηση κατάλληλων συνθηκών στο ριζικό περιβάλλον. Υποστρώματα με κατάλληλες τιμές EC διασφαλίζουν την υγιή ανάπτυξη των φυτών, αποφεύγοντας προβλήματα που σχετίζονται με την αλατότητα ή τη θρεπτική ανισορροπία στο θρεπτικό διάλυμα (Σάββας, 2011).

2.3.5 Περιεκτικότητα Υποστρωμάτων σε Διαθέσιμα Θρεπτικά Στοιχεία

Από καλλιεργητική άποψη, η περιεκτικότητα ενός υποστρώματος σε θρεπτικά στοιχεία έχει σημασία μόνο εφόσον αυτά είναι διαθέσιμα για τα φυτά. Τα άμεσα διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία είναι εκείνα που βρίσκονται διαλυμένα στο νερό που περιέχει το υπόστρωμα, γνωστό και ως θρεπτικό διάλυμα. Για τον λόγο αυτό, τα άμεσα διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία συχνά

αποκαλούνται και υδατοδιαλυτά θρεπτικά στοιχεία. Εκτός από τα υδατοδιαλυτά θρεπτικά στοιχεία, τα δυνητικά διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία είναι εκείνα που συγκρατούνται στην επιφάνεια της στερεάς φάσης του υποστρώματος μέσω προσρόφησης σε αρνητικά ή θετικά φορτισμένες θέσεις. Αυτά τα προσροφημένα στοιχεία, γνωστά και ως ανταλλάξιμα θρεπτικά στοιχεία, μπορούν να αντικατασταθούν από άλλα ιόντα με το ίδιο φορτίο που είναι διαλυμένα στο νερό του πορώδους, καθιστώντας τα διαθέσιμα για απορρόφηση από τα φυτά. Στα ανόργανα υποστρώματα, όπως ο περλίτης και η ελαφρόπετρα, το σύνολο των διαθέσιμων θρεπτικών στοιχείων περιλαμβάνει τόσο τα υδατοδιαλυτά όσο και τα ανταλλάξιμα θρεπτικά στοιχεία. Αυτά τα υποστρώματα συχνά χαρακτηρίζονται από μικρότερη περιεκτικότητα σε ανταλλάξιμα στοιχεία λόγω της περιορισμένης ανταλλακτικής ικανότητάς τους. Στα οργανικά υποστρώματα, όπως η τύρφη και οι ίνες κοκοφοίνικα, εκτός από τα άμεσα και δυνητικά διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία, περιλαμβάνονται και εκείνα που είναι δεσμευμένα με χημικούς δεσμούς σε οργανικές ενώσεις. Αυτά τα στοιχεία θεωρούνται επίσης δυνητικά διαθέσιμα, καθώς μπορούν να απελευθερωθούν μέσω της μικροβιακής αποδομητικής δραστηριότητας κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας, καθιστώντας τα άμεσα διαθέσιμα για τα φυτά. Στα χημικά αδρανή υποστρώματα, όπως ο πετροβάμβακας, τα θρεπτικά στοιχεία είναι είτε άμεσα διαθέσιμα είτε μη διαθέσιμα. Αυτά τα υλικά δεν διαθέτουν ανταλλακτική ικανότητα ή μικροβιακά αποδομήσιμη οργανική ουσία, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζουν τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα. Η κατανόηση της περιεκτικότητας των υποστρωμάτων σε διαθέσιμα θρεπτικά στοιχεία είναι ζωτικής σημασίας για την επιλογή του κατάλληλου υλικού στις καλλιέργειες εκτός εδάφους και για τη σωστή διαχείριση της θρέψης των φυτών (Σάββας, 2011).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΟΣΗ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

3.1 Ο ρόλος της άρδευσης στις υδροπονικές καλλιέργειες

Το νερό είναι σημαντικό συστατικό όλων των φυτών. Οι ρίζες, οι βλαστοί και τα φύλλα των ποωδών φυτών αποτελούνται κατά 70-95% από νερό. Το νερό είναι ζωτικής σημασίας για όλες τις λειτουργίες των φυτών, καθώς επιτελεί πολυάριθμους ρόλους, όπως η αφομοίωση του CO₂, η λειτουργία ως φορέας διαλυτών για βιοχημικές μετατροπές, η μεταφορά παλμών και σημάτων, καθώς και η συμβολή στον παράγοντα σπαργής, που δίνει στα φυτά το σχήμα τους. Η αύξηση του όγκου των κυττάρων επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της απορρόφησης νερού. Τα ζωντανά κύτταρα περιέχουν περίπου 70-90% νερό. Τα φυτά χρειάζονται νερό όχι μόνο ως συστατικό του σώματός τους, αλλά, και κυρίως, για τη διαπνοή, που ρυθμίζει τη θερμοκρασία του φυτού κατά την περίοδο της ημέρας με υψηλές θερμοκρασίες. Λόγω της σημασίας της διαθεσιμότητας του νερού, τα καλλιεργούμενα φυτά διαθέτουν έναν μικρό «αποθηκευτικό χώρο νερού» εσωτερικά, που τους επιτρέπει να αντιμετωπίσουν την έλλειψη νερού. Ωστόσο, το νερό που διαθέτουν για να καλύψουν αυτές τις ελλείψεις αντιστοιχεί μόνο σε ένα πολύ μικρό μέρος της καθημερινής διαπνοής. Επομένως, εάν η περιεκτικότητα των φυτών σε νερό μειωθεί κατά 20-30% από την ιδανική τιμή, υπάρχει πιθανότητα να μαραθούν γρήγορα. Γενικά, εάν η απώλεια νερού λόγω διαπνοής είναι μεγαλύτερη από την πρόσληψη από τις ρίζες, το φυτό βρίσκεται σε κατάσταση στρες, με αποτέλεσμα να μειώνεται η φωτοσύνθεση, κάτι που στη συνέχεια μειώνει την ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών (Lawlor, 2002). Συνεπώς, τα φυτά πρέπει να λαμβάνουν συνεχώς την ποσότητα του νερού που χάνεται λόγω διαπνοής από το υπόστρωμα. Όταν η παροχή νερού στο φυτό δεν καλύπτει τις ανάγκες του για διαπνοή, εμφανίζεται υδατικό στρες. Το άνοιγμα των στομάτων επηρεάζεται άμεσα (μειώνεται), προκαλώντας μειωμένη εισροή διοξειδίου του άνθρακα στο μεσόφυλλο (Σαββας, 2011) γεγονός που επηρεάζει και άλλους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία των φύλλων (Jackson et al., 1981, Kastoulas et al., 2009) και ο καθαρός ρυθμός φωτοσύνθεσης (Chaves et al., 2002, Sarlikioti et al., 2010). Η επαρκής διαθεσιμότητα νερού στα φυτά γίνεται ένας από τους κύριους παράγοντες επιτυχίας της καλλιέργειας. Το νερό που χάνεται στην ατμόσφαιρα μέσω της διαπνοής είναι ελεύθερο νερό (νερό χωρίς άλατα). Αυτό το ελεύθερο νερό απομακρύνεται από το περιβάλλον της ρίζας, αυξάνοντας έτσι τη συνολική συγκέντρωση αλάτων στην περιοχή της ρίζας. Επομένως, με την αύξηση των αλάτων, το ελεύθερο νερό μειώνεται (χαμηλώνει το δυναμικό του νερού) στο υπόστρωμα γύρω από τη ρίζα, γεγονός που

δυσκολεύει τα φυτά να απορροφήσουν το απαραίτητο νερό (Mavrogianopoulos, 2006). Τα άλατα που συσσωρεύονται στην περιοχή της ρίζας προέρχονται είτε από το αρδευτικό νερό (πολλοί τύποι νερού περιέχουν στοιχεία που δεν έχουν καμία σχέση με τη θρέψη των φυτών, π.χ. νάτριο, χλώριο) είτε από τα εφαρμοσμένα λιπάσματα. Σε περίπτωση ηλιοφάνειας και χαμηλής υγρασίας που ευνοεί υψηλά ποσοστά διαπνοής, η συγκέντρωση των αλάτων στο υπόστρωμα αυξάνεται γρήγορα, με αποτέλεσμα σημαντική μείωση του διαθέσιμου ελεύθερου νερού στο υπόστρωμα (μειωμένο δυναμικό νερού). Είναι επομένως πολύ σημαντικό να διατηρείται χαμηλή η συγκέντρωση των αλάτων στην περιοχή της ρίζας για να αποφεύγεται το στρες των φυτών. Η συγκέντρωση των αλάτων στο θρεπτικό διάλυμα μετριέται εύκολα με μετρητή ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ο οποίος δίνει τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) σε dS/m ή mS/cm. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι ανάλογη με τη συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων στο διάλυμα. Παρόλο που παρέχει μια ένδειξη για τη συγκέντρωση των αλάτων, η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δεν δίνει πληροφορίες για τον τύπο των διαλυμένων αλάτων. Μια ηλεκτρική αγωγιμότητα χαμηλότερη από μια συγκεκριμένη τιμή υποδεικνύει ανεπαρκή ποσότητα θρεπτικών στοιχείων γύρω από το ριζικό σύστημα. Από την άλλη, μια υψηλότερη από την απαιτούμενη τιμή υποδεικνύει υψηλή συγκέντρωση αλάτων και χαμηλή ποσότητα ελεύθερου νερού διαθέσιμου στα φυτά, με αποτέλεσμα αρνητικές συνέπειες για την ανάπτυξη και την παραγωγή των περισσότερων καλλιεργούμενων φυτών. Στα περισσότερα υδροπονικά θερμοκήπια οι καλλιέργειες αναπτύσσονται σε πορώδη υποστρώματα. Το νερό που παρέχεται μέσω άρδευσης απορροφάται από τους μικρότερους πόρους του υποστρώματος και ρέει επιπλέον από τους μεγαλύτερους πόρους, επιτρέποντας την είσοδο φρέσκου και πλούσιου σε οξυγόνο αέρα στην περιοχή των ριζών. Η επαρκής αερισμός της ριζικής ζώνης είναι ζωτικής σημασίας για το φυτό, καθώς οι ρίζες χρειάζονται οξυγόνο για την αναπνοή, η οποία με τη σειρά της είναι απαραίτητη για την επαρκή απορρόφηση θρεπτικών και νερού (Schwarz, 1995). Όσο μεγαλύτερο είναι το πορώδες και η διάμετρος των πόρων, τόσο μεγαλύτερη είναι η κάθετη κίνηση του θρεπτικού διαλύματος στο υπόστρωμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος μπορούν να αλλάξουν με την πάροδο του χρόνου. Οι αλλαγές προκαλούνται κυρίως από τη συμπίεση, τη σύνθλιψη, την ανάπτυξη των ριζών και την αύξηση της μικροχλωρίδας. Τέτοιες αλλαγές τροποποιούν την ικανότητα συγκράτησης νερού και την υδραυλική αγωγιμότητα. Μέρος της ποσότητας του νερού που παραμένει στο υπόστρωμα μετά την άρδευση είναι εύκολα διαθέσιμο στα φυτά (το ποσοστό διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του υποστρώματος). Είναι πολύ σημαντικό το εύκολα διαθέσιμο νερό να έχει χαμηλή συγκέντρωση αλάτων (υψηλό δυναμικό νερού) ώστε να είναι εύχρηστο για τα φυτά. Τα χαρακτηριστικά και η ποσότητα του

υποστρώματος σε ένα δοχείο επηρεάζουν στη συνέχεια την ποσότητα του ελεύθερου νερού, τη συνολική συγκέντρωση αλάτων (EC) και τη συγκέντρωση οξυγόνου στην περιοχή της ρίζας. Η σωστή παροχή νερού και θρεπτικών στοιχείων είναι πολύ σημαντική στα υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας για την αποδοτική χρήση νερού και λιπασμάτων, την αποφυγή καταστάσεων στρες και τον έλεγχο της παραγωγής (Gohler et al., 1989). Ο έλεγχος της άρδευσης είναι η διαδικασία λήψης αποφάσεων για το πότε και πόσο θρεπτικό διάλυμα θα εφαρμοστεί και αναλύεται παρακάτω (Schröder & Lieth, 2002).

Η συχνότητα και η διάρκεια της άρδευσης αποκτούν ιδιαίτερη σημασία στις καλλιέργειες εκτός εδάφους, όπου τα υποστρώματα συγκρατούν σημαντικά αποθέματα νερού στο περιβάλλον των ριζών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η συνεχής άρδευση δεν είναι απαραίτητη, καθώς το εύκολα διαθέσιμο νερό που βρίσκεται στο πορώδες των υποστρωμάτων μπορεί να καλύψει τις ανάγκες των φυτών κατά τα μεσοδιαστήματα μεταξύ των ποτισμάτων. Με κάθε εφαρμογή άρδευσης, το νερό που καταναλώθηκε από τα φυτά στο διάστημα μεταξύ δύο ποτισμάτων πρέπει να αναπληρώνεται, ώστε η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε υγρασία να επανέρχεται στα επίπεδα της προηγούμενης άρδευσης. Για την εφαρμογή αυτής της στρατηγικής, απαιτείται ένα σαφές κριτήριο που θα καθορίζει το πότε θα αναπληρωθεί το καταναλωθέν νερό, δηλαδή η συχνότητα της άρδευσης. Επίσης, πρέπει να εκτιμάται η ποσότητα νερού που απορρόφησαν τα φυτά από την τελευταία εφαρμογή άρδευσης, ώστε να χορηγείται η αντίστοιχη ποσότητα στην επόμενη. Κατά την αρχική εγκατάσταση της καλλιέργειας, καθώς και σε κάθε άρδευση, το υπόστρωμα πρέπει να ποτίζεται τουλάχιστον μέχρι να φτάσει στην υδατοϊκανότητά του, δηλαδή την κατάσταση όπου περιέχει τη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να συγκρατήσει ενάντια στη βαρύτητα (Σάββας, 2011).

3.2 Δοση άρδευσης

Ένας τρόπος για να υπολογιστεί η δόση άρδευσης (Q, σε λίτρα ανά σάκο) είναι χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση (Mavrogianopoulos, 2015)

$$Q = \frac{Y \times W_w \times N}{1 - Dr}$$

Όπου:

Υ: Η ικανότητα συγκράτησης νερού (υδατοχωρητικότητα φυτοδοχείου) του υποστρώματος μέσα στον σάκο [λίτρα ανά σάκο]. Στην πράξη, ένας εύκολος τρόπος για να μετρηθεί η ποσότητα της ικανότητας συγκράτησης νερού του υποστρώματος στον σάκο είναι ο εξής: Ζυγίστε τον σάκο με το ξηρό υπόστρωμα και αφήστε τον μέσα σε ένα δοχείο γεμάτο με νερό για 24 ώρες, ώστε να ολοκληρωθεί η πλήρης διαβροχή του υποστρώματος. Στη συνέχεια, αφαιρέστε τον σάκο από το δοχείο και τοποθετήστε τον οριζόντια για 12 ώρες ώστε να στραγγίξει. Στο τέλος, ζυγίστε τον ξανά. Η διαφορά στο βάρος αντιστοιχεί στην ικανότητα συγκράτησης νερού, σε κιλά ανά σάκο ή λίτρα ανά σάκο (Mavrogianopoulos, 2015).

W_w : Το ποσοστό του εύκολα διαθέσιμου νερού στο υπόστρωμα.

N: το ποσοστό του εύκολα διαθέσιμου νερού στο υπόστρωμα, το οποίο, όταν εξαντληθεί από τον σάκο, θα πρέπει να ξεκινήσει η άρδευση. Συνήθως κυμαίνεται από 5% έως 35% του εύκολα διαθέσιμου νερού, με τα μικρότερα ποσοστά να αντιστοιχούν σε αλατούχα νερά και/ή υποστρώματα με μικρή ικανότητα συγκράτησης νερού.

D_r: Το επιθυμητό ποσοστό απορροής (εξαρτάται από την περιεκτικότητα του νερού σε άλατα και συνήθως κυμαίνεται από 10 έως 30 %)

Η διάρκεια κάθε κύκλου άρδευσης (t, σε δευτερόλεπτα) για να επιτευχθεί η δόση άρδευσης υπολογίζεται με τον τύπο:

$$T = \frac{Q}{n \times q} \times 3600 \quad (\text{Mavrogianopoulos, 2015})$$

Όπου:

Q= Η δόση άρδευσης (λίτρα ανά σάκο)

n= ο αριθμός των σταλακτών ανά σάκο

q= η παροχή των σταλακτών (λίτρα ανά ώρα)

Μια άλλη προσέγγιση για τον υπολογισμό της δόσης άρδευσης είναι η εξής:

Ο προσδιορισμός της βέλτιστης δόσης άρδευσης απαιτεί τον υπολογισμό δύο ποσοτήτων: του καθαρού (l_{net}) και του συνολικού ή πραγματικού (l_{gross}) όγκου άρδευσης (εκφρασμένος σε L/m^2). Η πρώτη ποσότητα (l_{net}) αντιστοιχεί στη μέγιστη διακύμανση της υγρασίας του υποστρώματος (θ) που είναι ανεκτή από την καλλιέργεια και υπολογίζεται ως (Pardossi et al., 2011):

$$l_{net} = \frac{AW_{cont}}{100} \times V_{cont} \times f$$

όπου:

- AW_{cont} (%) είναι το διαθέσιμο νερό στο υπόστρωμα για δοχείο συγκεκριμένων διαστάσεων ,
- V_{cont} είναι ο όγκος του υποστρώματος (L/m^2),
- f είναι ένας συντελεστής άρδευσης ειδικός για την καλλιέργεια, που κυμαίνεται από 0,05 έως 1,0. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του f , τόσο μικρότερη είναι η διακύμανση της υγρασίας του υποστρώματος και τόσο συντομότερη η άρδευση.

Συνεπώς, η τιμή του f πρέπει να επιλέγεται σύμφωνα με:

- τις υδραυλικές ιδιότητες του υποστρώματος,
- τη διάταξη του συστήματος άρδευσης, που επηρεάζει την ομοιομορφία κατανομής του νερού και καθορίζει τη μικρότερη δυνατή διάρκεια κάθε άρδευσης,
- τη φυσιολογία της καλλιέργειας.

Η πραγματική δόση άρδευσης (l_{gross}) είναι γενικά μεγαλύτερη από την l_{net} , καθώς απαιτείται συνήθως περίσσεια νερού για να αντιμετωπιστεί η άνιση διαπνοή μεταξύ των μεμονωμένων φυτών, οι διαφορές στην παροχή νερού από τους σταλάκτες και άρα η άνιση κατανομή του νερού και η ανάγκη αποφυγής συσσώρευσης αλάτων στο περιβάλλον των ριζών.

Επομένως το l_{gross} υπολογίζεται από την σχέση: $l_{gross} = l_{net} \times K_s$

όπου K_s είναι ο συντελεστής ασφαλείας

Για κάθε συμβάν άρδευσης, το κλάσμα απορροής (DF, το οποίο είναι το ποσοστό του νερού που παρέχεται και αποστραγγίζεται) προσεγγίζεται ως (Pardossi et al., 2011):

$$DF = 100 \times \frac{l_{gross} - l_{net}}{l_{gross}}$$

Ο συντελεστής ασφαλείας K_s εξαρτάται από την καλλιέργεια, την ομοιομορφία της άρδευσης και τον κίνδυνο αλατότητας του υποστρώματος. Οι τιμές του K_s κυμαίνονται από 1,15 (όταν υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή νερού, χρήση νερού με χαμηλή αλατότητα, υψηλή ανοχή καλλιέργειας στην αλατότητα) έως 2,0 (μεγάλη μεταβλητότητα στην εξατμισοδιαπνοή μεταξύ φυτών, κακή ομοιομορφία άρδευσης, χρήση αλατούχου νερού, ευαίσθητες στην αλατότητα καλλιέργειες), που αντιστοιχούν σε DF από 0,13 έως 0,50, αντίστοιχα. Ένας συντελεστής K_s ίσος με 1,30 (DF = 23%) είναι κατάλληλος στις περισσότερες συνθήκες. Προφανώς, ο καθορισμός του K_s είναι λιγότερο σημαντικός σε κλειστά συστήματα, αν και ένας πολύ υψηλός K_s και συνεπώς και DF αυξάνει το κόστος άντλησης νερού και απολύμανσης του θρεπτικού διαλύματος. Η διάρκεια (D_I) κάθε άρδευσης σε συστήματα στάγδην άρδευσης υποστρώματος είναι γενικά πολύ μικρή (της τάξης μερικών δευτερολέπτων έως λίγων λεπτών) και εξαρτάται από την πυκνότητα των σταλακτών d (αριθμός σταλακτών ανά μονάδα επιφάνειας εδάφους) και τον ρυθμό παροχής r (L/h) των σταλακτών (Pardossi et al., 2011).

Υπολογίζεται ως εξής:

$$D_I = \frac{d \times 3600}{r}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο ένα μέρος του νερού στο υπόστρωμα είναι εύκολα διαθέσιμο για τα φυτά, ενώ ένα σημαντικό ποσοστό –συνήα πάνω από 20% είναι μη διαθέσιμο (Ravin et al., 2002). Συνεπώς, η άρδευση πρέπει να γίνεται πριν η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε νερό πέσει σε επίπεδα όπου το νερό δεν είναι πλέον εύκολα προσβάσιμο από τα φυτά. Για παράδειγμα, αν το υπόστρωμα μιας καλλιέργειας έχει υδατοϊκανότητα φυτοδοχείου 36% και περιεκτικότητα σε εύκολα διαθέσιμο νερό 12%, η άρδευση πρέπει να πραγματοποιείται αρκετά πριν η υγρασία πέσει κάτω από το 24%. Αν ο όγκος υποστρώματος ανά φυτό είναι 5 λίτρα, η καλλιέργεια πρέπει να αρδεύεται πριν η κατανάλωση νερού φτάσει τα 0,6 λίτρα ανά φυτό, που αντιστοιχούν στα αποθέματα του εύκολα διαθέσιμου νερού σε πλήρη υδατοϊκανότητα. Για

λόγους ασφαλείας και καλύτερης διαχείρισης, δεν είναι σκόπιμο να αφήνονται τα αποθέματα του εύκολα διαθέσιμου νερού να εξαντληθούν πλήρως πριν την επόμενη άρδευση. Μια ορθολογική στρατηγική είναι η εφαρμογή άρδευσης όταν καταναλωθεί το 1/3 έως 1/4 του εύκολα διαθέσιμου νερού. Στο παραπάνω παράδειγμα, αυτό σημαίνει ότι η άρδευση πρέπει να γίνεται όταν καταναλωθούν 0,15-0,2 λίτρα νερού ανά φυτό. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι τα φυτά παραμένουν συνεχώς σε ένα ευνοϊκό υδατικό καθεστώς, ενώ παράλληλα μειώνονται οι κίνδυνοι υδατικής καταπόνησης λόγω ανεπαρκούς άρδευσης (Σάββας, 2011). Στις καλλιέργειες που βασίζονται σε υποστρώματα, είναι απαραίτητο να χορηγείται περισσότερο θρεπτικό διάλυμα από αυτό που μπορεί να συγκρατήσει το πορώδες του υποστρώματος, ώστε να εξασφαλίζεται η απορροή ενός συγκεκριμένου ποσοστού, γνωστού ως κλάσμα απορροής (Raviv et al., 2002). Αυτό το κλάσμα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της απαιτούμενης ποσότητας θρεπτικού διαλύματος σε κάθε εφαρμογή άρδευσης. Για παράδειγμα, αν το επιδιωκόμενο κλάσμα απορροής είναι 0,25 και η άρδευση πραγματοποιείται όταν έχει καταναλωθεί το 1/4 του εύκολα διαθέσιμου νερού (ΕΔΝ), τότε η ποσότητα του διαλύματος που πρέπει να χορηγηθεί ανά φυτό ανέρχεται σε $0,15/0,75 = 0,2$ L. Σε αυτήν την περίπτωση, αν χρησιμοποιείται ένας σταλάκτης ανά φυτό με παροχή 2,4 L/h, η διάρκεια άρδευσης θα είναι περίπου 5 λεπτά. Γενικεύοντας, ο υπολογισμός της διάρκειας ενός κύκλου άρδευσης μπορεί να εκφραστεί με τη μαθηματική σχέση (Σάββας, 2011):

$$T_i = \frac{60 \times W_f \times V_s \times F}{(1 - \alpha)R}$$

όπου:

- W_f : το ογκομετρικό κλάσμα του ΕΔΝ βάσει της ΧΚΥ του υποστρώματος,
- V_s : ο όγκος του υποστρώματος ανά φυτό σε λίτρα,
- F : το ποσοστό του ΕΔΝ που μπορεί να καταναλωθεί πριν από την επόμενη άρδευση,
- α : το επιδιωκόμενο κλάσμα απορροής,
- R : η παροχή των σταλακτών σε L/h.

Η διάρκεια της άρδευσης εξαρτάται από τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος, τον όγκο του ανά φυτό και την παροχή των σταλακτών, όχι όμως από τα χαρακτηριστικά των φυτών και τις κλιματικές συνθήκες. Αντίθετα, το χρονικό διάστημα μέχρι την επόμενη άρδευση –κατά το οποίο το θρεπτικό διάλυμα που συγκρατείται στο υπόστρωμα

καταναλώνεται από τα φυτά— επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του φυτού και τις κλιματικές συνθήκες (Kiehl et al., 1992, Prenger et al., 2002).

Ο χρόνος που χρειάζεται ένα φυτό για να απορροφήσει μια συγκεκριμένη ποσότητα νερού εξαρτάται από παράγοντες όπως το είδος του φυτού, το στάδιο ανάπτυξής του, και καλλιεργητικές επεμβάσεις, όπως η αφαίρεση φύλλων (Orgaz et al., 2005). Επιπλέον, οι κλιματικές συνθήκες, όπως η υγρασία και η θερμοκρασία του αέρα, η ηλιακή ακτινοβολία, και η κίνηση του αέρα, επηρεάζουν τον ρυθμό διαπνοής του φυτού και, κατ' επέκταση, τον ρυθμό απορρόφησης νερού (Prenger et al., 2002). Συνεπώς, η συχνότητα άρδευσης καθορίζεται από έναν συνδυασμό αυτών των παραμέτρων, οι οποίες διαμορφώνουν την απαίτηση του φυτού για νερό και τον ρυθμό με τον οποίο αυτή καλύπτεται.

3.3 Συχνότητα άρδευσης

Στις καλλιέργειες εκτός εδάφους, η περιορισμένη ποσότητα υποστρώματος ανά φυτό καθιστά την αρδευτική δόση μικρότερη από την ημερήσια κατανάλωση νερού, ειδικά σε πλήρως αναπτυγμένα φυτά (Schroder and Lieth, 2002). Κατά συνέπεια, απαιτούνται πολλαπλές εφαρμογές άρδευσης κατά τη διάρκεια της ημέρας, με τη συχνότητά τους να καθορίζεται από τον ρυθμό κατανάλωσης νερού. Ο ρυθμός αυτός επηρεάζεται από παράγοντες σχετιζόμενους με τα φυτά και τις κλιματικές συνθήκες, οι οποίοι μεταβάλλονται συνεχώς, καθιστώντας δύσκολο τον ακριβή προσδιορισμό της συχνότητας άρδευσης. Όταν η συχνότητα είναι πολύ μικρή, το υπόστρωμα μπορεί να αποκτήσει υψηλή μύζηση, ξεπερνώντας τα 5 ή 10 kPa, γεγονός που καθιστά το νερό δύσκολα διαθέσιμο για τα φυτά, προκαλώντας υδατική καταπόνηση (Kiehl et al., 1992, Lieth and Oki, 2008). Η έννοια του εύκολα διαθέσιμου νερού έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στο παρελθόν για την αξιολόγηση της διαθεσιμότητας νερού για τα φυτά (Gabriel et al., 2009, Heiskanen, 1995, Londra et al., 2018b). Ωστόσο, πρόσφατες επιστημονικές μελέτες επισημαίνουν ότι αυτός ο δείκτης δεν είναι επαρκής για να περιγράψει με ακρίβεια τις αλλαγές στη διαθεσιμότητα του νερού, ούτε στον χρόνο ούτε στο χώρο μέσα στο πορώδες του εδάφους (Al Naddaf et al., 2011; Gizas and Savvas, 2007a; Peng et al., 2020a). Οι Wallach και Raviv (2005) διαπίστωσαν ότι η μείωση της ακόρεστης υδραυλικής αγωγιμότητας που προκαλείται από τη μείωση της υγρασίας κάτω από τον κορεσμό περιορίζει τη διαθεσιμότητα του νερού για τα φυτά με πολύ πιο αυστηρό τρόπο από τους περιορισμούς του νερού που επιβάλλονται από το επίπεδο του εύκολα διαθέσιμου νερού. Το νερό στη ριζόσφαιρα μπορεί να εξαντληθεί γρήγορα λόγω της απορρόφησης από το φυτό, εάν δεν

αναπληρώνεται από νερό που κινείται με υψηλούς ρυθμούς μέσα στο πορώδες του υποστρώματος. Έτσι, η διαθεσιμότητα νερού για τα φυτά εξαρτάται όχι μόνο από την παρουσία επαρκών ποσοτήτων νερού που συγκρατούνται με επαρκώς χαμηλή μύζηση στο υπόστρωμα, αλλά και από την ικανότητα αυτού του νερού να μετακινείται γρήγορα στην επιφάνεια των ριζών, η οποία εξαρτάται από την υδραυλική αγωγιμότητα του μέσου. Μείωση της υγρασίας προκαλεί αύξηση της μύζησης ψ, η οποία με την σειρά της μειώνει την ταχύτητα ροής του νερού προς την επιφάνεια των ριζικών τριχιδίων και κατά συνέπεια την απορρόφηση νερού από τα φυτά. Στα περισσότερα υποστρώματα, η μετάβαση από τιμές μύζησης όπου το νερό είναι εύκολα διαθέσιμο σε αυτές όπου καθίσταται μη διαθέσιμο απαιτεί μόνο μια μικρή μείωση της υγρασίας (Raviv et al., 2002). Επομένως, για λόγους ασφαλείας, η άρδευση πρέπει να ξεκινά μόλις καταναλωθεί ένα ορισμένο ποσοστό του εύκολα διαθέσιμου νερού (ενδεικτικά από 20% έως 40%) και να σταματά μόλις επιτευχθεί η υδατοχωρητικότητα του φυτοδοχείου. Από την άλλη πλευρά, η υπερβολική συχνότητα άρδευσης μπορεί να διατηρήσει την υγρασία του υποστρώματος κοντά στην υδατοϊκανότητά του, περιορίζοντας τη διαθεσιμότητα οξυγόνου και αυξάνοντας τον κίνδυνο φυτοπαθολογικών προβλημάτων (Raviv et al., 2001, Casadesus et al., 2007). Παράλληλα, σε ανοιχτά συστήματα, υπερβολική άρδευση οδηγεί σε υψηλά κλάσματα απορροής, σπατάλη νερού και λιπασμάτων, και ενδεχόμενη περιβαλλοντική μόλυνση (Klaring, 2001, Massa et al., 2010). Στα κλειστά συστήματα καλλιέργειας, όπου το θρεπτικό διάλυμα ανακυκλώνεται, η αυξημένη συχνότητα άρδευσης δεν προκαλεί σπατάλη πόρων και είναι συχνά επωφελής. Έχει αποδειχθεί ότι υψηλά κλάσματα απορροής, έως και 60-70% της συνολικής παροχής, μειώνουν τη συσσώρευση αλάτων στο περιβάλλον των ριζών (Savvas et al., 2007), βελτιώνουν την παροχή οξυγόνου και θρεπτικών στοιχείων στις ρίζες, και μειώνουν τη συχνότητα εμφάνισης φυσιολογικών διαταραχών, όπως το σχίσσιμο των καρπών και η ξηρή σήψη κορυφής (Abbott et al., 2003, Savvas et al., 2008). Συνολικά, η συχνότητα άρδευσης είναι κρίσιμος παράγοντας για την παραγωγή και την ποιότητα των καλλιεργειών εκτός εδάφους. Ειδικά στα ανοιχτά συστήματα, επηρεάζει σημαντικά την αποτελεσματική χρήση νερού και λιπασμάτων. Για τον καθορισμό της συχνότητας άρδευσης, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη οι ρυθμοί απορρόφησης νερού από τα φυτά, παρά τη δυσκολία εκτίμησής τους στην πράξη. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές που διευκολύνουν τον προσδιορισμό της κατάλληλης συχνότητας άρδευσης (Prenger et al., 2002).

3.3.1 Προγραμματισμός άρδευσης με χρονοδιακόπτη

Ο προγραμματισμός άρδευσης με χρονοδιακόπτη θεωρείται η απλούστερη και φθηνότερη τεχνική άρδευσης που υιοθετείται από τους καλλιεργητές (Oki και Lieth, 2008). Η συχνότητα της άρδευσης ελέγχεται σύμφωνα με ένα σταθερό πρόγραμμα, το οποίο μπορεί να επαναπρογραμματιστεί εύκολα, ανάλογα με τα διάφορα στάδια ανάπτυξης των φυτών. Συνήθως ξεκινά μία ώρα μετά την ανατολή του ήλιου και τελειώνει μία ώρα πριν από τη δύση, με διαστήματα άρδευσης περίπου κάθε ώρα. Παρόλο που ο προγραμματισμός με χρονοδιακόπτη είναι πιο αξιόπιστος από άλλες τεχνικές άρδευσης, συχνά καταλήγει σε υψηλό ποσοστό απορροής και υποβέλτιστες συνθήκες ριζών, οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών, καθώς δεν είναι πάντα σε συμφωνία με τις τιμές του ρυθμού διαπνοής των καλλιεργειών. Οι Incrocci et al. (2014) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι υπήρχε σημαντικά μικρότερη χρήση νερού και εκπομπή θρεπτικών ουσιών στο περιβάλλον όταν ο προγραμματισμός άρδευσης βασιζόταν είτε στην κατάσταση υγρασίας στο υπόστρωμα είτε στην υπολογιζόμενη εξατμισοδιαπνοή των καλλιεργειών, σε αντίθεση με τον προγραμματισμό με χρονοδιακόπτη. Οι Lizarraga et al. (2003), οι οποίοι αξιολόγησαν την άρδευση με χρονοδιακόπτη και σε διαστήματα άρδευσης ανά μία ώρα, ανέφεραν ότι οι ντομάτες που καλλιεργούνταν σε περλίτη αντιμετώπιζαν συνθήκες υδατικού στρες κατά τις απογευματινές ώρες, παρόλο που το ποσοστό απορροής ήταν σχεδόν 46% του ημερήσιου αρδευτικού νερού που εφαρμόστηκε. Σε οποιαδήποτε περίπτωση προγραμματισμού άρδευσης με χρονοδιακόπτη, η συμπληρωματική παρακολούθηση του όγκου της απορροής (20-30% του ημερήσιου όγκου θρεπτικού διαλύματος) εξασφαλίζει ότι δεν θα υπάρξει συσσώρευση αλάτων στο υπόστρωμα.

3.3.2 Προγραμματισμός άρδευσης μέσω ηλιακής ακτινοβολίας

Δεδομένου ότι η ακτινοβολία επηρεάζει τη διαπνοή περίπου κατά 70%, η συχνότητα της άρδευσης μπορεί να ελέγχεται μέσω ακτινοβολίας, η οποία υπολογίζεται από το άθροισμα των φωτονίων που φτάνουν σε μια ορισμένη περιοχή ανά μονάδα χρόνου (Savvas et al., 2007, Shin et al., 2014). Η ρύθμιση της συχνότητας άρδευσης με βάση την ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει στην κόμη των φυτών απαιτεί την εγκατάσταση αισθητήρα μέτρησης της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (πυρανόμετρο) και ενός ειδικού προγραμματιστή άρδευσης. Οι τιμές έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας που καταγράφονται από το πυρανόμετρο μετατρέπονται αυτόματα από τον προγραμματιστή σε ποσότητες ηλιακής ενέργειας ανά μονάδα καλλιεργούμενης επιφάνειας μέσω χρονολογικής ολοκλήρωσης. Αυτή η ενέργεια

περιλαμβάνει τόσο τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία όσο και την κοσμική, που καλύπτει ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Συνήθως, η ηλιακή ενέργεια εκφράζεται σε μονάδες Wh/m^2 ($1 \text{ Wh/m}^2 = 3600 \text{ J/m}^2 = 0,36 \text{ J/cm}^2$). Οι τιμές έντασης της ακτινοβολίας καταγράφονται σε σταθερά χρονικά διαστήματα (π.χ. ανά λεπτό) και αθροίζονται συνεχώς στον προγραμματιστή. Όταν η συνολική ηλιακή ενέργεια φτάσει την προκαθορισμένη τιμή ενεργοποίησης άρδευσης (TEA), ο προγραμματιστής δίνει εντολή για έναρξη της άρδευσης και μηδενίζει την αθροιστική ενέργεια, επανεκκινώντας τη διαδικασία. Έτσι, η συχνότητα άρδευσης αυξάνεται όταν η ένταση της ακτινοβολίας είναι υψηλή και μειώνεται σε συνθήκες μειωμένης ηλιοφάνειας, προσαρμοζόμενη στις ανάγκες των φυτών. Η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στην κάλυψη των υδατικών αναγκών των φυτών χωρίς σπατάλη νερού και λιπασμάτων (Abou-Hadid et al., 1994, Roh & Lee, 1996, Lizarraga et al., 2003), καθώς η ηλιακή ενέργεια σχετίζεται στενά με τη διαπνοή, την κύρια αιτία απώλειας νερού από τα φυτά. Ωστόσο, η τιμή TEA πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα με το είδος, το μέγεθος και το στάδιο ανάπτυξης των φυτών. Για παράδειγμα, σε καλλιέργειες τομάτας, η συνιστώμενη τιμή TEA για πλήρως ανεπτυγμένα φυτά είναι $0,81 \text{ MJ/m}^2$ (225 Wh/m^2) (Lizarraga et al., 2003). Στην αρχή της καλλιέργειας, όταν τα φυτά είναι μικρά, η TEA είναι υψηλότερη για να διατηρούνται μεγαλύτερα διαστήματα μεταξύ των αρδεύσεων. Καθώς τα φυτά μεγαλώνουν, η TEA μειώνεται σταδιακά, ενώ κατά την πλήρη ανάπτυξη παραμένει σταθερή. Παράλληλα, η αρχική διάρκεια των αρδεύσεων μπορεί να μειώνεται για την αποφυγή υψηλών ποσοστών απορροής. Ο έλεγχος του κλάσματος απορροής είναι κρίσιμος για τη σωστή ρύθμιση της TEA, εξασφαλίζοντας αποδοτική χρήση νερού και λιπασμάτων. Η ρύθμιση της συχνότητας άρδευσης με βάση την ηλιακή ενέργεια είναι απλή και κατανοητή, μειώνοντας τις απώλειες νερού και λιπασμάτων σε σχέση με την άρδευση σε προκαθορισμένους χρόνους. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή δεν λαμβάνει υπόψη άλλες παραμέτρους, όπως το έλλειμμα κορεσμού του αέρα στο θερμοκήπιο ή η θερμότητα από το σύστημα θέρμανσης. Συνεπώς, μπορεί να υπάρξουν αποκλίσεις από τις πραγματικές υδατικές ανάγκες των φυτών (Katerji et al., 2008). Το πυρανόμετρο τοποθετείται συνήθως εκτός του θερμοκηπίου για την αποφυγή σκιών από τη δομή του θερμοκηπίου, ενώ λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής περατότητας του υλικού κάλυψης. Για την ακρίβεια των μετρήσεων, απαιτείται τακτικός καθαρισμός της επιφάνειας του πυρανόμετρου και σωστή οριζοντίωσή του. Συχνά, το πυρανόμετρο αποτελεί μέρος ενός μετεωρολογικού σταθμού που καταγράφει επίσης θερμοκρασία, υγρασία, και ανέμους. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, και ειδικά υπό συνθήκες υψηλής έντασης φωτός, τα μεσοδιαστήματα άρδευσης μειώνονται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός διαπνοής, με αποτέλεσμα οι μεσημεριανές αρδεύσεις να έχουν μεσοδιαστήματα μικρότερα από 30 λεπτά, πολλές φορές την ημέρα.

Αντίθετα, σε συνθήκες χαμηλής έντασης φωτός, η έναρξη της πρώτης άρδευσης μπορεί να καθυστερήσει περισσότερο από δύο ώρες μετά την ανατολή του ήλιου λόγω χαμηλού ρυθμού διαπνοής. Επομένως, για να υπάρχει ολοκληρωμένη προσέγγιση άρδευσης όταν χρησιμοποιούνται όργανα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι απαραίτητος ο συνδυασμός τους με άλλες τεχνικές άρδευσης, όπως η άρδευση με χρονοδιακόπτη, προκειμένου να αποφευχθεί η ξηρότητα του υποστρώματος, ιδιαίτερα κατά τις ώρες της νύχτας, και να ληφθεί υπόψη η διαπνοή των φυτών. Υπάρχουν αρκετές λεπτομερείς αναφορές για τη νυχτερινή διαπνοή των φυτών. Για παράδειγμα, οι Medrano et al. (2005) ανέφεραν ότι οι τιμές νυχτερινής διαπνοής για τα αγγούρια κυμαίνονταν μεταξύ 120 και 200 g m⁻² d⁻².

3.3.3 Άρδευση με βάση την υγρασία στο υπόστρωμα

Η χρήση τασιμέτρων για τον έλεγχο της συχνότητας άρδευσης στις καλλιέργειες σε υποστρώματα βασίζεται στη μέτρηση του δυναμικού της θεμελιώδους μάζας (μύζηση) στο πορώδες του υποστρώματος, το οποίο συσχετίζεται με την περιεκτικότητα του υποστρώματος σε υγρασία. Παρόλο που τα τασιμέτρα χρησιμοποιούνται ευρέως στις καλλιέργειες εδάφους (Thompson et al., 2007), η εφαρμογή τους στις καλλιέργειες σε υποστρώματα είναι σχετικά νέα και απαιτεί περαιτέρω ανάπτυξη και δοκιμές (Lieth & Burger, 1989, Pardossi et al., 2009). Τα τασιμέτρα ενεργοποιούν την παροχή θρεπτικού διαλύματος όταν η μύζηση υπερβεί μια προκαθορισμένη μέγιστη τιμή (π.χ. -5 kPa) και τη διακόπτουν όταν η μύζηση φτάσει σε μια ελάχιστη τιμή (π.χ. -1 kPa). Αυτές οι τιμές εισάγονται στο σύστημα αυτοματισμού της άρδευσης ως τιμές αναφοράς και συνδυάζονται με την έννοια του εύκολα διαθέσιμου νερού, το οποίο συγκρατείται σε μύζηση μεταξύ -5 και -1 kPa (Pardossi et al., 2009). Ωστόσο, η εμπειρία στη χρήση τασιμέτρων για υποστρώματα όπως ο πετροβάμβακας, ο περλίτης, η ελαφρόπετρα και ο κοκοφοίνικας είναι περιορισμένη, και η αξιοπιστία τους παρουσιάζει προκλήσεις (Lieth & Oki, 2008). Ένα από τα βασικά προβλήματα είναι η δομή του πορώδους των υποστρωμάτων, η οποία περιλαμβάνει μεγάλο ποσοστό μεγάλων πόρων σε σύγκριση με το έδαφος (Fonteno, 1996). Αυτό συχνά αποτρέπει τη δημιουργία καλής επαφής μεταξύ του υποστρώματος και της κεραμικής κεφαλής του τασιμέτρου, δυσχεραίνοντας την ακριβή μέτρηση της μύζησης (Pardossi et al., 2009). Επιπλέον, το ύψος τοποθέτησης της κεραμικής κεφαλής μέσα στο υπόστρωμα επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις. Η υγρασία μειώνεται απότομα σε μύζηση από 0 έως -2 kPa, γεγονός που καθιστά κρίσιμο τον προσδιορισμό του κατάλληλου σημείου τοποθέτησης για την καλύτερη αποτύπωση της διαθεσιμότητας νερού. Η τοποθέτηση της κεφαλής του τασιμέτρου σε ύψος 10 cm από τον πυθμένα του υποδοχέα, που

αντιστοιχεί στη συμβατική υδατοικανότητα φυτοδοχείου, φαίνεται μια λογική προσέγγιση. Ωστόσο, δεν υπάρχουν επαρκή πειραματικά δεδομένα που να τεκμηριώνουν αυτή τη μέθοδο στην καλλιεργητική πρακτική. Η περαιτέρω έρευνα είναι απαραίτητη για τον καθορισμό του βέλτιστου ύψους τοποθέτησης των τασίμετρων στα υποστρώματα των καλλιεργειών εκτός εδάφους, καθώς και για την οριστικοποίηση των τιμών αναφοράς για την έναρξη και λήξη των κύκλων άρδευσης (Schroder & Lieth, 2002). Σύμφωνα με τις τρέχουσες πρακτικές, κάθε ηλεκτροβάνα που παρέχει θρεπτικό διάλυμα σε έναν συγκεκριμένο αρδευόμενο τομέα ελέγχεται συνήθως από ένα τασίμετρο, το οποίο ρυθμίζει τη λειτουργία της (Lieth & Oki, 2008). Παράλληλα, υπάρχουν προγραμματιστές άρδευσης που βασίζουν την ενεργοποίηση της παροχής νερού στον μέσο όρο των μετρήσεων από δύο ή περισσότερα τασίμετρα (Pardossi et al., 2009). Για να μειωθεί η πιθανότητα έκθεσης μέρους της καλλιέργειας σε καταπόνηση λόγω ανεπαρκούς υγρασίας, είναι σημαντικό τα τασίμετρα να τοποθετούνται σε υποστρώματα που υποστηρίζουν μεγάλα και καλά εκτεθειμένα στο ηλιακό φως φυτά (Schroder & Lieth, 2002). Επιπλέον, για αυξημένη ασφάλεια, συνιστάται να υπάρχουν και επιπλέον τασίμετρα, εγκατεστημένα σε διαφορετικά σημεία του θερμοκηπίου. Αυτά τα τασίμετρα μπορούν να ενεργοποιούν σύστημα συναγερμού, εάν εντοπιστούν συνθήκες που απειλούν την καλλιέργεια, όπως ανεπαρκής παροχή θρεπτικού διαλύματος ή διακοπή της άρδευσης, με αποτέλεσμα την αύξηση της μύζησης σε επίπεδα που προκαλούν σοβαρή υδατική καταπόνηση. Εκτός από τα τασίμετρα, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί και άλλοι τύποι αισθητήρων για τον έλεγχο της άρδευσης, οι οποίοι βασίζονται στη μέτρηση της υγρασίας στο περιβάλλον του υποστρώματος και όχι στη μύζηση. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Αισθητήρες ηλεκτρικής αγωγιμότητας (Electrical Conductance Sensors): Μετρούν την αγωγιμότητα του πορώδους μέσου ως δείκτη της περιεκτικότητας σε υγρασία.
2. Αισθητήρες ανακλαστικότητας στο πεδίο του χρόνου (Time Domain Reflectometry - TDR): Μετρούν την ισχύ της ανάκλασης ενός ηλεκτρομαγνητικού σήματος για τον προσδιορισμό της υγρασίας.
3. Αισθητήρες ανακλαστικότητας στο πεδίο των συχνοτήτων (Frequency Domain Reflectometry - FDR): Μετρούν την ισχύ της ανάκλασης στο πεδίο των συχνοτήτων για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε υγρασία.

Η ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών προσφέρει εναλλακτικούς και συχνά πιο ευέλικτους τρόπους παρακολούθησης της υγρασίας στα υποστρώματα και στις καλλιέργειες εκτός

εδάφους. Ωστόσο, η επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα εξαρτάται από τις ιδιαιτερότητες της καλλιέργειας και των συνθηκών του περιβάλλοντος. Οι αισθητήρες που βασίζονται στη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του πορώδους μέσου λειτουργούν με βάση την αρχή ότι όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα ενός πορώδους μέσου σε νερό, τόσο μεγαλύτερη είναι η δυνατότητά του να μεταφέρει ηλεκτρικό ρεύμα για δεδομένη τάση και απόσταση (Lieth & Oki, 2008). Το κύριο πλεονέκτημα αυτών των αισθητήρων είναι η απλή τεχνολογία τους, η οποία τους καθιστά οικονομικά προσιτούς. Ωστόσο, παρουσιάζουν σημαντικά μειονεκτήματα που περιορίζουν τη χρησιμότητά τους στις καλλιέργειες σε υποστρώματα. Πρωτίστως, η ηλεκτρική αγωγιμότητα εξαρτάται όχι μόνο από την υγρασία του πορώδους μέσου, αλλά και από την περιεκτικότητα του νερού σε άλατα (Pardossi et al., 2009). Αυτό σημαίνει ότι η ακρίβεια των μετρήσεων που παρέχουν σχετίζεται άμεσα με τη βαθμονόμηση των αισθητήρων στο συγκεκριμένο υπόστρωμα και στο σύστημα υδρολίπανσης που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, οι μετρήσεις επηρεάζονται από τη σταθερότητα της συνολικής συγκέντρωσης αλάτων στο θρεπτικό διάλυμα. Ένα ακόμη μειονέκτημα αυτών των αισθητήρων είναι η αργή απόκρισή τους στις μεταβολές της υγρασίας στο πορώδες μέσο, γεγονός που περιορίζει την αποτελεσματικότητά τους σε δυναμικές συνθήκες καλλιέργειας (Munoz-Carpena et al., 2005). Λόγω αυτών των περιορισμών, οι αισθητήρες που βασίζονται στη μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δεν θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλοι για τον έλεγχο της συχνότητας άρδευσης στις καλλιέργειες που βασίζονται σε υποστρώματα. Οι δύο άλλοι τύποι αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της περιεκτικότητας των πορώδων μέσων σε υγρασία βασίζονται στη μέτρηση της διηλεκτρικής χωρητικότητας ή περατότητας (Robinson et al., 2003). Συγκεκριμένα, οι αισθητήρες αυτοί λειτουργούν με την εκπομπή ενός ηλεκτρομαγνητικού παλμού και την ανίχνευση της ισχύος ανακλασής του, είτε στο πεδίο του χρόνου (time domain reflectometry, TDR) είτε στο πεδίο των συχνοτήτων (frequency domain reflectometry, FDR). Η ισχύς της ανακλασής τους εξαρτάται άμεσα από την υγρασία του μέσου, επιτρέποντας την ανάλυση των ηλεκτρομαγνητικών ταλαντώσεων για τον προσδιορισμό της υγρασίας. Επιπλέον, αυτοί οι διηλεκτρικοί αισθητήρες μπορούν να μετρούν ταυτόχρονα την ηλεκτρική αγωγιμότητα και τη θερμοκρασία στο πορώδες μέσο (Kizito et al., 2008). Για να λειτουργήσουν αξιόπιστα, οι αισθητήρες αυτοί πρέπει να βαθμονομούνται για κάθε συγκεκριμένο υπόστρωμα (Baas et al., 2004). Ωστόσο, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος ή του νερού στο υπόστρωμα υπερβαίνει τα 5 dS/m (Lieth & Oki, 2008). Παρά τα περιοριστικά αυτά χαρακτηριστικά, οι αισθητήρες TDR και FDR είναι ανθεκτικοί στην υγρασία και στις αντίξοες συνθήκες καλλιέργειας, ενώ αντιδρούν γρήγορα στις μεταβολές της υγρασίας, προσφέροντας μετρήσεις

με επαναληψιμότητα και αποδεκτή ακρίβεια, εφόσον βαθμονομηθούν σωστά (Charpentier et al., 2004; Murray et al., 2004). Παρόλο που το κόστος τους δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό, οι αισθητήρες TDR απαιτούν ακριβότερη ηλεκτρονική συσκευή για την ανίχνευση και ανάλυση των σημάτων τους (Lieth & Oki, 2008). Αντίθετα, οι αισθητήρες FDR είναι μικρότερου μεγέθους, παρέχουν μεγαλύτερες δυνατότητες αυτοματοποίησης και είναι πιο κατάλληλοι για τον έλεγχο της άρδευσης σε εκτός εδάφους καλλιέργειες (Kizito et al., 2008, van Os et al., 2008). Μια εναλλακτική προσέγγιση για τον έλεγχο της συχνότητας άρδευσης βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση και καταγραφή του βάρους ενός ή μιας ομάδας υποδοχέων που περιέχουν το υπόστρωμα (Lieth & Oki, 2008). Αυτή η μέθοδος επιτυγχάνεται με τη χρήση ζυγαριών συνδεδεμένων με το σύστημα αυτοματισμού της άρδευσης. Οι υποδοχείς περιέχουν υπόστρωμα και φυτά, όπως και τα υπόλοιπα της καλλιέργειας, ενώ οι στιγμιαίες μεταβολές στο βάρος τους αντανakλούν τις απώλειες ή την πρόσληψη υγρασίας στο υπόστρωμα λόγω διαπνοής ή άρδευσης αντίστοιχα. Με βάση αυτές τις μετρήσεις και τον γνωστό όγκο του υποστρώματος, είναι δυνατός ο υπολογισμός της περιεκτικότητάς του σε νερό και η αυτόματη ρύθμιση της συχνότητας άρδευσης με τη χρήση προκαθορισμένων ορίων υγρασίας, όπως γίνεται και στους διηλεκτρικούς αισθητήρες.

3.3.4 Άρδευση με βάση την ηλεκτρική αγωγιμότητα στο υπόστρωμα

Η διαθεσιμότητα αισθητήρων υγρασίας υποστρώματος, οι οποίοι είναι επίσης ικανοί να μετρούν τη θερμοκρασία και την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υποστρώματος (EC), παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες στη διαχείριση της άρδευσης υδροπονικών καλλιεργειών. Η παρακολούθηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για τη διέγερση της ανάπτυξης της καλλιέργειας, τη βελτίωση της ποιότητας των καρπών, την ένδειξη για το αν απαιτείται έκπλυση του υποστρώματος και την αύξηση της αποδοτικότητας χρήσης του νερού, διατηρώντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα στις ρίζες κοντά στα μέγιστα επιτρεπτά όρια για την καλλιέργεια (Valdés et al., 2014). Είναι γνωστό ότι σε συνθήκες χαμηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος, παρατηρείται βλαστική ανάπτυξη της καλλιέργειας, ενώ υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε συνδυασμό με ελαφρύ υδατικό στρες διεγείρουν τη παραγωγική ανάπτυξη. Συνεπώς, για να ενισχυθεί η παραγωγική ανάπτυξη και να δημιουργηθεί μεγάλο ριζικό σύστημα, κατά τη διάρκεια φωτεινών ημερών, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υποστρώματος στις ντομάτες που αναπτύσσονται σε πετροβάμβακα μπορεί να αυξηθεί έως 5-6 dS m⁻¹, ενώ ταυτόχρονα η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε νερό (VWC) μειώνεται στο 50-55%. Επιπλέον, σε

συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υποστρώματος μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω έως 8 dS m^{-1} (Lee, 2009). Επιπλέον, όπως αναφέρουν οι Nebauer et al. (2013), όταν η ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος αυξήθηκε στα $4,0 \text{ dS m}^{-1}$, παρατηρήθηκε αύξηση κατά 14-15% στον μέγιστο ρυθμό φωτοσύνθεσης στις ντομάτες. Η περαιτέρω αύξηση στα $8,75 \text{ dS m}^{-1}$ επηρεάζει έμμεσα την ανάπτυξη του φυτού, καθώς δεν προκαλεί αλλαγές στον ρυθμό φωτοσύνθεσης των φύλλων, αλλά μειώνει τη συνολική φυλλική επιφάνεια, μειώνοντας έτσι τη συνολική φωτοσύνθεση του φυτού. Ωστόσο, όπως έχουν διαπιστώσει αρκετοί συγγραφείς, παρατεταμένες περίοδοι υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος είχαν ως αποτέλεσμα μείωση της εισροής νερού στους καρπούς, οδηγώντας σε χαμηλότερο μέσο βάρος καρπών (Savvas & Lenz, 2000, Magan et al., 2008). Στην περίπτωση των καλλωπιστικών φυτών, η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, ακόμα και για σύντομες περιόδους, επηρεάζει αρνητικά την παραγωγή. Επομένως, συνιστάται να λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις της αλατότητας ανάλογα με την καλλιέργεια, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική χρήση αλατούχου νερού και, συνεπώς, η μείωση της απόδοσης. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η αποδοτικότητα χρήσης νερού μειώθηκε καθώς αυξήθηκε η αλατότητα του νερού (Mahjoor et al., 2016).

3.3.5 Άρδευση με προσομοίωση της διαπνοής

Η άρδευση με βάση την προσομοίωση της διαπνοής αποτελεί έναν εξαιρετικά αποδοτικό τρόπο διαχείρισης του νερού στις καλλιέργειες εκτός εδάφους. Στις καλλιέργειες αυτές, λόγω της κάλυψης του υποστρώματος ή του θρεπτικού διαλύματος με πλαστικό, οι απώλειες νερού από εξάτμιση είναι σχεδόν μηδενικές. Έτσι, το νερό που παρέχεται μέσω άρδευσης απορροφάται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τα φυτά, ενώ το υπόλοιπο απορρέει. Η διαπνοή αντιπροσωπεύει περίπου το 99% του νερού που απορροφούν τα φυτά, με μόνο το 1% να χρησιμοποιείται για την αύξηση της βιομάζας τους (Katerji et al., 2008, Raviv et al., 2004). Η ποσότητα νερού που απορροφάται από την καλλιέργεια μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια εφόσον εκτιμηθεί η διαπνοή κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων χρονικών διαστημάτων. Εάν η διαπνοή υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο, η άρδευση μπορεί να ενεργοποιείται αυτόματα όταν η συνολική εκτιμώμενη απώλεια νερού λόγω διαπνοής ισούται με την αρδευτική δόση μείον το κλάσμα απορροής. Για παράδειγμα, αν η αρδευτική δόση είναι $X \text{ m}^3$ και το κλάσμα απορροής α , η άρδευση θα πρέπει να ενεργοποιείται όταν η εκτιμώμενη διαπνοή φτάσει στο επίπεδο $X(1-\alpha) \text{ m}^3$. Η αρδευτική δόση παραμένει σταθερή και καθορίζεται από τον όγκο και τις φυσικές ιδιότητες του υποστρώματος. Με τη χρήση κατάλληλων προσομοιωμάτων που

λαμβάνουν δεδομένα από αυτόματα καταγραφόμενους μετεωρολογικούς δείκτες, όπως θερμοκρασία, υγρασία και ηλιακή ακτινοβολία, η συχνότητα άρδευσης μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως (Prenger et al., 2002). Αυτά τα προσομοιώματα δεν περιορίζονται μόνο στις καλλιέργειες εκτός εδάφους, αλλά γενικά υπολογίζουν την εξατμισοδιαπνοή. Έχουν, δε, ενσωματωθεί σε συστήματα λήψης αποφάσεων (DSS) που επιτρέπουν την πλήρη αυτοματοποίηση της άρδευσης (Lieth & Oki, 2008, Pardossi et al., 2009). Οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την εξατμισοδιαπνοή είναι η ενέργεια που δέχεται η καλλιέργεια και το μέγεθος της διαπνεούσας φυλλικής επιφάνειας. Σε θερμοκήπια, η ενέργεια αυτή προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία και το σύστημα θέρμανσης (de Graaf, 1985). Πρόσθετοι παράγοντες που επηρεάζουν την εξατμισοδιαπνοή περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία, την ταχύτητα του ανέμου, το έλλειμμα κορεσμού του αέρα σε υγρασία και την περιεκτικότητα σε CO₂ (Howell et al., 1986). Η επίδραση του CO₂ στην κατανάλωση νερού είναι αμελητέα ακόμα και με ανθρακολίπανση, καθιστώντας την πρακτικά μη σημαντική (Nederhoff & Graaf, 1993). Αυτή η προσέγγιση προσφέρει τη δυνατότητα εξαιρετικά ακριβούς ελέγχου της συχνότητας άρδευσης, μειώνοντας τη σπατάλη νερού και λιπασμάτων, ενώ προσαρμόζεται στις πραγματικές ανάγκες των φυτών σε κάθε στάδιο ανάπτυξης. Η εξατμισοδιαπνοή στις καλλιέργειες θερμοκηπίου υπολογίζεται συνήθως με δύο κύρια προσομοιώματα: την εξίσωση των Penman-Monteith και την εξίσωση του Stanghellini (1987). Το προσομοίωμα των Penman-Monteith αρχικά σχεδιάστηκε για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής σε υπαίθριες καλλιέργειες. Ωστόσο, μπορεί να εφαρμοστεί και στις θερμοκηπιακές συνθήκες με ορισμένες απαραίτητες προσαρμογές (Prenger et al., 2002). Από την άλλη, η εξίσωση του Stanghellini (1987) αποτελεί τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης των Penman-Monteith, ειδικά προσαρμοσμένη στις συνθήκες που επικρατούν στα θερμοκήπια.

Εξίσωση Penman-Monteith:

$$ET_c = K_c \cdot ET_o = K_c * \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Εξίσωση Stanghellini:

$$ET_o = 0,408 * \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} * 172,8 LAI * \rho_a \lambda (e_s - e_a \div r_a) \right]$$

Όπου:

- ET_c : Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (mm/day)
- ET_o : Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm/day)
- K_c : Ο συντελεστής καλλιέργειας
- Δ : Η κλίση της καμπύλης πίεσης υδρατμών (kPa/°C)
- R_n : Η καθαρή ακτινοβολία (MJ/m²/day)
- G : Η ροή θερμότητας του εδάφους (MJ/m²/day)
- γ : Ο ψυχομετρικός συντελεστής (kPa/°C)
- T : Η μέση ημερήσια θερμοκρασία του αέρα (°C)
- u_2 : Η ταχύτητα του ανέμου στα 2 m (m/s)
- e_s : Η πίεση κορεσμού υδρατμών (kPa)
- e_a : Η πραγματική πίεση υδρατμών (kPa)
- LAI (Leaf Area Index - Συντελεστής Φυλλικής Επιφάνειας): Είναι ο λόγος της συνολικής επιφάνειας της μιας πλευράς των φύλλων προς την καλλιεργούμενη επιφάνεια του θερμοκηπίου, εκφρασμένος σε m²/m².
- ρ_a (Πυκνότητα του Αέρα): Είναι η μάζα του αέρα ανά μονάδα όγκου, εκφρασμένη σε kg/m³.
- λ (Λανθάνουσα Θερμότητα Εξάτμισης του Νερού): Είναι η ενέργεια που απαιτείται για την εξατμίσση 1 kg νερού και εκφράζεται σε MJ/kg.
- r_a (Αεροδυναμική Αντίσταση): Είναι η μέση ημερήσια τιμή της αντίστασης στη μεταφορά θερμότητας και υδρατμών μέσω του αέρα, μετρούμενη σε s/m

Εξίσωση Stanghellini:

$$ET_o = 0,408 * \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} * 172,8 LAI * \rho_a \lambda (e_s - e_a \div r_a) \right]$$

Για την πρακτική εφαρμογή των προαναφερόμενων προσομοιωμάτων (Penman-Monteith και Stanghellini) στην καλλιέργεια, απαιτείται η συνεχής καταγραφή συγκεκριμένων μεταβλητών μέσω αισθητήρων και η μεταφορά των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στον προγραμματιστή

άρδευσης. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το προσομοίωμα της Stanghellini αναπτύχθηκε και βαθμονομήθηκε σε συνθήκες ψυχρού κλίματος, όπως αυτές της Ολλανδίας, όπου επικρατούν χαμηλές εντάσεις ηλιακής ακτινοβολίας. Κατά συνέπεια, η εφαρμογή του σε θερμοκήπια μεσογειακών περιοχών και η ακρίβεια των εκτιμήσεών του απαιτούν περαιτέρω μελέτη και αξιολόγηση (Lecina et al., 2003, Τσιρογιάννης κ.ά., 2007). Για να καταστεί δυνατή η χρήση αυτών των προσομοιωμάτων σε μεσογειακά θερμοκήπια, είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση και η προσαρμογή τους στις τοπικές κλιματικές συνθήκες. Παρά την επιστημονική αξία τους, η εφαρμογή τους στις παραγωγικές καλλιέργειες εκτός εδάφους παρουσιάζει πρακτικές δυσκολίες, λόγω της πολυπλοκότητας των παραμέτρων που εμπεριέχονται στα μοντέλα. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή τους απαιτεί εξειδικευμένη συμβουλευτική υποστήριξη (Kittas et al., 1999). Ακόμη και όταν παρέχεται η απαιτούμενη υποστήριξη, η ρύθμιση της συχνότητας άρδευσης με βάση τη διαπνοή μέσω προσομοίωσης κρίνεται σκόπιμο να συνοδεύεται από ένα επικουρικό σύστημα λειτουργίας με χρονοδιακόπτη, για μεγαλύτερη ασφάλεια και αποφυγή δυσλειτουργιών (Schroder and Lieth, 2002).

Η διαπνοή μπορεί να μετρηθεί άμεσα μέσω της χρήσης συσκευών, όπως τα λυσίμετρα, τα οποία μετρούν συνεχείς αλλαγές στη μάζα της καλλιέργειας σε σύντομα χρονικά διαστήματα. Η τυπική δομή ενός λυσίμετρου αποτελείται από έναν περιέκτη που υποστηρίζει το μέσο ανάπτυξης με τα φυτά και μια συσκευή ζύγισης. Η δομή αυτή είναι ευθυγραμμισμένη με την καλλιέργεια, αλλά λειτουργεί ως ξεχωριστό σώμα. Η διαφορά μεταξύ των δύο μετρήσεων θεωρείται ότι είναι ίση με τη διαπνοή της καλλιέργειας. Σύμφωνα με τον Fazlil Ilahi (2009), μία προϋπόθεση για τη σωστή μέτρηση με τη χρήση λυσίμετρων είναι ότι η βλάστηση τόσο μέσα όσο και ακριβώς έξω από τα λυσίμετρα πρέπει να είναι απόλυτα αντίστοιχη (ίδιο ύψος και δείκτης φυλλικής επιφάνειας). Αυτή η προϋπόθεση, ιστορικά, δεν έχει τηρηθεί αυστηρά στην πλειονότητα των μελετών με λυσίμετρα, με αποτέλεσμα να αποτυγχάνει η πρόβλεψη της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Εάν τα ζυγιζόμενα φυτά βρίσκονται σημαντικά πιο ψηλά από τα περιβάλλοντα φυτά-περίγραμμα, εκτίθενται σε υψηλότερη ηλιακή ακτινοβολία και άνεμο, γεγονός που αυξάνει τις τιμές διαπνοής σε σύγκριση με τα γύρω φυτά.

Τα λυσίμετρα θεωρούνται από πολλούς συγγραφείς οι πιο ακριβείς και ποσοτικοποιήσιμες μέθοδοι μέτρησης της διαπνοής σε μικρά χρονικά διαστήματα σε πραγματικό χρόνο. Έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία τόσο για καλλιέργειες πεδίου όσο και για καλλιέργειες θερμοκηπίου, καθώς και για τη βαθμονόμηση διαφόρων μοντέλων εξατμισοδιαπνοής (Meijer et al., 1985, Schmidt et al., 2013).

3.3.6 Άρδευση με αισθητήρες μέτρησης φυσιολογικών παραμέτρων του φυτού

Η άρδευση με βάση αισθητήρες που καταγράφουν φυσιολογικές παραμέτρους των φυτών αποτελεί αντικείμενο εντατικής έρευνας τα τελευταία χρόνια, με στόχο την ανάπτυξη τεχνολογιών που ελέγχουν αυτόματα την άρδευση μέσω συνεχούς παρακολούθησης μορφολογικών και φυσιολογικών χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την υδατική τους κατάσταση (Jones, 2004). Μέχρι στιγμής, έχουν δοκιμαστεί διάφορες παράμετροι που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως δείκτες υδατικής κατάστασης ή αναγκών των φυτών, όπως η διάμετρος του βλαστού (Fernandez and Cuevas, 2010), το πάχος των φύλλων (Jones, 2004, Seelig et al., 2009), η ροή του ανιόντος χυμού μέσω του ξυλώδους ιστού (Egea et al., 2009, Liu et al., 2010), η στοματική αγωγιμότητα (Jones, 2004), και η ανακλαστικότητα των φύλλων σε ακτινοβολίες διαφορετικών μηκών κύματος (Seelig et al., 2009, Tsirogiannis et al., 2010, 2011). Σε ορισμένες περιπτώσεις, πειραματικές μελέτες έχουν δείξει συσχέτιση μεταξύ της υδατικής κατάστασης των φυτών και ενός μεμονωμένου ή συνδυασμού δεικτών φυσιολογικής κατάστασης (Steppe et al., 2008). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας (Crop Water Stress Index, CWSI), ο οποίος αποτελεί συνάρτηση της θερμοκρασίας του φυλλώματος και λαμβάνει τιμές από 0 (καμία καταπόνηση) έως 1 (μέγιστη καταπόνηση) (Prenger et al., 2005, Katsoulas et al., 2002). Παρόλα αυτά, η πρακτική εφαρμογή της άρδευσης με βάση μορφολογικά ή φυσιολογικά χαρακτηριστικά των φυτών παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι ότι οι μεταβολές αυτών των παραμέτρων συνήθως γίνονται μετρήσιμες όταν τα φυτά βρίσκονται ήδη σε κατάσταση υδατικής καταπόνησης (Oki and Lieth, 2008, Seelig et al., 2009). Επιπλέον, αυτές οι μέθοδοι δεν παρέχουν ποσοτικές πληροφορίες για το ακριβές μέγεθος των υδατικών αναγκών των φυτών. Επίσης, απαιτείται πειραματική δοκιμή και βαθμονόμηση για κάθε συγκεκριμένο είδος φυτού, γεγονός που καθιστά δύσκολη την εφαρμογή τους σε παραγωγικά θερμοκήπια. Στις υδροπονικές καλλιέργειες, όπου η υδατική κατάσταση του περιβάλλοντος των ριζών μπορεί να μεταβληθεί ταχύτατα, οι τεχνολογίες αυτές είναι ακόμη πιο δύσκολο να εφαρμοστούν. Παρόλα αυτά, υπάρχει η πιθανότητα κάποιες από αυτές τις μεθόδους να καταστούν πρακτικά εφαρμόσιμες στο μέλλον, εφόσον βελτιωθεί σημαντικά η ευαισθησία των μετρήσεων που συνδέουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των φυτών με την υδατική τους κατάσταση.

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των φυτών μπορούν να ταξινομηθούν γενικά σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει αισθητήρες που βρίσκονται σε φυσική επαφή με το φυτό (π.χ. αισθητήρας θερμοκρασίας φύλλου, αισθητήρας μικρομεταβολών στελέχους) και σε ορισμένες περιπτώσεις είναι καταστροφικοί (π.χ.

αισθητήρας ροής χυμού). Σε αυτήν την περίπτωση, οι πληροφορίες που λαμβάνονται για την κατάσταση του νερού ενός φυτού από ένα όργανο ενός μόνο φυτού μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν σωστά την πραγματικότητα. Για να ληφθούν σωστές μετρήσεις σχετικά με την κατάσταση του νερού των φυτών, ορισμένα συστήματα ελέγχου του κλίματος προτείνουν την εγκατάσταση φυτοαισθητήρων σε διάφορες θέσεις μέσα στο θερμοκήπιο. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει αισθητήρες που δεν είναι καταστροφικοί για τα φυτά και συνήθως βρίσκονται σε κάποια απόσταση από την καλλιέργεια (π.χ. ραδιομετρικοί αισθητήρες), ενώ παρακολουθούνται περισσότερα φυτά ταυτόχρονα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΦΥΤΟΥ ΜΕΣΩ ΑΡΔΕΥΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Στις καλλιέργειες θερμοκηπίου, όπως οι ντομάτες, οι πιπεριές και τα αγγούρια, είναι απαραίτητο να διατηρείται μια καλή ισορροπία του φυτού για την επίτευξη βέλτιστης παραγωγής κατά τη διάρκεια ολόκληρης της καλλιεργητικής περιόδου. Η ισορροπία του φυτού, με απλά λόγια, είναι η ισορροπία μεταξύ των φύλλων και των καρπών σε ένα φυτό. Ο όρος χρησιμοποιείται κυρίως για καλλιέργειες που παράγουν καρπούς, αλλά η αρχή ισχύει επίσης και για τα ανθοκομικά καλλωπιστικά φυτά. Τα φυτά που δεν είναι ισορροπημένα χαρακτηρίζονται είτε ως "βλαστικά" είτε ως "αναπαραγωγικά". Τα βλαστικά φυτά βρίσκονται σε κατάσταση όπου το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς τους κατευθύνεται στην ανάπτυξη φύλλων, ενώ ελάχιστη ενέργεια επενδύεται στην παραγωγή καρπών. Αντίθετα, τα αναπαραγωγικά φυτά διοχετεύουν την περισσότερη ενέργειά τους στην ανάπτυξη καρπών και έχουν ελάχιστη ενέργεια για να επενδύσουν σε νέα φύλλα και στο αναπτυσσόμενο άκρο του φυτού (την κορυφή του φυτού). Μια ισχυρή κορυφή του φυτού είναι απαραίτητη για τη συνέχιση της παραγωγής. Παράλληλα, ένα υγιές ριζικό σύστημα είναι ζωτικής σημασίας. Τα μη ισορροπημένα φυτά αποδίδουν πάντα λιγότερο. Τα βλαστικά φυτά αποδίδουν λιγότερο επειδή δεν φέρουν αρκετούς καρπούς για να επιτύχουν υψηλή παραγωγή. Από την άλλη πλευρά, τα αναπαραγωγικά φυτά αποδίδουν λιγότερο επειδή διαθέτουν ανεπαρκή φυλλική επιφάνεια για την παραγωγή αρκετής ποσότητας σακχάρων για να γεμίσουν τους αναπτυσσόμενους καρπούς. Τα βλαστικά φυτά χαρακτηρίζονται από μεγάλα φύλλα, χοντρό βλαστό, ισχυρή κορυφή και γενικά αργή ανάπτυξη καρπών. Αντίθετα, τα αναπαραγωγικά φυτά έχουν μικρά φύλλα, λεπτό κεντρικό βλαστό, αδύναμη κορυφή, μικρά έντονα άνθη και πιθανώς μεγάλο φορτίο καρπών. Το φορτίο καρπών αποτελεί έναν δείκτη, αλλά μπορεί να είναι παραπλανητικό. Άλλωστε, πολλά ώριμα φρούτα πάνω στο φυτό δείχνουν ότι η καρπόδεση ήταν καλή πριν από κάποιο χρονικό διάστημα, αλλά δεν λέει τίποτα για την τρέχουσα κατάσταση του φυτού. Ο καλύτερος δείκτης της ισορροπίας του φυτού είναι η κορυφή του φυτού. Μια αδύναμη κορυφή και ένας βλαστός που είναι λεπτός στο επάνω μέρος υποδηλώνουν ότι το φυτό εστιάζει στους καρπούς του, άρα είναι αναπαραγωγικό. Αντίθετα, μια χοντρή, γεμάτη κορυφή φυτού είναι χαρακτηριστική για ένα βλαστικό φυτό. Σε γενικές γραμμές, ήπιες συνθήκες ευνοούν την πλούσια ανάπτυξη, οδηγώντας σε βλαστικά φυτά. Αντίθετα, σκληρές συνθήκες και στρες καθιστούν τα φυτά αναπαραγωγικά. Αυτό συμβαίνει

επειδή τα φυτά προσπαθούν να επιβιώσουν σε αντίξοες συνθήκες μέσω της παραγωγής περισσότερων σπόρων. Η ισορροπία των φυτών είναι εν μέρει αποτέλεσμα της εποχής. Οι ήπιες ανοιξιάτικες συνθήκες, με υψηλή υγρασία και καλή φωτεινότητα, διεγείρουν τη ζωτικότητα του φυτού, καθιστώντας το βλαστικό. Αντίθετα, οι καλοκαιρινές συνθήκες, με υψηλή ακτινοβολία, αυξημένη θερμοκρασία του φυτού και χαμηλή υγρασία, προκαλούν στρες στα φυτά και τα κάνουν αναπαραγωγικά (Nederhoff & Houter, 2009).

4.2 Παράμετροι άρδευσης για ισορροπία

4.2.1 Περιεκτικότητα σε υγρασία στο περιβάλλον της ρίζας

Η άρδευση έχει ισχυρή επίδραση στις συνθήκες του ριζικού συστήματος, ξεκινώντας από το υπόστρωμα. Υποστρώματα με καλή ικανότητα συγκράτησης νερού, όπως η τύρφη και ο κοκοφοίνικας, διατηρούν κατά μέσο όρο μεγαλύτερη υγρασία, γεγονός που ευνοεί την πλούσια βλαστική ανάπτυξη και οδηγεί τα φυτά σε βλαστική κατάσταση. Αντίθετα, υποστρώματα με περιορισμένη ικανότητα συγκράτησης νερού, όπως η ελαφρόπετρα, είναι κατά μέσο όρο πιο ξηρά, ασκώντας αναπαραγωγική επίδραση στα φυτά. Η άρδευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για τον έλεγχο της ισορροπίας του φυτού, καθώς επηρεάζει την περιεκτικότητα σε νερό (υγρασία) και την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του υποστρώματος. Και οι δύο αυτοί παράγοντες καθορίζουν εάν οι συνθήκες ανάπτυξης είναι ευνοϊκές ή δυσμενείς, γεγονός που με τη σειρά του επηρεάζει εάν τα φυτά γίνονται βλαστικά ή αναπαραγωγικά. Υψηλή περιεκτικότητα σε νερό στη ζώνη των ριζών δημιουργεί εύκολες συνθήκες ανάπτυξης, οι οποίες προάγουν πλούσια βλαστική ανάπτυξη. Από την άλλη πλευρά, χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό στη ζώνη των ριζών, ή με άλλα λόγια ένα ξηρό υπόστρωμα, δημιουργεί πιο δυσμενείς συνθήκες ανάπτυξης, κάνοντας τα φυτά αναπαραγωγικά. Αυτός είναι ένας τρόπος με τον οποίο το καθεστώς άρδευσης επηρεάζει την ισορροπία του φυτού (Nederhoff & Houter, 2009).

4.2.2 Ηλεκτρική αγωγιμότητα στο υπόστρωμα

Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο η άρδευση επηρεάζει την ισορροπία του φυτού είναι μέσω της αγωγιμότητας, γνωστής και ως EC (Ηλεκτρική Αγωγιμότητα). Αυτό στην ουσία αναφέρεται στη συγκέντρωση του θρεπτικού διαλύματος. Η EC του υποστρώματος καθορίζει πόσο εύκολα απορροφάται το νερό. Το καθαρό νερό ή ένα θρεπτικό διάλυμα με πολύ χαμηλή EC απορροφάται εύκολα από τα φυτά. Συνεπώς, χαμηλή EC προκαλεί έντονη βλαστική

ανάπτυξη. Αντίθετα, ένα θρεπτικό διάλυμα με υψηλή EC ή αλμυρό νερό δυσκολεύει την απορρόφηση νερού. Η υψηλή EC εμποδίζει την απορρόφηση νερού και δυσκολεύει τα φυτά, οδηγώντας τα σε αναπαραγωγική ανάπτυξη. Πρέπει να σημειωθεί ότι η EC επηρεάζει πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με την ποσότητα και την ποιότητα της παραγωγής. Ο βασικός προβληματισμός είναι τα φυτά να λαμβάνουν επαρκείς ποσότητες νερού και θρεπτικών συστατικών. Υπό συνθήκες υψηλής ακτινοβολίας, τα φυτά χρειάζονται μεγάλες ποσότητες νερού για να αναπληρώσουν τις απώλειες λόγω διαπνοής. Σε αυτή την περίπτωση, η EC πρέπει να είναι χαμηλή, διότι ένα διάλυμα με χαμηλή EC είναι πολύ πιο εύκολο να απορροφηθεί από τα φυτά. Ωστόσο, το καλοκαίρι, τα φυτά χρειάζονται και μεγάλες ποσότητες θρεπτικών συστατικών. Η χαμηλή συγκέντρωση θρεπτικών στο διάλυμα αντισταθμίζεται από τον μεγάλο όγκο που απορροφάται. Αντίθετα, υπό συνθήκες χαμηλής ακτινοβολίας, η EC πρέπει να αυξηθεί για να εξασφαλιστεί ότι τα φυτά λαμβάνουν επαρκή θρεπτικά συστατικά. Γενικά, τα φυτά ευδοκιμούν σε ένα σχετικά σταθερό περιβάλλον στη ριζική ζώνη και υποφέρουν από ανεπιθύμητες διακυμάνσεις στην EC και την περιεκτικότητα σε νερό. Σκόπιμες μεταβολές μπορούν να εφαρμοστούν για να επηρεαστεί ο τρόπος ανάπτυξης των φυτών. Έτσι, η άρδευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κατευθύνει την ισορροπία των φυτών. Η βασική αρχή είναι ότι η υψηλή περιεκτικότητα σε νερό και η χαμηλή EC ενισχύουν τη βλαστική ανάπτυξη, ενώ η χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό και η υψηλή EC ενισχύουν την αναπαραγωγική ανάπτυξη. Ορισμένα επίπεδα περιεκτικότητας σε νερό και EC στη ριζική ζώνη μπορούν να επιτευχθούν με πολλούς τρόπους, δηλαδή με μεταβολές στο χρονοδιάγραμμα, τη δόση και τη συχνότητα άρδευσης, με μεταβολές στον όγκο απορροής, καθώς και με μεταβολές στην αποξήρανση κατά τη διάρκεια της νύχτας (απώλεια νερού από το υπόστρωμα καλλιέργειας). Φυσικά, είναι πάντα απαραίτητο τα φυτά να λαμβάνουν την ημερήσια ποσότητα θρεπτικού διαλύματος που χρειάζονται (Nederhoff & Houter, 2009).

4.3 Δόση και Συχνότητα Κύκλων Άρδευσης

Αν μια συγκεκριμένη ποσότητα νερού απαιτείται μέσα σε μια ημέρα, ο καλλιεργητής μπορεί να επιλέξει να τη χορηγήσει είτε μέσω πολλών μικρών κύκλων άρδευσης είτε μέσω λίγο μεγαλύτερων κύκλων κατανεμημένων κατά τη διάρκεια της ημέρας (ή με οποιοδήποτε συνδυασμό αυτών). Η ποσότητα νερού ανά κύκλο επηρεάζει την υγρασία και την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) στο υπόστρωμα, καθώς και το ποσοστό απορροής (drain). Αυτό μπορεί να κατανοηθεί εξετάζοντας τι συμβαίνει το πρωί, όταν το υπόστρωμα είναι ξηρό και ξεκινά ο

πρώτος κύκλος άρδευσης. Αν η ποσότητα είναι μικρή, θα απορροφηθεί εύκολα από το ξηρό υπόστρωμα. Το νερό θα διανεμηθεί ομοιόμορφα στο υπόστρωμα, ενώ μόνο μια ελάχιστη ποσότητα θα απορρεύσει. Αντίθετα, αν ο πρώτος κύκλος ρίξει μια πολύ μεγάλη ποσότητα νερού στο ξηρό υπόστρωμα, αυτή η μεγάλη ποσότητα δεν θα απορροφηθεί πλήρως και θα απορρεύσει κυρίως. Το υπόστρωμα δεν θα υγρανθεί επαρκώς από αυτόν τον κύκλο άρδευσης. Αν, στη συνέχεια, ο δεύτερος κύκλος έρθει αρκετά αργότερα και επίσης περιλαμβάνει μια μεγάλη ποσότητα νερού, θα συμβεί το ίδιο. Έτσι, μεγάλοι κύκλοι άρδευσης με μεγάλο χρονικό διάστημα ανάμεσά τους οδηγούν σε περισσότερη απορροή, ξηρότερο υπόστρωμα και υψηλότερη EC. Τόσο το ξηρό υπόστρωμα όσο και η υψηλή EC έχουν αναπαραγωγική επίδραση στα φυτά, όπως συζητήθηκε προηγουμένως. Αντίθετα, πολλοί μικροί κύκλοι άρδευσης δημιουργούν πιο υγρό υπόστρωμα με χαμηλότερη EC, γεγονός που έχει βλαστική επίδραση στα φυτά (Nederhoff & Houter, 2009).

4.4 Ώρα Έναρξης και Διακοπής Άρδευσης

Η ώρα έναρξης και διακοπής της άρδευσης καθορίζουν τους χρόνους του πρώτου και του τελευταίου κύκλου άρδευσης μέσα στην ημέρα. Αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών. Μια πρόωμη έναρξη το πρωί ή μια καθυστερημένη διακοπή το απόγευμα οδηγούν σε πιο υγρή ζώνη ριζών κατά τη διάρκεια της νύχτας, γεγονός που έχει μια βλαστική επίδραση στα φυτά. Αντίθετα, μια καθυστερημένη έναρξη το πρωί και μια πρόωμη διακοπή το απόγευμα οδηγούν σε πιο ξηρή ζώνη ριζών κατά τη διάρκεια της νύχτας, προκαλώντας μια αναπαραγωγική επίδραση στα φυτά. Οι ώρες έναρξης και διακοπής χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του βαθμού ξηρότητας του υποστρώματος κατά τη διάρκεια της νύχτας (overnight dry back) (Nederhoff & Houter, 2009).

Πίνακας 3. Πως η άρδευση επηρεάζει την ισορροπία του φυτού (Nederhoff & Houter, 2009).

Μεταβλητή άρδευσης	Κατεύθυνση προς βλαστική ανάπτυξη	Κατεύθυνση προς αναπαραγωγική ανάπτυξη
Υγρασία στο υπόστρωμα	Υψηλή (πολύ υγρό υπόστρωμα)	Χαμηλή (Ξηρότερο υπόστρωμα)
eC στο υπόστρωμα	Χαμηλή	Υψηλή
Όγκος κύκλου άρδευσης	Μικρός -> μεγαλύτερη θ στο υπόστρωμα	Μεγάλος → μικρότερη θ στο υπόστρωμα
Συχνότητα άρδευσης	Περισσότερες αρδεύσεις ανά ημέρα -> μεγαλύτερη θ στο υπόστρωμα	Λιγότερες αρδεύσεις ανά ημέρα → μικρότερη θ στο υπόστρωμα
Πρώτη άρδευση το πρωί	Νωρίτερη άρδευση → μεγαλύτερη θ στο υπόστρωμα	Αργότερη άρδευση → μικρότερη θ στο υπόστρωμα
Τελευταία άρδευση την νύχτα	Αργότερη άρδευση → μεγαλύτερη θ στο υπόστρωμα	Νωρίτερη άρδευση → μικρότερη θ στο υπόστρωμα
Απώλεια νερού κατά την διάρκεια της νύχτας	Χαμηλή → μεγαλύτερη θ στο υπόστρωμα	Υψηλή → μικρότερη θ στο υπόστρωμα

4.5 Προγραμματισμός άρδευσης

Ο προγραμματισμός της άρδευσης περιλαμβάνει την επιλογή συγκεκριμένων μοτίβων άρδευσης για διάφορα μέρη της περιόδου παραγωγής καλλιεργειών. Για παράδειγμα, στην καλλιέργεια αγγουριού σε θερμοκήπιο, μεταξύ μεταφύτευσης και ανθοφορίας, η άρδευση πρέπει να προγραμματίζεται έτσι ώστε να προκαλεί ελαφρύ υδατικό στρες και να αυξάνει την ανάπτυξη των ριζών. Όλοι οι καρποί πρέπει να αφαιρούνται για μήκος βλαστού έως και 50 cm για να ενισχυθεί η βλαστική ανάπτυξη. Οι τομάτες πρέπει να βρίσκονται σε στρες για μεγαλύτερο διάστημα μετά τη μεταφύτευση (περίπου 3 εβδομάδες) για τον σχηματισμό της πρώτης και δεύτερης ταξιανθίας. Διαφορετικά, τα φυτά θα γίνουν περισσότερο βλαστικά υπό συνθήκες χαμηλού φωτισμού (Schroeder & Lieth, 2002).

Επίσης, η υγρασία του υποστρώματος (%) μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη των φυτών. Στην καλλιέργεια με πετροβάμβακα, υπάρχουν στοχευμένες τιμές για την υγρασία του υποστρώματος, και έχουν αναπτυχθεί ειδικοί αισθητήρες για αυτόν τον σκοπό. Για παράδειγμα, ο φορητός μετρητής Grodan Water Content Meter (WCM-H) έχει αναπτυχθεί ειδικά για τη μέτρηση της περιεκτικότητας σε νερό, της EC και της θερμοκρασίας στον πετροβάμβακα. Χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό πεδίο, ο WCM-H μετρά τη μέση περιεκτικότητα σε νερό κατά μήκος του υποστρώματος. Για την ανοιξιάτικη καλλιέργεια αγγουριού, συνιστάται υγρασία 60%. Σε αυτό το επίπεδο υγρασίας, η πρώιμη παραγωγή ήταν κατά 40% υψηλότερη και το ριζικό σύστημα δείχνει περισσότερες λεπτές και λευκές ρίζες. Εάν η ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι πολύ υψηλή, τα φυτά χρειάζονται πολύ περισσότερο νερό ακόμα και το απόγευμα προς το βράδυ, δηλαδή από της 6-11 μ.μ. Αν δεν εφαρμοστεί άρδευση εκείνη την περίοδο, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της υγρασίας του υποστρώματος. Η ανάπτυξη των καρπών ενισχύεται από υψηλά επίπεδα υγρασίας κατά τις βραδινές ώρες, και η αποστράγγιση πρέπει να αποφεύγεται. Η άρδευση τη νύχτα συνιστάται εάν η υγρασία του υποστρώματος έπεσε κατά 8-10% το προηγούμενο πρωί. Χαμηλότερη υγρασία οδηγεί σε χαμηλότερη ποιότητα καρπών, σκασίματα ή ακόμα και ξήρανση των ριζών στα ανώτερα στρώματα του υποστρώματος. Η υγρασία μειώνεται πολύ πιο γρήγορα σε μικρούς όγκους υποστρωμάτων από ό,τι σε μεγαλύτερους. Υψηλά επίπεδα υγρασίας το πρωί μπορεί να οδηγήσουν σε έλλειψη οξυγόνου (O_2) και θάνατο των ριζών, προκαλώντας στρες, που οδηγεί σε περισσότερη αναπαραγωγική ανάπτυξη. Έτσι, ο έλεγχος της άρδευσης είναι απαραίτητος σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού. Ένα τυπικό γράφημα ακτινοβολίας για μία ημέρα δείχνει μέγιστες τιμές μεταξύ 12 το μεσημέρι και 3 μ.μ., ενώ οι θερμοκρασίες κορυφώνονται μεταξύ 2 και 5 μ.μ. Το σημείο ρύθμισης για την άρδευση ανάλογα με το άθροισμα φωτός πρέπει να είναι υψηλό (π.χ. $150 J/cm^2$). Κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου, όταν μειώνεται η φωτεινότητα, η υγρασία πρέπει να ακολουθεί τη μείωση του φωτός (Lattauschke, 2000).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη σημασία της επιλογής κατάλληλων υποστρωμάτων και στρατηγικών άρδευσης στις υδροπονικές καλλιέργειες τομάτας και αγγουριού. Η υδροπονική γεωργία, ως καινοτόμος μέθοδος καλλιέργειας, συνδυάζει τη μέγιστη αξιοποίηση των φυσικών πόρων με την ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Παρέχει στους καλλιεργητές τη δυνατότητα να διαχειρίζονται αποτελεσματικά την υγρασία, τα θρεπτικά συστατικά και το περιβάλλον ανάπτυξης των φυτών, επιτυγχάνοντας υψηλότερες αποδόσεις σε σύγκριση με τις παραδοσιακές καλλιέργειες. Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης, εξετάστηκαν οι φυσικές και χημικές ιδιότητες τεσσάρων βασικών υποστρωμάτων: πετροβάμβακα, κοκοφοίνικα, περλίτη και ελαφρόπετρας. Ο πετροβάμβακας αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα υποστρώματα, λόγω της σταθερότητας και της ομοιογένειάς του. Χρησιμοποιείται κυρίως σε καλλιέργειες όπου απαιτείται ακριβής διαχείριση της υγρασίας, καθώς επιτρέπει την ομοιόμορφη κατανομή νερού και θρεπτικών στοιχείων στις ρίζες. Ο κοκοφοίνικας, από την άλλη πλευρά, είναι ένα βιοδιασπώμενο υλικό με υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων, θεωρείται ιδανικός για περιοχές με περιορισμένη διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων. Επιπλέον, ο περλίτης προσφέρει εξαιρετικό αερισμό στις ρίζες, ευνοώντας την ανάπτυξη των φυτών σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία. Η ελαφρόπετρα, τέλος, χαρακτηρίζεται από τον συνδυασμό υψηλής απορροφητικότητας και σταθερότητας, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για ποικίλες συνθήκες καλλιέργειας και εφαρμογές. Η διαχείριση της άρδευσης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας στις υδροπονικές καλλιέργειες, καθώς επηρεάζει άμεσα την ισορροπία ανάμεσα στη βλαστική και την αναπαραγωγική ανάπτυξη των φυτών. Η υπερβολική άρδευση μπορεί να ενισχύσει τη βλαστική ανάπτυξη εις βάρος της αναπαραγωγικής, μειώνοντας την παραγωγή καρπών, ενώ η ανεπαρκής άρδευση ενδέχεται να περιορίσει την ανάπτυξη του φυτού συνολικά. Στη μελέτη αναλύθηκαν μέθοδοι άρδευσης, όπως η χρήση αισθητήρων για τη μέτρηση της υγρασίας, η άρδευση βάσει ηλιακής ακτινοβολίας και η παρακολούθηση της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε νερό. Οι μέθοδοι αυτές επιτρέπουν την ακριβή διαχείριση της υγρασίας, εξασφαλίζοντας την ισορροπία μεταξύ των δύο φάσεων ανάπτυξης, που είναι κρίσιμη για τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας. Η σωστή διαχείριση της άρδευσης δεν επηρεάζει μόνο την παραγωγή, αλλά και τη βιωσιμότητα των καλλιεργειών. Τα φυτά που διατηρούν την ισορροπία τους μεταξύ βλαστικής και αναπαραγωγικής ανάπτυξης παρουσιάζουν καλύτερη αντοχή σε περιβαλλοντικές καταπονήσεις, όπως οι αυξημένες θερμοκρασίες ή οι μεταβολές

της υγρασίας. Αυτό συμβάλλει στη συνολική απόδοση και στην υγεία των φυτών. Συνολικά, η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η επιλογή του κατάλληλου υποστρώματος και η υιοθέτηση βέλτιστων στρατηγικών άρδευσης δεν επηρεάζουν μόνο την παραγωγικότητα, αλλά έχουν και σημαντικό αντίκτυπο στη βιωσιμότητα των καλλιεργειών. Οι γνώσεις αυτές προσφέρουν πολύτιμες κατευθύνσεις για τους καλλιεργητές, ενισχύοντας τη σύγχρονη υδροπονική γεωργία. Η υιοθέτηση αυτών των πρακτικών μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην αντιμετώπιση παγκόσμιων προκλήσεων, όπως η διατροφική ασφάλεια και η προστασία του περιβάλλοντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γκίζας, Γ., Σάββας, Δ., Καρράς, Γ., & Καβαφάκης, Χ. (2003). Επίδραση της κοκκομετρίας της ελαφρόπετρας και της τοποθέτησής της σε σάκο ή μαμούθ σακίδιο στην ανάπτυξη και την παραγωγή δρεπτών φυλλοφόρων. Πρακτικά 21ου Συνεδρίου Ελληνικής Εταιρείας Επιστήμης Οπωροκηπευτικών, Ιωάννινα, Τόμος 11, Τεύχος Α', 319–322.

Κωσταρέλου, Μ. (2014). Έλεγχος άρδευσης υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας με τη βοήθεια προσομοιωμάτων και αισθητήρων. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Μαυρογιαννόπουλος, Γ. (2006). Υδροπονικές εγκαταστάσεις. Αθήνα: Α. Σταμούλης.

Μπλέτσας, Ε. (2016). Προγραμματισμός άρδευσης υδροπονικών καλλιεργειών με τη βοήθεια προσομοιωμάτων και αισθητήρων. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Πουλοβασίλης, Α., 2010. Εισαγωγή στις αρδεύσεις. Εκδόσεις Έμβρυο, Αθήνα.

Χαρίτος, Ν.Κ. (1989). Υδροπονικές καλλιέργειες σε θερμοκήπια. Γεωργική Τεχνολογία, Μάιος.

Τσιρογιάννης, Ι.Α., Κατσούλας, Ν., Κίττας, Κ., & Σάββας, Δ. (2007). Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού υδατικών αναγκών θερμοκηπιακής καλλιέργειας πιπεριάς. 5ο Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής. Πρακτικά Συνεδρίου, 403-410.

Ξένη Βιβλιογραφία

Abbot, J.D., Peet, M.M., Willits, D.H., Sanders, D.C., & Gough, R.E. (2003). Effects of irrigation frequency and scheduling on fruit production and radial fruit cracking in greenhouse tomatoes in soil beds and in a soil-less medium in bags. *Scientia Horticulturae*, 28, 209-217.

Abou-Hadid, A.F., El-Shinawy, M.Z., El-Oksh, I., Gomaa, H., El-Beltagy, A.S., Cockshull, K.E., & Tüzel, Y. (1994). Studies on water consumption of sweet pepper under plastic houses. *Acta Horticulturae*, 366, 355-371.

Al Naddaf, O., Livieratos, I., Stamatakis, A., Tsirogiannis, I., Gizas, G., & Savvas, D. (2011). Hydraulic characteristics of composted pig manure, perlite, and mixtures of them, and their

impact on cucumber grown on bags. *Scientia Horticulturae*, 129, 135–141.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.03.023>

Baas, R., Bulle, A., & Vonk Noordegraaf, C. (2004). Estimation of available water and evapotranspiration of potted plants with a frequency-domain sensor. *Acta Horticulturae*, 644, 291-297.

Blaabjerg, J. (1983). Physical and chemical compositions of the inactive growing medium GRODAN and its fields of application and extension. *Acta Horticulturae*, 133, 53–57.

Bougoul, S., Ruy, S., de Groot, F., & Boulard, T. (2005). Hydraulic and physical properties of stonewool substrates in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 104, 391–405.

Bunt, A.C., 1988. Media and mixes for container-grown plants. Unwin Hayman, London.

Burés, S., Pokorny, F. A., Landau, D. P., & Ferrenberg, A. M. (1993). Computer-simulation of volume shrinkage after mixing container media components. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118(5), 757–761.

Casadesus, J., Caceres, R., & Marfa, O. (2007). Dynamics of CO₂ efflux from the substrate root system of container-grown plants associated with irrigation cycles. *Plant and Soil*, 300, 71-82.

Charpentier, S., Guérin, V., Morel, P., & Tawegoum, R. (2004). Measuring water content and electrical conductivity in substrates with TDR (time domain reflectometry). *Acta Horticulturae*, 644, 283-290.

Chaves, M. M., Pereira, J. S., Maroco, J., Rodrigues, M. L., Ricardo, C. P. P., Osorio, M. L., Carvalho, I., Faria, T., & Pinheiro, C. (2002). How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth. *Annals of Botany*, 89(7), 907–916.
<https://doi.org/10.1093/aob/mcf105>

da Silva, F. F., Wallach, R., & Chen, Y. (1993). Hydraulic properties of sphagnum peat moss and tuff (scoria) and their potential effects on water availability. *Plant and Soil*, 154, 119–126.
<https://doi.org/10.1007/BF00011082>

De Graaf, R. (1985). The influence of thermal screening and moisture gap on the evapotranspiration of glasshouse tomatoes during the night. *Acta Horticulturae*, 174, 57-66.

- De Rijck, G., Schrevens, E., 1998. Distribution of nutrients and water in rockwool slabs. *Sci. Hort.* 72, 277-285
- Drzal, M.S., Fonteno, W.C., Cassel, D.K., 1999. Pore fraction analysis: A new tool for substrate testing. *Acta Hort.* 481, 43-54.
- Egea, G., Baille, A., Martín, B., Nortes, P.A., & González-Real, M.M. (2009). Do short term sap flow measurements scale with leaf transpiration? A case study on *Cucumis sativus* plants. *Acta Horticulturae*, 846, 127-134.
- Evans, M.R., Konduru, S., Stamps, R.H., 1996. Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. *HortScience* 31, 965-967.
- Fazlil-Ilahi, W. F. (2009). *Evapotranspiration Models in Greenhouse* (M.Sc. Thesis). Wageningen Agricultural University, The Netherlands, p. 47.
- Fernández, J.E., & Cuevas, M.V. (2010). Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 135-151.
- Fonteno, W. C. (1996). Substrates: General introduction. In A. E. W. G. R. Soffer (Ed.), *Proceedings of the International Symposium on Growing Media and Plant Nutrition in Horticulture* (pp. 17–33). ISHS *Acta Horticulturae*.
- Fonteno, W.C. (1996). Growing media: Types and physical/chemical properties. In: Reed, D.W. (Ed.), *Water, Media, and Nutrition for Greenhouse Crops*. Ball Publishing, Batavia, Illinois, USA.
- Gabriel, M. Z., Altland, J. E., & Owen, J. S. (2009). The effect of physical and hydraulic properties of peatmoss and pumice on douglas fir bark based soilless substrates. *HortScience*, 44(3), 874–878. <https://doi.org/10.21273/hortsci.44.3.874>
- Gizas, G., Savvas, D., 2007. Particle size and hydraulic properties of pumice affect growth and yield of greenhouse crops in soilless culture. *HortScience* 42, 1274-1280.
- Gizas, G., Savvas, D., Mitsios, I., 2001. Availability of macrocations in perlite and pumice as influenced by the application of nutrient solutions having different cation concentration ratios. *Acta Hort.* 548, 277-284
- Gizas, G., Tsirogiannis, I., Bakea, M., Mantzos, N., & Savvas, D. (2012). Impact of hydraulic characteristics of raw or composted *Posidonia* residues, coir, and their mixtures with pumice

on root aeration, water availability, and yield in a lettuce crop. Faculty of Agricultural Technology, TEI of Epirus, P.O. Box 110, 47100, Arta, Greece; Laboratory of Vegetable Crops, Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 11855 Athens, Greece.

Gohler, F., Heibner, A., & Schmeil, H. (1989). Control of water and nutrient supply in greenhouse vegetable production by means of hydroponic systems. *Acta Horticulturae*, 260, 237–246. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1989.260.30>

Grillas, S., Lucas, M., Bardopoulous, E., and Sarafopoulos, S. (2001). Perlite based soilless culture system: current commercial applications and prospects. *Acta Hortic.* 548, 105–113. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.548.10>.

Gruda, N., Caron, J., Prasad, M., & Maher, M.J. (2016b). Growing media. In R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of soil sciences* (3rd ed., pp. 1053–1058). CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1081/EESS3-120053784>

Hanna, H.Y., 2005. Properly recycled perlite saves money does not reduce greenhouse tomato yield and can be reused for many years. *HortTechnology* 15, 342-345

Heiskanen, J. (1995). Physical properties of two-component growth media based on Sphagnum peat and their implications for plant-available water and aeration. *Plant and Soil*, 172, 45–54. <https://doi.org/10.1007/BF00020858>

Helling, C.S., Chesters, G., Corey, R.B., 1964. Contribution of organic matter and clay to soil cation-exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28, 517-520.

Howell, T.A., Bucks, D.A., Goldhamer, D.A., & Lima, J.M. (1986). Irrigation scheduling. In: Nakayama, F.S., & Bucks, D.A. (Eds.), *Trickle Irrigation for Crop Production*. Elsevier Amsterdam, pp. 241-279.

Incrocci, L., Marzioletti, P., & Incrocci, G. (2014). Substrate water status and evapotranspiration irrigation scheduling in heterogeneous container nursery crops. *Agricultural Water Management*, 131, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.09.013>

Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, J. R. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4), 1133–1138. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>

- Jones, H.G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 407, 2427-2436.
- Kämpf, A. N. (2005). Substrates for plant cultivation. Porto Alegre, Brazil: Genesis.
- Katerji, N., Mastrorilli, M., & Rana, G. (2008). Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: Review and analysis. *European Journal of Agronomy*, 28, 493-507.
- Katsoulas, N., Baille, A., & Kittas, C. (2002). Influence of leaf area index on canopy energy partitioning and greenhouse cooling requirements. *Biosystems Engineering*, 83, 349-359.
- Katsoulas, N., Savvas, D., Tsirogiannis, I., Merkouris, O., & Kittas, C. (2009). Response of an eggplant crop grown under Mediterranean summer conditions to greenhouse cooling. *Scientia Horticulturae*, 123(1), 90–98. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.07.007>
- Kiehl, P.A., Lieth, J.H., Burger, D.W. (1992). Growth response of chrysanthemum to various container substrates and irrigation frequencies. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117, 224-229.
- Kittas, C., Katsoulas, N., & Baille, A. (1999). Transpiration and canopy resistance of greenhouse soilless roses: Measurements and modeling. *Acta Horticulturae*, 507, 61-68.
- Kizito, F., Campbell, C.S., Cobos, D.R., Teare, B.L., Carter, B.L., & Hopmans, J.W. (2008). Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, 352, 367-378.
- Kläring, H.P. (2001). Strategies to control water and nutrient supplies to greenhouse crops: A review. *Agronomie*, 21, 311-321.
- Lattauschke, G. (2000). Anbauempfehlungen für den Gurkenanbau im Gewächshaus. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden.
- Lawlor, D. W. (2002). Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: Stomata vs. metabolism and the role of ATP. *Annals of Botany*, 89, 871–885. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf110>
- Lecina, S., Martínez-Cob, A., Pérez, P.J., Villalobos, F.J., & Baselga, J.J. (2003). Fixed versus bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman–Monteith equation under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 60, 181-198.

- Lee, A. (2009). Understanding substrate design. *Practical Hydroponics & Greenhouses*, November/December, 56–59.
- Lieth, J.H., & Burger, D.W. (1989). Growth of chrysanthemum using an irrigation system controlled by soil moisture tension. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 114, 387-392.
- Lieth, J.H., & Oki, L.R. (2008). Irrigation in soilless culture. In: Raviv, M., & Lieth, H.J. (Eds.), *Soilless Culture: Theory and Practice*. Elsevier.
- Liu, H., Sun, J., Duan, A., Liu, Z., & Liang, Y. (2010). Experiments on variation of tomato sap flow under drip irrigation conditions in greenhouse. *Nongye Gongcheng Xuebao (Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering)*, 26, 77-82.
- Lizarraga, A., Boesveld, H., Huibers, F., & Robles, C. (2003). Evaluating irrigation scheduling of hydroponic tomato in Navarra, Spain. *Irrigation and Drainage*, 52, 177-188.
- Londra, P., Paraskevopoulou, A., & Psychogiou, M. (2018b). Hydrological behavior of peat and coir-based substrates and their effect on begonia growth. *Water (Basel)*, 10(6), 722. <https://doi.org/10.3390/W10060722>
- Magán, J.J., Gallardo, M., Thompson, R.B., & Lorenzo, P. (2008). Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soilless culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 95(9), 1041–1055. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.04.006>
- Mahjoor, F., Ghaemi, A.A., & Golabi, M.H. (2016). Interaction effects of water salinity and hydroponic growth medium on eggplant yield, water-use efficiency, and evapotranspiration. *International Soil and Water Conservation Research*, 4(2), 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.05.004>
- Marfà, O., Martínez, A., Orozco, R., Serrano, L., & Martínez, F. X. (1993). The use of fine-grade perlites in lettuce bag cultures: II. Physical properties, rheologic effects, and productivity. *Acta Horticulturae*, 342, 339–347.
- Massa, D., Incrocci, L., Maggini, R., Carmassi, G., Campiotti, C.A., & Pardossi, A. (2010). Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultures of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, 97, 971-980.

- Mavrogianopoulos, G. N. (2015). Irrigation dose according to substrate characteristics, in hydroponic systems. *Open Agriculture*, 1, 1-6. <https://doi.org/10.1515/opag-2016-0001>
- Medrano, E., Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., & Montero, J.I. (2005). Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions. *Scientia Horticulturae*, 105, 163-175.
- Meijer, J., Bot, G. P. A., Stanghellini, C., & Udink ten Cate, A. J. (1985). Development and application of a sensitive, high precision weighting lysimeter for use in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 32, 321-336.
- Milks, R. R., Fonteno, W. C., & Larson, R. (1989). Hydrology of horticultural substrates. I: Mathematical models for moisture characteristics of horticultural container media. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 114(1), 48–52.
- Munoz-Carpena, R., Dukes, M.D., Li, Y.C., Klassen, W., & 2005. Field comparison of tensiometer and granular matrix sensor automatic drip irrigation on tomato. *HortTechnology*, 15, 584-590.
- Murray, J.D., Lea-Cox, J.D., & Ross, D. (2004). Time domain reflectometry accurately monitors and controls irrigation water applications in soilless substrates. *Acta Horticulturae*, 633, 75-82.
- Nebauer, S. G., Sánchez, M., Martínez, L., Lluch, Y., Renau-Morata, B., & Molina, R. V. (2013). Differences in photosynthetic performance and its correlation with growth among tomato cultivars in response to different salts. *Plant Physiology and Biochemistry*, 63, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.11.015>
- Nederhoff, E., & Houter, B. (2009). Controlling plant balance by irrigation. *Practical Hydroponics & Greenhouses*, (March/April), 45-50.
- Nederhoff, E., & Houter, B. (2009, March/April). Controlling plant balance by irrigation. *Practical Hydroponics & Greenhouses*, 45–48.
- Nederhoff, E.M., & De Graaf, R. (1993). Effects of CO₂ on leaf conductance and canopy transpiration of greenhouse grown cucumber and tomato. *Scientia Horticulturae*, 55, 1-17.
- Nichols, M. A. (2007). Coir – A XXIst century sustainable growing medium. *Acta Horticulturae*, 747, 91–95.

- Orgaz, F., Fernandez, M.D., Bonachela, S., Gallardo, M., & Fereres, E. (2005). Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agricultural Water Management*, 72, 81-96.
- Papadopoulos, A. P., Bar-Tal, A., Silber, A., Saha, U. K., & Raviv, M. (2008). Inorganic and synthetic organic components of soilless culture and potting mixes (pp. 505–543). In M. Raviv & H. J. Lieth (Eds.), *Soilless culture: Theory and practice*. Elsevier.
- Pardossi, A., Carmassi, G., Diara, C., Incrocci, L., Maggini, R., & Massa, D. (2011). Fertigation and substrate management in closed soilless culture. University of Pisa, Dipartimento di Biologia delle Piante Agrarie. Retrieved from [Euphoros Project Website](#)
- Pardossi, A., Incrocci, L., Incrocci, G., Malorgio, F., Battista, P., Bacci, L., Rapi, B., Marzialesi, P., Hemming, S., & Balendonck, J. (2009). Root zone sensors for irrigation management in intensive agriculture. *Sensors*, 9, 2809-2835.
- Peng, Z., Smith, C., & Stovin, V. (2020a). The importance of unsaturated hydraulic conductivity measurements for green roof detention modelling. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 590, 125273. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.125273>
- Prenger, J.J., Flynn, R.P., & Hansen, R.C. (2002). A comparison of four evapotranspiration models in a greenhouse environment. *Transactions of the ASAE*, 45, 1779-1788.
- Prenger, J.J., Ling, P.P., Hansen, R.C., & Keener, H.M. (2005). Plant response-based irrigation control systems in a greenhouse: System evaluation. *Transactions of the ASAE*, 48, 1175-1183.
- Raviv, M. (2017). Growing media in soilless horticulture: Definitions and concepts. In M. Raviv & J. H. Lieth (Eds.), *Soilless Culture: Theory and Practice* (2nd ed., pp. 1–44). Elsevier.
- Raviv, M., & Lieth, J. H. (2008). *Soilless culture: Theory and practice*. Amsterdam: Elsevier.
- Raviv, M., Lieth, J.H., Burger, D.W., & Wallach, R. (2001). Optimization of transpiration and potential growth rates of 'Kardinal' rose with respect to root-zone physical properties. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126, 638-643.
- Raviv, M., Wallach, R., & Blom, T.J. (2004). The effect of physical properties of soilless media on plant performance: A review. *Acta Horticulturae*, 644, 251-259.

- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A., Bar-Tal, A., 2002. Substrates and their analysis. In: D, Savvas and H.C. Passam (eds). *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals*. Embryo Publications, Athens, Greece, pp. 25-101.
- Resh, H. M. (2013). *Hydroponic food production*. CRC Press.
- Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D., & Friedman, S.P. (2003). A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soil using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2(4), 444–475. <https://doi.org/10.2136/vzj2003.4440>
- Roh, M.Y., & Lee, Y.B. (1996). Control of amount and frequency of irrigation according to integrated solar radiation in cucumber substrate culture. *Acta Horticulturae*, 440, 332-337.
- Rosa-Rodriguez, R. (2020). Sustainable food production systems in protected environments: An overview of global challenges and strategies. *Journal of Environmental Management*, 264, 110479. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110479>
- Sarlikioti, V., Driever, S. M., & Marcelis, L. F. M. (2010). Photochemical reflectance index as a mean of monitoring early water stress. *Annals of Applied Biology*, 157(1), 81–89. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2010.00431.x>
- Savvas, D. (2003). Hydroponics: A modern technology supporting the application of integrated crop management in greenhouse. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 1, 80–86.
- Savvas, D., & Gruda, N. (2015). Application of soilless culture technologies in the modern greenhouse industry – A review. *Scientia Horticulturae*, 194, 202-219. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.030>
- Savvas, D., Gianquinto, G.P., Tüzel, Y., & Gruda, N. (2013). Soilless culture. In *Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops – Principles for Mediterranean climate areas* (pp. 303–354). FAO, Plant Production and Protection Paper 217.
- Savvas, D., & Lenz, F. (2000). Effects of NaCl or nutrient-induced salinity on growth, yield, and composition of eggplants grown in rockwool. *Scientia Horticulturae*, 84(1–2), 37–47. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00112-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00112-2)
- Savvas, D., & Passam, H.C. (2008). Plant nutrition and physiological disorders in greenhouse crops. *European Journal of Plant Science & Biotechnology*, 2, 45-61.

- Savvas, D., Stamati, E., Tsirogiannis, I.L., Mantzos, N., Barouchas, P.E., Kittas, C., & Katsoulas, N. (2007). Interactions between salinity and irrigation frequency in greenhouse pepper grown in a closed-loop hydroponic system. *Agricultural Water Management*, 91, 102-111.
- Schafer, M., Klammer, J., & Hemming, S. (2015). Substrates and their characteristics for plant cultivation. *Horticultural Science Journal*, 51(2), 101–113. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2015.1082.14>
- Scheffer, F., 1984. *Lehrbuch des Bodenkunde/Scheffer/Schachtschabel*. 11. Auflage. Enke, Stuttgart, Γερμανία.
- Schmidt, C. D. S., Pereira, F. A. C., Oliveira, A. S., Júnior, J. F. G., & Vellame, L. M. (2013). Design, installation and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies. *Water Resource and Irrigation Management*, 2, 77-85.
- Schroder, F.G., Lieth, H.J., (2002). Irrigation control in hydroponics. In Savvas, D., & Passam, H.C. (Eds.), *Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals* (pp. 263-298). Embryo Publications, Athens, Greece.
- Schroeder, F., & Lieth, J. (2002). Substrate-based soilless cultivation of vegetables: Irrigation and fertigation practices.
- Schwarz, M. (1995). Soilless culture management. In *Advance Series in Agricultural Sciences* (Vol. 24). Berlin: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-79204-0>
- Seelig, H.D., Hoehn, A., Stodieck, L.S., Klaus, D.M., Adams, W.W., & Emery, W.J. (2009). Plant water parameters and the remote sensing R 1300/R 1450 leaf water index: Controlled condition dynamics during the development of water deficit stress. *Irrigation Science*, 27, 357-365.
- Sharma, S., Bhardwaj, S. K., Suman, M., & Thakur, R. (2022). Hydroponics in vegetable crops: A review. *International Journal of Agriculture and Food Science Technology*, 13(1), 45–54.
- Shin, J. H., Park, J. S., & Son, J. E. (2014). Estimating the actual transpiration rate with compensated levels of accumulated radiation for the efficient irrigation of soilless cultures of paprika plants. *Agricultural Water Management*, 135, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.002>
- Smith, D.L., 1987. *Rockwool in Horticulture*. Grower Books. London.

- Sonneveld, C. (1989). Rockwool as a substrate in protected cultivation. *Chronica Horticulturae*, 29(3), 33–36.
- Spomer, L. A. (1974). Optimizing container soil amendment: The threshold proportion and prediction of porosity. *HortScience*, 9, 532–533.
- Stanghellini, C. (1987). Transpiration of greenhouse crops: An aid to climate management. PhD Thesis, Agricultural University of Wageningen.
- Stanghellini, C., van 't Ooster, B., & Heuvelink, E. (2019). Greenhouse horticulture: Technology for optimal crop production. Wageningen Academic Publishers.
- Steppe, K., de Pauw, D.J.W., Lemeur, R. (2008). A step towards new irrigation scheduling strategies using plant-based measurements and mathematical modelling. *Irrigation Science*, 26, 505–517.
- Szmidt, R. A. K., Hall, D. A., & Hitchon, G. M. (1988). Development of perlite culture systems for the production of greenhouse tomatoes. *Acta Hort.* 221, 371-378
- Thompson, R.B., Gallardo, M., Valdez, L.C., Fernández, M.D. (2007). Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Acta Horticulturae*, 761, 213–220.
- Tsirogiannis, I., Katsoulas, N., & Kittas, C. (2010). Effect of irrigation scheduling on gerbera flower yield and quality. *HortScience*, 45, 265–270.
- Tsirogiannis, I., Savvas, D., Katsoulas, N. and Kittas, C. (2012). EVALUATION OF CROP REFLECTANCE INDICES FOR GREENHOUSE IRRIGATION SCHEDULING. *Acta Hortic.* 927, 269-276
- Valdés, R., Miralles, J., Franco, J. A., Sánchez-Blanco, M. J., & Bañón, S. (2014). Using soil bulk electrical conductivity to manage saline irrigation in the production of potted poinsettia. *Scientia Horticulturae*, 170, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.02.005>
- Van Os, E., Gieling, T.H., & Lieth, H.J. (2008). Technical equipment in soilless production systems. In Raviv, M., & Lieth, H.J. (Eds.), *Soilless Culture: Theory and Practice* (pp. 157–207). Elsevier, Amsterdam.
- Vence, F. (2008). Growing media: A bibliographic review. ResearchGate. Retrieved from <https://www.researchgate.net/>

- Verdonck, O., de Vleeschauwer, D., & Penninck, R. (1983). Cocofibre dust, a new growing medium for plants in the tropics. *Acta Horticulturae*, 133, 215–220.
- Verwer, F. L. J. A. W. (1976). Growing horticultural crops in rockwool and nutrient film. In *Proceedings of the 4th International Congress on Soilless Culture* (pp. 107–119). IWOSC, Wageningen, The Netherlands.
- Wageningen University and Research. (2000). Controlling plant balance by irrigation. Wageningen University and Research Publications.
- Wallach, R., 2008. Physical characteristics of soilless media. In: Raviv, M., Lieth, H.J. (eds). *Soilless culture: Theory and practice*. Elsevier, Amsterdam, pp. 41-116.
- Wallach, R., da Silva, F. F., & Chen, Y. (1992). Hydraulic characteristics of tuff (Scoria) used as a container medium. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(3), 415–422.
- Wallach, R., & Raviv, M. (2005a). The dependence of moisture-tension relationship and water availability on irrigation frequency in containerized growing medium. *Acta Horticulturae*, 697, 293–300. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.697.36>
- Wever, G., 1995. Physical analysis of peat and peat-based growing media. *Acta Hort.* 401, 561-567