



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΣΤΙΣ ΑΡΔΕΥΣΕΙΣ, ΤΙΣ ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ
ΣΤΗΝ ΕΚΜΗΧΑΝΙΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ»

Προγραμματισμός άρδευσης υδροπονικών καλλιεργειών με τη
βοήθεια προσομοιωμάτων και αισθητήρων.

Μεταπτυχιακή Διατριβή
Ευάγγελος Μπλέτσας

Επιβλέπων καθηγητής: Κωνσταντίνος Κίττας
Βόλος 2016

Τριμελής Επιτροπή

α. Κωνσταντίνος Κίττας

(Γεωργικές κατασκευές, Καθηγητής
ΠΘ)

β. Νικόλαος Κατσούλας

(Γεωργικές Κατασκευές με έμφαση στα
θερμοκήπια, Αναπλ. Καθηγητής ΠΘ)

γ. Χρήστος Λύκας

(Ανθοκομία, Επικ. Καθηγητής ΠΘ)

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
A.1.Σύντομη ιστορική αναδρομή. Οι καλλιέργειες εκτός εδάφους στον κόσμο	7
A.2.Υφιστάμενη κατάσταση και εξελίξεις στον τομέα κηπευτικών θερμοκηπίου στη Ελλάδα	8
A.3. Συστήματα καλλιεργειών εκτός εδάφους	12
A.4. Σύστημα επίπλευσης (Deep Flow technique DFT ή Floating system)	13
A.5.Τεχνική λεπτής στοιβάδας θρεπτικού διαλύματος (Nutrient Film Tehnique NFT)	14
A.6. Αεροπονία	15
A.7. Η καλλιέργεια σε πορώδη στερεά υλικά	16
A.8.Παραγωγή και ποιότητα. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα των Υδροπονικών συστημάτων καλλιέργειας	18
A.9. ΑΡΔΕΥΣΗ	
Γενικά	21
A.10.Υδραυλικά χαρακτηριστικά υποστρώματος	24
A.11.Προγραμματισμός της άρδευσης	28
A.12.Υπολογισμός δόσης Άρδευσης	32
A.13.Συχνότητα άρδευσης	34
A.14.Στρατηγικές άρδευσης για τις εκτός εδάφους καλλιέργειες	35
A.15.Άρδευση με βάση το χρονικό προγραμματισμό (Χρονόμετρο)	37
A.16.Άρδευση με βάση προσομοίωση της ET	39
A.17.Άρδευση κλειστών υδροπονικών συστημάτων βάση ελέγχου του διαλύματος απορροής	42
A.18.Αισθητήρες υγρασίας υποστρώματος καλλιέργειας	43
A.19.Προγραμματισμός της άρδευσης με τη χρήση αισθητήρων εδαφικής υγρασίας (Root Zone Sensor RZS)	48

A.20.Ολοκληρωμένη μέθοδος προγραμματισμού	50
Σκοπός της μελέτης	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	
B.1. Γενική περιγραφή του θερμοκηπίου	54
B.2. Σχετικά με την καλλιέργεια της τομάτας στο πείραμα	57
B.3. Πρόγραμμα άρδευσης	59
B.4. Άρδευση με βάση εκτιμήσεις διαπνοής των φυτών και μετρήσεις υγρασίας υποστρώματος (Μεταχείριση Α)	61
B.5. Άρδευση με βάση εκτιμήσεις διαπνοής των φυτών και σταθερή διάρκεια ποτίσματος (Μεταχείριση Β)	62
B.6. Ο Πετροβάμβακας	62
B.7. Αισθητήρας Grodan WCM-Control	63
B.8. Αισθητήρας ECH20 EC-5	63
B.9. Αισθητήρας SM200	66
B.10. Διαδικασία βαθμονόμησης	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	
Γ.1. Ημερήσια κατανομή των αρδευτικών κύκλων	70
Γ.2. Περιεκτικότητα της πλάκας πετροβάμβακα σε υγρασία και διακύμανση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.	74
Γ.3. Συχνότητα άρδευσης, όγκος άρδευσης και αποδοτικότητα άρδευσης	79
Γ.5. Σύγκριση του ρυθμού ανάπτυξης των φυτών (Ύψος φυτών, Αριθμός Φύλλων)	81
Γ.5.1. Μέτρηση αριθμού φύλλων	81
Γ.5.2. Μέτρηση του ύψους φυτών	82
Γ.5.3. Διακύμανση της παραγωγής	83
Γ.6. Δείκτης παραγωγικότητας νερού	86
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89

Περίληψη

Η εργασία αυτή έχει στόχο να αξιολογήσει την εφαρμογή δυο διαφορετικών αυτοματοποιημένων συστημάτων άρδευσης και να συγκρίνει τα αποτελέσματά τους σε επίπεδο παραγωγής και αποτελεσματικότητας χρήσης νερού, για ένα κλειστό σύστημα υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας.

Για το σκοπό αυτό, ένα αυτοματοποιημένο σύστημα στο οποίο ο προγραμματισμός της άρδευσης γίνεται με βάση προβλέψεις της διαπνοής των φυτών και μετρήσεις υγρασίας του υποστρώματος (Substrate –water-status-SW) (Μεταχείριση Α), συγκρίνεται με ένα αντίστοιχο σύστημα όπου ο προγραμματισμός της άρδευσης γίνεται μόνο με βάση προβλέψεις της διαπνοής (Μεταχείριση Β). Έτσι, ενώ η συχνότητα άρδευσης ρυθμίζεται με βάση τη διαπνοή των φυτών και στις δυο μεταχειρίσεις η δόση άρδευσης ρυθμίζεται με βάση την υγρασία του υποστρώματος της καλλιέργειας στη μεταχείριση Α ενώ είναι σταθερή στη μεταχείριση Β. Η πρόβλεψη της διαπνοής βασίζεται σε μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου, εισερχόμενες ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και της φυλλικής επιφάνειας των φυτών.

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ένα σύγχρονο και πλήρως εξοπλισμένο τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο, καλυμμένο με απλό φύλλο PE (πολυαιθυλενίου) πάχους 0,18 mm και συνεχόμενο παράθυρο οροφής, του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Στα αρχικά στάδια της καλλιέργειας επιλέχθηκαν τυχαία έξι φυτά από κάθε μεταχείριση προκειμένου να γίνει σύγκριση των δυο προγραμμάτων άρδευσης στη βλαστική ανάπτυξη, στη παραγωγή καρπών και στην αποδοτικότητα άρδευσης. Τα φυτά αναπτύχθηκαν σε πετροβάμβακα, μορφώθηκαν σε μονοστέλεχο σύστημα και η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος ήταν κοινή για τις δυο μεταχειρίσεις. Κατά τα διάφορα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας μετρήθηκαν το ύψος των φυτών και ο αριθμός

φύλλων. Όσο αφορά τους καρπούς που συγκομίζονταν από κάθε μεταχείριση, μετρήθηκε το συνολικό βάρος και ο αριθμός τους.

Σημαντικές διαφορές σημειώθηκαν στην ανάπτυξη και στον αριθμό φύλλων που έφεραν τα φυτά της κάθε μεταχείρισης. Σε επίπεδο βλαστικής ανάπτυξης, τα φυτά της μεταχείρισης A παρουσίασαν κατά μέσο όρο 9,953 cm μεγαλύτερο ύψος σε σχέση με τα αντίστοιχα της μεταχείρισης B ενώ και ο αριθμός φύλλων που έφεραν τα φυτά ακολούθησε την ίδια τάση, με τα φυτά της μεταχείρισης A κατά μέσο όρο (SD+/-) να αναπτύσσουν 23,97 (+/- 0,63%) φύλλα έναντι 22,047 (+/-0,53%) φύλλων για τη μεταχείριση B.

Η παραγωγή για τη μεταχείριση A, στην οποία η υγρασία του υποστρώματος ελέγχονταν με αισθητήρα διηλεκτρικής χωρητικότητας, ήταν αυξημένη κατά 25,91 % σε σχέση με τη μεταχείριση B, στην οποία η άρδευση είχε σταθερή διάρκεια. Ταυτόχρονα, αυτή η αύξηση της παραγωγής συνοδεύτηκε και από μια βελτίωση των εμπορικών χαρακτηριστικών των εμπορεύσιμων καρπών με μια αύξηση του βάρους τους κατά 54,67 % και μείωση των φυσιολογικών ανωμαλιών (ξηρή σήψη κορυφής) κατά 69,72 %. Ο δείκτης παραγωγικότητας νερού (WUE-used) διαμορφώθηκε στα 34.07 kg/m³ για τη μεταχείριση A και στα 28.84 kg/m³ για τη μεταχείριση B.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επιτυχία της σύγχρονης γεωργίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την αποτελεσματική διαχείριση της παραγωγικής διαδικασίας για την παραγωγή ποιοτικών προϊόντων. Στόχος της είναι η εξεύρεση της αποδοτικότερης σχέσης κόστους – οφέλους μέσω της βελτιστοποίησης της διαδικασίας σε κάθε παραγωγικό στάδιο. Η εφαρμογή αυτοματοποιημένων έξυπνων συστημάτων ελέγχου στη γεωργία μπορεί να συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας, στη μείωση των αποβλήτων και της ρύπανσης του περιβάλλοντος, στην αύξηση της παραγωγικότητας, στη μείωση του κόστους λειτουργίας, στη διευκόλυνση της εργασίας και στην βελτίωση της ποιότητας ζωής του παραγωγού, έχοντας ως βασική επιδίωξη την αύξηση της ανταγωνιστικότητας.

Στην απλούστερη μορφή ενός συστήματος αυτόματου ελέγχου κλειστού βρόχου, ένας ελεγκτής συγκρίνει την μετρημένη τιμή μιας διαδικασίας με μια επιθυμητή τιμή (set point), και επεξεργάζεται το προκύπτον σήμα σφάλματος για να αλλάξει κάποια στοιχεία των εισροών στη διαδικασία, κατά τέτοιο τρόπο ώστε, η διαδικασία να παραμένει στις προκαθορισμένες τιμές, παρά τις όποιες διαταραχές (Γαύρος, 2008; Λερός, 2005).

Στη σύγχρονη αγροτική παραγωγή, οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες γνωστές και ως Γεωργία σε Ελεγχόμενο Περιβάλλον (Controlled Environment Agriculture CEA), αποτελούν ίσως τη πιο εντατική μορφή παραγωγής τροφίμων. Ένα θερμοκήπιο μπορεί να θεωρηθεί όχι μόνο ως μια τεχνητή δομή που σκοπό έχει την προστασία της καλλιέργειας από εξωτερικούς μετεωρολογικούς παράγοντες, αλλά επίσης και ως ένα μέσο στο οποίο η ανάπτυξη των φυτών εξαρτάται από ελεγχόμενους παράγοντες όπως το νερό, ο φωτισμός, τα λιπάσματα, το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα (Beltrão et al., 2002). Οι μεταβλητές που επηρεάζουν άμεσα το σύστημα παραγωγής των θερμοκηπίων είναι ο στόχος του συστήματος ελέγχου. Οι παράμετροι και οι διαδικασίες που πρέπει να ελέγχονται σε ένα θερμοκήπιο είναι : θερμοκρασία, αερισμός, η σχετική υγρασία του αέρα, ο φωτισμός, η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα, η άρδευση, χημικές εργασίες (εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων), η άρδευση και η εφαρμογή του θρεπτικού διαλύματος (Bailey, 2002; Ramin et al., 2013)

Στις εκτός εδάφους καλλιέργειες, ο όγκος του υποστρώματος που είναι διαθέσιμος για την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος είναι σχετικά μικρός. Το γεγονός αυτό αυξάνει σημαντικά τον κίνδυνο εκδήλωσης μιας κατάστασης υδατικής καταπόνησης για την καλλιέργεια από μια ανεπαρκή ποσότητα νερού στο υπόστρωμα συνέπεια ενός αναποτελεσματικού προγράμματος άρδευσης. Έτσι λοιπόν η ακριβής διαχείριση της άρδευσης αποκτά εξαιρετικό ενδιαφέρον στις εκτός εδάφους καλλιέργειες αν και συχνά οι καλλιεργητές τείνουν να αρδεύουν με υπερβολικές ποσότητες νερού για προληπτικούς λόγους.

Στα συστήματα χωρίς ανατροφοδότηση (π.χ. άρδευση με χρονικό προγραμματισμό), αφού γίνει η έναρξη της άρδευσης συνήθως με ένα χρονοδιακόπτη on-off που ενεργοποιεί και απενεργοποιεί το σύστημα άρδευσης σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα ανεξάρτητα από τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας, παρέχεται μια προκαθορισμένη ποσότητα νερού χωρίς το αποτέλεσμα της άρδευσης να συμμετέχει στον έλεγχο της διαδικασίας. Σε αυτή τη περίπτωση πολύ συχνά γίνεται υπερβολική σπατάλη νερού και λιπασμάτων, γιατί η διάρκεια της άρδευσης καθορίζεται εμπειρικά και πολλές φορές δεν διαφοροποιείται ανάλογα με το υπόστρωμα που χρησιμοποιείται και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας. Επιπλέον η άρδευση με περίσσιες ποσότητες αυξάνει την ευαισθησία των φυτών στις μυκητολογικές και εντομολογικές προσβολές (Chappel et al., 2013; Incrocci et al., 2014). Ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου με βρόχους ανάδρασης μπορεί να είναι η κατάλληλη λύση, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει όσον αφορά την ανταπόκριση και την απόδοση (Helmer et al., 2005)

Μια σύγχρονη αντιμετώπιση για την πρόβλεψη του ελλείμματος του υδατικού ισοζυγίου της καλλιέργειας βασίζεται στη χρήση μοντέλων, τα οποία συνδυάζουν κλιματικά δεδομένα και φυτικούς συντελεστές για τον υπολογισμό του ρυθμού της εξαμισοδιαπνοής (ET). Η αποτελεσματικότητα αυτών των μοντέλων, εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία υπολογίζεται η εξαμισοδιαπνοή (ET). Ο φυτικός συντελεστής K_c ο οποίος εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, την καλλιεργητική τεχνική και τη διάρκεια του καλλιεργητικού κύκλου, πρέπει να υπολογίζεται με μεγάλη ακρίβεια καθόλα τη διάρκεια του καλλιεργητικού κύκλου (Malura et al., 1993), γεγονός

που περιορίζει τη χρήση των μοντέλων εξαμυσοδιαπνοής στο προγραμματισμό των αρδεύσεων σε καλλιέργειες κηπευτικών (Beeson Jr et al., 2004), ενώ στην περίπτωση της καλλιέργειας καλλωπιστικών το πρόβλημα εντείνεται επιπλέον από το γεγονός ότι δεν υπάρχουν φυτικοί συντελεστές για ένα σημαντικό αριθμό καλλωπιστικών φυτών και είναι απίθανο να βρεθούν στο άμεσο μέλλον (O' Meara et al., 2014).

Μια άλλη προσέγγιση είναι η χρήση αισθητήρων εδαφικής υγρασίας για τον έλεγχο της άρδευσης και τη μείωση του ελλείμματος νερού στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι η λύση του προβλήματος καθώς, η μοντελοποίηση γίνεται για μια παράμετρο. Αισθητήρες για την παρακολούθηση της εδαφικής υγρασίας, έχουν εφαρμοσθεί με επιτυχία για τον ακριβή έλεγχο της άρδευσης (Balayneh et al., 2013; Chappell et al., 2013; van Iersel et al., 2009). Οι εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων εδαφικής υγρασίας, έχουν αποδείξει ότι η ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται για την άρδευση των καλλιεργειών μπορεί να μειωθεί, γεγονός που δεν συμβάλλει μόνο στη μείωση του κόστους χρήσης του νερού αλλά μειώνει επίσης και τη χρήση των λιπασμάτων ή και άλλων χημικών εισροών (Chappell et al., 2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

A.1. Σύντομη ιστορική αναδρομή. Οι καλλιέργειες εκτός εδάφους στον κόσμο

Το σύστημα της υδροπονίας είναι μια τεχνική με την οποία η καλλιέργεια πραγματοποιείται μέσα σε θρεπτικό διάλυμα ή σε ένα στερεό πορώδες υπόστρωμα (όπως τύρφη, πετροβάμβακας κλπ) που διαβρέχεται από το θρεπτικό διάλυμα δηλαδή είναι μια τεχνική καλλιέργειας με την οποία καταργείται η παρουσία του εδάφους.

Πολλοί συγγραφείς ταυτίζουν την πρώτη εφαρμογή του συστήματος της υδροπονικής καλλιέργειας με τα πρώτα πειράματα στην θρέψη των φυτών που πραγματοποιήθηκαν από τον Woodward και Boyle τον 18ο αιώνα. Στην πραγματικότητα η υδροπονία έχει ρίζες πολύ παλαιότερες που προσδιορίζονται την εποχή των Αιγυπτίων και των Βαβυλώνιων. Όμως, οι πραγματικοί ιδρυτές της υδροπονίας θεωρούνται δυο γερμανοί ερευνητές Sachs (1860) και Knor (1861). Η έρευνά τους επέδειξε πως μια φυσιολογική ανάπτυξη φυτών μπορεί να επιτευχθεί με την προσθήκη κάποιων θρεπτικών στοιχείων στο νερό κατά κύριο λόγο, άζωτο, φωσφόρος, κάλιο, θείο, ασβέστιο και μαγνήσιο.

Στην διάρκεια των ετών που ακολούθησαν, διάφοροι ερευνητές όπως Tollens (1882), Tottingham(1914), Shive (1915), Hoagland (1919), Arnon (1938), ανέπτυξαν νέα θρεπτικά διαλύματα κάποια από τα οποία χρησιμοποιούνται και σήμερα. Ο όρος υδροπονία χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά το από το καθηγητή W.F. Gericke, του California Agricultural Experimental Station (1937) για να περιγράψει όλα εκείνα τα συστήματα καλλιέργειας στα οποία τα φυτά αναπτύσσονταν μέσα σε ένα υγρό διάλυμα (θρεπτικό διάλυμα). Στον Gericke αποδίδεται και η πρώτη εμπορική εφαρμογή αυτού του συστήματος καλλιέργειας, κατά τον προηγούμενο αιώνα στο μεσοδιάστημα μεταξύ των δυο παγκοσμίων πολέμων. Αρχικός στόχος για τη δημιουργία ενός συστήματος καλλιέργειας εκτός εδάφους, ήταν η εξεύρεση μιας εναλλακτικής μεθόδου για την αποφυγή των προβλημάτων που συνδέονται με την καλλιέργεια στο έδαφος όπως η κούραση του εδάφους (Jensen 1997). Παρόλο του μεγάλου ενδιαφέροντος για την υδροπονία που

υπέδειξαν όσοι δραστηριοποιούνταν στον κλάδο αρχικά η διάδοση αυτής της τεχνικής ήταν περιορισμένη λόγω προβλημάτων που συνδέονταν με το υψηλό κόστος εγκατάστασης και με προβλήματα ασφυξίας του ριζικού συστήματος (Jensen 1997).

Για την αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων αρχικά υιοθετήθηκε η λύση της καλλιέργειας σε άμμο και χαλίκι (Hangland and Arnon, 1950), δίνοντας τα πρώτα συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους τα οποία, αν και παρουσίαζαν ένα τεχνολογικό βήμα προς τα εμπρός, δεν περιόριζαν το κόστος εγκατάστασης το οποίο παρέμενε υψηλό. Χάριν της εφαρμογής του συστήματος της στάγδην άρδευσης και την ευρεία εισαγωγή των πλαστικών στην γεωργία στις αρχές του '60-'70, απλοποιήθηκαν κατά πολύ κατασκευαστικά προβλήματα που είχαν να κάνουν με την κάλυψη του θερμοκηπίου, την κατασκευή καναλιών, σωληνώσεων κλπ, αναζωπυρώνοντας το ενδιαφέρον των καλλιεργητών του κλάδου για την καλλιέργεια εκτός εδάφους. Τελικά η μεγάλη εξάπλωση των συστημάτων καλλιέργειας εκτός εδάφους επετεύχθη με την εισαγωγή και χρήση νέων χημικά αδρανών υποστρωμάτων όπως πετροβάμβακα, περλίτη, ελαφρόπετρα, κλπ των οποίων τα φυσικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες είναι καλύτερες από αυτές της άμμου και του χαλικιού.

A.2. Υφιστάμενη κατάσταση και εξελίξεις στον τομέα κηπευτικών θερμοκηπίου στη Ελλάδα

Η Ελληνική στρατηγική για την ανάπτυξη της οικονομίας έχει θέση ως προτεραιότητα την ανάπτυξη του πρωτογενή τομέα καθώς έχει αποδειχθεί ότι είναι από τους τομείς που λιγότερο πλήττονται από την τρέχουσα ύφεση. Στην Ελλάδα ο γεωργικός τομέας είναι ένας από τους σημαντικότερους κλάδους για την οικονομία της χώρας, τόσο όσο αφορά την παραγωγή όσο και την απασχόληση. Σαν ποσοστό του ΑΕΠ η αγροτική παραγωγή αντιπροσωπεύει ποσοστό μεγαλύτερο του 3%, χρησιμοποιώντας έως και το 12,6% του ενεργού πληθυσμού της χώρας. (www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE). Σχεδόν το 1/3 της αγροτικής παραγωγής αφορά την παραγωγή φρούτων και κηπευτικών. Η αξία των εξαγωγών φρούτων και κηπευτικών

αντιπροσωπεύουν περίπου το 35% του συνόλου των εξαγόμενων αγροτικών προϊόντων, με το εξωτερικό εμπορικό ισοζύγιο να αυξάνεται σε σταθερή βάση. Είναι μακράν ο πιο ανταγωνιστικός τομέας της γεωργίας στην Ελλάδα (www.investingreece.gov.gr). Παρά την μεγάλη σημασία αυτού του παραγωγικού τομέα για την Ελληνική οικονομία και το σχετικά υψηλό ποσοστό απασχόλησης, η Ελλάδα εισάγει ακόμη μεγάλες ποσότητες φρούτων και κηπευτικών. Λόγω ξεπερασμένων μεθόδων παραγωγής, ενός σχετικά υψηλού κόστους παραγωγής και της αδιαφάνειας στην αλυσίδα διανομής, τα Ελληνικά προϊόντα δεν είναι ανταγωνιστικά για πολλές αλυσίδες λιανικής πώλησης οι οποίες ενδιαφέρονται για ποιοτικά προϊόντα, σταθερό όγκο παραγωγής που να εξασφαλίζει εγγυημένη και σταθερή προμήθεια, των προϊόντων που διακινούν. Στα πλαίσια λοιπόν της αγροτικής παραγωγής κηπευτικών, στη χώρα μας η εκτός εποχής παραγωγή κηπευτικών σε θερμοκήπια αποτελεί μία από τις σημαντικότερες γεωργικές δραστηριότητες, όπως συμβαίνει σε όλες σχεδόν τις χώρες της μεσογειακής λεκάνης. Ο ανταγωνισμός όμως, τόσο με τις χώρες της Βόρειας Ευρώπης, όσο και με τις χώρες της Μεσογειακής λεκάνης, είναι ιδιαίτερα οξύς.

Από τα δεδομένα της Ετήσιας Γεωργικής Στατιστικής Έρευνας 2010 ("Πηγή ΕΛΣΤΑΤ", <http://dlib.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE>), προκύπτει ότι η συνολική έκταση των θερμοκηπίων που καλλιεργήθηκαν με κηπευτικά στην Ελλάδα το 2010 ανήλθε σε 53.044 στρέμματα. Εάν στην έκταση αυτή προστεθούν, τα θερμοκήπια με ανθοκομικές καλλιέργειες 3.708 στρ. και οι εμπορικοί ανθόκηποι 6.980 στρ. τότε η συνολική έκταση των θερμοκηπιακών κατασκευών ανέρχεται στα 63.732 στρ. Η πλειοψηφία των θερμοκηπιακών κατασκευών, περίπου το 50%, βρίσκεται στο νησί της Κρήτης με την περιοχή της Ιεράπετρας να είναι η πιο σημαντική, ακολουθούμενη από την πεδιάδα της Μεσσαράς. Η περιοχή της Προπονήσου κατέχει ένα άλλο 25% των θερμοκηπίων. Το υπόλοιπο 25% είναι διάσπαρτο σε όλη την Ελλάδα. Οι κύριες καλλιέργειες θερμοκηπίου στην Ελλάδα είναι: τομάτα, πιπεριά, αγγούρι, μελιτζάνα, πεπόνι και καρπούζι. Από αυτές τομάτα, αγγούρι, πιπεριά (τύπου κέρατο) και καρπούζι συχνά είναι καλλιέργειες με εξαγωγικό προσανατολισμό. Η μισή από την παραπάνω έκταση (34.780 στρέμματα) αντιστοιχεί σε καλλιέργειες τομάτας, οι οποίες έδωσαν συνολική παραγωγή 259.018 τόνους και μέση παραγωγή 7,44 τόνους ανά στρέμμα. Η δεύτερη σε

έκταση καλλιέργεια θερμοκηπίου είναι το αγγούρι με 15.078 στρέμματα (συνολική παραγωγή 144.242 τόνους) και ακολουθούν η μελιτζάνα με 3.685 στρέμματα και η φράουλα με 3.735 στρέμματα.

Οι χαμηλές αποδόσεις ανά μονάδα καλλιεργούμενης επιφάνειας οφείλονται στο γεγονός ότι τα περισσότερα Ελληνικά θερμοκήπια είναι χαμηλής τεχνολογίας, με μειωμένες έως ανύπαρκτες δυνατότητες ελέγχου του εσωτερικού κλίματος. Επιπλέον, το επίπεδο της τεχνογνωσίας όσον αφορά κυρίως την άρδευση και τη θρέψη καθώς και την φυτοπροστασία είναι πολύ χαμηλό. Τέλος, λόγω των ανεπαρκειών στην ρύθμιση του εσωτερικού κλίματος, στην τεχνική της καλλιέργειας και των κατασκευαστικών λαθών ιδιαίτερα όσο αφορά το ύψος της κατασκευής, επιβάλλουν την υιοθέτηση περιόδων μικρής διάρκειας σε κηπευτικά συνεχούς καρποφορίας όπως είναι η τομάτα (μέσης διάρκειας 5-6 μηνών), τα οποία για να αποδώσουν το μέγιστο των δυνατοτήτων τους θα πρέπει να καλλιεργούνται ολόκληρη την καλλιεργητική περίοδο όπως για παράδειγμα στην Ολλανδία όπου η μέση καλλιεργητική περίοδος είναι 10-11 μήνες, γεγονός που επιτρέπει, για παράδειγμα στην καλλιέργεια της τομάτας, την συγκομιδή της παραγωγής μέχρι την 30-35 ταξιανθία. Το ύψος των Ελληνικών θερμοκηπίων συνήθως είναι απαράδεκτα χαμηλό (2,5 m στο υψηλότερο σημείο έναντι των 3-6 m των θερμοκηπίων του εξωτερικού) με συνέπεια η ρυθμιστική τους ικανότητα ως προς τις κλιματικές συνθήκες να είναι πολύ μικρή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρατηρούνται μεγάλες ημερήσιες διακυμάνσεις θερμοκρασίας και υγρασίας με αρνητικά αποτελέσματα στο ύψος της τελικής παραγωγής και στην ποιότητα των προϊόντων.

Η πλειοψηφία των παραγωγών ακολουθούν δυο κύκλους παραγωγής:

- Φθινόπωρο-χειμώνα; Η καλλιεργητική περίοδος ξεκινά τον Αύγουστο και συνεχίζει μέχρι τον Ιανουάριο
- Άνοιξη-καλοκαίρι: η καλλιέργεια ξεκινά τον Φεβρουάριο και συνεχίζει μέχρι την έναρξη της φθινοπωρινής καλλιέργειας.

Εξαιτίας της τεχνολογικής υστέρησης των Ελληνικών θερμοκηπίων σε σύγκριση με αυτών των περισσότερο ανταγωνιστικών χωρών, η παρουσία των ελληνικών θερμοκηπιακών προϊόντων στις διεθνείς αγορές είναι

κατώτερη των φυσικών δυνατοτήτων της χώρας. Σε διεθνές επίπεδο, οι σύγχρονες θερμοκηπιακές μονάδες δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στη βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων παρά στην αύξηση της παραγωγής, καθώς και στη μείωση των ενεργειακών και χημικών εισροών (Gruda, 2009; Passam et al., 2007). Κάτι τέτοιο όμως προϋποθέτει τη χρήση νέων τεχνολογιών στη διαδικασία της παραγωγής, η εφαρμογή των οποίων οδηγεί σε θερμοκήπια φιλικότερα στο περιβάλλον.

Οι θερμοκηπιακές μονάδες που εφαρμόζουν ένα πρόγραμμα ολοκληρωμένης διαχείρισης της παραγωγής ακόμη είναι λίγες σε σύγκριση με την συνολική έκταση των θερμοκηπίων στη χώρα μας. Ωστόσο, η υιοθέτηση ενός συστήματος καλλιέργειας εκτός εδάφους, μπορεί να έχει σημαντικό ρόλο σε ένα πρόγραμμα βιώσιμης ανάπτυξης διότι αποτελεί μια ολοκληρωμένη στρατηγική παρέμβασης που στόχο έχει την δημιουργία «κλειστών» συστημάτων παραγωγής στα οποία τα ωφέλει και οι απώλειες είναι ρυθμισμένες με τρόπο τέτοιο ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση των εισροών και να ελαχιστοποιούνται οι εκροές (Pardossi, 1993).

Εάν σκεφτούμε την ανάγκη που υπάρχει για μια αύξηση του βαθμού αυτοματοποίησης στο θερμοκήπιο καθώς επίσης και την ανάγκη να μειωθεί η ρύπανση του περιβάλλοντος, η υιοθέτηση ενός συστήματος καλλιέργειας εκτός εδάφους, φαίνεται να είναι η φυσική εξέλιξη της καλλιέργειας σε προστατευόμενο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, η όχι και τόσο πρόσφατη νομοθεσία που στόχο έχει την επιβολή κυρώσεων στις «ρυπογόνες» παραγωγικές διαδικασίες καθιστά επιτακτική τη μετάβαση σε περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον παραγωγικά συστήματα (van Os, 1995). Ωστόσο, έχοντας να κάνουμε με προηγμένα τεχνολογικά συστήματα η επίτευξη των στόχων που προαναφέραμε, απαιτεί υψηλού κόστους επενδύσεις και την ορθή διαχείριση όλων των παραγόντων που εμπλέκονται στη παραγωγική διαδικασία. Ως εκ τούτου η δημιουργία ενός θερμοκηπίου στα πρότυπα μιας βιομηχανίας, σκοπό έχει την τυποποίηση των συστημάτων παραγωγής και προϊόντων παραγωγής (τόσο από άποψη ποσότητας όσο και ποιότητας) με ταυτόχρονη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Martignon ad Pardossi, 1993).

A.3. Συστήματα καλλιέργειών εκτός εδάφους

Σε ένα σύστημα καλλιέργειας εκτός εδάφους, το ριζικό σύστημα αναπτύσσεται εξ' ολοκλήρου εκτός του φυσικού εδάφους με τέτοιο τρόπο, ώστε να έχει στην διάθεσή του αρκετό νερό και θρεπτικά στοιχεία για να μπορεί να επιτελεί τις απαραίτητες για τη ζωή του φυτού λειτουργίες. Οι ρίζες αναπτύσσονται: είτε απευθείας σε υδατικό διάλυμα ανόργανων αλάτων τα οποία χρησιμοποιούνται από το φυτό ως θρεπτικά στοιχεία (θρεπτικό διάλυμα), είτε σε πορώδη στερεά υλικά τα οποία καλούνται υποστρώματα και διαβρέχονται τακτικά με θρεπτικό διάλυμα στα πλαίσια της άρδευσης του φυτού.

Η κατάταξη των συστημάτων καλλιέργειας εκτός εδάφους γίνεται κατά βάση με:

- Κριτήριο τον τρόπο διαχείρισης των απορροών.
- Κριτήριο το μέσο ανάπτυξης του ριζικού συστήματος και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος.

Με βάση τον τρόπο διαχείρισης των απορροών, μπορούμε να διακρίνουμε ανοιχτά ή κλειστού τύπου συστήματα. Στα ανοιχτού τύπου συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους, η περίσσεια θρεπτικού διαλύματος που απορρέει από το υπόστρωμα και διαφεύγει στο περιβάλλον ενώ στα κλειστά συστήματα, η περίσσεια θρεπτικού διαλύματος που αποστραγγίζει από το υπόστρωμα, συλλέγεται, συμπληρώνεται με καθαρό νερό και θρεπτικά στοιχεία και επαναχρησιμοποιείται.

Σύμφωνα με την παρουσία ή όχι ενός υποστρώματος διακρίνουμε υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας χωρίς υπόστρωμα (αεροπονία, NFT, Float system) και καλλιέργεια σε χημικά αδρανή υποστρώματα ή σε υποστρώματα με χημική δραστηριότητα (ανόργανα υποστρώματα με ανταλλακτική ικανότητα, οργανικά υποστρώματα με ανταλλακτική ικανότητα). Τα χημικά αδρανή υποστρώματα που χρησιμοποιούνται στις υδροπονικές καλλιέργειες είναι η πυριτική άμμο (λεπτόκοκκη με κοκκομετρικό εύρος από 0,05 έως 0,5 mm, χονδρόκοκκη με εύρος μεγέθους κόκκων από 0,5 έως 2 mm), ο πετροβάμβακας, ο διογκωμένος περλίτης, η ελαφρόπετρα και ο

διογκωμένος άργιλος. Τα υποστρώματα με χημική δραστηριότητα (χημικά ενεργά υποστρώματα) διακρίνονται σε: ανόργανα υποστρώματα (Ζεόλιθος, βερμικουλίτης καθώς και διάφορα άλλα ηφαιστειακά υλικά) και σε οργανικά υποστρώματα (Τύρφη, Ίνες ή άλεσμα κόκκου ή κοκκόχωμα, κομπόστα).

Τέλος, με κριτήριο τα υλικά και την αρχιτεκτονική της κατασκευής τους η ταξινόμηση των συστημάτων καλλιέργειας εκτός εδάφους διαχωρίζει δυο κατηγορίες συστημάτων: τα συστήματα υδροκαλλιέργειας (καλλιέργεια σε στάσιμο θρεπτικό διάλυμα (float system), ανακυκλούμενο θρεπτικό διάλυμα (NFT), Αεροπονία, σύστημα κεκλιμένων πεδίων (A-Frame), και συστήματα των οποίων το ριζικό σύστημα αναπτύσσεται σε ένα στερεό πορώδες υλικό (καλλιέργεια σε σάκους, καλλιέργεια σε πορώδεις πλάκες, σε γλάστρες, σε φυτοδοχεία, σε κανάλια)

A.4. Σύστημα επίπλευσης (Deep Flow technique DFT ή Floating system)

Η τεχνική αυτή προβλέπει την καλλιέργεια σε στάσιμο θρεπτικό διάλυμα που περιέχεται σε λεκάνες καλλιέργειας βάθους τουλάχιστον 25 cm, με απευθείας σπορά ή με μεταφύτευση των φυτών σε κυψελωτούς πολυεστερικούς ή πλαστικούς δίσκους που επιπλέουν στο θρεπτικό διάλυμα. Η διατήρηση θρεπτικού διαλύματος σε σχετικά μεγάλο ύψος μέσα στις λεκάνες καλλιέργειας αυξάνει την ρυθμιστική ικανότητα του συστήματος ως προς τις μεταβολές της θερμοκρασίας και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιοχές και εποχές που επικρατούν πολύ υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίας. Η εξασφάλιση του απαραίτητου οξυγόνου για την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος γίνεται με εμπλουτισμό του διαλύματος με αντλία που διοχετεύει αέρα στο χώρο της δεξαμενής. Η άκρως απλοποιημένη κατασκευαστική αυτή λύση είναι και ο λόγος της εμπορικής επιτυχίας αυτής της τεχνικής κυρίως για την καλλιέργεια φυτών με σύντομους καλλιεργητικούς κύκλους όπως φυλλώδη λαχανικά (διάφορες σαλάτες), βαλεριάνα, ρόκα, βασιλικός κλπ. με προορισμό κυρίως την αγορά κηπευτικών κατηγορίας IV (φρέσκα έτοιμα προς κατανάλωση). Επιπλέον, το σύστημα επίπλευσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε φυτώρια για παραγωγή σποροφύτων λαχανοκομικών και ανθοκομικών φυτών, καθώς και άλλων καλλιεργούμενων φυτών όπως ο καπνός (Frantz et

al., 1998, Μπιλάλης κ.ά., 2007). Μειονέκτημα του συστήματος είναι το γεγονός ότι δεν επιτρέπει την συχνή αντικατάσταση του διαλύματος και λόγω του μεγάλου όγκου των δεξαμενών υπάρχει μεγάλη απώλεια λιπασμάτων.

Στον κλάδο της ανθοκομίας η τεχνική του floating system βρήκε εφαρμογή στην καλλιέργεια βολβώδη ανθοκομικών ειδών για δρεπτά άνθη (τουλίπα, ορχιδέα, λίκιο, κλπ). Τα πλεονεκτήματα εντοπίζονται στο χαμηλό κόστος παραγωγής, στη γρήγορη ανθοφορία, στην ετήσια παραγωγή, στη μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και φυτοφαρμάκων καθώς και στις καλύτερες συνθήκες εργασίας (Malorgio, 2005).

A.5. Τεχνική λεπτής στοιβάδας θρεπτικού διαλύματος (Nutrient Film Tehnique NFT)

Η τεχνική NFT, δημιουργός της οποίας ήταν ο Cooper το 1972 στο Ηνωμένο Βασίλειο, προβλέπει την καλλιέργεια των φυτών σε κανάλια μήκους έως και 20 m. Η περιεκτικότητα του θρεπτικού διαλύματος σε οξυγόνο μειώνεται σημαντικά στην πορεία της ροής του μέσα στο κανάλι με συνέπεια να δημιουργούνται προβλήματα υποξίας στα φυτά που βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από 18 – 20 m από το σημείο εισόδου του θρεπτικού διαλύματος στο κανάλι (Puerta et al., 2007), με ελαφριά κλίση (1,5-2 %) (Schwarz, 1995) στα οποία ρέει (με ρυθμό παροχής 1-3 Lit/min) ένα λεπτό στρώμα θρεπτικού διαλύματος. Για να επιτυγχάνεται καλή οξυγόνωση του ριζικού συστήματος, το βάθος του ρέοντος θρεπτικού διαλύματος μέσα στα κανάλια δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 2-4 mm. Αυτή η τεχνική παρουσιάζει αρκετά από τα τυπικά προβλήματα των κλειστών συστημάτων όπως, (αναγκαιότητα συχνών αναλύσεων για την αναπροσαρμογή του θρεπτικού διαλύματος, γρήγορη συσσώρευση ιόντων Na και Cl στη περίπτωση που χρησιμοποιείται νερό με αυξημένη περιεκτικότητα στα δυο αυτά ιόντα (Savvas et al., 2011), υψηλό ρίσκο καταστροφής της καλλιέργειας λόγω απουσίας υποστρώματος στην περίπτωση που σταματήσει η ροή του θρεπτικού διαλύματος, κίνδυνος μετάδοσης παθογόνων ειδικά του ριζικού συστήματος μέσω της κυκλοφορίας του θρεπτικού διαλύματος, υψηλό κόστος χημικής απολύμανσης του θρεπτικού διαλύματος λόγω του μεγάλου του όγκου. Τα

προβλήματα αυτά εμπόδισαν την εμπορική εξάπλωσή της καλλιέργειας, η οποία ουσιαστικά περιορίστηκε σε καλλιέργειες με βραχύ καλλιεργητικό κύκλο (3-4 μηνών) όπως τα φυλλώδη λαχανικά. Σε περιοχές της Μεσογείου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και στην καλλιέργεια κηπευτικών όπως τομάτα, πιπεριά, πεππονοειδή κλπ. για ποικιλίες με μικρότερο καλλιεργητικό κύκλο.

A.6 Αεροπονία

Στην αεροπονία το ριζικό σύστημα αιωρείται σε κλειστά δοχεία (κενά κιβώτια) ή σε κανάλια καλλιέργειας (επιμήκεις σωλήνες) όπου ένα σύστημα υδρονέφωσης μεριμνά να διατηρείται συνεχώς κορεσμένος σε υγρασία ψεκάζοντας θρεπτικό διάλυμα απευθείας πάνω στο ριζικό σύστημα (Weathers and Zobel, 1992). Το θρεπτικό διάλυμα ψεκάζεται κατευθείαν στις ρίζες (που αιωρούνται στο κενό) οι οποίες παραμένουν πάντα υγρές και μπορούν έτσι να απορροφούν νερό και θρεπτικά συστατικά, μέσου ενός πλήρους αυτοματοποιημένου συστήματος υδρονέφωσης για ένα χρονικό διάστημα που κυμαίνεται από 30-60 δευτερόλεπτα και συχνότητα η οποία και αυτή μεταβάλλεται ανάλογα τις κλιματικές συνθήκες, το είδος της καλλιέργειας, το στάδιο ανάπτυξης των φυτών κλπ. Γενικά η συχνότητα των ψεκασμών κυμαίνεται στα 2-3 min ενώ σύμφωνα με τον Jones (1997) ο συνεχής ψεκασμός θρεπτικού διαλύματος δίνει καλύτερα αποτελέσματα εφόσον η σταγόνα είναι μικρού μεγέθους.

Κρίσιμος παράγοντας για την επιτυχία μίας αεροπονικής καλλιέργειας είναι το μέγεθος της ψεκαζόμενης σταγόνας το οποίο θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 40 - 50 μm (0,04 – 0,05 mm). Σταγόνες μεγέθους μέχρι 100 μm μπορούν επίσης να δώσουν σχετικά ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Μεγαλύτερου μεγέθους σταγόνες όμως είναι ακατάλληλες για αεροπονία, δεδομένου ότι δεν διασφαλίζουν ικανοποιητικές συνθήκες αερισμού στην ρίζα. Σταγόνες μικρότερες από 30 μm θεωρούνται επίσης ακατάλληλες, γιατί οδηγούν σε υπερβολική ανάπτυξη ριζικών τριχιδίων καθώς και ανεπαρκή διακλάδωση και πλευρική ανάπτυξη του ριζικού συστήματος

Παρόλο που με το σύστημα της αεροπονίας προβλήματα όπως η ασφυξία του ριζικού συστήματος εξαλείφονται (Zobel et al., 1976), το υψηλό

κόστος εγκατάστασης έχει περιορίσει την εξάπλωση. Αεροπονικά συστήματα καλλιέργειας έχουν προταθεί για την καλλιέργεια του χρυσάνθεμου για δρεπτό άνθος ή για την καλλιέργεια μητρικών φυτών για την παραγωγή πολλαπλασιαστικού αγενούς υλικού όπως για τον ιβίσκο, ποϊνσέτια, καθώς και φυλλώδη λαχανικών (π.χ μαρούλι, σπανάκι).

A.7. Η καλλιέργεια σε πορώδη στερεά υλικά

Υπόστρωμα καλλιέργειας φυτών ονομάζεται κάθε πορώδες υλικό, φυσικό ή προερχόμενο από βιομηχανική επεξεργασία, που δεν είναι φυτοτοξικό και μπορεί να υποκαταστήσει το έδαφος ως μέσο ανάπτυξης των ριζών των φυτών. Τα υποστρώματα υποκαθιστούν το έδαφος ως προς τις εξής λειτουργίες του:

- Παροχή νερού στα φυτά
- Παροχή θρεπτικών στοιχείων στα φυτά
- Παροχή οξυγόνου στη ρίζα
- Στήριξη των φυτών.

Η εξέλιξη της τεχνικής της καλλιέργειας σε υπόστρωμα, είδε το πέρασμα από τα τσιμεντένια κανάλια που περιείχαν άμμο ή χαλίκι, στην χρήση υποστρωμάτων όπως για παράδειγμα τύρφη, πετροβάμβακα, περλίτη (μεγαλύτερη υδατοϊκανότητα, καλύτερος αερισμός με σαφή πλεονεκτήματα για την άρδευση), σε μια προσπάθεια μείωσης του κόστους εγκατάστασης. Η εισαγωγή του πλαστικού στη γεωργία τη δεκαετία του '70, επέτρεψε την μετάβαση από του υψηλού κόστους εγκατάστασης τσιμεντένιων καναλιών στη χρήση καναλιών πολυπροπυλενίου για να καταλήξουμε στη συνέχεια στα φυτοδοχεία ή σε πολυεστερικά προφίλ, με σημαντική μείωση του όγκου του υποστρώματος που έχει στη διάθεσή του το φυτό. Στην πραγματικότητα ένα υπόστρωμα με εκείνα τα φυσικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες που το καθιστούν ιδανικό για τα υδροπονικά συστήματα καλλιέργειας (ικανότητα να συγκρατεί νερό και αέρα, σταθερή δομή στο χρόνο κλπ), οικονομικό και εύκολα ανακυκλώσιμο δεν υπάρχει, ή τουλάχιστον δεν έχει βρεθεί ακόμη. Η

επιλογή του υποστρώματος πρέπει να γίνεται κατόπιν αξιολόγησης ενός αριθμού χαρακτηριστικών που περιλαμβάνουν (Wilson G. 1984):

- Το φαινόμενο ειδικό βάρος E_f (πρέπει να είναι μεταξύ 200 και 500 kg m^3)
- Τη δυνατότητα ανακύκλωσης του
- Τα δομικά του χαρακτηριστικά, τα οποία πρέπει να εξασφαλίζουν στο φυτό μια επαρκεί στήριξη. Η δομή του πρέπει να είναι πορώδης και να χαρακτηρίζεται από ικανότητα κατακράτησης νερού (υδατοϊκανότητα), μεγαλύτερη σε σχέση με το μέσο έδαφος. Η δομή αυτή, πρέπει επίσης να είναι σταθερή στο χρόνο, να αντιστέκεται στην συμπίεση, στη σύνθλιψη και στη μείωση του όγκου κατά τη φάση που χάνεται νερό (ανάμεσα σε δυο αρδευτικούς κύκλους) η οποία θα μπορούσε να προκαλέσει τη θραύση των ριζών. Στις εκτός εδάφους καλλιέργειες πρέπει να προτιμούνται υποστρώματα με μια ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων κατά προτίμηση μηδενική (χημικά αδρανή υποστρώματα). Στα αδρανή υποστρώματα δεν πρέπει να ανιχνεύεται παρουσία θρεπτικών στοιχείων για να μην αλληλεπιδρούν με αυτά του θρεπτικού διαλύματος. για να μπορούμε να διαχειριζόμαστε ιδανικά τη χορήγηση των θρεπτικών συστατικών. με το μικρότερο κίνδυνο όσο αφορά την αύξηση της αλατότητας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο υπόστρωμα. Αυτή η ιδιότητα συνδέεται άμεσα με την «ρυθμιστική ικανότητα» του υποστρώματος, δηλαδή στην ικανότητα του υποστρώματος να απορροφά (εξισορροπεί) απότομες μεταβολές του pH. Σε γενικές γραμμές, τα οργανικά υποστρώματα σε αντίθεση με τα ορυκτά, χαρακτηρίζονται από μια μεγάλη ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων και μια υψηλή ρυθμιστική ικανότητα (buffering capacity). Κατά συνέπεια, η υδρολίπανση πρέπει να είναι κατάλληλα προσαρμοσμένη στη σύνθεση του κάθε υποστρώματος, καθώς και στο διαφορετικό βαθμό ευαισθησίας ή την ανοχή στην αλατότητα κάθε καλλιέργειας. Για τα περισσότερα από τα καλλιεργούμενα είδη η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε κορεσμένο υπόστρωμα κυμαίνεται από 1,2 dS m^{-1} (ανθοκομικά και φράουλα) έως 8,0 dS m^{-1} (κηπευτικά). Γενικά ισχύει η αρχή ότι όσο χαμηλότερη είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός

υποστρώματος τόσο καταλληλότερο είναι αυτό για καλλιέργεια φυτών. Υψηλή τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας σημαίνει ότι το υπόστρωμα περιέχει αυξημένες ποσότητες υδατοδιαλυτών αλάτων (κυρίως NaCl αλλά και άλατα ασβεστίου).

- Το pH των αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα στις εκτός εδάφους καλλιέργειες είναι μικρής σημασίας διότι προσδιορίζεται (προκύπτει) από το pH του θρεπτικού διαλύματος
- Ισορροπημένη περιεκτικότητα σε θρεπτικά συστατικά. Μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική μια αναλογία N:K:P ίση με 1:1:1, για οργανικά υποστρώματα.
- Υψηλή θερμομονωτική ικανότητα ώστε να εξομαλύνονται θερμοκρασιακές μεταβολές του υποστρώματος. Αυτή η ιδιότητα σχετίζεται άμεσα με την υδατοϊκανότητα (ικανότητα να συγκρατεί το νερό) του υποστρώματος. Είναι γνωστό ότι η αύξηση της θερμοκρασίας και η θερμοκρασιακή διακύμανση του υποστρώματος είναι τόσο χαμηλότερη όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητά του σε νερό
- Το υπόστρωμα πρέπει να είναι απαλλαγμένο από παθογόνα του ριζικού συστήματος όταν χρησιμοποιείται για πρώτη φορά. Αν το υπόστρωμα επαναχρησιμοποιηθεί, μπορεί να απολυμανθεί ευκολότερα σε σύγκριση με το έδαφος (χαμηλότερο κόστος, μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα).
- Τέλος το υπόστρωμα πρέπει να είναι χαμηλού κόστους, να είναι εύκολα διαθέσιμο στο εμπόριο και να παρουσιάζει τυποποιημένα φυσικό-χημικά χαρακτηριστικά σταθερά στο χρόνο και στο χώρο.

A.8. Παραγωγή και ποιότητα. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα των υδροπονικών συστημάτων καλλιέργειας

Είναι προφανές ότι η υδροπονία μπορεί να εγγυηθεί τις ιδανικές συνθήκες για την ανάπτυξη της καλλιέργειας με στόχο την παραγωγή ενός

προϊόντος με ξεκάθαρα συγκριτικό πλεονέκτημα τόσο από πλευράς ποιότητας όσο και από πλευράς τελικής ποσότητας. Επιπλέον επιτρέπει την καλλιέργεια σε εδάφη που αντιμετωπίζουν προβλήματα από παθογόνα εδάφους, προβλήματα μόλυνσης από την παρουσία χημικών ουσιών τοξικές για την καλλιέργεια και απαλλάσσει τον καλλιεργητή από την χρήση εδαφοαπολυμαντικών. Υπό αυτή την άποψη, η καλλιέργεια εκτός εδάφους θεωρείται ως η εγκυρότερη εναλλακτική μέθοδος καλλιέργειας στη χρήση του βρωμιούχου μεθυλίου. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Μόντρεαλ, η χρήση βρωμιούχου μεθυλίου για απολύμανση του εδάφους των θερμοκηπίων υπόκειται σε αυστηρούς περιορισμούς στις ανεπτυγμένες χώρες μετά το 2005 με προοπτική να απαγορευτεί πλήρως σε όλες τις χώρες μετά το 2015 (Batchelor, 2004). Πέραν των πλεονεκτημάτων αυτών, με προϋπόθεση την ορθή διαχείριση, η εκτός εδάφους καλλιέργεια μπορεί να αυξήσει την πρωιμότητα της παραγωγής και μετασυλλεκτικά, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του συγκομισμένου προϊόντος. Γενικά η καλλιεργητική απόδοση διάφορων κηπευτικών τείνει να είναι υψηλότερη για τις εκτός εδάφους καλλιέργειες συγκριτικά με αυτές που αναπτύσσονται στο έδαφος (Olle et al., 2012).

Εξετάζοντας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των κηπευτικών προϊόντων τα μόνα για τα οποία υπάρχουν στοιχεία, τα κηπευτικά προϊόντα που προέρχονται από ένα σύστημα καλλιέργειας εκτός εδάφους σε σχέση με την καλλιέργεια στο έδαφος, δεν παρουσιάζουν χημική υπολλειματικότητα από τη χρήση εδαφοαπολυμαντικών. Εξετάζοντας κι άλλα ποιοτικά χαρακτηριστικά, όπως τα θρεπτικά χαρακτηριστικά, στην βιβλιογραφία παρουσιάζονται αντικρουόμενα αποτελέσματα. Οι Mauro et al. (2001) αναφέρουν ότι δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές στα ποιοτικά χαρακτηριστικά καρπού τομάτας μεταξύ παραδοσιακής καλλιέργειας στο έδαφος και καλλιέργειας με το σύστημα της υδροπονίας. Αντίθετα, HyunKyoung et al. (2001), Majid et al. (2008) απέδειξαν ότι η ποιότητα των καρπών είναι ανώτερη όταν οι καρποί προέρχονται από φυτά καλλιεργημένα στο έδαφος. Το αντίθετο αναφέρεται από άλλους ερευνητές (Oswald ad Petrovic, 1996).

Η σωστή διαχείριση του θρεπτικού διαλύματος μπορεί να βελτιώσει ουσιαστικά θρεπτικά και υγιεινά χαρακτηριστικά του προϊόντος. Για παράδειγμα στην υδροπονία παρέχεται η δυνατότητα απομάκρυνσης του αζώτου από το θρεπτικό διάλυμα κατά την περίοδο των τελευταίων ημερών

της καλλιέργειας, ή να χρησιμοποιηθούν ποσότητες αζώτου αμμωνιακό/νιτρικό με μια σχέση που να μειώνει την παρουσία νιτρικών στο συγκομισμένο προϊόν (Santamaria et al. 2001). Αυτό το αποτέλεσμα είναι μεγάλης σημασίας για ορισμένες καλλιέργειες όπως αυτή του μαρουλιού, που συσσωρεύουν σημαντικές ποσότητες τέτοιων ουσιών εν δυνάμει επικίνδυνες για την ανθρώπινη υγεία.

Παρόλα αυτά, η εκτός εδάφους καλλιέργεια παρουσιάζει και μειονεκτήματα που συνδέονται με τον περιορισμένο όγκο που έχει στην διάθεσή του να αναπτυχθεί το ριζικό σύστημα, γεγονός που αυξάνει τον διαχειριστικό κίνδυνο και το στρες για την καλλιέργεια. Επιπλέον, στα κλειστά συστήματα η επαναχρησιμοποίηση της απορροής μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο μετάδοσης παθογόνων του ριζικού συστήματος. Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων το θρεπτικό διάλυμα μπορεί να απολυμανθεί με την χρήση θερμότητας (παστερίωση), με έκθεση σε ακτινοβολία UV και με την τεχνική του μικρο-φιλτραρίσματος (Runia, 1995). Το φιλτράρισμα με χρήση άμμου αποτελεί μια ενδιαφέρουσα λύση, είναι το οικονομικότερο όλων των συστημάτων και μπορεί να εφαρμοστεί και για μικρότερες εκμεταλλεύσεις (<10 στρεμμάτων). Άλλοι μέθοδοι αποστείρωσης κάνουν χρήση του όζοντος ή του ιωδίου που, όμως, δεν έχουν πρακτική εφαρμογή στο θερμοκήπιο εξαιτίας τεχνικών και οικονομικών δυσκολιών.

A.9. ΑΡΔΕΥΣΗ

Γενικά

Το νερό έχει αρχίσει να γίνεται ένας φυσικός πόρος σε ανεπάρκεια, ιδιαίτερα στις ξηροθερμικές περιοχές. Σύμφωνα με στοιχεία FAO (2002), ο γεωργικός κλάδος είναι ο μεγαλύτερος χρήστης γλυκού νερού, με ποσοστό 70% κατά μέσο όρο ενώ στις Μεσογειακές χώρες, στις οποίες το νερό αποτελεί περιοριστικό παράγοντα ανάπτυξης το ποσοστό αυξάνεται πάνω από το 80%. Και στην Ελλάδα η γεωργία είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής γλυκού νερού καταναλώνοντας περίπου το 78,2% για την άρδευση του 41,2% της καλλιεργούμενης έκτασης.

Η παραγωγή αγροτικών προϊόντων απαιτεί τη κατανάλωση μεγάλων όγκων νερού. Για την παραγωγή 1 kg ξηράς ουσίας π.χ. τομάτας, σιταριού, ρυζιού και πατάτας απαιτούνται 0,6 m³ έως 1,0 m³, 0,9 m³, 1,9 m³ και 0,5 m³ αντίστοιχα. Ωστόσο η απόδοση μιας καλλιέργειας βελτιώνεται με την αύξηση του νερού άρδευσης μέχρι ενός σημείου κορεσμού πέραν του οποίου η παραγωγή δεν αυξάνει (Hillel, 1997).

Στη χώρα μας στη προσπάθεια να υπάρξει μια ολοκληρωμένη διαχείριση και μια αποτελεσματική εφαρμογή των υδατικών πόρων, άρχισε ήδη να εφαρμόζεται μια πολιτική τιμολόγησης του νερού άρδευσης σύμφωνα με την Οδηγία (ΕΕ) WFD 60/2000 για το νερό. Η τιμή του νερού άρδευσης ποικίλει σε μεγάλο εύρος μεταξύ των διάφορων περιοχών, αλλά και μέσα στην ίδια περιοχή, ανάλογα με τον διαχειριστή του έργου. Στη Κρήτη για παράδειγμα στη περιοχή της Δυτ. Κισσάμου το νερό άρδευσης από τα έργα του ΟΑΔΥΚ (Οργανισμός Ανάπτυξης Δυτικής Κρήτης) κοστίζει από 0,15 έως 18 €/m³, όταν στα έργα που διαχειρίζονται οι Δήμοι κοστίζει από 0,18 έως 0,25 €/m³ με το κόστος να αυξάνει στην περίπτωση ιδιωτικών γεωτρήσεων στα 0,35 έως 0,40 €/m³ (Chartzoulakis et al., 2001).

Η άνιση κατανομή των βροχοπτώσεων, τα ακραία καιρικά φαινόμενα, οι σοβαροί περιορισμοί για την ανάπτυξη νέων πηγών νερού (ιδιαίτερα από τους υπόγειους υδροφορείς) και οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις έχουν σαν αποτέλεσμα τα φαινόμενα λειψυδρίας που παρατηρούνται σε ορισμένες περιοχές της χώρας. Σε μια προσπάθεια για μια δίκαιη κατανομή και μια

ορθολογική χρήση αυτού του πολύτιμου φυσικού πόρου σε Εθνικό επίπεδο, η διαχείριση της ποιότητας είναι το ίδιο σημαντική όσο και η διαχείριση της ποσότητας. Η κυριότερη πηγή μόλυνσης τόσο του επιφανειακού όσο και του υπόγειου νερού είναι η γεωργία με τη μαζική χρήση των αγροχημικών. Η αύξηση των αρδεύσεων σε συνδυασμό με την αναποτελεσματική τεχνολογία των αρδευτικών συγκροτημάτων και τη μη σωστή εφαρμογή των ποσοτήτων νερού που αρδεύονται, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αλατότητας των εδαφών, κυρίως στις ξηροθερμικές περιοχές. Η διείσδυση του υφάλμυρου νερού στους (παραλιακούς κυρίως) υδροφορείς λόγω υπεράντλησης, αποτελεί επίσης μια σοβαρή αιτία υποβάθμισης της ποιότητας του νερού. Το πρόβλημα της υποβάθμισης του γλυκού νερού αναμένεται να ενταθεί στο μέλλον λόγω αύξησης της εντατικοποίησης της γεωργίας. Κατά συνέπεια, γίνεται καθοριστική η ανάγκη βελτίωσης της αποδοτικότητας των αρδεύσεων (δηλαδή η σχέση μεταξύ ποσότητα νερού που εφαρμόζεται προς την απόδοση της καλλιέργειας) για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας του γεωργικού συστήματος ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί στην αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση τροφίμων και γεωργικών προϊόντων.

Η αποδοτικότητα της άρδευσης εξαρτάται από τη μέθοδο άρδευσης (καταιονισμός, στάγδην κλπ) και το προγραμματισμό, με τον οποίο καθορίζεται τόσο ο όγκος του αρδευόμενου νερού όσο και η συχνότητα εφαρμογής. Συνεπώς ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα άρδευσης έχει τεράστιες επιπτώσεις στη τελική παραγωγή και στη ποιότητα. Από την άλλη πλευρά, η υπερβολική άρδευση αυξάνει τις απαιτήσεις της καλλιέργειας σε θρεπτικά συστατικά και την ευπάθειά της στις ασθένειες, το ενεργειακό κόστος άντλησης, τη ρύπανση του περιβάλλοντος εξαιτίας της έκπλυσης θρεπτικών συστατικών που εφαρμόζονται στη καλλιέργεια με τη συμβατική λίπανση ή με την υδρολίπανση. Οι Thompson et al., 2007 αναφέρει ότι η ανεπαρκής διαχείριση της στάγδην άρδευσης, η οποία σε πολλές περιπτώσεις εξακολουθεί να βασίζεται στην εμπειρία του καλλιεργητή, είναι ένας από τους λόγους έκπλυσης νιτρικών στη παραγωγή τομάτας θερμοκηπίου στην Αλμερία της Ισπανίας.

Συνεπώς, στόχος ενός αποτελεσματικού προγράμματος άρδευσης είναι να παρέχει στη καλλιέργεια την ποσότητα νερού που χρειάζεται όταν τη χρειάζεται, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες λόγω αποστράγγισης. Για την

επίτευξη αυτού του στόχου διάφορες λύσεις έχουν προταθεί για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων, η καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα (Jones, 2004). Παρά το γεγονός ότι καινοτόμες μέθοδοι που βασίζονται στην άμεση παρακολούθηση της σχέσης φυτού/νερού έχουν προταθεί για τον έλεγχο της άρδευσης (μέτρηση μικρο-μεταβολών της διαμέτρου του βλαστού και φρούτων, το πάχος του φύλλου, τη στοματική αγωγιμότητα, τη θερμοκρασία του φύλλου κλπ.) η διαχείριση των αρδεύσεων βάση παραμέτρων που σχετίζονται άμεσα με το φυτό δεν έχει πρακτικά επεκταθεί εμπορικά στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες.

Η περισσότερο διαδεδομένη μέθοδος ελέγχου της άρδευσης βασίζεται στον προσδιορισμό της υγρασίας του υποστρώματος, η οποία εμπλέκει την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής (ETc). Σε γενικές γραμμές η εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται βάση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (ή αναφοράς ETc) μέσω μετρήσεων ενός μετρολογικού σταθμού και τους συντελεστές της καλλιέργειας (Allen et al., 1999) οι οποίοι είναι διαφορετικοί για κάθε καλλιέργεια και για κάθε στάδιο ανάπτυξης.

Η άλλη προσέγγιση για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων χρησιμοποιεί αισθητήρες για την ανίχνευση του ποσοστού της υγρασίας στη ριζοσφαίρα (Rout Zone Sensor, RZS) και την αναπλήρωση της σε προκαθορισμένα επίπεδα υγρασίας (set point). Η μέθοδος αυτή παρακάμπτει την ανάγκη υπολογισμού της εξατμισοδιαπνοής και μπορεί να εφαρμοσθεί για κάθε καλλιέργεια, εφόσον έχει προηγηθεί η σωστή επιλογή των σημείων set-point για τον ελεγκτή της άρδευσης. Μέχρι στιγμής η χρήση των εδαφικών αισθητήρων υγρασίας για τον έλεγχο της άρδευσης είναι λιγότερο διαδεδομένη από ότι η εφαρμογή μεθόδων βάση υπολογισμού του υδατικού ισοζυγίου. Η ανάπτυξη νέων τύπων αισθητήρων εδαφικής υγρασίας οι οποίοι βασίζουν τη λειτουργία τους στη μέτρηση των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του εδάφους, έχει ανοίξει νέες προοπτικές για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων και σήμερα, μετά τις αμφιβολίες των πρώτων εφαρμογών με τη χρήση Gypsum block, η βιομηχανία των αρδεύσεων σε όλο το κόσμο αναγνωρίζει τους αισθητήρες εδαφικής υγρασίας ως πολύτιμα εργαλεία στη σύγχρονη τεχνολογία των έξυπνων συστημάτων για την εφαρμογή των αρδεύσεων στην εντατική γεωργία. Προς το παρόν τουλάχιστον, ακριβοί και

εξελιγμένοι αισθητήρες όπως οι αισθητήρες ανίχνευσης νετρονίων (Neutron Scattering Method) (Steven, 2003) δεν έχουν εμπορικές εφαρμογές.

A.10. Υδραυλικά χαρακτηριστικά υποστρώματος

Τα στερεά πορώδη υποστρώματα υδροπονίας συγκρατούν υγρασία λόγω ελκτικών δυνάμεων και δυνάμεων συνάφειας που αναπτύσσονται μεταξύ της επιφάνειας της στερεάς ουσίας των υποστρωμάτων και των μορίων του νερού, σε ποσοστό που προσδιορίζεται από το ολικό πορώδες του υποστρώματος, την υδατοϊκανότητα του φυτοδοχείου (θ_{cc} , container capacity), του ποσοστού του εύκολα διαθέσιμου νερού (easily available water EAW) και από τη σχετική πυκνότητα του υποστρώματος.

Η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε νερό μπορεί να εκφραστεί με όρους ενέργειας (υδατικό δυναμικό ή μύζηση θ_{ψ} ή h , εκφράζεται συνήθως σε kPa, cm κλπ) ή ως συνολική ποσότητα νερού (θ , συνήθως εκφράζεται σε μονάδες όγκου). Αμφότερες οι μέθοδοι έχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ο καθορισμός του υδατικού δυναμικού στο υπόστρωμα δείχνει το πόσο εύκολα διαθέσιμο (για την απορρόφηση του από το ριζικό σύστημα) είναι το νερό αλλά δεν παρέχει πληροφορίες για την συνολική περιεκτικότητα του νερού ή το εύκολα διαθέσιμο νερό στο υπόστρωμα. Αντιστρόφως η κατ' όγκο περιεκτικότητα νερού στο υπόστρωμα δείχνει τη ποσότητα του νερού που περιέχει το υπόστρωμα μια δεδομένη χρονική στιγμή αλλά δεν παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη διαθεσιμότητά του για τα φυτά.

Στις εκτός εδάφους καλλιέργειες (το ίδιο ισχύει και για το έδαφος) η σχέση μεταξύ της κατ' όγκο περιεκτικότητας νερού (θ) και του υδατικού δυναμικού (θ_{ψ}) του υποστρώματος περιγράφεται από τις χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας (water retention curve WRC) σε κάθε σημείο της οποίας αντιστοιχεί ένα ζεύγος τιμών για θ και θ_{ψ} . Η χαρακτηριστική καμπύλη υγρασίας εξαρτάται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος και κατασκευάζεται πειραματικά βάση τυποποιημένων μεθόδων (για παράδειγμα με τη μέθοδο που περιγράφεται από τον De Boodt and Verdonck, 1972 ή τη EN 13041) και μπορεί να μοντελοποιηθεί (Van Genuchten, 1980; Van Genuchten and Nielsen, 1985). Το μοντέλο Van Genuchten πηγάζει από μια

ανάλυση των Brooks και Corey (1964) και δίνει την περιεχόμενη υγρασία θ συναρτήσει της μύζησης (h σε cm)

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) (\alpha h)^L + \theta_r$$

όπου θ_s είναι η ποσότητα νερού που περιέχεται σε κορεσμένο υπόστρωμα, θ_r είναι η υπολειμματική περιεκτικότητα σε νερό (η υγρασία που αντιστοιχεί στο $d\theta/dh=0$, εκεί δηλαδή όπου η πρώτη παράγωγος της χαρακτηριστικής καμπύλης υγρασίας ως προς το h μηδενίζεται), L είναι ο «δείκτης κατανομή μεγέθους πόρων». Προκειμένου να παρέχει μια μεγαλύτερη ευελιξία στην εφαρμογή του μοντέλου, Van Genuchten (1980) πρότεινε:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha h)^n]^m \quad \text{Εξίσωση 1.1}$$
$$m = 1 - (1/n)$$

στο οποίο όλες (πέντε) οι παράμετροι είναι ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι παραμετροί θ_s , θ_r και h είναι γνωστές εμπειρικές παράμετροι που προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις, ενώ, οι παράμετροι n και α είναι άγνωστοι (παράμετροι που εξαρτώνται από τα φυσικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος) και προσδιορίζονται με μη γραμμικές μεθόδους ανάλυσης των ελαχίστων τετραγώνων βάσει των μετρήσεων των θ_s , θ_r και h .

Ωστόσο χρησιμοποιώντας τις σχετικές καμπύλες υγρασίας, χαρακτηριστικές για κάθε υπόστρωμα, μπορεί να οδηγηθούμε σε εσφαλμένα συμπεράσματα γιατί χαρακτηρίζονται από μια χρονική μεταβλητότητα καθώς τα φυσικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος (ειδικά το μέγεθος των πόρων και η χωρική κατανομή τους) μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, λόγω ανάπτυξης του ριζικού συστήματος και τη σταδιακή αποδόμηση των δομικών στοιχείων του υποστρώματος.

Τα φυτά πρέπει να υπερνικήσουν τη μύζηση υποστρώματος ώστε να μπορέσουν να αποσπώντας νερό από αυτό και να το χρησιμοποιήσουν για τις φυσιολογικές τους λειτουργίες. Για κάποια σημεία της καμπύλης οι πληροφορίες που δίνουν για το ποσοστό υγρασίας του υποστρώματος είναι σημαντικές στο προγραμματισμό των αρδεύσεων. Τέτοια σημεία είναι:

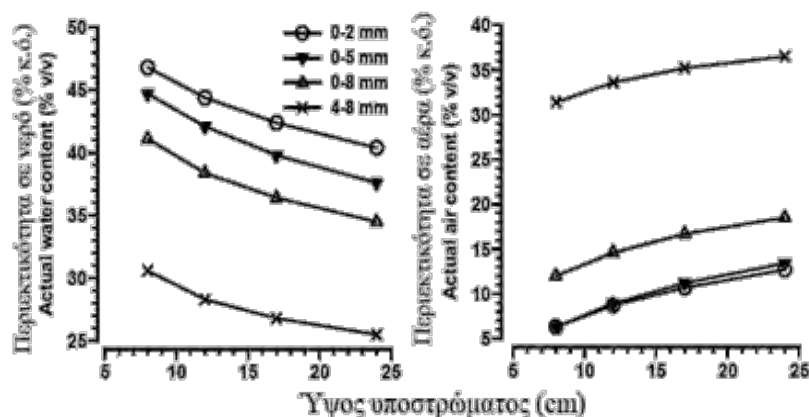
- Η περιεκτικότητα κατά όγκο υγρασία θ (v.v%) για μύζηση 10cm στήλης νερού (-1 KPa). Αυτό το ποσοστό υγρασίας ονομάζεται Υδατοϊκανότητα φυτοδοχείου (θ_{cc} , container capacity) και εκφράζει την μέγιστη περιεκτικότητα (%) ενός υποστρώματος σε υγρασία σε συνθήκες ανεμπόδιστης στράγγισης (αλλά πριν την εξάτμιση).
- Η διαφορά θ για μύζηση -1 και -5 KPa (10 και 50 cm στήλης νερού), η οποία αντιπροσωπεύει το εύκολα Διαθέσιμο Νερό (ΕΔΝ, Easy Available Water EAW) το οποίο και μπορεί να αντληθεί από τα φυτά χωρίς να καταναλωθούν σημαντικά ποσά ενέργειας
- Η διαφορά θ για μύζηση -5 και -10 KPa (50 και 100 cm στήλης νερού), ονομάζεται Ρυθμιστική Περιεκτικότητα Νερού (ΡΠΝ, Water Buffering Capacity-WBC).

Ανάλογα με τη φύση του υποστρώματος, το ποσοστό του εύκολα διαθέσιμου νερού (EAW) κυμαίνεται από 7 έως 35% και τείνει να αυξηθεί ανάλογα με την αύξηση του πορώδους και τη πυκνότητα του υλικού. Για μεγαλύτερες τιμές μύζησης, το νερό είναι από πολύ δύσκολα έως καθόλου διαθέσιμο για τα φυτά (στα 1500 KPa αντιστοιχεί το σημείο μόνιμης μάρανσης (Unavailable Water UW), πέραν από το οποίο τα φυτά έχουν μηδενική δυνατότητα άντλησης νερού (Saxton et al., 2006). Η διαφορά μεταξύ του θ_{cc} και UW είναι η διαθέσιμη ποσότητα νερού για την ανάπτυξη των φυτών (Available Water, AW).

Οι παραγωγοί πρέπει να επιλέγουν τον κατάλληλο συνδυασμό υπόστρωμα/φυτοδοχείο ώστε, πέραν του να ταιριάζει στην ανάπτυξη του ριζικού συστήματος της επιλεγμένης καλλιέργειας (Biran and Eliassaf, 1980), να εξασφαλίζεται και απαραίτητη ποσότητα νερού και αέρα στα φυτά και για τα διάφορα στάδια ανάπτυξης. Η EAW φυτοδοχείου (EAW cont) εξαρτάται και από τα φυσικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος και από τη γεωμετρία του φυτοδοχείου, ιδίως από το ύψος του το οποίο επηρεάζει την αποστράγγιση: το μεγαλύτερο ύψος του φυτοδοχείου αυξάνει το ποσοστό του νερού που αποστραγγίζεται μειώνοντας κατά κανόνα την υδατοϊκανότητα ή υδατοχωρητικότητα του φυτοδοχείου (Fonteno 1989; Bilderback and Fonteno, 1987) (Σχήμα1.1). Πολλά υποστρώματα χαρακτηρίζονται από μικρή διαφορά

στην περιεκτικότητα σε νερό μεταξύ της κατάστασης κορεσμού και μύζησης - 1Κra (10 cm στήλη νερού), με συνέπεια να παρουσιάζουν προβλήματα ανεπαρκούς αερισμού. Τα προβλήματα αυτά εμφανίζονται κυρίως όταν το ύψος του υποστρώματος στο κανάλι, το φυτοδοχείο ή στον σάκο που το φιλοξενεί είναι χαμηλό (κάτω από 15 cm) (Gizas and Savvas, 2007). Στις περιπτώσεις αυτές το υπόστρωμα πρέπει να τοποθετείται σε σάκους, ή άλλου είδους φυτοδοχεία με αυξημένο ύψος και ανάλογα μειωμένο πλάτος.

Αντίθετα, η καλλιέργεια σε χονδρόκοκκα υποστρώματα συνδέεται με προβλήματα ανεπαρκούς συγκράτησης νερού. Στις περιπτώσεις αυτές συνιστάται η τοποθέτηση του υποστρώματος σε μικρό ύψος (μέχρι 10 cm) με αντίστοιχη αύξηση της οριζόντιας επιφάνειας ανά μονάδα όγκου. Παράλληλα, τα φυτά που καλλιεργούνται σε σχετικά χονδρόκοκκα υποστρώματα πρέπει να αρδεύονται συχνότερα με αντίστοιχη μείωση της δόσης νερού ανά κύκλο άρδευσης.



Σχήμα 1.1: Μεταβολές στην περιεκτικότητα τεσσάρων τύπων ελαφρόπετρας σε νερό και αέρα στην κατάσταση της υδατοϊκανότητας σε συνάρτηση με το ύψος σε ένα φυτοδοχείο με ίδιο εμβαδόν εγκάρσιας τομής σε όλο το ύψος τους (Savvas, 2007).

A.11. Προγραμματισμός της άρδευσης

Στη καλλιέργεια εκτός εδάφους σε στερεό υπόστρωμα, ο προγραμματισμός της δόσης και της συχνότητας της άρδευσης είναι απαραίτητος προκειμένου να μεγιστοποιήσουμε την απόδοση της καλλιέργειας και να ελαχιστοποιήσουμε την περιβαλλοντική μόλυνση λόγω έκπλυσης των λιπασμάτων. Οι Thompson et al. (2007) αναφέρουν ότι ακατάλληλες πρακτικές στην άρδευση είναι η αιτία για την έκπλυση μεγάλων ποσοτήτων νιτρικών από θερμοκηπιακές καλλιέργειες τομάτας στην Αλμερία της Ισπανίας. Ο ετήσιος όγκος νερού που χρησιμοποιείται στην άρδευση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών κυμαίνεται από 150 έως 200 mm (Lm^{-2}) για καλλιέργειες με βραχύ καλλιεργητικό κύκλο, όπως για παράδειγμα τα φυλλώδη λαχανικά και από 1000 έως 1500 mm (Lm^{-2}) για καλλιέργειες με μεγαλύτερη περίοδο καλλιέργειας όπως η τομάτα και το κολοκύθι. Μια υπερβολική άρδευση ή μια ελλειμματική άρδευση μπορεί να επηρεάσει την ανάπτυξη των φυτών και την απόδοση της καλλιέργειας. Για παράδειγμα μπορεί να αυξήσει τις φυσιολογικές διαταραχές (όπως τον αριθμό των ταξιανθιών σε τομάτα και πιπεριά, (Savvas et al. 2009) ή την ευαισθησία του ριζικού συστήματος σε παθογόνα (Saha et al., 2008). Οι Burnett and van Iersel, (2008), με στόχο να προσδιορίσουν τις επιπτώσεις του ποσοστού υγρασίας στο υπόστρωμα, στη μορφολογία και στην ανάπτυξη της *Gaura lindheimeri*, χρησιμοποιώντας ένα ελεγκτή εδαφικής υγρασίας (EC-5, Decagon Devices) για τον έλεγχο της περιεκτικότητας του νερού στο υπόστρωμα, έδειξαν ότι ο έλεγχος της υγρασίας του υποστρώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της επιμήκυνσης των ανεπιθύμητων βλαστών.

Ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα άρδευσης πρέπει να αποσκοπεί στο να διατηρείται η περιεκτικότητα του υποστρώματος σε νερό εντός των ορίων του εύκολα διαθέσιμου νερού για τα φυτά, χωρίς να αυξάνεται σημαντικά η ηλεκτρική αγωγιμότητα στη περιοχή της ρίζας. Έτσι η συχνότητα της άρδευσης μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας συναρτήσει της διαπνοής των φυτών που αποτελεί τον κύριο παράγοντα ζήτησης νερού από τα φυτά. Κρίσιμο σημείο στην διαδικασία αποτελεί ο υπολογισμός της χρονικής στιγμής έναρξης της άρδευσης και ο υπολογισμός της ποσότητας του νερού που θα

χορηγηθεί σε κάθε αρδευτικό κύκλο. Πράγματι, οποιοδήποτε και εάν είναι το αρδευτικό σύστημα που χρησιμοποιείτε, μια διαχείριση της άρδευσης για να είναι αποτελεσματική είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός πλήθους δεδομένων ικανά να παρέχουν σαφή εικόνα για την υδατική κατάσταση του συστήματος υπόστρωμα - φυτά - εσωτερική ατμόσφαιρα θερμοκηπίου. Επιπροσθέτως τα δεδομένα αυτά πρέπει να μπορούν να επεξεργασθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν την κατάλληλη πληροφορία.

Σε γενικές γραμμές οι παράγοντες τους οποίους πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη και οι μέθοδοι που ακολουθούνται στη κατάρτιση ενός προγράμματος άρδευσης διακρίνονται σε (Baille, 1994; Hsiao, 1990):

- Μέθοδοι που βασίζονται σε παραμέτρους που σχετίζονται με την υγρασία του υποστρώματος (ποσοστό υγρασίας και υδατικό δυναμικό).
- Μέθοδοι που βασίζονται στην επεξεργασία των κλιματικών δεδομένων για την εκτίμηση των υδατικών αναγκών της καλλιέργειας.
- Μέθοδοι που βασίζονται σε άμεσες μετρήσεις των φυτών (πάχος του φύλλου, θερμοκρασία, στοματική αγωγιμότητα, μικρομεταβολές της διαμέτρου των βλαστών).

Το επόμενο βήμα, μετά τη συλλογή των δεδομένων από το υπόστρωμα, τα φυτά και το κλίμα αποτελείται από τρία διαδοχικά στάδια:

1. Επεξεργασία των δεδομένων για την απόκτηση της πληροφορίας (δυναμική εξατμισοδιαπνοή, δείκτες stress κλπ).
2. Λήψη αποφάσεων (για παράδειγμα πότε και με τη ποσότητα πρέπει να αρδεύσουμε).
3. Εκτέλεση απόφασης.

Οι πηγές των δεδομένων μπορεί να ταξινομηθούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

1. Δεδομένα που προέρχονται από (μάκρο-) παρατηρήσεις της καλλιέργειας και του περιβάλλοντος και μπορεί να έχουν ποιοτικά χαρακτηριστικά (δείκτες stress, δείκτης ευρωστίας των φυτών) ή ποσοτικά (συντελεστής καλλιέργειας, δείκτης φυλλικής επιφάνειας).

2. Δεδομένα αισθητήρων για το υπόστρωμα το περιβάλλον και τα φυτά (Baille, 1994).

Ένα παράδειγμα συνδυασμού πληροφορίας που προέρχεται τόσο από δεδομένα αισθητήρων και από παρατήρηση της καλλιέργειας για τον υπολογισμό των υδατικών αναγκών καλλιέργειας θερμοκηπίου δίνετε από την γνωστή εξίσωση :

$$ET=Kc ETc = Kc \alpha G$$

Όπου ETc : είναι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή η οποία θεωρείται ότι εξαρτάται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, G , α : είναι μια εμπειρική σταθερά που εξαρτάται την περατότητα του καλύμματος του θερμοκηπίου και το ποσοστό της ακτινοβολίας που εμπλέκεται στο φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής και Kc : είναι ο συντελεστής καλλιέργειας (de Villele, 1972). Σε αυτό το μοντέλο οι πληροφορίες για την καλλιέργεια λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του Kc ενώ οι πληροφορίες για το κλίμα στον συντελεστή α και στην ηλιακή ακτινοβολία. Όταν η εξατμισοδιαπνοή αγγίζει ένα προκαθορισμένο όριο ξεκινά η άρδευση για την αναπλήρωση της χαμένης ποσότητας νερού από το υπόστρωμα με δόσεις έως το προκαθορισμένο σημείο (set point) που έχουμε ορίσει. Η αξιοπιστία αυτού του μοντέλου εξαρτάται από την ακρίβεια με την οποία υπολογίζεται η ETc . Ωστόσο στην περίπτωση των εκτός εδάφους συστημάτων η ακρίβεια και μόνο των μετρήσεων της ETc , μπορεί να μην επαρκεί για την κατάρτιση ενός αποτελεσματικού προγράμματος άρδευσης. Πράγματι στην περίπτωση αυτή απαιτούνται δεδομένα για βραχυπρόθεσμα χρονικά διαστήματα (ωριαία ή μικρότερα της μιας ώρας) ειδικά όπως συμβαίνει στα Μεσογειακά κλίματα στα οποία απαιτείται συχνή άρδευση. Τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν από τον Baille et al., (1994) σε καλλιέργεια τριανταφυλλιάς επιβεβαιώνουν ότι η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής που βασίζεται αποκλειστικά στη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας αν και ισχύει σε ημερήσια κλίμακα δεν επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό των αναγκών σε νερό της καλλιέργειας για μια μικρότερη χρονική κλίμακα (ωριαία ή και μικρότερη). Επίσης ο προγραμματισμός της άρδευσης με βάση μόνο εκτιμήσεις της διαπνοής των φυτών, μπορεί να είναι μια αξιόπιστη μέθοδος για συνθήκες κλίματος μεταξύ 200 και 600 cal cm⁻²

day⁻¹, ενώ οδηγεί σε μια υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση της διαπνοής έξω από αυτό το διάστημα. Έτσι λοιπόν στη περίπτωση των υδροπονικών καλλιεργειών, κρίνεται απαραίτητη η κατασκευή πιο περίπλοκων μοντέλων τα οποία μπορούν να ενσωματώσουν και άλλες μεταβλητές που σχετίζονται με το φυτό (δείκτης φυλλικής επιφάνειας), με το μικροκλίμα (όπως το έλλειμμα πίεσης υδρατμών, Vapor Pressure Deficit, VPD, Jolliet ad Bailey, 1992), ή με το υπόστρωμα (μύζηση ή ποσοστό υγρασίας, είτε με τη θερμοκρασία του υποστρώματος Okuya ad Okuya, 1988). Έχουν προταθεί υπολογιστικά μοντέλα πολλά εκ των οποίων έχουν ως βάση την εξίσωση Penman-Monteith (P-M). Τα μοντέλα αυτά στον υπολογισμό για το υδατικό ισοζύγιο της καλλιέργειας δεν λαμβάνουν υπόψη μόνο τη παράμετρο της εσωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της εξωτερικής συνολικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας, αλλά και μια παράμετρο που εξαρτάται κυρίως από την έλλειψη κορεσμού του εσωτερικού αέρα (Jolliet ad Bailley, 1992; Bailley et al., 1993). Συνεπώς ο ενεργητικός έλεγχος της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (συστήματα Misting ή Fog) είναι, ως εκ' τούτου, ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη μείωση της διαπνοής (Cohen et al., 1987; Baille et al., 1994) και συνεπώς της συχνότητας άρδευσης.

Άλλοι ερευνητές χρησιμοποιούν απευθείας την εξίσωση των P-M θεωρώντας τη στοματική αγωγιμότητα συνάρτηση των παραμέτρων του μικροκλίματος (Stanghelini ad Van Meuers, 1989; 1992; Baille, 1992). Τα μοντέλα αυτά έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια από τα προηγούμενα και μπορεί να εφαρμοσθούν για μικρής κλίμακας χρονικά διαστήματα (απαραίτητο στη περίπτωση των εκτός εδάφους καλλιέργειες), ωστόσο απαιτείται ο υπολογισμός του ελλείμματος κορεσμού του αέρα και του δείκτη φυλλικής επιφάνειας (Baille, 1994). Ένα άλλο πρόβλημα των μοντέλων αυτών είναι ότι ο συντελεστής K_c, ο οποίος εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης, την καλλιεργητική τεχνική και τη διάρκεια του καλλιεργητικού κύκλου (Malura et al., 1993; Lazzara and Rana.), πρέπει να υπολογίζεται με μεγάλη ακρίβεια για όλη τη διάρκεια του καλλιεργητικού κύκλου. Ο έλεγχος της άρδευσης βάση ολοκλήρωσης ηλιακής ακτινοβολίας, συνεπώς, μπορεί να παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο με την επιλογή της πραγματικής τιμής του συντελεστή K_c και όχι βάση μιας προκαθορισμένης ενιαίας τιμής.

Πράγματι, η ζήτηση της καλλιέργειας για νερό κατά τη διάρκεια των διαφορετικών σταδίων ανάπτυξης αλλάζει δραματικά. Επιπλέον εργασίες όπως το κορφολόγημα των φυτών, η απομάκρυνση των πλάγιων βλαστών, η συλλογή των καρπών, επιφέρουν μεταβολές στις απαιτήσεις για άρδευση που δύσκολα μπορεί να ποσοτικοποιηθούν. Για παράδειγμα σε καλλιέργεια τριανταφυλλιάς, με την απομάκρυνση ενός πλάγιου βλαστού το φυτό στερείται 200 – 600 cm² φυλλική επιφάνεια (Baille et al., 1991). Βάση της κατανάλωσης νερού από τη καλλιέργεια και την ηλιακή ακτινοβολία που καταγράφηκε σε καλλιέργεια τριανταφυλλιάς σε περλίτη, οι μικρότερες τιμές για το συντελεστή Kc καταγράφηκαν στο στάδιο συλλογής των ανθών και κατά το κλάδεμα της καλλιέργειας (De Pascale ad Paradiso, 2000).

A.12. Υπολογισμός δόσης Άρδευσης

Ο προσδιορισμός της βέλτιστης δόσης άρδευσης απαιτεί τον υπολογισμό δυο ποσοτήτων: την καθαρή δόση άρδευσης (Inet) και της πραγματικής δόσης άρδευσης (Igross) (που εκφράζονται σε L m⁻²).

Η πρώτη ποσότητα αντιστοιχεί στη μέγιστη διακύμανση του ποσοστού υγρασίας (θ) στο υπόστρωμα που μπορεί να είναι ανεκτή από την καλλιέργεια και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{net} = EAW_{cont} / 100 * V_{cont} * f \quad \text{Εξίσωση 1.2}$$

όπου EAW_{cont} (%) είναι το εύκολα διαθέσιμο νερό στο σύστημα δοχείο-υπόστρωμα, V_{cont} είναι ο όγκος του υποστρώματος (L m⁻²) και f (αδιάστατος) είναι ένας συντελεστής άρδευσης της καλλιέργειας που κυμαίνεται από 0.05 έως 1.0: όσο χαμηλότερος είναι ο f, τόσο μικρότερη είναι η μεταβολή στην υγρασία του υποστρώματος με αποτέλεσμα τόσο πιο σύντομη να είναι και η διάρκεια της άρδευσης.

Ως εκ τούτου ο συντελεστής f πρέπει να επιλέγεται σύμφωνα με: τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος, τη διάταξη του συστήματος άρδευσης η οποία επηρεάζει την ομοιομορφία κατανομής της άρδευσης και καθορίζει την ελάχιστη διάρκεια του κάθε αρδευτικού κύκλου, και τέλος, τα

φυσιολογικά χαρακτηριστικά της καλλιέργειας. Η πραγματική δόση άρδευσης γενικά είναι υψηλότερη από την I_{net} καθώς γενικά η άρδευση με περίσσια ποσότητα από τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας είναι αναγκαία λόγω: α) της άνισης διαπνοής των μεμονωμένων φυτών της καλλιέργειας, β) τις διαφορές στην παροχή των επιμέρους σταλακτήρων και συνακόλουθα την άνιση κατανομή του νερού, γ) την ανάγκη να αποφευχθεί η συσσώρευση αλάτων στο περιβάλλον της ρίζας.

Συνεπώς η I_{net} υπολογίζεται ως:

$$I_{gross} = I_{net} * K_s$$

Εξίσωση 1.3

όπου K_s (αδιάστατη) είναι ένας συντελεστής ασφαλείας.

Σε κάθε αρδευτικό κύκλο το ποσοστό της αποστράγγισης (drain fraction DF), ορίζεται ως η εκατοστιαία αναλογία μεταξύ του όγκου νερού εφαρμογής και του όγκου που αποστραγγίζεται) και υπολογίζεται ως:

$$DF = 100 * (I_{gross} - I_{net}) / I_{gross}$$

Εξίσωση 1.4

K_s : εξαρτάται από την καλλιέργεια, την ομοιομορφία κατανομής του νερού και τον κίνδυνο εμφάνισης υψηλής αλατότητας στο υπόστρωμα. Οι τιμές για τον K_s κυμαίνονται από 1,15 (ομοιόμορφη καλλιέργεια και ομοιόμορφη κατανομή νερού, χρήση αρδευτικού νερού με σχετικά χαμηλή αλατότητα, υψηλή ανοχή της καλλιέργειας στην αλατότητα) έως 2,0 (μεγάλη μεταβλητότητα της ET μεταξύ των φυτών της καλλιέργειας, χαμηλή αποδοτικότητα διανομής του νερού από το σύστημα άρδευσης, χρήση υφάλμυρου νερού για άρδευση, ευαίσθητη καλλιέργεια), το οποίο οδηγεί σε ένα ποσοστό απορροής (DF) από 0,13 και 0,50 αντίστοιχα. Μια τιμή του K_s 1.30 (DF=23%) είναι αποδεκτή για τις περισσότερες συνθήκες.

Προφανώς, ο προσδιορισμός του συντελεστή K_s είναι μικρότερης σημασίας στη περίπτωση των κλειστών συστημάτων, αν και ένας μεγάλος συντελεστής K_s , συνεπώς και ένα υψηλό ποσοστό DF, αυξάνει το κόστος χρήσης νερού και της απολύμανσης του θρεπτικού διαλύματος. Η διάρκεια της άρδευσης (D_I , sec) κάθε εφαρμογής συνήθως είναι πολλή μικρή (της

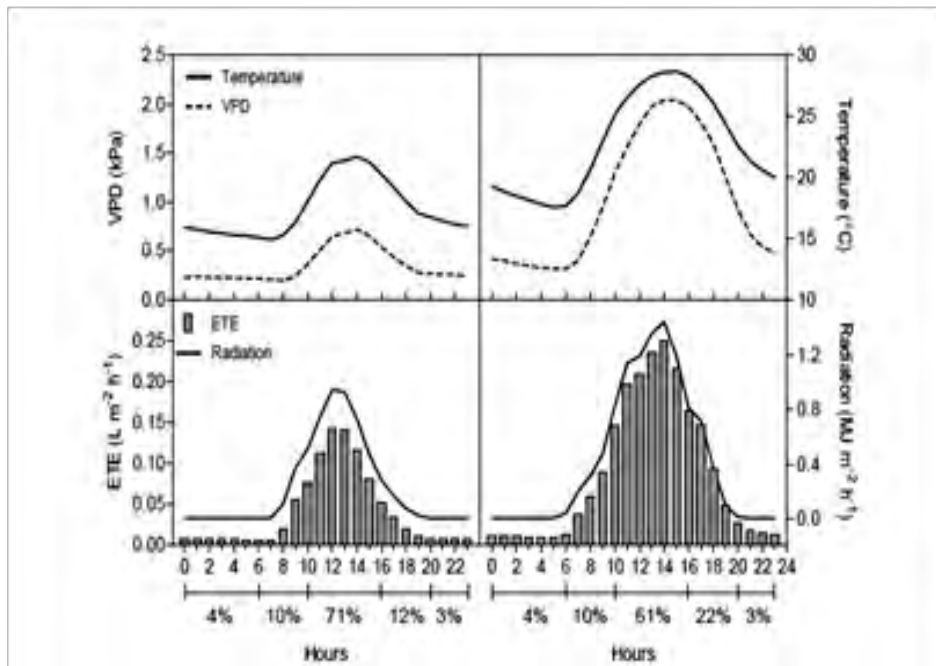
τάξης μερικών δεκάδων δευτερολέπτων έως λίγα λεπτά) και εξαρτάται από τη πυκνότητα (d : αριθμός σταλακτήρων ανά μονάδα επιφάνειας) και την παροχή (r : $l\ h^{-1}$) και υπολογίζεται ως εξής:

$$DI=d*3600/r \text{ [sec].}$$

Εξίσωση 1.5

A.13. Συχνότητα άρδευσης

Στα συστήματα εκτός εδάφους με καλλιέργεια σε υπόστρωμα η συχνότητα των αρδευτικών κύκλων συνήθως εξαρτάται και υπολογίζεται βάση της ηλιακής ακτινοβολίας, από την οποία εξαρτώνται η απορρόφηση του νερού από τα φυτά της καλλιέργειας (διαπνοή). Η ποσότητα του διαθέσιμου νερού στη πλειοψηφία των συστημάτων που χρησιμοποιούν υπόστρωμα ως βάση ανάπτυξης του φυτού ανέρχεται στα 10 Lit για κάθε τετραγωνικό μέτρο υποστρώματος, αρκετό συνήθως να ικανοποιήσει τις υδατικές ανάγκες της καλλιέργειας για 1-2 ημέρες. Πρέπει να προσθέσουμε ότι ο μεγάλος αριθμός των αρδευτικών κύκλων στόχο κυρίως έχει την αποφυγή της υπερβολικής αποστράγγισης και στεγνώματος του υποστρώματος, παρά σκοπό έχει να ικανοποιήσει αυξημένες ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό (Sonneveld, 2000). Γενικά η καλλιέργεια αρδεύεται αρκετές φορές κατά τη διάρκεια της ημέρας με την έναρξη των αρδευτικών εφαρμογών να συμπίπτει με τις πρώτες πρωινές ώρες. Περισσότερο από το 90% της ημερήσιας διαπνοής λαμβάνει χώρα κατά την περίοδο με ηλιοφάνεια που μπορεί να διαρκεί 10 ώρες (ή λιγότερο) κατά τους φθινοπωρινούς-χειμwnιατικούς μήνες και 12-14 ώρες την άνοιξη-καλοκαίρι (Εικόνα 3). Στα θερμαινόμενα θερμοκήπια ή κατά τις ξηρές περιόδους του έτους ή και στις ξηροθερμικές περιοχές, η άρδευση μπορεί να γίνει απαραίτητη και κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Εικόνα 1. Ωριαία διακύμανση της τιμής της διαπνοής (ET) σε ζέρμπερα θερμοκηπίου σε υπόστρωμα πετροβάμβακα σε μη θερμαινόμενο θερμοκήπιο υπό συνήθεις συνθήκες της Μεσογείου φθινόπωρο (αριστερά) και την άνοιξη (δεξιά). Η ET κατά τις νυκτερινές ώρες αντιπροσώπευαν το 7% των ημερήσιων ET και στις δυο εποχές.

Αποτέλεσμα έρευνας που πραγματοποιήθηκε σε υδροπονικά συστήματα με υπόστρωμα, βάση διαφορετικής συχνότητας άρδευσης δεν προέκυψαν στατιστικά μετρήσιμες διαφορές στην ανάπτυξη της καλλιέργειας, εκτός της περίπτωσης που χρησιμοποιείται μια πολύ χαμηλή συχνότητα άρδευσης (Sonneveld, 2000).

A.14. Στρατηγικές άρδευσης για τις εκτός εδάφους καλλιέργειες

Στα συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους, ο σχετικά μικρός όγκος του υποστρώματος που έχει στη διάθεσή του το ριζικό σύστημα σε συνδυασμό με την στάγδην άρδευση, μπορούν πολύ εύκολα να διαμορφώσουν συνθήκες υδατικής καταπόνησης με πολύ αρνητικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών εξαιτίας αστοχίας στην επιλογή της κατάλληλης στρατηγικής στον έλεγχο της υδρολίπανσης. Κατά συνέπεια απαιτείται μια προσεκτική διαχείριση της υδρολίπανσης (προγραμματισμός

της συχνότητας και της ποσότητας θρεπτικού διαλύματος για κάθε αρδευτικό κύκλο), που σκοπό δεν έχει μόνο τη μεγιστοποίηση των αποδόσεων και της τελικής παραγωγής αλλά και την προστασία του περιβάλλοντος, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται συστήματα ανοικτού κύκλου.

Στις εκτός εδάφους καλλιέργειες σε στέρεο πορώδες υπόστρωμα, στα οποία χορηγείται συνεχώς περίσσια ποσότητα φρέσκου θρεπτικού διαλύματος σε σχέση με τις πραγματικές ανάγκες της καλλιέργειας, μόνο το 60 έως 70% της χορηγούμενης ποσότητας απορροφάται από την καλλιέργεια. Το υπόλοιπο 30 έως 40% αποστραγγίζεται προκειμένου να διασφαλίζεται μια επαρκής έκπλυση του υποστρώματος και στη συνέχεια απορρίπτεται στο περιβάλλον (van Os et al., 1991). Στις ΗΠΑ το ποσοστό αποστράγγισης σε αυτά τα συστήματα είναι 40 έως 50%, αλλά μπορεί να αγγίξει και το 80%. Οι περίσσιες αυτές ποσότητες θρεπτικού διαλύματος, από τη μια πλευρά εξασφαλίζουν σταθερά ποσοστά υγρασίας και χαμηλές τιμές αλατότητας στο υπόστρωμα αλλά από την άλλη προκαλούν μια κατασπατάληση νερού και λιπασμάτων (υπολογίζεται σε 4-5 τόνους/εκτάριο /έτος) με πολύ αρνητικές επιπτώσεις τόσο στο κόστος παραγωγής όσο και για το περιβάλλον (van Noordwijk, 1990). Οι Malorgio et al. (2001) αναφέρουν ότι η ετήσια αποστράγγιση νερού και N από ανοικτό σύστημα καλλιέργειας τριανταφυλλιάς ανέρχεται αντίστοιχα σε 2123 m³/ha και 1477 kg ha⁻¹. Υψηλές τιμές αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος μπορεί να επιφέρουν μείωση στην ανάπτυξη των φυτών και στην τελική παραγωγή σε καλλιέργεια τομάτας σε ποσοστό 3 έως 4% για κάθε ds/m αλλά το κόστος του νερού άρδευσης αυξάνει με την ποιότητά του (Stangellini et al. 2005)

Στις υδροπονικές καλλιέργειες κατά κανόνα η άρδευση ελέγχεται από ένα αυτοματοποιημένο σύστημα βάση:

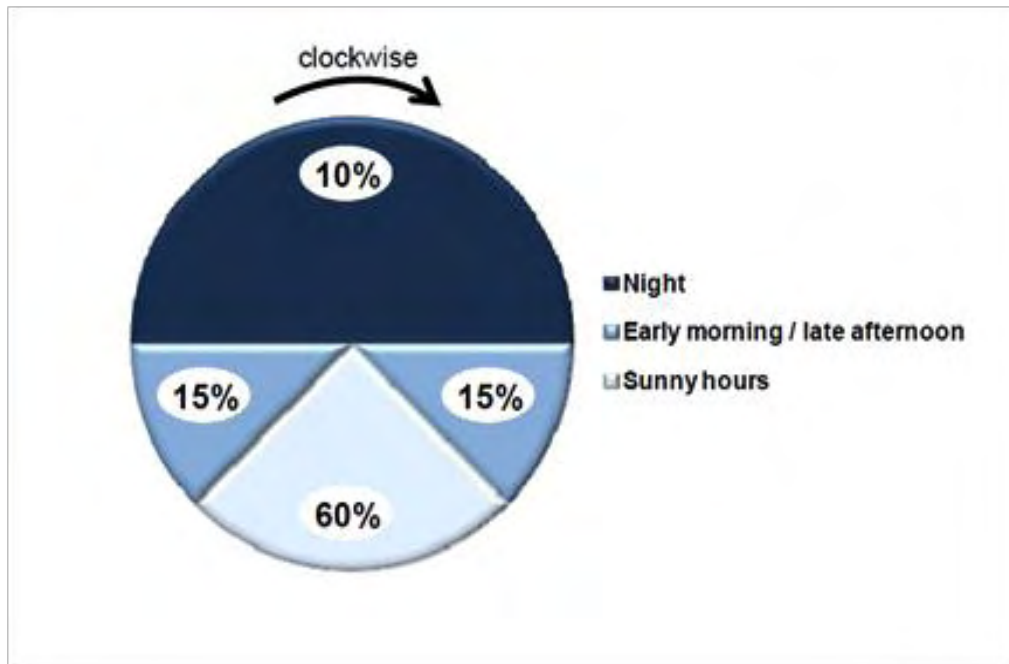
- Χρονοδιακόπτη, βασίζεται στην εμπειρία του καλλιεργητή για την ET της καλλιέργειας, μη ρυθμιζόμενη διεργασία (ανοιχτός βρόχος, open loop).
- Μοντέλων της ET της καλλιέργειας, προσέγγιση βάση μοντέλου ρύθμισης πρόδρασης, Feedforward control: στη ρύθμιση πρόδρασης μετράμε τις τιμές των διαταραχών και μεταβάλλουμε τις τιμές των

μεταβλητών ελέγχου, έτσι ώστε το καθαρό αποτέλεσμα των εισροών (μεταβλητές εισόδου) επί της διεργασίας να είναι η διατήρηση των μεταβλητών εξόδου στις επιθυμητές τιμές.

- Τον όγκο του διαλύματος της απορροής, που είναι μια βαρομετρική μέθοδος μέτρησης της ET με ρύθμιση ανάδρασης, Feedback control: το μετρούμενο σήμα εξόδου συγκρίνεται με το σήμα αναφοράς. Από τη σύγκριση αυτή υπολογίζεται το σφάλμα, με βάση την τιμή του οποίου υπολογίζονται οι νέες τιμές των μεταβλητών ελέγχου, έτσι ώστε οι μεταβλητές εξόδου να προσεγγίσουν τις επιθυμητές τιμές. Η ρύθμιση με ανάδραση προϋποθέτει την άμεση μέτρηση ή έμμεση εκτίμηση όλων των μεταβλητών εξόδου που θέλουμε να ρυθμίσουμε. Αντίθετα με τη ρύθμιση πρόδρασης, στη ρύθμιση ανάδρασης η διορθωτική αλλαγή στις τιμές των μεταβλητών ελέγχου επιβάλλεται μετά την είσοδο και δράση των διαταραχών επί της διεργασίας που έχει ως αποτέλεσμα την απόκλιση των ρυθμιζόμενων μεταβλητών από τις επιθυμητές τιμές.
- Αισθητήρες εδαφικής υγρασίας.

A.15. Άρδευση με βάση το χρονικό προγραμματισμό (Χρονόμετρο)

Όταν η άρδευση πραγματοποιείται βάση χρονικού προγραμματισμού, ο κανόνας που ισχύει είναι η κατανομή της ποσότητας νερού στη διάρκεια του 24ώρου όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα στο οποίο η ET χωρίζεται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους νωρίς το πρωί, ώρες μεγάλης ηλιοφάνειας, αργά το απόγευμα και βράδυ.



Πολλά εμπορικά θερμοκήπια για τον έλεγχο της άρδευσης εφαρμόζουν τον χρονικό προγραμματισμό για την άρδευση της καλλιέργειας χρησιμοποιώντας απλούς χρονοδιακόπτες on-off για την ενεργοποίηση ή την απενεργοποίηση του συστήματος άρδευσης. Ένα τέτοιο σύστημα όμως δεν λαμβάνει υπόψη τις ημερήσιες μεταβολές στην κατανάλωση νερού από την καλλιέργεια που οφείλονται στις μεταβολές των κλιματικών συνθηκών ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας, υγρασίας και την ταχύτητας του αέρα. Στην μέθοδο αυτή δυο τάσεις είναι εμφανείς:

- Η κατανάλωση νερού τείνει να αυξηθεί κατά τη διάρκεια του καλλιεργητικού κύκλου ως αποτέλεσμα της αύξησης του μεγέθους των φυτών.
- Η ημερήσια διακύμανση της κατανάλωσης του νερού από τα φυτά της καλλιέργειας εξαρτάται από το ποσοστό της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολία δηλαδή αύξηση της ηλιοφάνειας οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης νερού.

Παρά το γεγονός ότι καμία από τις δυο αυτές διαπιστώσεις δεν μας εκπλήσσει, το σίγουρο είναι ότι οι διακυμάνσεις της κατανάλωσης του νερού οδηγούν σε διακύμανση της περιεκτικότητας του νερού στο υπόστρωμα εάν δεν προβλεφθεί μια αποτελεσματική διαχείριση της άρδευσης.

A.16. Άρδευση με βάση προσομοίωση της ET

Η διαπνοή των φυτών εντός θερμοκηπίου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως την ηλιακή ακτινοβολία, την θερμοκρασία του αέρα, την υγρασία, την φυλλική επιφάνεια, την συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα και τέλος από την ταχύτητα του ανέμου (Stanghellini, 1987). Μεταξύ των διαφορετικών προσεγγίσεων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ET, η εξίσωση Penman-Monteith (PM), ήταν και παραμένει ένα πρότυπο αναφοράς (Allen et al., 1998; Walter et al., 2002; Ventura et al., 1999).

Μοντέλα διαφορετικής πολυπλοκότητας έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη της ET σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Στη δεκαετία του '70, για παράδειγμα, ο υπολογισμός της ET γινόταν στη βάση μιας απλής συσχέτισης με την ολική ακτινοβολία (RG) (De Villele, 1974):

$$ET=A K_c RG+B$$

εξίσωση 1.6

όπου K_c είναι ένας φυτικός συντελεστής που εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας, A και B είναι δύο συντελεστές που εξαρτώνται από την διαπνοή και τις κλιματικές παραμέτρους και η τιμή τους προκύπτει κατόπιν στατιστικών υπολογισμών. Τέτοια μοντέλα επέτρεψαν τον υπολογισμό της εξαμισοδιαπνοής με τη μέτρηση μόνο της ολικής ακτινοβολίας και λίγων άλλων συντελεστών, χαρακτηριστικών της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο. Πρέπει να προστεθεί πως τα μοντέλα αυτά είναι παραμετροποιημένα για συγκεκριμένες συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Εάν υπάρξει μεταβολή των συνθηκών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου προκύπτει αλλαγή και των παραμέτρων και το μοντέλο παύει να είναι αξιόπιστο (Jemaa, et. al., 1995).

Στη δεκαετία του '80, αναπτύχθηκαν νέα μοντέλα που βασίζονται στην εξίσωση Penman-Monteith (Stanghellini, 1987; Yang et. al., 1990; Jolliet & Bailey, 1992) η χρήση των οποίων απαιτεί τη γνώση διάφορων εισροών ή παραμέτρων των οποίων ο προσδιορισμός δεν είναι πάντα εύκολος. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος για τον οποίο αρκετοί ερευνητές (Okuya & Okuya, 1988; Jolliet & Bayley, 1992; Baille, 1994) έχουν προτείνει μια απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης Penman-Monteith για την πρόβλεψη της ET συναρτήσει

του LAI, το ποσοστό της εσωτερικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας (intercepted radiation, R_{int} , $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$) και το έλλειμμα πίεσης υδρατμών (VPD, kPa) μια απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης Penman-Monteith προκειμένου να ξεπεραστούν τέτοιου είδους προβλήματα. (Baille et al., 1994): πρότεινε μια απλοποιημένη μορφή της εξίσωσης:

$$ET = A \frac{R_{int}}{\lambda} + B LAI VPD \quad \text{Εξίσωση 1.7}$$

Όπου ET: ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας ($\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), λ η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού (J kg^{-1}), A: (αδιάστατος) και B: ($\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{kPa}^{-1}$) είναι εμπειρικοί συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται κυρίως από τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) και λαμβάνουν διαφορετικές τιμές κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Οι τιμές των συντελεστών A και B για διάφορες καλλιέργειες μπορεί να αναζητηθούν στη βιβλιογραφία ή μπορεί να υπολογιστούν για το συγκεκριμένο θερμοκήπιο βάση μετρήσεων της διαπνοής και των κλιματικών παραμέτρων (Baille, 1994).

Ο συντελεστής R_{int} , υπολογίζεται από τον συντελεστή LAI και ένα συντελεστή απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας από τη καλλιέργεια (k , συντελεστής εξατμισοδιαπνοής):

$$R_{int} = 1 - \exp^{-kLAI} \quad \text{Εξίσωση 1.8}$$

Μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση, μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια η ET για ένα μεγάλο μέρος θερμοκηπιακών καλλιεργειών.

Όταν ο έλεγχος της υδρολίπανσης βασίζεται στην μέτρηση έμμεσων μεταβλητών όπως η ηλιακή ακτινοβολία και η απορροή (αποστράγγιση), αυξάνεται η πιθανότητα να προκύψουν μεγαλύτερα σφάλματα στον έλεγχο των απωλειών του νερού και των ανόργανων συστατικών στα φυτά. Με στόχο να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επίπτώσεις από ένα ανεπαρκή έλεγχο της υδρολίπανσης, (Rijck et al., 1998) πρότεινε ένα σύστημα για καλλιέργεια τομάτας σε θερμοκήπιο, που βασίζεται στο προσδιορισμό της θερμικής αγωγιμότητας και της περιεκτικότητας σε υγρασία του πετροβάμβακα (με δυνατότητα εφαρμογής και σε άλλους τύπους υποστρωμάτων με επαρκή

ακρίβεια). Δεδομένου ότι η θερμική αγωγιμότητα ενός ομοιογενούς σώματος αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητάς του σε υγρασία, ο έλεγχος της άρδευσης γίνεται βάση της υγρασίας του υποστρώματος η οποία θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ μιας μέγιστης και ελάχιστης προκαθορισμένη τιμής. Ένα απλό μοντέλο για την εκτίμηση της ημερήσιας ET γραμμικών καλλιεργειών σε θερμαινόμενο θερμοκήπιο έχει προταθεί από De Graaf (1988):

$$ET = \frac{h}{m} [a R + b \sum_{1440}^1 \text{mini} (T_t - T_a)] \quad \text{Εξίσωση 1.9}$$

όπου h και m είναι το πραγματικό και το μέγιστο ύψος της καλλιέργειας αντίστοιχα, R είναι η εσωτερική ολική ακτινοβολία, a και b είναι συντελεστές συγκεκριμένοι για κάθε καλλιέργεια, με τον δεύτερο να εξαρτάται από την θέρμανση, mini είναι τα διαδοχικά λεπτά στη διάρκεια της ημέρας κατά την οποία η θερμοκρασία του αγωγού θέρμανσης (T_t) είναι διαφορετική από τη θερμοκρασία του αέρα (T_a). Η τιμή του b είναι $0,22 \cdot 10^{-4}$ για θερμοκηπιακές καλλιέργειες τομάτας και αγγουριού, για τις συνθήκες που επικρατούν στην Ολλανδία.

Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία είναι η κύρια μεταβλητή του κλίματος που επηρεάζει την ET στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες, ειδικά στη περίπτωση μη θερμαινόμενων θερμοκηπίων (Baille et al., 1994; van Kooten et al., 2008), η ολοκλήρωση της ET με τη στατιστική μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης μόνο ως προς τη εξωτερική ή την εσωτερική ηλιακή ακτινοβολία, είναι μια τεχνική που έχει προταθεί για την απλοποίηση του ελέγχου της άρδευσης στα θερμοκήπια (Bacci et al., 2011). Στην πρώτη περίπτωση, ο συντελεστής μετάδοσης (περατότητας) της ακτινοβολίας του υλικού κάλυψης πρέπει να είναι γνωστός. Τυπικά αυτός ο συντελεστής παίρνει τιμές μεταξύ 0,60 και 0,70.

A.17. Άρδευση κλειστών υδροπονικών συστημάτων βάση ελέγχου του διαλύματος απορροής

Στα σύγχρονα συστήματα ελέγχου έχει γίνει προσπάθεια να συνδυαστούν οι θρεπτικές απαιτήσεις της καλλιέργειας με τον ρυθμό ανάπτυξης. Στη περίπτωση αυτή περισσότερη σημασία αποκτά ο ρυθμός απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων από ότι η συγκέντρωσή τους στο θρεπτικό διάλυμα. Ο ρυθμός απορρόφησης των θρεπτικών συστατικών και του νερού από τα φυτά, σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις κλιματικές συνθήκες και το στάδιο ανάπτυξης. Κατά συνέπεια, στις καλλιέργειες με υπόστρωμα, μετά από κάθε εφαρμογή άρδευσης ο όγκος και η ιονική σύσταση της απορροής είναι διαφορετική (Savvas et al., 1999). Ως αποτέλεσμα, στις υδροπονικές καλλιέργειες όπου χρησιμοποιούνται συστήματα άρδευση κλειστού τύπου, το διάλυμα της απορροής που θα επαναχρησιμοποιηθεί θα πρέπει να αναπληρώνεται με μεταβλητές ποσότητες θρεπτικών ουσιών και νερού σε κάθε εφαρμογή άρδευσης (Gieling et. al., 1988).

Γίνεται συνεπώς αντιληπτό πως ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου της υδρολίπανσης, πρέπει να περιλαμβάνει την μέτρηση και την προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο της σύνθεσης του διαλύματος της απορροής και την επαναχρησιμοποίηση του. Τα συστήματα αυτόματου ελέγχου του θρεπτικού διαλύματος διακρίνονται σε:

- Συστήματα που βασίζουν τη λειτουργία τους αποκλειστικά στη ανίχνευση των τιμών της EC και του pH
- Συστήματα που χρησιμοποιούν ιοντοεκλεκτικούς αισθητήρες για την μέτρηση της συγκέντρωσης των ιόντων (Ben-Yaakov et al., 1982; Bailey et al., 1988).

Μια λύση που υιοθετήθηκε είναι η μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του διαλύματος και η αυτόματη αναπροσαρμογή του, με στόχο να διατηρηθεί σταθερή η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο διάλυμα, με την παροχή τυποποιημένων ποσοτήτων λιπασμάτων για τη δημιουργία του θρεπτικού διαλύματος, αποφεύγοντας διακυμάνσεις στη σύνθεσή του. Μια

άλλη λύση για τα συστήματα ανοιχτού τύπου, είναι η αυτόματη ρύθμιση, σε πραγματικό χρόνο, της διαδικασίας εμπλουτισμού του καθαρού νερού με την προσθήκη καθορισμένων ποσοτήτων λιπασμάτων για τη δημιουργία του θρεπτικού διαλύματος, με αποτέλεσμα μια σταθερή τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο διάλυμα με το οποίο γίνεται η άρδευση (Kreij, 1995).

Η μέτρησης του όγκου της απορροής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον προγραμματισμό της άρδευσης, συχνά σε συνδυασμό με ένα μοντέλο πρόβλεψης της διαπνοής της καλλιέργειας για τον αποτελεσματικό έλεγχο της υδρολίπανσης, μειώνοντας σημαντικά τις απώλειες νερού και θρεπτικών συστατικών και την περιβαλλοντική ρύπανση (De Graaf, 1998). Ωστόσο, σε θερμοκήπιο με εμπορική χρήση, η μέτρηση σε πραγματικό χρόνο της ιοντικής σύνθεσης της απορροής και η εφαρμογή μοντέλων για την συσχέτιση σύνθεσης - δόσης δεν είναι εύκολη (Savvas, 2002)

A.18. Αισθητήρες υγρασίας υποστρώματος καλλιέργειας

Η αποτελεσματική χρήση των αισθητήρων εδαφικής υγρασίας στον έλεγχο των αρδεύσεων τόσο σε καλλιέργειες στο έδαφος όσο και στις εκτός εδάφους καλλιέργειες έχει τεκμηριωθεί από πολλούς ερευνητές (π.χ Muñoz-Carpena et al., 2008; Zotarelli et al., 2009). Αποτελούν ένα σημαντικό στοιχείο στο σύστημα ελέγχου με βρόχο ανάδρασης καθώς παρέχουν τα δεδομένα που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να ρυθμιστεί η συχνότητα άρδευσης και, ενδεχομένως η δόση άρδευσης με τη συνεχή παρακολούθηση της θ ή του θ_{ψ} του υποστρώματος, των οποίων οι τιμές τους εξαρτώνται από την καλλιέργεια και το υπόστρωμα (Dukes et al., 2010). Για τα συνηθισμένα υποστρώματα που χρησιμοποιούνται στην υδροπονία ένα τυπικό εύρος τιμών για το θ_{ψ} είναι από -4 kPa έως -10 kPa (Pardossi et al., 2009). Η βασική ιδέα πίσω από τη χρήση αισθητήρων υγρασίας για τον έλεγχο της άρδευσης είναι απλή: όταν τα φυτά απορροφούν νερό η περιεκτικότητά του στο υπόστρωμα μειώνεται. Οι αισθητήρες ανιχνεύουν αυτή τη μεταβολή και στη συνέχεια αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ξεκινήσει η άρδευση όταν η υγρασία του υποστρώματος πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή (set point). Το αποτέλεσμα είναι η συχνή εφαρμογή μικρών ποσοτήτων νερού, με

τη συχνότητα άρδευσης να προσαρμόζεται αυτόματα βάση του ρυθμού απορρόφησης του νερού από τα φυτά ή διαφορετικά βάση του ρυθμού εξάντλησης του νερού στο υπόστρωμα. Μια τέτοια προσέγγιση της άρδευση οδηγεί στην άμεση αντικατάσταση των ποσοτήτων του νερού που απορροφούνται από τα φυτά της καλλιέργειας (ή που χάνονται λόγω εξάτμισης) και εξασφαλίζει την αποφυγή υδατικών καταπονήσεων για τη καλλιέργεια. Αρδεύοντας με ποσότητες νερού που πραγματικά απαιτούνται από τη καλλιέργεια, η χρήση και η ποσότητα νερού που αποστραγγίζεται (εκπλύεται) μπορεί να μειωθεί σε μεγάλο βαθμό. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης, χωρίς τη χρήση ακριβών συστημάτων επαναχρησιμοποίησης της απορροής ή τη δημιουργία δεξαμενών (εξάτμισης) περισυλλογής της απορροής.

Οι Helmer et al, (2005), μελέτησαν την επίδραση των κλιματικών συνθηκών, μεταξύ άλλων παραγόντων εγγενείς του συστήματος του θερμοκηπίου, που μπορεί να προκαλέσουν σοβαρά σφάλματα στις μετρήσεις. Ειδικότερα γίνεται ανάλυση εκείνων των παραγόντων που μπορεί να επηρεάσουν τις τιμές των αισθητήρων μέτρησης της εδαφικής υγρασίας, των οποίων η λειτουργική αρχή βασίζεται στην μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, που παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα όταν υπάρχει διακύμανση της υγρασίας κοντά στο σημείο μέτρησης. Οι τιμές των μετρήσεων για κάθε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, επηρεάζονται σημαντικά από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και από την ποσότητα των διαλυμένων αλάτων στο υπόστρωμα, στη περιοχή γύρω από το σημείο εισαγωγής των άκρων μέτρησης, χωρίς αυτό απαραίτητα να οδηγεί σε μια σημαντική διαφοροποίηση με την πάροδο του χρόνου. Με βάση τα συμπεράσματα αυτά, η επιλογή των αισθητήρων πρέπει να γίνεται προσεκτικά με τρόπο που να πληρούν τις απαιτήσεις και τους όρους της διαδικασίας, τα στατικά χαρακτηριστικά (όπως το εύρος μετρήσεων, την ακρίβεια, την επαναληψιμότητα και την ευαισθησία) και τα δυναμικά χαρακτηριστικά (όπως είναι ο χρόνος απόκρισης).

Οι Norrie et al. (1994) σχεδίασαν ένα αυτοματοποιημένο σύστημα υδρολίπανσης για θερμοκηπιακή καλλιέργεια τομάτας σε τύρφη, βασισμένο στη χρήση ηλεκτρονικών τενσιόμετρων, σύμφωνα με το οποίο τόσο η θ_w όσο και η ιοντική συγκέντρωση του θρεπτικού διαλύματος (δηλαδή η EC) διαμορφωνόταν βάση των τιμών της ET, η οποία υπολογίζονταν βάση της

εξίσωσης Penman-Montieth. Κατά την περίοδο με αυξημένη ET η συχνότητα άρδευσης αυξάνονταν (η έναρξη του αρδευτικού κύκλου γινόταν για τιμές θ_w λιγότερο αρνητικές) και η τιμή της EC ήταν μικρότερη συγκριτικά με την περίοδο με χαμηλή ET. Αν και τα тенσιόμετρα έχουν αποδειχθεί χρήσιμα εργαλεία έρευνας, ωστόσο, η εφαρμογή τους στα εμπορικά θερμοκήπια μπορεί να είναι προβληματική εξαιτίας του μικρού όγκου του υποστρώματος (διαθέσιμου στο ριζικό σύστημα των φυτών) και του υψηλού πορώδες των υποστρωμάτων που συνήθως χρησιμοποιούνται στα συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους. Η αρχή λειτουργίας ενός тенσιόμετρου βασίζεται στην επαφή του κεραμικού στοιχείου με το πορώδες του υποστρώματος. Εάν το υπόστρωμα συρρικνωθεί ή μετακινηθεί η συσκευή κατά λάθος, αυτή η επαφή μπορεί να διακοπή με συνέπεια να διακοπεί και η λειτουργία του τασιμέτρου. Τη τελευταία δεκαετία διαφορετικού κόστους και πολυπλοκότητας αισθητήρες εδαφικής υγρασίας όπως οι αισθητήρες ανίχνευσης νετρονίων και οι αισθητήρες μέτρησης διηλεκτρικής χωρητικότητας (Dielectric Capacitance), είναι διαθέσιμοι στους ερευνητές για εφαρμογές σε εμπορικά θερμοκήπια για τον έλεγχο της άρδευσης όπου απαιτούνται πρακτικές συσκευές χαμηλού κόστους. Ενδιαφέρουσες δυνατότητες για πρακτικές εφαρμογές παρέχονται από τους εδαφικούς αισθητήρες που μετρούν διηλεκτρικές ιδιότητες του υποστρώματος (εδάφους) Pardossi et al., 2009. Αισθητήρες, όπως 5TE (Decagon Devices) ή WET (Delta-T Device), έχουν αναπτυχθεί για ταυτόχρονες μετρήσεις της θερμοκρασίας στο υπόστρωμα, την κ.ο. περιεκτικότητα εδαφικής υγρασίας (θ) καθώς και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) (Pardossi et al., 2009), παρέχοντας την δυνατότητα αυτοματοποίησης του ελέγχου της υδρολίπανσης. Με στόχο την αποφυγή της συσσώρευσης αλάτων στη ριζοσφαίρα και την μείωση της απορροής, ένα αυτοματοποιημένο σύστημα υδρολίπανσης έχει δοκιμαστεί με επιτυχία για τη ρύθμιση τόσο της συχνότητας άρδευσης όσο και της EC του θρεπτικού διαλύματος βάση ταυτόχρονης μέτρησης του ποσοστού υγρασίας (θ) και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) του υποστρώματος (pore water EC, EC_{PW}) με τη βοήθεια ενός WET αισθητήρα (διηλεκτρικής σταθεράς) (Incrocci et al., 2009). Το σύστημα άρδευσης ενεργοποιείται όταν το ποσοστό υγρασίας (θ) του υποστρώματος προσεγγίζει μια προκαθορισμένη τιμή (humidity set point) .

Οι Nemali and van Iersel (2006) περιγράφουν ένα σύστημα άρδευσης που χρησιμοποιεί αισθητήρες υγρασίας εδάφους (EC-10, Decagon Devices) για τον έλεγχο της περιεκτικότητας του νερού στο υπόστρωμα, εντός ενός προκαθορισμένου ορίου τιμών, ανεξάρτητα από μεταβολές των καιρικών συνθηκών ή την ανάπτυξη των φυτών. Για να περιοριστεί η επίδραση της θερμοκρασίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, οι αισθητήρες έχουν αντικατασταθεί με τον αισθητήρα EC-5 (Decagon Devices), που έχει μεγαλύτερη συχνότητα μετρήσεων.

Οι van Iersel et al. (2009) για την αυτοματοποίηση της άρδευσης σε ένα εμπορικό θερμοκήπιο με καλλιέργεια ορτανσίας, χρησιμοποίησαν ως ελεγκτές άρδευσης αισθητήρες εδαφικής υγρασίας (Moisture Click Dynamax, Huston, TX). Ο ελεγκτής αποτελείται από ένα αισθητήρα εδαφικής υγρασίας SM 200 (Delta T), που είχε προγραμματιστεί να ξεκινά την άρδευση όταν η περιεκτικότητα του νερού στο υπόστρωμα πέσει κάτω από $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Η σύγκριση έγινε με ένα σύστημα άρδευσης με χρονικό προγραμματισμό, μια σύνηθες πρακτική στα θερμοκήπια. Επίσης για τη μέτρηση της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε υγρασία χρησιμοποιήθηκε και ένας αισθητήρας EC-5 (Decagon Devices) διαχωρισμένος από τον SM200 ενώ για τον υπολογισμό της δόσης άρδευσης χρησιμοποιήθηκε ένας μετρητής ροής. Τόσο στη περίπτωση άρδευσης με χρονικό προγραμματισμό όσο και στον έλεγχο της άρδευσης βάση αισθητήρα, το αποτέλεσμα στο οποίο κατέληξαν ήταν μια μέση περιεκτικότητα νερού στο υπόστρωμα $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, με τη διαφορά ότι στον έλεγχο βάση αισθητήρα (μέση περιεκτικότητα υγρασίας $\pm \text{SD}=0.171 \pm 0.030 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) η μέση τιμή της υγρασίας επιτεύχθηκε συντομότερα από ότι με το χρονικό προγραμματισμό ($167 \pm 0,051 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Αν και στη περίπτωση της άρδευσης βάση αισθητήρα η περιεκτικότητα του νερού στο υπόστρωμα τελικά ήταν λίγο μεγαλύτερη και με μικρότερες διακυμάνσεις, η άρδευση για διάστημα μεγαλύτερο του $2\frac{1}{2}$ μηνών είχε σαν αποτέλεσμα την μείωση της κατανάλωσης του νερού κατά 83% σε σύγκριση με το πρόγραμμα βάση χρονικού προγραμματισμού. Παρομοίως, οι Ristvey et al., (2004) χρησιμοποιώντας αισθητήρες TDR στον έλεγχο της άρδευσης σε φυτορική καλλιέργεια της *Ilex cornuta* διαπίστωσε μείωση της κατανάλωσης νερού κατά 60 έως 85%, με αντίστοιχες μειώσεις στην έκπλυση του N και P.

Αποδεικνύεται λοιπόν ότι, η χρήση αισθητήρων για τον έλεγχο της άρδευσης όχι μόνο μειώνει την χρονική παραλλακτικότητα του ποσοστού υγρασίας στο υπόστρωμα αλλά, οδηγεί και σε μια μεγάλη εξοικονόμηση των όγκων νερού που χρησιμοποιούνται στην άρδευση με ταυτόχρονη μείωση της έκπλυσης των θρεπτικών στοιχείων (Ristvey et al., 2004; van Iersel et al., 2009). Μια ποικιλία εμπορικών αισθητήρων που είναι πλέον διαθέσιμοι μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου της άρδευσης του θερμοκηπίου ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν αυτόνομοι ελεγκτές.

Πιο πρόσφατοι είναι οι υβριδικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούν την ίδια αρχή, μέτρηση της διηλεκτρικής σταθεράς, για το προσδιορισμό του υδατικού δυναμικού στο υπόστρωμα (για παράδειγμα Delta T, MPS-1, Decagon Devices). Τοποθετώντας το αισθητήριο όργανο του αισθητήρα μέσα σε ένα πορώδες κεραμικό υλικό, ο αισθητήρας καθορίζει την περιεκτικότητα του νερού στο κεραμικό υλικό. Όταν το υδατικό δυναμικό στο κεραμικό υλικό εξισορροπήσει με το υδατικό δυναμικό του υποστρώματος, ο αισθητήρας μπορεί να προσδιορίσει το υδατικό δυναμικό στο μέσο καλλιέργειας (έδαφος ή υπόστρωμα για τις εκτός εδάφους καλλιέργειες σε στερεό υπόστρωμα) με βάση τις χαρακτηριστικές καμπύλες υγρασίας του κεραμικού υλικού. Αυτοί οι αισθητήρες δεν απαιτούν βαθμονόμηση για τα διαφορετικού τύπου υποστρώματα που συνήθως χρησιμοποιούνται στην υδροπονία, διότι μετρούν την περιεκτικότητα του νερού στο κεραμικό υλικό, και όχι εκείνη του υποστρώματος. Δυστυχώς, αυτού του είδους εμπορικοί αισθητήρες δεν διαθέτουν την απαραίτητη ευαισθησία για το εύρος τιμών του υδατικού δυναμικού στο υπόστρωμα στο οποίο για τα περισσότερα φυτά βρίσκεται το εύκολο διαθέσιμο νερό (0-10 kPa, de Boodt and Verdonck, 1972). Επιπλέον, δεν είναι σαφές εάν οι χρόνοι ανταπόκρισης αυτών των αισθητήρων είναι αρκετά γρήγοροι για να μπορούν να ανιχνεύσουν τις γρήγορες μεταβολές (του περιεχόμενου νερού) που μπορεί να παρατηρηθούν σε υποστρώματα τόσο μικρού όγκου.

Σημαντικό σημείο στη διαδικασία μέτρησης της ποσότητας νερού ή του υδατικού δυναμικού στο υπόστρωμα αποτελεί η σωστή τοποθέτηση του αισθητήρα. Διαφορετικοί αισθητήρες ανιχνεύουν διαφορετικούς όγκους υποστρωμάτων και είναι σημαντικό να εξετασθεί η διαφορετική συμπεριφορά

των αισθητήρων κατά την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα ανά περίπτωση. Τενσιόμετρα και ειδικά τα μικρο-τενσιόμετρα μετρούν το δυναμικό του νερού στο υπόστρωμα που είναι σε επαφή με το κεραμικό στοιχείο και ως εκ τούτου επηρεάζονται μόνο από ένα μικρό όγκο υποστρώματος. Οι αισθητήρες διηλεκτρικής σταθεράς διαφέρουν σημαντικά ως προς τον όγκο του υποστρώματος που μπορούν να ανιχνεύσουν: μικρότεροι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν την υγρασία για το μεγαλύτερο μέρος σε υποστρώματα μικρού όγκου, ενώ άλλοι αισθητήρες μπορεί να λειτουργούν καλύτερα για μεγαλύτερου όγκου φυτοδοχεία.

A.19. Προγραμματισμός της άρδευσης με τη χρήση αισθητήρων εδαφικής υγρασίας (Root Zone Sensor RZS)

Ερευνητικές εργασίες έχουν τεκμηριώσει ότι ο προγραμματισμός των αρδεύσεων με τη χρήση αισθητήρων εδαφικής υγρασίας μπορεί να μειώσει σημαντικά την χρήση του νερού πολλών υπαίθριων και θερμοκηπιακών καλλιεργειών (στο έδαφος ή σε εκτός εδάφους καλλιέργειες) χωρίς σημαντικές επιπτώσεις στην απόδοση της καλλιέργειας. Μερικά παραδείγματα εφαρμογής RZS είναι οι εργασίες των Zotarelli et al. (2009) (σε καλλιέργεια τομάτας), Tuzel et al. (2009) (καλλιέργεια αγγουριού θερμοκηπίου), και Pardossi et al. (2009) (καλλωπιστικά φυτά εξωτερικού χώρου σε γλάστρα).

Κρίσιμο σημείο για το προγραμματισμό της άρδευσης βάση υπολογισμού της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε υγρασία (είτε ως δυναμικό θ_{ψ} είτε ως ποσοστό θ) με τη χρήση αισθητήρων εδαφικής υγρασίας είναι ο ορισμός του κατώτατου ορίου μέχρι το οποίο η υγρασία του υποστρώματος μπορεί να μειωθεί πριν γίνει απαιτητή η άρδευση. Σε γενικές γραμμές αυτές οι τιμές επιλέγονται κατά τρόπο που να εξασφαλίζουν ότι η καλλιέργεια δεν θα βιώσει συνθήκες υδατικής καταπόνησης με αρνητικές συνέπειες για την παραγωγή. Στην πράξη οι περισσότερες τιμές για το θ_{ψ} που δίνονται από Extension service ή από τους κατασκευαστές, είναι εμπειρικές ή βασίζονται σε ένα περιορισμένο αριθμό επιστημονικών μελετών. Οι περισσότερες δημοσιευμένες τιμές «κατώφλι» (start-άρδευση) του θ_{ψ} για τα

κηπευτικά προέρχονται από συγκριτικές μελέτες της παραγωγής για διάφορα επίπεδα μύζησης (Bower et al., 1975).

Στην περίπτωση των αισθητήρων που εκφράζουν το διαθέσιμο ποσοστό υγρασίας στο υπόστρωμα (Soil Water Content, SWC) ως % κ.ο περιεκτικότητα σε νερό (θ), οι τιμές θ που ορίζουν το διαθέσιμο νερό στο υπόστρωμα (Available Water Content, AWC) για τα φυτά παρέχουν ένα πρακτικό πλαίσιο λειτουργίας για αυτούς τους αισθητήρες. Για πολλά καλλιεργούμενα είδη, οι ανώτερες αποδεκτές τιμές για το AWC (AWCt) περιλαμβάνονται σε σχετικά εγχειρίδια του FAO ενώ το κατώτατο επιτρεπτό όριο που ορίζεται ως περιοριστικός παράγοντας για την παραγωγή ορίζεται ως 100-AWCt (Allen et al., 1998). Παράδειγμα για τη καλλιέργεια τομάτας στο έδαφος και σε συνθήκες μέσης ET η τιμή θ που ορίζει τη AWCt είναι 60% (Allen et al., 1998) η οποία μειώνεται κατά 20% σε συνθήκες χαμηλής ET. Άλλες μελέτες συστήνουν τιμές «κατώφλι» για τη AWC υψηλότερες από τις κατά FAO συνιστώμενες. Για παράδειγμα Hartz (1993) προτείνει για τη τομάτα τιμές >80%.

Όταν εφαρμόζονται RZS για τον προγραμματισμό της άρδευσης, ο ελεγκτής χρησιμοποιεί τα δεδομένα της υγρασίας από το σημείο/ή σημεία ανίχνευσης του ριζικού συστήματος για να προσδιορίσει τη χρονική στιγμή έναρξης της άρδευσης και τη διάρκεια του αρδευτικού κύκλου. Το σκεπτικό είναι ότι, κάθε φορά που η περιεκτικότητα υποστρώματος σε υγρασία (θ ή θ_{ψ}) πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή (start), οι βαλβίδες των αγωγών άρδευσης ανοίγουν μέχρι τη τιμή “stop” γενικά κοντά στη υδατοχωρητικότητα του φυτοδοχείου (θ_{cc}). Εκτός του καθορισμού των ορίων start και stop, ο ελεγκτής που λειτουργεί βάση δεδομένων ενός αισθητήρα εδαφικής υγρασίας (RZS-based controllers), γενικά απαιτεί και άλλα δεδομένα εισόδου από το χρήστη, όπως η ελάχιστη και η μέγιστη διάρκεια της άρδευσης, ο μέγιστος χρόνος μεταξύ δύο αρδεύσεων για τη περίπτωση βλάβης του αισθητήρα.

Το όριο “start” (τιμή θ ή θ_{ψ}) για να ξεκινήσει η άρδευση εξαρτάται από το φυτικό είδος, από το στάδιο ανάπτυξης, τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Όσο αφορά τις τιμές θ_{ψ} , ένα τυπικό εύρος τιμών για καλλιέργειες στο έδαφος είναι μεταξύ -20 και -70 kPa (ανάλογα με την υφή του εδάφους) και μεταξύ -4 και -10 kPa για τις εκτός εδάφους καλλιέργειες σε στερεό υπόστρωμα (Bacci et al., 2004). Ωστόσο,

προσδιορίζοντας την απόκλιση του υδατικού δυναμικού των φύλλων μεταξύ των καλά ποτισμένων φυτών και ελλιπώς αρδευόμενων φυτών, (Thompson et al. 2007) το κατώτατο όριο για θ_{ψ} που προσδιόρισε για θερμοκηπιακή καλλιέργεια πιπεριάς, πεπτονιού και τομάτας σε περιοχή της Νότιο-Ανατολικής ακτής της Ισπανίας ήταν: -58 kPa για την πιπεριά, -35 kPa για τη καλλιέργεια πεπτονιού και -38 ή -58 kPa για τομάτα, αντίστοιχα, για καλλιέργεια την άνοιξη ή κατά τη χειμερινή περίοδο. Ως εκ τούτου, η βέλτιστη θ_{ψ} «εκκίνηση» της άρδευσης μπορεί να μειωθεί κάτω από συνθήκες χαμηλότερης ET, τουλάχιστον σε ορισμένα είδη καλλιεργειών.

Αρκετοί ερευνητές (Sadras and Milroy, 1996; Sinclair et al., 1998; Girona et al., 2002), έχουν εκφράσει αντιρρήσεις για τη χρήση σταθερών τιμών «κατώφλι» της AWC για τον προγραμματισμό των αρδεύσεων, διότι για μια δεδομένη καλλιέργεια παράγοντες όπως, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, η εξατμισοδιαπνοή, η ανάπτυξη και η κατανομή του ριζικού συστήματος μπορούν να επηρεάσουν το «κατώφλι» για την AWC. Βέβαιο είναι όμως ότι, ο βέλτιστος προγραμματισμός των αρδεύσεων με τη χρήση αισθητήρων εδαφικής υγρασίας απαιτεί ακριβείς τιμές start-άρδευση για θ_{ψ} ή θ για μεμονωμένες καλλιέργειες σε δεδομένα γεωργικά παραγωγικά συστήματα.

A.20. Ολοκληρωμένη μέθοδος προγραμματισμού

Ο χρόνος έναρξης της άρδευσης και η δόση άρδευσης είναι οι βασικές πτυχές ενός προγράμματος άρδευσης. Ο διαθέσιμος εξοπλισμός των εμπορικών αισθητήρων για την παρακολούθηση του ποσοστού της υγρασίας του υποστρώματος, παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την κατάρτιση ενός αποτελεσματικού προγράμματος άρδευσης αλλά, συχνά εμφανίζονται προβλήματα αντιπροσωπευτικότητας και αξιοπιστίας των δεδομένων. Για να μπορέσει να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, αυτοματοποιημένα συστήματα υπολογισμού της ET και καταγραφής της υγρασίας του υποστρώματος μπορεί να ενσωματωθούν σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα άρδευσης για την βελτιστοποίηση της απόδοσής του (Kruger et al., 1999) αλλά και να εξασφαλισθεί η λειτουργία του συστήματος σε περίπτωση βλάβης του αισθητήρα.

Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει η εφαρμογή μεθόδων που βασίζονται στη καταγραφή των κλιματικών δεδομένων (για τον έλεγχο της άρδευσης) είναι το γεγονός ότι απαιτούν τον ακριβή καθορισμό της τιμής του Kc για κάθε καλλιέργεια και για κάθε στάδιο ανάπτυξης (Bacci et al., 2008; Reagan, 1996).

Οι Norrie et al. (1994) ανέπτυξαν ένα αυτόματο σύστημα άρδευσης που ενσωματώνει δυο ηλεκτρονικά тенσιόμετρα και αξιοποιεί με τα δεδομένα ενός μετεωρολογικού σταθμού για τον υπολογισμό της ETc με τη μέθοδο Penman-Monteith (Allen et al., 1999). Το σύστημα δοκιμάστηκε σε μια εκτός εδάφους καλλιέργεια τομάτας σε τύρφη. Τα δεδομένα της ETc χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό του ορίου “start”, εκκίνησης της άρδευσης καθώς και, την ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC) του θρεπτικού διαλύματος: σε περιόδους έντονης ETc η συχνότητα άρδευσης ήταν μεγαλύτερη και η EC μειώθηκε σε σχέση με τις περιόδους με χαμηλή ETc. Μεταγενέστερα Bacci et al., (2008) πρότεινε τη χρήση των ενδείξεων του тенσιόμετρου στον υπολογισμό του φυτικού συντελεστή Kc χρησιμοποιώντας την εξίσωση CIMIS για τον υπολογισμό της ET0. Σε αυτή τη περίπτωση, μετά από μια σύντομη περίοδο βαθμονόμησης για διάφορα καλλωπιστικά σε γλάστρα, το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα, ελέγχοντας τη λειτουργία του тенσιόμετρου μέσω έμμεσου υπολογισμού της ETc.

Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ελέγχου άρδευσης στο οποίο η αναπροσαρμογή της συχνότητας άρδευσης γίνεται με βάση την ηλιακή ενέργεια που φτάνει στα φυτά μπορεί να καλύψει ικανοποιητικά τις υδατικές ανάγκες των φυτών χωρίς να γίνεται σπατάλη νερού και λιπασμάτων. Η ηλιακή ακτινοβολία μετράται με πυρανόμετρα (τοποθετημένα συνήθως εκτός θερμοκηπίου για να αποφεύγονται προβλήματα από περατότητα, σκίασης) και ολοκληρώνεται ως προς το χρόνο. Όταν το ολοκλήρωμα φτάσει σε μια προκαθορισμένη από τον χρήστη τιμή, ενεργοποιείται το σύστημα άρδευσης και λειτουργεί όσο χρόνο έχει ορισθεί ώστε να δοθεί η προκαθορισμένη δόση νερού στα φυτά (Katsoulas et. al., 2006). Σε μια προσπάθεια βελτίωσης της αποτελεσματικότητας συστημάτων ηλιακής ακτινοβολίας με τη χρήση παραμέτρων υγρασίας στο υπόστρωμα, Shelford et. al.,(2004), αξιολόγησαν το συνδυασμό συστήματος ολοκλήρωσης ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία με λυσιμετρικό ζυγό σε καλλιέργεια τομάτας για τη λήξη της άρδευσης, όταν η

απορροή φτάσει σε προκαθορισμένο ποσοστό της ποσότητας νερού που παρέχεται. Τα αποτελέσματα ήταν πολύ ικανοποιητικά με τα φυτά να λαμβάνουν νερό σύμφωνα με τις πραγματικές τους ανάγκες και την απορροή να διατηρείται ευκολότερα στα επιθυμητά επίπεδα.

Τα δεδομένα από αισθητήρες μέτρησης παραμέτρων υποστρώματος έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν για ρύθμιση παραμέτρων ενός συστήματος ολοκλήρωσης ηλιακής ακτινοβολίας με στόχο τη διατήρηση της υγρασίας και της αγωγιμότητας του υποστρώματος σε συγκεκριμένα επίπεδα ώστε τα φυτά να λαμβάνουν θρεπτικό διάλυμα υπό τις καλύτερες δυνατές συνθήκες. Συγκεκριμένα έχουν τη δυνατότητα να συντελέσουν (Katsoulas et. al., 2006).:

- Στο καθορισμό της πρώτης άρδευσης το πρωί,
- Στον αυτόματο καθορισμό της δόσης άρδευσης,
- Στο καθορισμό των λήξεων των αρδεύσεων το απόγευμα και
- Στην απόφαση εάν θα πραγματοποιηθούν ή όχι νυχτερινές αρδεύσεις.

Σκοπός της μελέτης

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής ήταν η συγκριτική μελέτη και η αξιολόγηση της εφαρμογής προσομοιωμάτων και αισθητήρων εδαφικής υγρασίας στο προγραμματισμό των αρδεύσεων στις υδροπονικές καλλιέργειες, όσο αφορά την επίδρασή τους στη συχνότητα άρδευσης, την ανάπτυξη, στην παραγωγή καρπών και στο δείκτη παραγωγικότητας νερού. Για το σκοπό αυτό ένα αυτοματοποιημένο σύστημα στο οποίο η διαχείριση της άρδευσης γίνεται με βάση εκτιμήσεις της διαπνοής των φυτών και μετρήσεις της υγρασίας του υποστρώματος (Substrate water status SW)(Μεταχείριση Α), συγκρίνεται με ένα πρόγραμμα άρδευσης με βάση εκτιμήσεις διαπνοής των φυτών και σταθερή διάρκεια ποτίσματος (Μεταχείριση Β). Κατά τα διάφορα στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας μετρήθηκαν το ύψος των φυτών και ο αριθμός φύλλων, προκειμένου να εντοπιστούν πιθανές διαφορές στη βλαστική ανάπτυξη. Παράλληλα προσδιορίστηκαν και αξιολογήθηκαν ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των καρπών, όσο και το συνολικό μέγεθος της παραγωγής καρπών, από τα φυτά που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της κάθε διαχείρισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Β.1. Γενική περιγραφή του θερμοκηπίου

Οι μετρήσεις του πειράματος πραγματοποιήθηκαν από τον Μάιο έως τον Ιούλιο του 2014 σε ένα από τα θερμοκήπια (GR_01) του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών & Ελέγχου Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το θερμοκήπιο βρίσκεται στο αγρόκτημα της Σχολής στο Βελεστίνο (γεωγραφικό πλάτος $39^{\circ}79'$; γεωγραφικό μήκος 85 m) και έχει ΒΑ/ΝΔ προσανατολισμό (360° δεξιόστροφα από το Βορρά). Πρόκειται για ένα σύγχρονο και πλήρως εξοπλισμένο τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο με πλαϊνά τοιχώματα, καλυμμένο με απλό φύλλο PE (πολυαιθυλενίου) πάχους 0,18 mm και συνεχόμενο παράθυρο οροφής. Διαθέτει σύστημα αυτόματου αερισμού με άνοιγμα και κλείσιμο παραθύρων, περιλαμβάνει όργανα μέτρησης θερμοκρασίας, υγρασίας και έντασης ηλιακής ακτινοβολίας. Κατά τη διάρκεια του πειράματος στην είσοδο του θερμοκηπίου είχε τοποθετηθεί εντομοστεγή δίκτυ για τον έλεγχο των εντόμων (αλευρώδης, αφίδες, τούτα).

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου είχαν ως εξής:

- Μαρκίζες ύψος: 2,4 m
- Ύψος κορυφής (κορφιάς): 4,1 m
- Συνολικό πλάτος: 8 m
- Συνολικό μήκος: 20 m
- Εμβαδόν καλυμμένου εδάφους (ground area) A_g : 160 m²
- Επιφάνεια καλύμματος (cover area): 303 m²
- Όγκος: 572 m³

Η φύτευση πραγματοποιήθηκε σε τέσσερις διπλές σειρές με απόσταση ενδοσειρών 0,75 m, απόσταση μεταξύ των σειρών 0.8 m ενώ η απόσταση φύτευσης των φυτών στη σειρά ήταν 0,33 m. Ο αερισμός του θερμοκηπίου επιτυγχάνονταν με φυσικό αερισμό. Το αυτόματο σύστημα αερισμού άνοιγε και έκλεινε το παράθυρο οροφής όταν η θερμοκρασία ήταν

μεγαλύτερη ή μικρότερη από την κρίσιμη θερμοκρασία των 23 °C. Η μέση τιμή (SD +/-) της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια του πειράματος ήταν 22,99 °C (+/- 6,79%) ενώ ξεπέρασε τους 30 °C σε ποσοστό 17,77%.

Ο αναμικτήρας αέρα λειτουργούσε όταν η υγρασία αέρα ήταν πάνω από το 75% κατά τη διάρκεια της ημέρα και πάνω από 50% κατά τις νυχτερινές ώρες. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της χαμηλής υγρασίας (κάτω του 30%) και της υψηλής θερμοκρασίας (άνω των 30°C), συνθήκες οι οποίες επιβραδύνουν ή και σταματούν την ανάπτυξη των φυτών, στο θερμοκήπιο λειτουργούσε σύστημα δροσισμού με υδρονέφωση (fog). Το σύστημα δροσισμού λειτουργούσε με πίεση 70Bar παράγοντας σταγονίδια διαμέτρου μικρότερης από 50 microns τα οποία εξαιτίας του μικροσκοπικού τους μεγέθους παραμένουν αιωρούμενα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η μέση τιμή (SD+/-) της σχετικής υγρασίας του αέρα (RH%) στο θερμοκήπιο ήταν 68,86 % (+/- 21,16%).

Κατά τη διάρκεια του πειράματος, ένα σύστημα μέτρησης και καταγραφής της υγρασίας του υποστρώματος αποτελούμενο από δύο αισθητήρες, τον EC5 και τον SM200 (Decagon Devices), προσαρμόστηκε, στη περιοχή ανάπτυξης του ριζικού συστήματος. Επιπλέον, η θερμοκρασία και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πετροβάμβακα καταγραφόταν με τη χρήση δύο αισθητήρων (Grodan BV, μοντέλο: WCM της Decagon (έναν για κάθε μεταχείριση), ο οποίος είναι παραμετροποιημένος για όλους τους τύπους του πετροβάμβακα της εταιρείας.

Για την μέτρηση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκε πυρανόμετρο τάξης A (σφάλμα μικρότερο του +/- 5%) το οποίο ήταν τοποθετημένο κεντρικά του θερμοκηπίου, μεταξύ της 4^{ης} και 5^{ης} γραμμής των φυτών, ώστε να μην επηρεάζετε από την σκίαση. Επιπλέον καταγραφόταν η θερμοκρασία και σχετική υγρασία εσωτερικά του θερμοκηπίου ενώ εξωτερικά του θερμοκηπίου υπάρχει ένας ολοκληρωμένος μετεωρολογικός σταθμός που περιλαμβάνει ανεμόμετρο, ανεμοδείκτη, θερμόμετρο, πυρανόμετρο και υγρασιόμετρο.

Το έδαφος του θερμοκηπίου ήταν καλυμμένο με άσπρο πλαστικό πολυαιθυλενίου για την αποφυγή ανάπτυξης ζιζανίων και την αύξηση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Εφαρμόστηκε κλειστό υδροπονικό σύστημα σε μη οργανικό υπόστρωμα πετροβάμβακα με διαστάσεις πλάκας

100x15x7.5 cm, της εταιρείας Grodan (Grodan®Expert). Η άρδευση γινόταν με θρεπτικό διάλυμα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- pH 5,5
- EC 2,4 dS m⁻¹

Οι τιμές αυτές βρίσκονται εντός των αποδεκτών ορίων για υδροπονική καλλιέργεια τομάτας (Li at al., 2001; Lizarraga et al., 2003; Lee, 2010). Για τη άρδευση χρησιμοποιήθηκαν αυτορυθμιζόμενοι σταλάκτες παροχής 2 l/h⁻¹ (ένας σταλάκτης ανά φυτό). Τα χαρακτηριστικά του αρδευτικού νερού και οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα που χορηγούνταν στη καλλιέργεια δίνονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων στο φρέσκο νερό και θρεπτικό διάλυμα.

Χαρακτηριστικά φρέσκου νερού			Συγκέντρωση θρεπτικών συστατικών	
			Ποσότητα	Τιμή – Στόχου
E _w	0.55dS/m	mmol/L	Et	2,40 dS/m
Ιόν	C _w	mmol/L	pHt	5,6 mmol/L
Ca ²⁺	1,40	mmol/L	[K]	7,30 mol/L
Mg ²⁺	1,60	mmol/L	[Ca]	4,30 mol/L
K ⁺	0,00	mmol/L	[Mg]	2,10 mol/L
NH ₄ ⁺	0,00	mmol/L	[NO ₃]	13,00mmol/L
Na ⁺	1,10	mmol/L	[NH ₄]	1,50 mmol/L
SO ₄ ²⁻	0,15	mmol/L	[H ₂ PO ₄ ⁻]	1,30 mmol/L
NO ₃ ⁻	0,10	mmol/L	C _{NaCl}	2,00 mmol/L
H ₂ PO ₄ ⁻	0,00	mmol/L	C _{Fe}	15.00μmol/L
HCO ₃ ⁻	5,70	mmol/L	C _{Mn}	10.00μmol/L
Cl ⁻	1,00	mmol/L	C _{Zn}	6.00 μmol/L
Fe	0,00	mmol/L	C _{Cu}	1.20 μmol/L
Mn	1,30	mmol/L	C _B	30.00μmol/L
Zn	1,20	mmol/L	C _{Mo}	0.50 μmol/L
Cu	0,00	mmol/L	HNO ₃ Περιεχόμενο	68 (% w/w)
B	0,00	mmol/L	H ₃ PO ₄ Περιεχόμενο	85 (% w/w)
Mo	0,00	mmol/L	Fe επί Χηλικού Fe	6 (% w/w)

Το σύστημα παρασκευής θρεπτικού διαλύματος και ελέγχου συστημάτων παροχής του θρεπτικού διαλύματος έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Agros Electronics και το Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος. Το σύστημα είναι ένα Ολοκληρωμένο Σύστημα Ευφυούς Ελέγχου Διαχείρισης Ηλεκτρονικών Υπολογιστών (Computer Integrated Management and Intelligent Control (CIMIC) system) το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και υδραυλικών συνδέσεων, που σκοπό έχουν την αυτόματη ανάληψη όλων των λειτουργιών της κεφαλής της υδρολίπανσης, σε συνεργασία με ειδικά αισθητήρια όργανα.

Βασίζεται σε ένα ισχυρό μικροελεγκτή, ο οποίος εκτελεί τα προγράμματα συνεχώς και αυτόνομα εκμηδενίζοντας το ρίσκο από διακοπές λειτουργίας. Ο προγραμματισμός της άρδευσης μπορεί να γίνει βάση:

- Ενός προγράμματος χρονικού (εβδομαδιαίου) προγραμματισμού
- Της διαθέσιμης υγρασίας του υποστρώματος (αισθητήρες υγρασίας)
- Ενός μοντέλου διαπνοής
- Ενός προγραμματισμένου ποσοστού απορροής

Όσο αφορά στην καλλιέργεια τομάτας (*Lycopersicon esculentum*, var. *Belladonna*), αυτή ήταν εγκαταστημένη με το σύστημα των δίδυμων γραμμών σε 4 κανάλια (τοποθέτηση με κύβο φύτευσης 10x10 cm). Τα κανάλια ήταν τοποθετημένα με κλίση 1% προκειμένου το διάλυμα της απορροής να μεταφέρεται χαμηλότερα προς τη δεξαμενή περισυλλογής και στη συνέχεια να απομακρύνεται από το χώρο.

B.2. Σχετικά με την καλλιέργεια της τομάτας στο πείραμα

Για τις ανάγκες του πειράματος σε κάθε κανάλι ήταν τοποθετημένοι 17 σάκοι στον καθένα εκ των οποίων υπήρχαν 3 φυτά τομάτα (απόσταση φυτών στη σειρά 0,33m). Συνολικά η πυκνότητα φύτευσης ήταν 2,125 φυτά m⁻². Τα σπορόφυτα (στάδιο 5-6 φύλλων) μεταφυτεύθηκαν την 01/04/2014 και η καλλιέργεια παρέμεινε στο θερμοκήπιο μέχρι τις 27/07/2014. Τα φυτά μορφώθηκαν σε μονοστέλεχο σύστημα και υποστυλώθηκαν με τη χρήση

πλαστικού σπάγκου, προσδένοντάς τα σε μεταλλικά σύρματα παράλληλα με τις γραμμές φύτευσης. Οι καλλιεργητικές φροντίδες και το πρόγραμμα φυτοπροστασίας ήταν αυτές που γενικά εφαρμόζονται για τη τομάτα σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια. Ειδικότερα καθώς τα φυτά αναπτυσσόταν και όταν ωρίμασε η 1^η ταξιανθία (ταξικαρπία) ξεκίνησε μια φορά την εβδομάδα η απομάκρυνση των πλευρικών βλαστών (2^{ης} τάξης) και των κατώτερων φυσιολογικά γερασμένων φύλλων. Τα φυτά διατηρήθηκαν μέχρι το ύψος της 7^{ης} ταξιανθίας. Στα αρχικά στάδια ανάπτυξης επιλέχθηκαν τυχαία έξι φυτά για την κάθε μεταχείριση στα οποία πραγματοποιήθηκαν εβδομαδιαίες μετρήσεις για το ύψος και τον αριθμό των φύλλων, με σκοπό να είναι δυνατή η παρακολούθηση του ρυθμού ανάπτυξης των φυτών. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στη χρονική περίοδο μιας ημέρας ώστε να περιοριστούν πιθανές απώλειες στα φύλλα και στους καρπούς αλλά και να υπάρξει μεγαλύτερη ακρίβεια στις συγκρίσεις των αποτελεσμάτων. Στα δεδομένα η ανάλυση έγινε με την μέθοδο repeated measures της ANOVA.

Η πρώτη συγκομιδή των καρπών πραγματοποιήθηκε την 01/06/2014 και συνεχίστηκε έως και το πρώτο δεκαήμερο του Ιουλίου 2014 οπότε και τερματίστηκε η καλλιέργεια. Η συγκομιδή των καρπών πραγματοποιούνταν μία φορά την εβδομάδα, όταν οι καρποί έφταναν στο στάδιο red ripe – RP (ώριμο κόκκινο στάδιο) (USDA, 1976), που είναι και το στάδιο εμπορικής ωρίμανσης του καρπού. Από κάθε επιλεγμένο φυτό καθώς και από το σύνολο των συγκομισμένων καρπών, οι καρποί με εμπορικά χαρακτηριστικά διαχωρίστηκαν από τους μη εμπορεύσιμους καρπούς και ζυγίστηκαν χωριστά προκειμένου να είναι δυνατή η σύγκριση της συνολικής παραγωγής μεταξύ των δυο μεταχειρίσεων.

Δεν εφαρμόστηκαν προληπτικοί ψεκασμοί με εντομοκτόνα ή μυκητοκτόνα διότι δεν αναμενόταν προβλήματα από εχθρούς και ασθένειες λόγω της υδροπονικής καλλιέργειας. Η προσβολή από Tuta (Tuta absoluta) αντιμετωπίστηκε με 2 ψεκασμούς χρησιμοποιώντας ALTAFLOR 35 WC (δραστική cloranthraniliprole) ενώ για αφίδα (*Aphis gossypii*) και αλευρώδη (*Trialeurodes vaporariorum*) δεν κρίθηκε σκόπιμη η καταπολέμηση τους. Το κυριότερο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν η σήψη κορυφής του καρπού, που αποτελεί φυσιολογική ανωμαλία. Ο κυριότερος λόγος εμφάνισης της ανωμαλίας αυτής ήταν οι συνθήκες ξηρασίας που επικράτησαν στο

περιβάλλον του θερμοκηπίου στο δεύτερο μισό της καλλιεργητικής περιόδου, με αποτέλεσμα να μειωθεί η πρόσληψη νερού και επομένως η πρόσληψη και η μεταφορά του ασβεστίου.

B.3. Πρόγραμμα άρδευσης

Στο προγραμματισμό της άρδευσης εφαρμόστηκαν δυο προσεγγίσεις. Η πρώτη (εφαρμόστηκε στο μισό της καλλιέργειας σε τέσσερα κανάλια) αφορούσε ένα πρόγραμμα με βάση προβλέψεις της διαπνοής των φυτών και μετρήσεις υγρασίας υποστρώματος με τη χρήση διηλεκτρικών αισθητήρων (μεταχείριση Α). Στο υπόλοιπο μισό της καλλιέργειας εφαρμόστηκε ένα πρόγραμμα άρδευσης με βάση προβλέψεις της διαπνοής των φυτών (μεταχείριση Β). Έτσι ενώ η συχνότητα άρδευσης ρυθμίζεται με βάση την διαπνοή των φυτών και στις δυο μεταχειρίσεις η δόση άρδευσης ρυθμίζεται με βάση την υγρασία του υποστρώματος της καλλιέργειας στη μεταχείριση Α ενώ είναι σταθερή στη μεταχείριση Β. Η πρόβλεψη της διαπνοής βασίζεται σε μετρήσεις θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου, εισερχόμενης ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και της φυλλικής επιφάνειας των φυτών.

Οι κύριοι στόχοι ήταν:

- Η υγρασία του υποστρώματος να διατηρείται κοντά στα επίπεδα του Εύκολου Διαθέσιμου Νερού (τυπικά κοντά στο 46% για το πετροβάμβακα) και όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην Υδατοϊκανότητα Φυτοδοχείου (60% για τον πετροβάμβακα (0-7,5cm) που χρησιμοποιήθηκε).
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στο υπόστρωμα να διατηρηθεί εντός των ορίων που αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία (2-3 dSm⁻¹).
- Το ποσοστό έκπλυσης (απορροή) να είναι κοντά στο 30%
- Η πτώση της υγρασίας στο υπόστρωμα κατά τη διάρκεια της νύχτας να μην είναι μεγαλύτερη από 10%

Προκειμένου να δοθεί ο απαραίτητος χρόνος στα φυτά να αναπτύξουν ένα επαρκές σύστημα στήριξης με τη πλάκα (ριζικό σύστημα) και μια ικανοποιητική φυλλική επιφάνεια, αρχικά από την ημέρα της εγκατάστασης της καλλιέργειας 01/04/2014 έως και 09/05/2014 που ξεκίνησε να εφαρμόζεται το διαφοροποιημένο πρόγραμμα αρδεύσεων, εφαρμόστηκε ένα κοινό πρόγραμμα άρδευσης και για τις δυο μεταχειρίσεις. Για το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιήθηκε η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας εξωτερικά του θερμοκηπίου και είχε σταθερή διάρκεια άρδευσης. Η άρδευση ξεκινούσε όταν 1080 kJ m^{-2} (280 Wm^{-2}) ηλιακής ακτινοβολίας συγκεντρωνόταν πάνω από το θερμοκήπιο και η διάρκεια κάθε αρδευτικού κύκλου ήταν 2min. Η δόση άρδευσης που αντιστοιχεί σε αυτή την ποσότητα ενέργειας σύμφωνα με τη προσέγγιση που παρουσιάζεται από τους Katsoulas et. al., (2006), για $K_c=1,05$, IE (αποτελεσματικότητα άρδευσης)=95%, $\tau=75\%$ και $\alpha=0,6$, είναι 137,5 ml/φυτό για κάθε άρδευση. Δεδομένου ότι, (αν και όχι σημαντική), υπάρχει κατανάλωση νερού από τα φυτά κατά τη διάρκεια της νύχτας, από το τελευταίο αρδευτικό συμβάν της ημέρας και μετά από 6h και 50min το πρόγραμμα πραγματοποιούσε μια άρδευση διάρκειας 1min με σκοπό την αποφυγή μιας μεγάλης μείωση της υγρασίας στο υπόστρωμα. Ο Lee (2010) θεωρεί αποδεκτή μια μείωση της υγρασίας του υποστρώματος κατά 10% κατά τη διάρκεια της νύχτας.

B.4. Άρδευση με βάση εκτιμήσεις διαπνοής των φυτών και μετρήσεις υγρασίας υποστρώματος (Μεταχείριση Α)

Για την μεταχείριση Α, από 09/05/2014 κάθε πρωί το χρονοδιάγραμμα των αρδεύσεων ξεκινούσε με μια άρδευση στις 8:04 π.μ και συνεχιζόταν με μια άρδευση κάθε 30 min, αναπληρώνοντας κάθε φορά ποσοστό 80% (συμπεριλαμβανομένου και του επιθυμητού ποσοστού απορροής 30%) του ελλείμματος υγρασίας, έως ότου η υγρασία στο υπόστρωμα φτάσει στην τιμή (humidity set point) που είχε ορισθεί στο 65%. Από τις 03/06/2014 έως και το τέλος των μετρήσεων η τιμή της υγρασίας (humidity set point) αυξήθηκε στο 70%. Στόχος της σταδιακής αύξησης της υγρασίας στο υπόστρωμα ήταν να μειωθεί το ποσοστό απορροής που θα προκαλούσε μια απότομη επαναφορά του υποστρώματος στην υδατοϊκανότητα με την παροχή μεγάλων όγκων νερού σε μικρό χρόνο.

Κατά τις νυχτερινές ώρες ήταν προγραμματισμένη μια άρδευση στις 02:20:27 π.μ διάρκειας 3,5 min, η οποία από την 15/5/2014 μετά από αξιολόγηση της υγρασίας του υποστρώματος και του σταδίου ανάπτυξης της καλλιέργειας αυξήθηκε στα 4 min. Στη συνέχεια και για όλη τη διάρκεια της υπόλοιπης ημέρας η εκδήλωση των αρδευτικών γεγονότων πραγματοποιούνταν όταν η υγρασία στο υπόστρωμα χαμήλωνε κάτω από το σημείο, humidity set point, και τερματιζόνταν όταν το ξεπερνούσε. Για να αποφύγουμε την υδατική καταπόνηση της καλλιέργειας που θα μπορούσε να οφείλεται σε σφάλμα του συστήματος είχε ορισθεί ως μέγιστος χρόνος, κατά την διάρκεια της ημέρας, ο χρόνος των 4h και 30min, πέραν των οποίων στη περίπτωση που δεν καταγραφόταν κανένα αρδευτικό γεγονός το σύστημα ενεργοποιούσε την άρδευση για 2 min

Τέλος, από της 11/6/2014 και μέχρι το τέλος της καλλιέργειας, ο κύκλος των αρδεύσεων ξεκινούσε κάθε πρωί με μια άρδευση στις 8:08:00 με μηδενισμό του ολοκληρωτή ενέργειας, ενώ η ολοκλήρωση γινόταν έως τις 20:00 το απόγευμα.

B.5. Άρδευση με βάση εκτιμήσεις διαπνοής των φυτών και σταθερή διάρκεια ποτίσματος (Μεταχείριση Β)

Στην περίπτωση της μεταχείρισης Β, η διάρκεια του κάθε αρδευτικού κύκλου βασίστηκε σε θεωρητικούς υπολογισμούς. Ειδικότερα, από της 9/5/2014 η έναρξη του ημερήσιου κύκλου αρδεύσεων ξεκινούσε, με μία άρδευση διάρκειας 1 min και συνεχιζόταν με δύο αρδευτικούς κύκλους διάρκειας 3 min. Για το υπόλοιπο διάστημα της ημέρας οι αρδεύσεις είχαν διάρκεια 5min. Στη συνέχεια από 5/6/2014 η διάρκεια των αρδεύσεων διαμορφώθηκε στα 2 min για την νυχτερινή, στα 4 min για τις πρώτες δύο πρωινές αρδεύσεις και στα 5 min για τις υπόλοιπες αρδεύσεις της ημέρας.

Η χρήση του νερού από τα φυτά υπολογίστηκε ως η διαφορά μεταξύ της ποσότητας νερού που εφαρμόστηκε μέσω της άρδευσης για κάθε μεταχείριση και του όγκου της απορροής. Η αποδοτικότητα της άρδευσης υπολογίστηκε ως ο λόγος του βάρους των εμπορεύσιμων καρπών και της ποσότητας νερού που εφαρμόστηκε μέσω της άρδευσης στη κάθε μεταχείριση είτε ως ο λόγος του βάρους των εμπορεύσιμων καρπών από κάθε μεταχείριση και της χρήσης του νερού από τα φυτά.

B.6. Ο Πετροβάμβακας

Στη παρούσα εργασία ο τύπος πετροβάμβακα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο Grodan® Expert χαμηλής πυκνότητας, της εταιρίας Grodan Company. Η πυκνότητα του πετροβάμβακα ήταν $0,046 \text{ kg/dm}^3$ και το πορώδες 97,6%. Οι διαστάσεις της πλάκας ήταν 7,5x15x100 cm. Η κοινή πλάκα ύψους 7,5 cm παρέχει μια ικανοποιητική ισορροπία μεταξύ της περιεκτικότητας σε νερό και αέρα. Επιπλέον εξασφαλίζει στο ριζικό σύστημα κλιμακούμενη μεταβολή της υγρασίας με αντίστροφη κλιμακούμενη μεταβολή της περιεκτικότητας του αέρα (δηλαδή με 100% κορεσμένη με νερό βάση και 100% αερισμό στην επιφάνεια της πλάκας).

B.7. Αισθητήρας Grodan WCM-Control

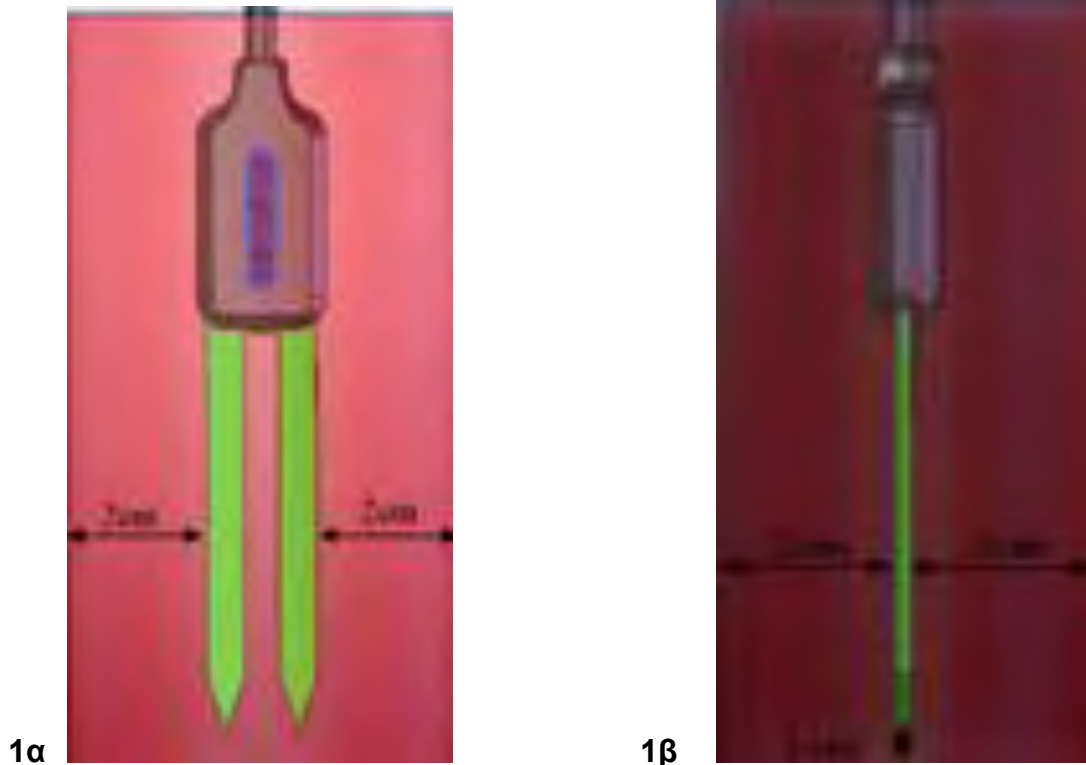
Ο αισθητήρας κατασκευάζεται από την εταιρία Delta T. Διατίθεται στην αγορά συστημάτων μετρήσεων από την Grodan B.V. για έλεγχο της υγρασίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας υποστρώματος στα πλαίσια διαχείρισης των αρδεύσεων στις υδροπονικές καλλιέργειες. Είναι βαθμονομημένος για μετρήσεις VWC (%v/v), EC (dS/m) και T (°C) για τους διάφορους τύπους υποστρωμάτων που διαθέτει η εταιρία. Το ύψος των ακίδων είναι 7 cm (επομένως μετρά σχεδόν σε όλο το ύψος για υποστρώματα πάχους 7,5 cm). Η τοποθέτησή του γίνεται κατακόρυφα στο πάνω μέρος των σάκων και σε απόσταση 10cm από τα φυτά κατά τη φορά κίνησης του νερού απορροής.

B.8. Αισθητήρας ECH20 EC-5

Ο αισθητήρας EC-5 μετρά την κατ' όγκο περιεκτικότητα της εδαφικής υγρασίας θ, μέσω μέτρησης της διηλεκτρικής χωρητικότητας ή περατότητας (dielectric capacitance ή dielectric permittivity) και λειτουργεί για θερμοκρασίες από -40 έως +50 °C. Ανήκει στους αισθητήρες Μέτρησης της Ισχύος Ανάκλασης στο πεδίο των Συχνοτήτων (Frequency Domain Reflectometry – FDR). Είναι ένας αισθητήρας της σειράς ECH20 (EC-10, EC-20, 5TE, 5TM) που παράγει η εταιρία Decagon Devices Ltd (USA). Αποτελείται από δυο ακίδες (καθετήρες) από fiberglass πάχους 0,2 mm, πλάτους 0,7 mm και ύψους 9 cm (5 cm είναι το ενεργό μέρος). Ο όγκος (αναφοράς) μέτρησης του οργάνου που δίνει η κατασκευάστρια εταιρία είναι της τάξης των 181 cm³ (ο αισθητήρας καταγράφει μεταβολές υγρασίας σε απόσταση περίπου 4cm πάνω και κάτω από το σημείο που έχει τοποθετηθεί. Εικ. 1α και 1β) (Cobos D. 2008).

Με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος που είναι ενσωματωμένο στον αισθητήρα, μετατρέπονται οι μεταβολές της χωρητικότητας του πυκνωτή (και κατ' επέκταση της υγρασίας) σε τιμές ηλεκτρικής τάσης mV (σήμα εξόδου) που λαμβάνονται με τη χρήση ενός αυτόματου καταγραφέα.

- 1α: ο όγκος ευαισθησίας του αισθητήρα παράλληλα προς το οριζόντιο επίπεδο των καθετήρων
- 1β: ο όγκος ευαισθησίας του αισθητήρα στην επίπεδη επιφάνεια των καθετήρων



Ο 5TE είναι ένας αισθητήρας χαμηλής ισχύος, χρησιμοποιεί μια συχνότητα 70 MHz (σε σύγκριση με τους μεγαλύτερους αισθητήρες EC-10, EC-20), η οποία σύμφωνα με τον κατασκευαστή ελαχιστοποιεί την επίδραση της αλατότητας και της δομής του υποστρώματος στη λειτουργία του αισθητήρα, καθιστώντας τον αισθητήρα κατάλληλο για χρήση σε κάθε τύπο εδάφους. Το ηλεκτρικό ρεύμα που τροφοδοτεί τον αισθητήρα πρέπει να έχει σταθερή τιμή τάσης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (Kizito et. al., 2008). Η σταθερή αυτή τιμή τάσης επιλέγεται μέσα στο εύρος τιμών 2-5V. Οι διαστάσεις του αισθητήρα είναι 8,9 cm (5 cm είναι το ενεργό μέρος) x 1,8 x 0,7 cm και το εύρος λειτουργίας του είναι για τιμές υγρασίας 0-1 cm³/cm³ (0-100VWC %) σύμφωνα με τις οδηγίες χρήση του οργάνου (Decagon Devices Ins. 2006). Η ακρίβεια είναι +/- 0,03 cm³/cm³ για τα περισσότερα ανόργανα (mineral organic) εδάφη και υποστρώματα (για EC 3-14 dS/m όσο αφορά το έδαφος και 0,5-8dS/m για τον πετροβάμβακα) η οποία αυξάνεται στο 0,01-

0,002 cm³/cm³ κατόπιν ειδικής βαθμονόμησης. Η ανάλυση είναι 0,001 cm³/cm³ (0,1 V_{WC} %) για ανόργανα εδάφη και 0,25 V_{WC} % για πετροβάμβακα. Το εύρος μέτρησης είναι από 0-100V_{WC}. Η κατ' όγκο περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό θ (cm³/cm³), λαμβάνεται από τη γραμμική σχέση μεταξύ του μετρούμενου σήματος, X και την κατ' όγκο περιεκτικότητα σε νερό του εδάφους. Το σήμα που μετράται εξαρτάται από τη συσκευή ανάγνωσης. Οι συσκευές της Decagon Devices μετρούν τιμές RAW (mV=0.61 RAW) προκρινόμενου να αυξηθεί η ανάλυση του σήματος εξόδου των αισθητήρων

$$\theta = aX + b \quad \text{Εξίσωση 2.1}$$

όπου: α, b είναι παράμετροι βαθμονόμησης που εξαρτώνται από το είδος του υποστρώματος.

Η εταιρεία παρέχει παράγοντες βαθμονόμησης για διάφορους τύπους εδαφών και υποστρωμάτων για τη μετατροπή των ενδείξεων του αισθητήρα (mv ή Raw Units-RU).

Η γενική σχέση για το πετροβάμβακα είναι:

$$\theta = 6,28 \cdot 10^{-7} \cdot RU^2 + 1,37 \cdot 10^{-4} \cdot RU - 0,183 \quad \text{Εξίσωση 2.2}$$

$$\theta = 2,63 \cdot 10^{-6} \cdot mv^2 - 5,07 \cdot 10^{-4} \cdot mv - 0,0394 \quad \text{Εξίσωση 2.3}$$

Εξαιτίας του χαμηλού κόστους του EC-5, ο αισθητήρας χρησιμοποιείτε ευρέως σε διάφορους τύπους εδαφών και υποστρωμάτων για τις εκτός εδάφους καλλιέργειες. Ο αισθητήρας έχει δοκιμαστεί από Kizito et al. (2008), Sakaki et al. (2008), Parsons and Bandaranayake (2009), Saito et al. (2009), Francesca et al. (2010), and Rosenbaum et al. (2010), ωστόσο, δεν έχει μελετηθεί αρκετά η επίδραση του εδαφικού διαλύματος στις μετρούμενες τιμές από τον αισθητήρα εκτός από τη περίπτωση του Parsons and Bandaranayake (2009), οι οποίοι μελέτησαν την ευαισθησία του αισθητήρα στη αλατότητα που προκαλείται από την εφαρμογή των λιπασμάτων. Το συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν είναι ότι ο αισθητήρας δεν παρουσιάζει ευαισθησία στην EC. Bogena et. al., (2007) χρησιμοποιώντας τον αισθητήρα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τι σφάλμα μέτρησης του αισθητήρα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της αλατότητας του διαλύματος η επίδραση των οποίων όμως μπορεί να μετριαστεί με κατάλληλες διορθώσεις στο λειτουργικό πρόγραμμα του αισθητήρα.

B.9. Αισθητήρας SM200

Ο αισθητήρας SM200 (Decagon Devices Ltd) είναι ένας ανιχνευτής ανακλασημετρίας στο πεδίο των συχνοτήτων (FDR). Ο αισθητήρας μετρά το διηλεκτρικό του εδάφους στα 100MHz (wave - form). Ο αισθητήρας αποτελείται από ένα ανθεκτικό πλαστικό σώμα (μήκος 6,7 cm και διάμετρο 4 cm) και δυο ράβδους από ανοξείδωτο ατσάλι μήκους 5,1 cm και διαμέτρου 0,025 cm. και το διάστημα λειτουργίας του είναι για τιμές υγρασίας 0-0,60 cm³/cm³. Η ακρίβεια είναι +/- 0,03 cm³/cm³ για θ από 0 έως 0,4 cm³/cm³ και +/- 0,05 cm³/cm³ για θ από 0,4 έως 0,6 cm³/cm³. Οι Farina ad Bacci (2005) παρατήρησαν ότι αλατότητα και θερμοκρασία έχουν μικρή επίδραση στη λειτουργία του αισθητήρα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών δεδομένου ότι η περιοχή λειτουργίας του είναι από -20 έως +60 °C. Συναρτήσει της θερμοκρασίας, η ακρίβεια μέτρησης είναι +/-0,07% στους 20°C και 0,13% στη περιοχή 20-60 °C. Η τιμή εξόδου, X (mV), σχετίζεται με τη τετραγωνική ρίζα της διηλεκτρικής χωρητικότητας (ε) και μοντελοποιείται με τη μέθοδο παρεμβολής πολυωνυμικής συνάρτησης η οποία είναι ειδική για τον αισθητήρα (πολυωνυμική παρεμβολή).



$$\varepsilon^{1/2} = 1,41 \times 10^{-14} X^5 - 4,75 \times 10^{-11} X^4 + 6,21 \times 10^{-8} X^3 - 3,9 \times 10^{-5} X^2 + 1,61 \times 10^{-2} X + 0,01$$

Εξίσωση 2.4

Η κατ' όγκο περιεκτικότητα του υποστρώματος σε νερό, θ , υπολογίζεται από τη γραμμική σχέση μεταξύ της τετραγωνικής ρίζας της διηλεκτρικής χωρητικότητας και της περιεκτικότητας στο υπόστρωμα υγρασίας.

$$\varepsilon^{1/2} = a\theta + b$$

Εξίσωση 2.5

Όπου a, b είναι παράμετροι βαθμονόμησης ειδικοί για κάθε υπόστρωμα (τους οποίους παρέχει η κατασκευάστρια εταιρεία).

B.10. Διαδικασία βαθμονόμησης

Οι αισθητήρες βαθμονομήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για καθαρό νερό και για πέντε επίπεδα υγρασίας: 30-50-70-80-100%. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε «κύβοι» διαστάσεων 20x15.5x7,5 cm Grodan Expert (όγκου 2325cm³) που ελήφθησαν από μια πλάκα (100x15.5x7,5 cm) από το ίδιο υλικό. Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε κάθετα στην επάνω επιφάνεια των κύβων. Η εισαγωγή των καθετήρων έγινε προσεκτικά αποφεύγοντας οποιαδήποτε περιστροφή τους προκειμένου να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή επαφή των καθετήρων με τα τοιχώματα του υποστρώματος και την αποφυγή δημιουργίας διάκενων αέρα. Διενεργήθηκαν πέντε επαναλήψεις για κάθε επίπεδο υγρασίας τοποθετώντας τον αισθητήρα αρχικά στο κέντρο του κύβου και εν συνεχεία σε άλλα τέσσερα περιφερειακά σημεία γύρο από το κέντρο. Οι κύβοι αρχικά ζυγίστηκαν προκειμένου να προσδιοριστεί η μάζα ξερού (m_{dry}) και εν συνεχεία υγράθηκαν με τη προσθήκη 900-1500-2100-2400-3000 cm³ καθαρού νερού αντίστοιχα. Η ακρίβεια της ηλεκτρονικής ζυγαριάς που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις ζυγίσεις είχε ανάλυση 0,01gr απαραίτητη για την ακρίβεια της βαθμονόμησης. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε μέρος σκιερό και αφήθηκαν για 24 ώρες να ανακατανεμηθεί ομοίμορφα το νερό μέσα στο κύβο. Στη συνέχεια κάθε δείγμα ζυγίστηκε για να τον υπολογισμό της περιεκτικότητας σε νερό βαρομετρικά και ακολούθησαν οι μετρήσεις. Η επιλογή της βαρομετρικής μεθόδου για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας σε νερό του υποστρώματος εφαρμόζοντας γνωστές

ποσότητες νερού έγινε διότι αποτελεί την μόνη άμεση μέθοδο υπολογισμού της περιεκτικότητας σε νερό. Θεωρώντας την ειδική πυκνότητα του νερού ίση με $1\text{gr}/\text{cm}^3$, Η κατ' όγκο περιεκτικότητα νερού στο υπόστρωμα υπολογίζεται ως ο όγκος του νερού ανά όγκο υποστρώματος:

$$\theta = \frac{V_w}{V_t}$$

θ : είναι η κατ' όγκο περιεκτικότητα νερού στο υπόστρωμα, V_w είναι ο όγκος του νερού σε cm^3 και V_t είναι ο όγκος του υποστρώματος σε cm^3 (που χρησιμοποιείται στη βαθμονόμηση). Για να προσδιορίσουμε τη V_w υπολογίζουμε τον όγκο του νερού που χάνεται μετά από 24h.

$$m_w = m_{\text{wet}} - m_{\text{dry}}$$

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w}$$

Όπου m_w είναι η μάζα του νερού, m_{wet} είναι η μάζα του υγρού υποστρώματος (g), m_{dry} είναι η μάζα του ξερού υποστρώματος και ρ_w είναι η πυκνότητα του νερού ($1\text{g}/\text{cm}^3$). Οι παράμετροι βαθμονόμησης των δυο αισθητήρων ελήφθησαν από τα δεδομένα των αισθητήρων (τιμές mV) από όλα τα σημεία τοποθέτησης του αισθητήρα χρησιμοποιώντας τις πολυωνυμικές συναρτήσεις ειδικές για τον κάθε αισθητήρα. Στη συνέχεια η στατιστική μέθοδο της γραμμικής και μη γραμμικής παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε για την συσχέτιση των τιμών. Η ανάλυση έγινε με χρήση του πακέτου Origin (Microcal Software Inc. Northampton, USA).

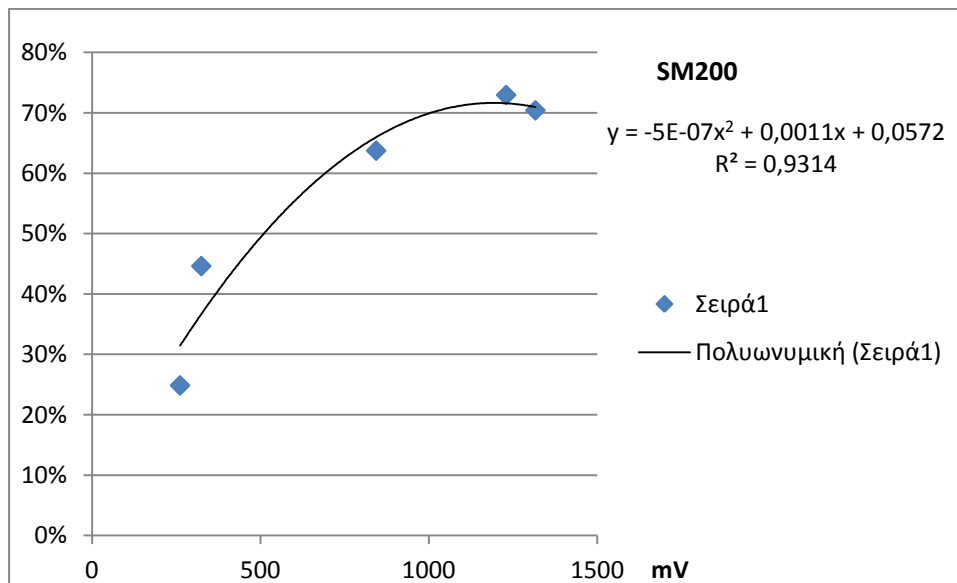
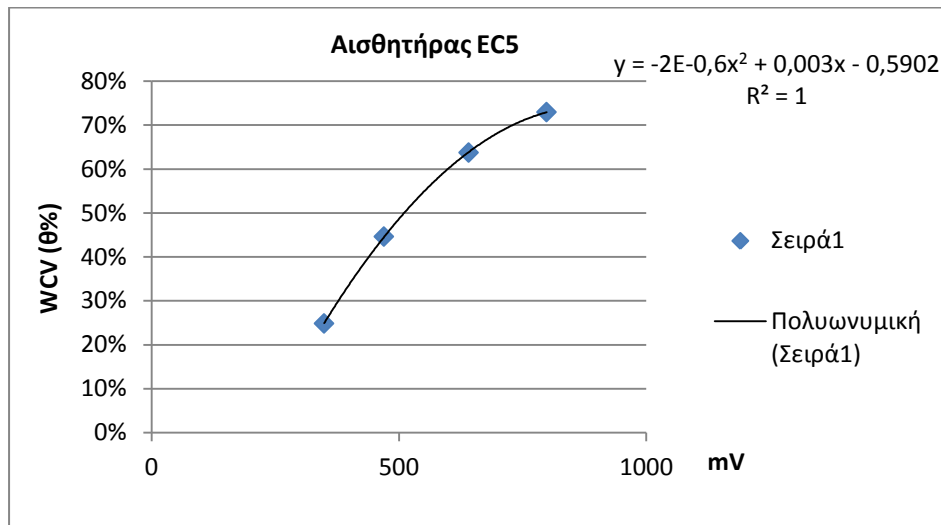
Η προσαρμογή του γραμμικού μοντέλου και του πολυωνυμικού (2^{ου} βαθμού) μοντέλων ήταν καλή, συντελεστές $R^2 = 1$ και 0,9314 αντίστοιχα για τον αισθητήρα EC5 και SM200. Οι εξισώσεις έχουν τη μορφή:

$$\theta = 0,0002 * mV + 0,32906 * mV - 66.4144$$

$$\theta = -2E-0,6 mV^2 + 0.003 mV - 0,5902$$

$$\theta = 0.00043 * mV + 0.106839 * mV + 6.545085$$

$$\theta = -5E-0,7 mV^2 + 0.0011 mV + 0,0572$$



Σχήμα 2.1: Πολυωνυμική παρεμβολή πειραματικών τιμών για μέτρηση υγρασίας (θ% v.v) με EC5 και SM200 για Grodan Expert

ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ. Αποτελέσματα και συζήτηση

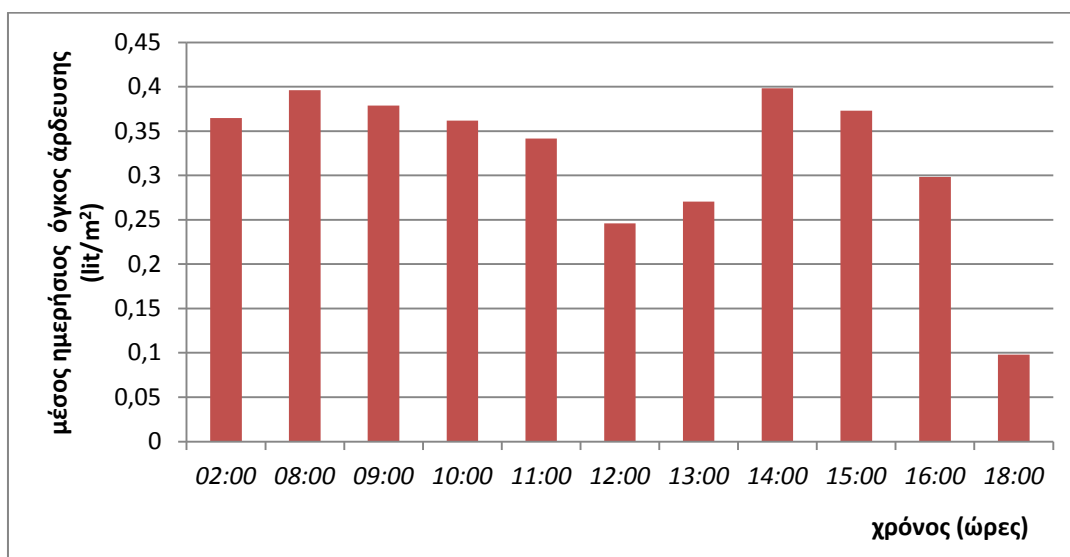
Γ.1. Ημερήσια κατανομή των αρδευτικών κύκλων

Ενώ για τη μεταχείριση Β (άρδευση με βάση προβλέψεις της διαπνοής των φυτών και σταθερή δόση ποτίσματος) η συχνότητα άρδευσης εξαρτήθηκε από τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας, για τη μεταχείριση Α (άρδευση με βάση προβλέψεις διαπνοής των φυτών και μετρήσεις υγρασίας υποστρώματος) η συχνότητα των αρδεύσεων αν και καθορίστηκε κυρίως από τη ζήτηση των φυτών σε νερό (Plant-Water-Use, PWU), εξαρτήθηκε επίσης και από:

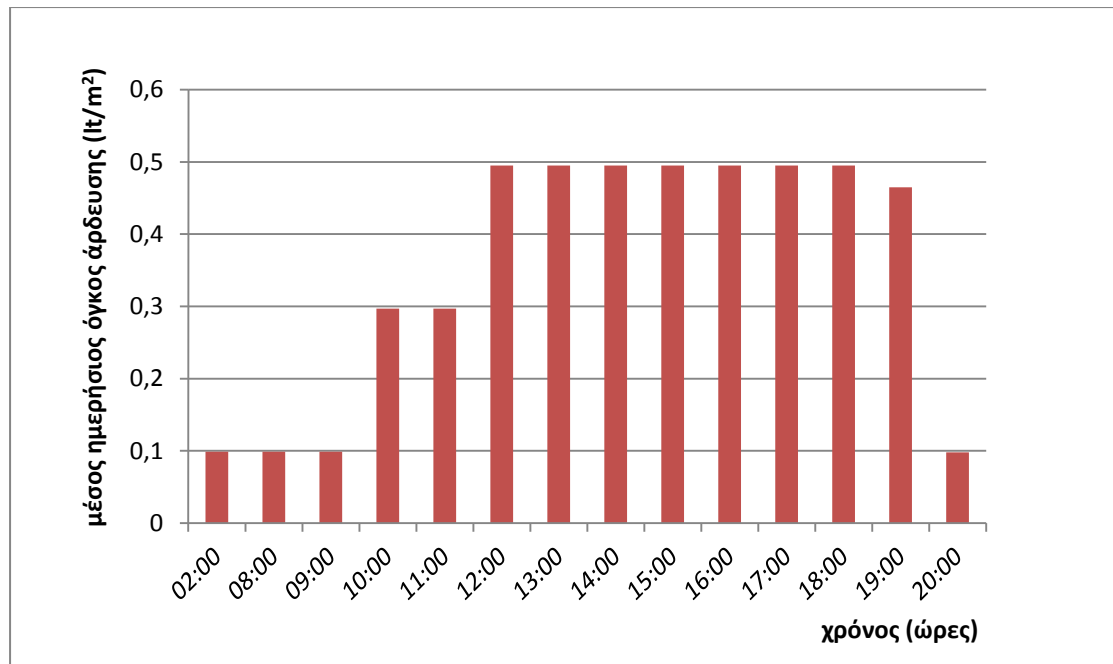
- Το περιεχόμενο της πλάκας του πετροβάμβακα σε νερό (plant-water content, plant-WC).
- Τις υδραυλικές ιδιότητες του πετροβάμβακα.

Ένα Ιστογράμματα του μέσου όρου όγκου νερού άρδευσης ανά τ.μ. (τετραγωνικό μέτρο) που κατανεμήθηκε από το σύστημα άρδευσης στη καλλιέργεια και για τις δυο μεταχειρίσεις, όπως καταγράφηκε κατά τη χρονική διάρκεια από 30 Μαΐου έως 1 Ιουνίου και από 23 Ιουνίου έως 25 Ιουνίου παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.1, 3.2, 3.3 και 3.4. Από το σύνολο των αρδευτικών κύκλων που πραγματοποιήθηκαν στη διάρκεια του 24ώρου, ποσοστό άνω του 80% παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια των ημερήσιων ωρών (από 6:00 έως 19:00'). Επιπλέον εντός των ωρών της ημέρας η πλειοψηφία των αρδευτικών γεγονότων (ποσοστό άνω του 60% της συνολικής ημερήσιας άρδευσης) παρατηρήθηκε στη χρονική περίοδο μεταξύ 9:00 π.μ και 5:00 μ.μ δηλαδή τη περίοδο κατά την οποία έχουμε και τη μεγαλύτερη διαπνοή των φυτών (μεγαλύτερη ζήτηση των φυτών σε νερό).

Από τα σχήματα 3.1 και 3.2 (χρονική περίοδος 30/5 έως 1/6, τέλος άνοιξης και πριν την έναρξη της συγκομιδής) μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο μέσος όρος όγκου άρδευσης ανά τ.μ. καλλιέργειας που κατένειμε το αρδευτικό σύστημα με κάθε πότισμα, βάση των δυο προγραμμάτων άρδευσης, ήταν διαφορετικός. Έτσι για τη μεταχείριση Α, η άρδευση της οποίας πραγματοποιούνταν συναρτήσει της υγρασίας στο υπόστρωμα, ο όγκος άρδευσης ήταν $0,329 \text{ Lt/m}^2$ (109.9 ml/νερό/φυτό) ενώ για τη μεταχείριση Β, της οποίας η διάρκεια άρδευσης ήταν σταθερή, η αντίστοιχη τιμή ήταν $0,351 \text{ Lt/m}^2$ (116 ml/νερό /φυτό).

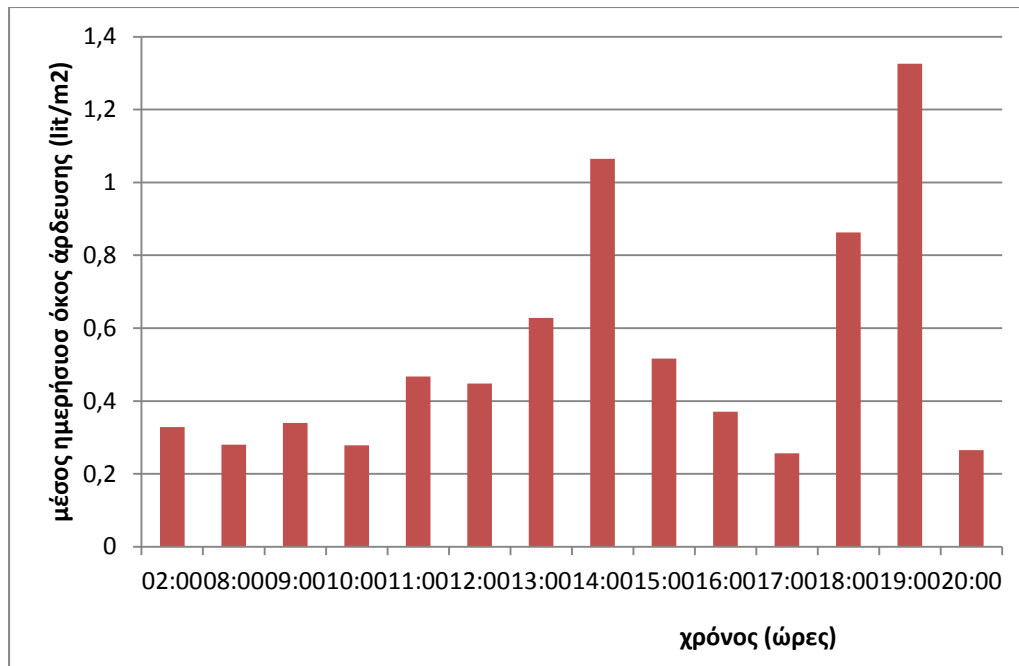


Σχήμα 3.1: Ιστόγραμμα με την ημερήσια κατανομή του μέσου όρου δόσης άρδευσης ανά τετραγωνικό μέτρο καλλιέργειας για τη μεταχείριση Α τη χρονική περίοδο 30/5-1/6/14

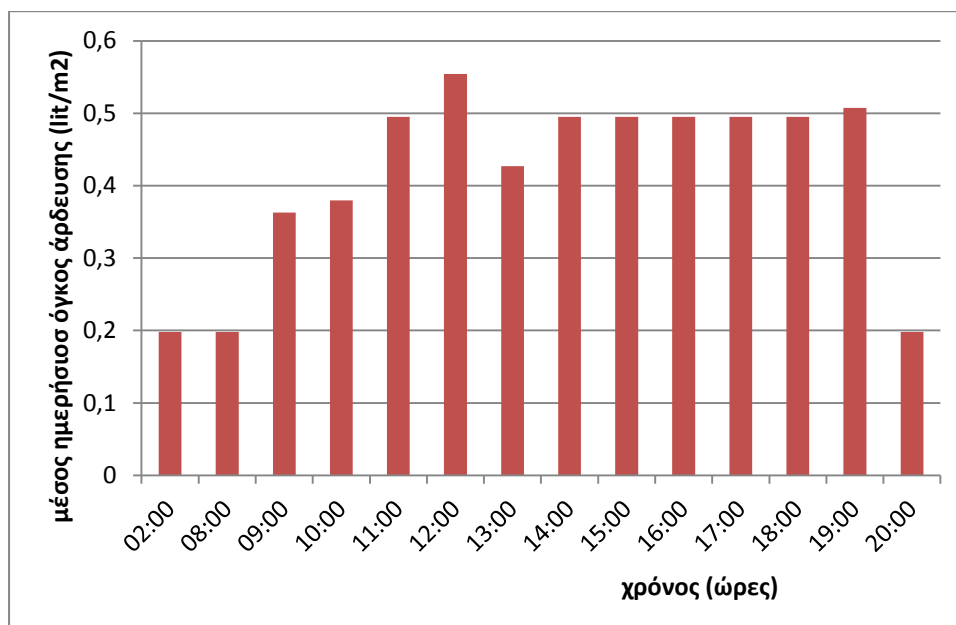


Σχήμα 3.2: Ιστόγραμμα με την ημερήσια κατανομή του μέσου όρου δόσης άρδευσης ανά τετραγωνικό μέτρο καλλιέργειας για τη μεταχείριση Β τη χρονική περίοδο 30/5-1/6/14

Κατά τη δεύτερη περίοδο παρατηρήσεων (23 έως 25/6) (Σχήμα 3.3 και 3.4), στα μισά περίπου της συγκομιδής, παρατηρείται μια σημαντική αύξηση στον όγκο άρδευσης του κάθε ποτίσματος ανά τετραγωνικό μέτρο καλλιέργειας ωστόσο, η αύξηση αυτή ήταν σε ποσοστό σημαντικά μεγαλύτερη στη περίπτωση της μεταχείριση Α έναντι του αντίστοιχο ποσοστού για τη Β. Ειδικότερα παρατηρήθηκε αύξηση κατά 65,90% για την μεταχείριση Α έναντι αύξησης 22,64% της μεταχείρισης Β. Για τη χρονική αυτή περίοδο η μέση τιμή όγκου άρδευσης για κάθε πότισμα ήταν για τη μεταχείριση Α 0,5309 Lt/m² (176,96 ml/φυτό/) και 0,4305 Lt/m² (143 ml/νερό/φυτό).



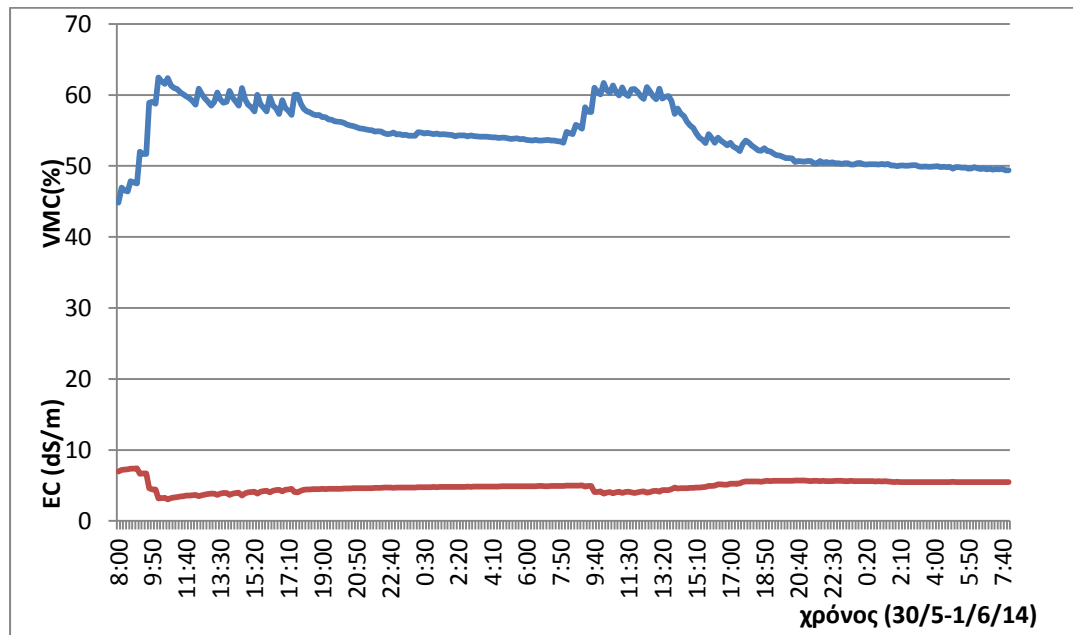
Σχήμα 3.3: Ιστόγραμμα με την ημερήσια κατανομή του μέσου όρου δόσης άρδευσης ανά τετραγωνικό μέτρο καλλιέργειας για τη μεταχείριση Α τη χρονική περίοδο 23-25/6/14



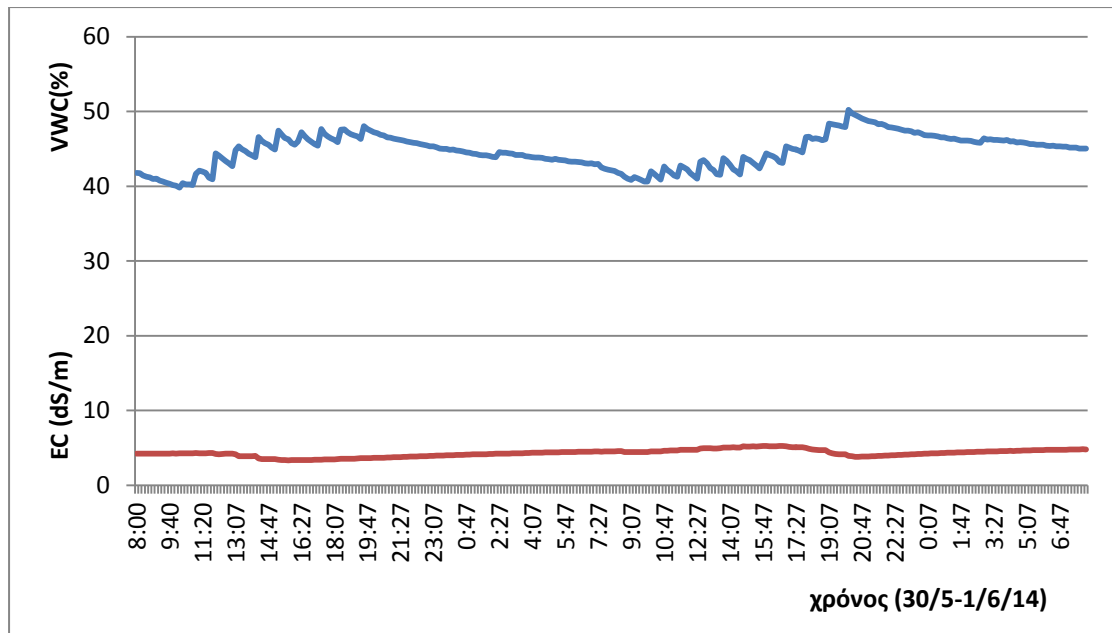
Σχήμα 3.4: Ιστόγραμμα με την ημερήσια κατανομή του μέσου όρου δόσης άρδευσης ανά τετραγωνικό μέτρο καλλιέργειας για τη μεταχείριση Β τη χρονική περίοδο 23-25/6/14

Γ.2. Περιεκτικότητα της πλάκας πετροβάμβακα σε υγρασία και διακύμανση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

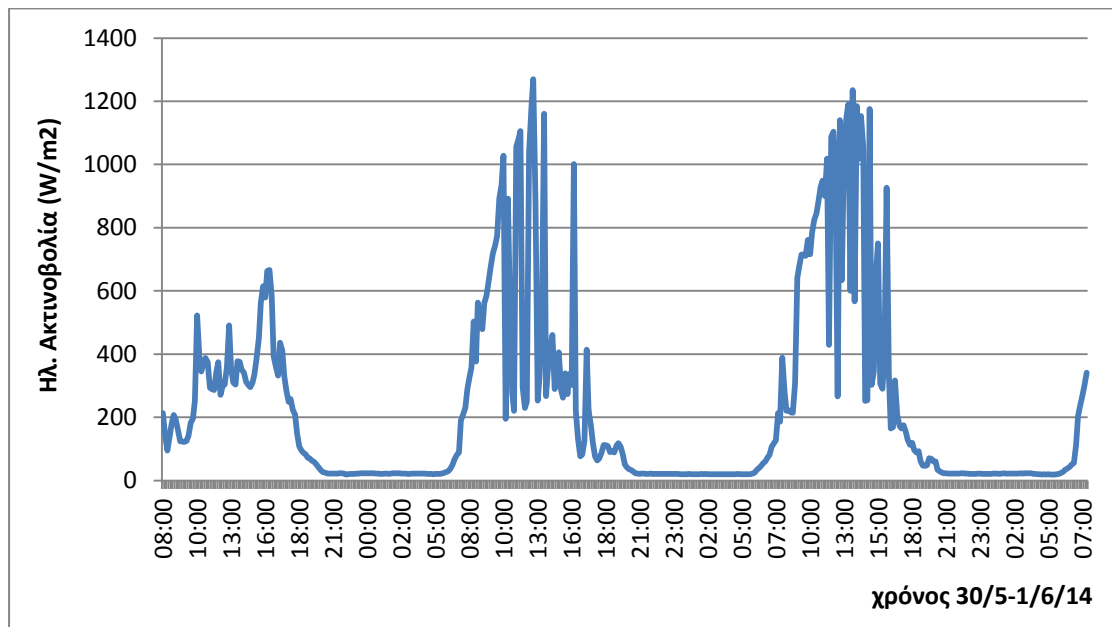
Η ημερήσια μέση περιεκτικότητα της πλάκας πετροβάμβακα σε νερό είναι διαφορετική στις δυο μεταχειρίσεις όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.5-6 και 3.8-9, γεγονός που αντανακλά ένα σαφή διαχωρισμό μεταξύ των δυο στρατηγικών άρδευσης, της άρδευσης με βάση μόνο τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας και της άρδευσης μέσω ενός προγράμματος στο οποίο ο έλεγχος της άρδευσης γίνεται με έλεγχο της υγρασίας στο υπόστρωμα με τη χρήση αισθητήρα. Για την χρονική περίοδο από 30/5 έως 1/6 (τέλος της άνοιξης και πριν την έναρξη της συγκομιδής των καρπών τομάτας) η διακύμανση της υγρασίας στο υπόστρωμα και της ηλιακής ακτινοβολίας απεικονίζονται στα Σχήματα 3.5 έως 3.7. Γι' αυτή τη περίοδο η μέση τιμή της υγρασίας (SD+/-) στο υπόστρωμα (μέτρηση με Grodan-control) για τη μεταχείριση A ήταν 54,56 % (+/- 3,88%) (Σχήμα 3.5), με την απορροή να κυμαίνεται στο 24,41% ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τη μεταχείριση B ήταν 44,69 % (+/- 2,24%) (Σχήμα 3.6) και 18,17%.



Σχήμα 3.5: Διακύμανση υγρασίας ($\theta\%$) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) πετροβάμβακα (μέτρηση με Grodan WCV-control τοποθετημένος κατακόρυφα στη πάνω πλευρά του σάκου σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή) για τη χρονική περίοδο 30/5-1/6/14. Άρδευση με βάση προβλέψεις διαπνοής των φυτών και μετρήσεις της υγρασίας του υποστρώματος (Μεταχείριση A).

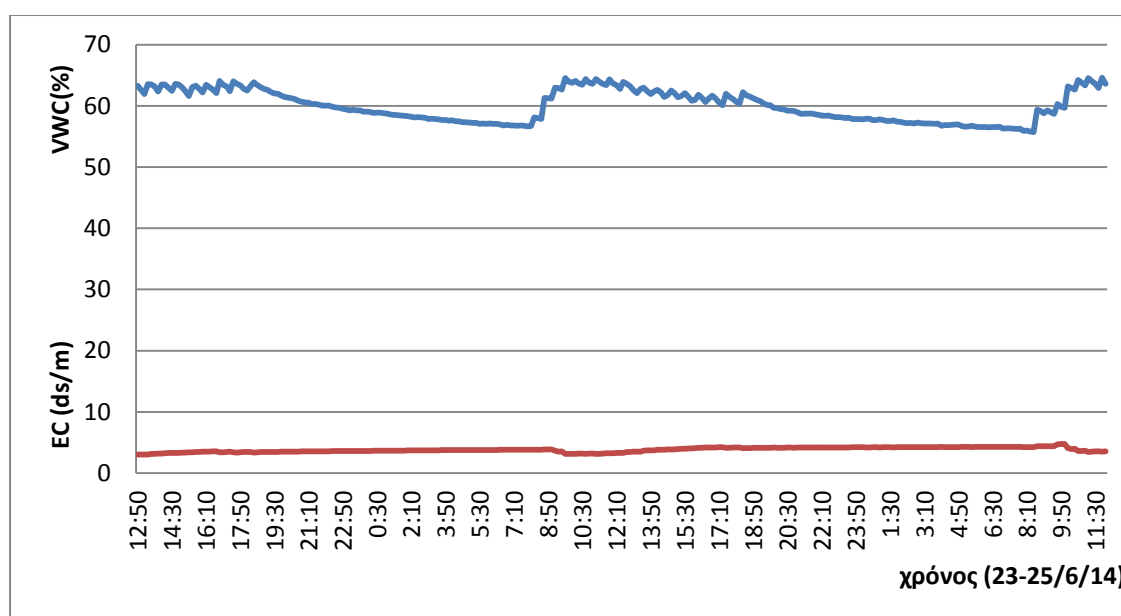


Σχήμα 3.6: Διακύμανση υγρασίας ($\theta\%$) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) πετροβάμβακα (μέτρηση με Grodan WCV-control τοποθετημένος κατακόρυφα στη πάνω πλευρά του σάκου σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή) για τη χρονική περίοδο 30/5-01/6. Άρδευση με βάση προβλέψεις διαπνοής των φυτών και σταθερή δόση ποτίσματος (Μεταχείριση Β).

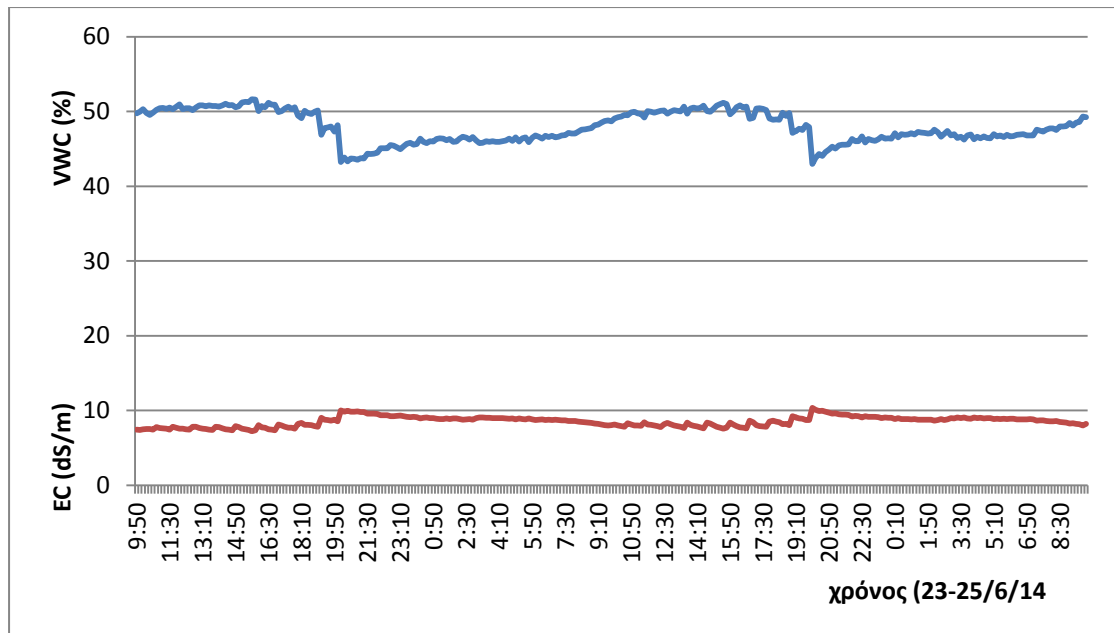


Σχήμα 3.7: Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) στο τέλος της άνοιξης (30/5-1/6)

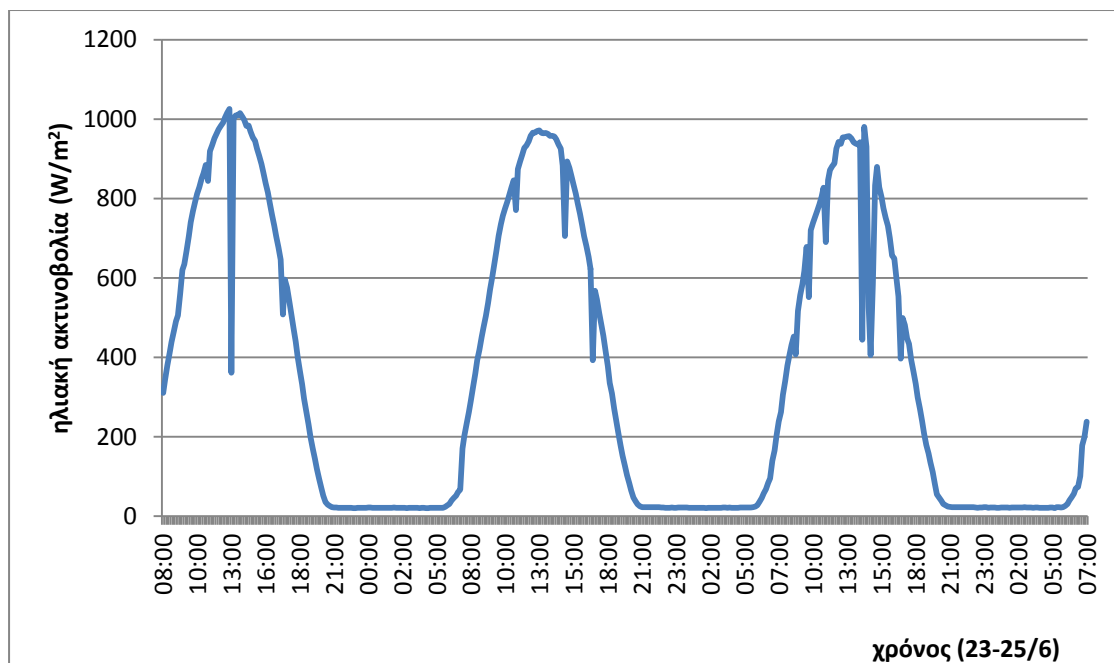
Οι αντίστοιχες μεταβολές υγρασίας υποστρώματος και ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη χρονική περίοδο συλλογής των καρπών από την 3^η ταξικαρπία, περίοδος που αντιστοιχεί περίπου στο μέσο της συγκομιδής (23 έως 25/6), απεικονίζονται στα Σχήματα 3.8 έως 3.9. Η μέση τιμή (SD+/-) υγρασίας στο υπόστρωμα (Σχήμα 3.8) για τη μεταχείριση Α κυμάνθηκε στο 60,005 % (+/-2,56%) με την απορροή στο 38,64%. Οι αντίστοιχες τιμές για τη μεταχείριση Β ήταν: υγρασία 47,89% (+/-2,09%) (Σχήμα 3.9) και 34,7% (τα δεδομένα της απορροής δεν παρουσιάζονται).



Σχήμα 3.8: Διακύμανση υγρασίας (θ%) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) πετροβάμβακα (μέτρηση με Grodan WCV-control τοποθετημένος κατακόρυφα στη πάνω πλευρά του σάκου σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή) για τη χρονική περίοδο 23-25/6. Άρδευση με βάση προβλέψεις διαπνοής των φυτών και μετρήσεις υγρασίας υποστρώματος (Μεταχείριση Α).



Σχήμα 3.9: Διακύμανση υγρασίας (θ%) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) πετροβάμβακα (μέτρηση με Grodan WCV-control τοποθετημένος κατακόρυφα στη πάνω πλευρά του σάκου σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή) για τη χρονική περίοδο 23-25/6/14. Άρδευση με βάση προβλέψεις διαπνοής ων φυτών και σταθερή δόση ποτίσματος (Μεταχείριση Β).



Σχήμα 3.10: Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας (W/m²) στο τρίτο δεκαήμερο του Ιουνίου 23-25/6

Γενικά η μέση τιμή της υγρασίας του υποστρώματος (με δεκάλεπτες καταγραφές στη διάρκεια του 24ώρου από τον αισθητήρα της Grodan^R (Grodan BV, μοντέλο:WCM-A)) ήταν στη περίπτωση της άρδευσης με βάση εκτιμήσεις διαπνοής των φυτών και μετρήσεις υγρασίας του υποστρώματος (Μεταχείριση Α) μεγαλύτερη από αυτή της άρδευσης με βάση εκτιμήσεις διαπνοής των φυτών και σταθερή διάρκεια ποτίσματος (Μεταχείριση Β). Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η μέση τιμή υγρασίας υποστρώματος για τις δυο μεταχειρίσεις, (δεδομένα από 1/4 έως 11/7). Συνολικά για όλη τη διάρκεια των παρατηρήσεων από την εγκατάσταση της καλλιέργειας (1/4/14) έως την εγκατάλειψή της (11/7/14) για τη μεταχείριση Α, η μέση (SD+/-) τιμή υγρασίας στο υπόστρωμα ήταν 57,28(+/-3,2 %) με μέγιστη και ελάχιστη τιμή 63,53% και 50,26% αντίστοιχα. Στην περίπτωση της μεταχείρισης Β οι σχετικές τιμές ήταν 46,29(+/-2,1%), 50,92% και 41,41%. Κατά μέσο όρο η περιεχόμενη υγρασία του υποστρώματος για τη μεταχείριση Α, κινήθηκε σταθερά σε υψηλότερες τιμές σε σχέση με αυτή της μεταχείρισης Β κατά 21,3 %. Επίσης, από τα Σχήματα της μεταβολής της υγρασίας στο υπόστρωμα για τις δυο χρονικές περιόδους από 30/5 έως 16/5 και από 23 έως 25/6, παρατηρείται ότι ο χρόνος που χρειάστηκε η υγρασία να αγγίξει και να ξεπεράσει την προκαθορισμένη τιμή του 60% ήταν σε όλες τις περιπτώσεις κατά πολύ μικρότερος από ότι στην μεταχείριση με σταθερή δόση ποτίσματος. Επίσης στη μεταχείριση με τη σταθερή δόση ποτίσματος η τιμή της υγρασίας δεν κατόρθωσε να αγγίξει την επιθυμητή τιμή του 60 % όπως προκύπτει από τα Σχήματα 3.6 και 3.9

Η μέση τιμή υγρασίας καθορίστηκε κυρίως από τη διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη διάρκεια της άρδευσης. Στη διάρκεια των συννεφιασμένων ημερών η μέση τιμή της υγρασίας στη πλάκα πετροβάμβακα και για τις δυο μεταχειρίσεις ήταν μεγαλύτερη από αυτή που καταγράφηκε τις ηλιόλουστες ημέρες (όταν τα φυτά χρειάζονται περισσότερο νερό). Η μεγαλύτερη διάρκεια του χρόνου άρδευσης (στη περίπτωση της άρδευσης με βάση εκτιμήσεις διαπνοής των φυτών και μετρήσεις της υγρασίας του υποστρώματος) συσχετίστηκε με υψηλότερες τιμές υγρασίας. Στη διάρκεια των ηλιόλουστων ημερών, οι ημερήσιες μεταβολές της υγρασίας του υποστρώματος μεταξύ ημέρας και νύχτας ήταν μεγαλύτερες. Η αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) ήταν μεγαλύτερη στη διάρκεια της νύχτας. Και στις δυο μεταχειρίσεις, η ημερήσια μέση τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας

(EC) στο υπόστρωμα ήταν σαφώς μεγαλύτερη από τη τιμή στόχου, πιθανά ως συνέπεια του ποσοστού έκπλυσης (δηλαδή η αναλογία όγκου νερού που αρδεύεται προς το νερό που εκπλύεται από τη καλλιέργεια) ειδικά στη περίπτωση της μεταχείρισης με σταθερή δόση άρδευσης η απορροή κυμάνθηκε στο 23,65 % ενώ η επιθυμητή τιμή ήταν 30 %.

Γ.3. Συχνότητα άρδευσης, όγκος άρδευσης και αποδοτικότητα άρδευσης

Σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα άρδευσης, με βάση τη τιμή της εδαφικής υγρασίας, όταν αυξάνεται η τιμή του σημείου που το σύστημα ξεκινά την άρδευση (set point) τότε αυξάνεται και η συχνότητα των αρδεύσεων και ο μέσος ημερήσιος όγκος νερού που παρέχεται στα φυτά για την διατήρηση της επιθυμητής τιμής της EC.

Στο Πίνακα 3.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται, ο συνολικός όγκος άρδευσης και οι μέσες ημερήσιες τιμές για την υγρασία (water content, WC) και την ηλεκτρική αγωγιμότητα (electrical conductivity, EC) για τη κάθε μεταχείριση. Ο βαθμός απορροής που επιτεύχθηκε υπολογίστηκε από τον όγκο του θρεπτικού διαλύματος που προσροφήθηκε από την καλλιέργεια προς τον όγκο του θρεπτικού διαλύματος που παρασχέθηκε στην καλλιέργεια.

Η μέση ημερήσια τιμή του όγκου άρδευσης ανά φυτό ήταν 1,780 Lt/ημέρα για τη μεταχείριση με βάση προβλέψεις της διαπνοής των φυτών και χρήση αισθητήρα εδαφικής υγρασίας (Μεταχείριση Α) και 1,252 Lt/ημέρα για τη μεταχείριση Β η οποία αρδεύονταν με σταθερή δόση.

Πίνακας 3.1: Μέσες τιμές υγρασίας (θ%) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας πετροβάμβακα (EC dS/m) στα πλαίσια των δυο προγραμμάτων άρδευσης

	Μεταχείριση Α: άρδευση με βάση τη συγκέντρωση από ηλιακή ακτινοβολία και αισθητήρα υγρασίας	Μεταχείριση Β: άρδευση με βάση τη συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας και σταθερή δόση άρδευσης
Συνολικός όγκος νερού άρδευσης (Lt)	33.801,7	25.094.2
Μέση τιμή υγρασίας στο υπόστρωμα (θ %)	57.28	46.29
Μέση τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC dS/m)	3,69	6.41
Μέση τιμή όγκου αρδευτικού νερού ((L/φυτό/ημέρα)	1.780	1.255
Μέση τιμή δόσης εφαρμογής αρδευτικού νερού (L/φυτό/ημέρα)	1.34	0.9583
Μέση τιμή απορροής (%)	32.75	23.65

Το ποσοστό της απορροής κυμάνθηκε στο 32,75% στην περίπτωση της μεταχείρισης στην οποία εφαρμόστηκε ο αισθητήρας ενώ αντίστοιχα για την μεταχείριση που αρδεύονταν με σταθερή δόση το ποσοστό ήταν 23,65%. Η διαθέσιμη βιβλιογραφία έχει δείξει ότι για τις εκτός εδάφους καλλιέργειες το ποσοστό έκπλυσης πρέπει να κυμαίνεται από 25% έως 50% ανάλογα με την ηλεκτρική αγωγιμότητα του θρεπτικού διαλύματος και τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες (Van Os, 1995) Συνήθως στα εμπορικά και πλήρως αυτοματοποιημένα θερμοκήπια το ημερήσιο ποσοστό έκπλυσης δεν είναι σταθερό. Προβλέπεται διαφορετική τιμή ώστε ο όγκος του διαλύματος που απομακρύνεται από το υπόστρωμα να είναι διαφορετικός στη διάρκεια μιας ημέρας. Γενικά, ο στόχος είναι να υπάρχει μικρή απορροή κατά τις πρώτες

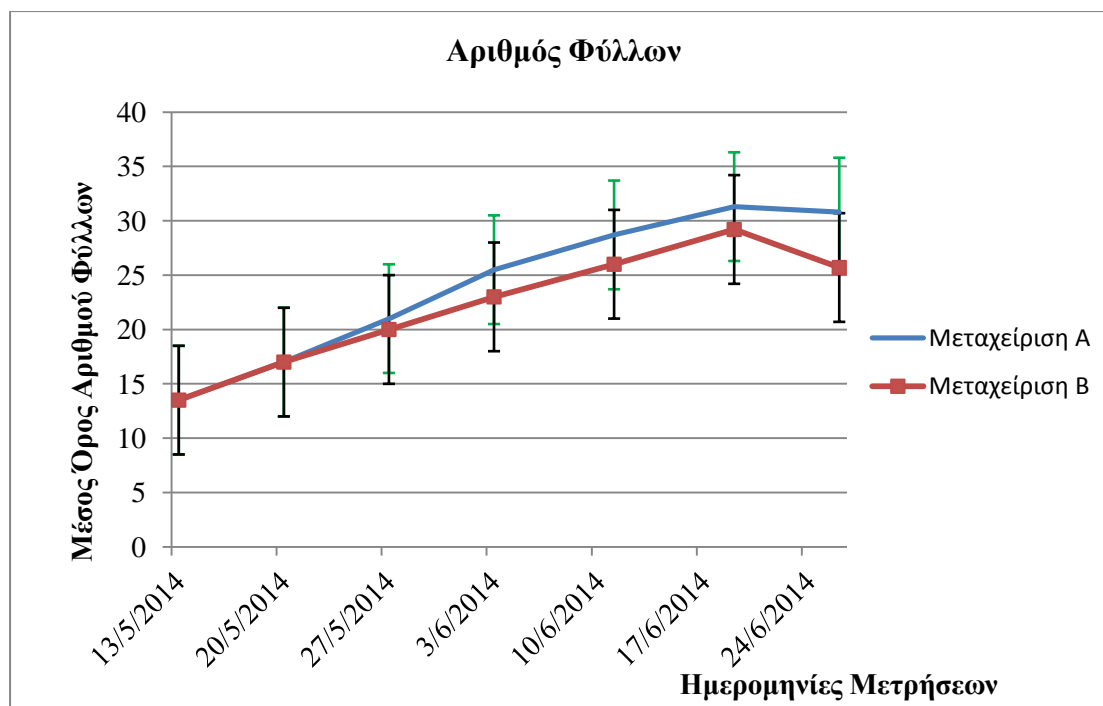
πρωινές ώρες και να αυξάνει αγγίζοντας ποσοστά της τάξης του 40% κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες (μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία) (Shelford et al., 2004).

Η μέση ημερήσια κατανάλωση νερού για τα φυτά κυμάνθηκε στα 0,9583 (Lt/φυτό/ημέρα) και 1,34 (Lt/φυτό/ημέρα) αντίστοιχα για τις δυο μεταχειρίσεις (Πίνακας 3.1). Ο Adams (1989) αναφέρει ότι η ημερήσια πρόληψη νερού από ένα φυτό τομάτας την περίοδο της καρποφορίας είναι 1,4 Lt.

Γ.5. Σύγκριση του ρυθμού ανάπτυξης των φυτών (Ύψος φυτών, Αριθμός Φύλλων)

Γ.5.1. Μέτρηση αριθμού φύλλων

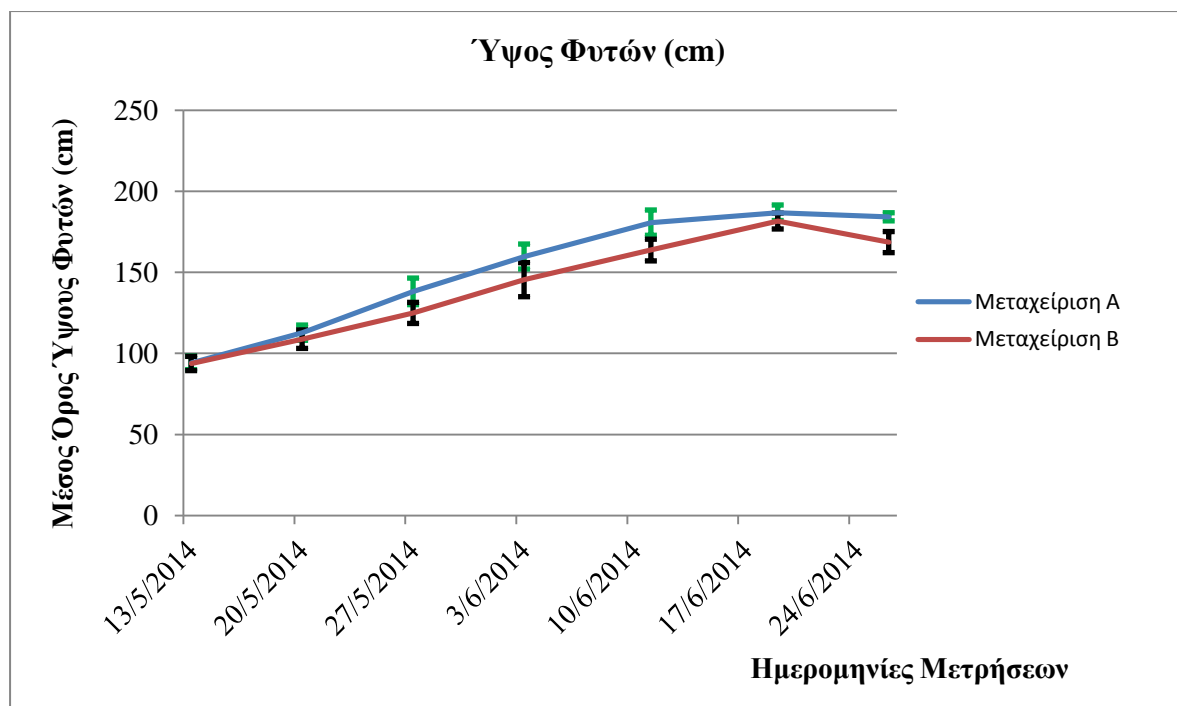
Παράλληλα με τη μέτρηση του ύψους των φυτών καταγραφόταν ο αριθμός φύλλων που έφεραν τα φυτά. Με βάση τα αποτελέσματα (Γράφημα 3.11) εντοπίστηκαν στατιστικές διαφορές (Συμαντικότητα=0,044). Κατά μέσο όρο (SD+/-) τα φυτά από τη μεταχείριση Α έφεραν 23,97 (+/- 0,63 %) φύλλα και 22,047 ((+/- 0,57 %) από τη μεταχείριση Β.



Σχήμα 3.11: Διακύμανση και τυπική απόκλιση του αριθμού φύλλων των φυτών για τη μεταχείριση A και B

Γ.5.2. Μέτρηση του ύψους φυτών

Πραγματοποιήθηκαν εβδομαδιαίες μετρήσεις για τη χρονική περίοδο από 13/5 έως 24/6/14. Στις 24/6 τα φυτά της καλλιέργεια κορφολογήθηκαν στο ύψος της 6^{ης} ταξιανθίας. Τα δεδομένα των φυτών από τις δυο μεταχειρίσεις εμφανίζονται στα Σχήμα 3.12. Η εφαρμογή της ANOVA στα δεδομένα κατέδειξε σημαντικές στατιστικές διαφορές (Σημαντικότητα=0,004). Το μέσο ύψος των φυτών για τη μεταχείριση στην οποία η διάρκεια της άρδευσης ήταν σταθερή ήταν χαμηλότερο σε σχέση με την μεταχείριση της οποίας η άρδευση πραγματοποιούνταν με αισθητήρα υγρασίας. Η μέση τιμή (SD+/-) ύψους για την μεταχείριση A κυμάνθηκε στα 151 cm (+/- 0,909 %) ενώ για τη μεταχείριση B στα 141,04 cm (+/-1,710 %).



Σχήμα 3.12: Διακύμανση (μέση και τυπική απόκλιση) ύψους φυτών για τη μεταχείριση A και B

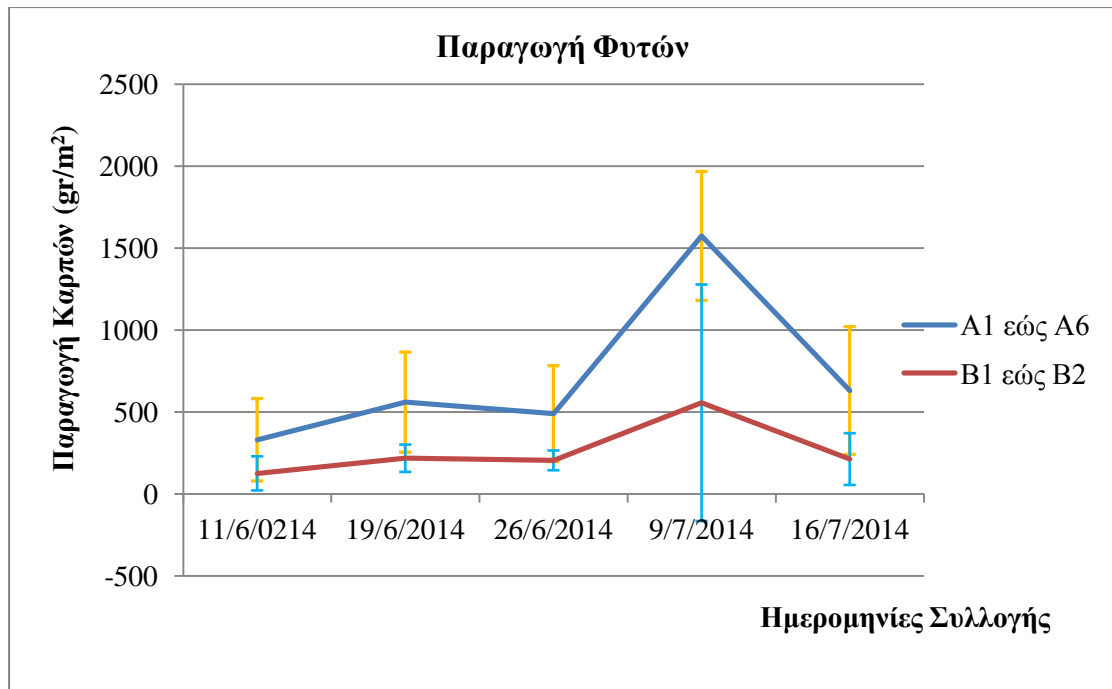
Γ.5.3. Διακύμανση της παραγωγής

Η συνολική παραγωγή (συνολικός αριθμός και βάρος των εμπορεύσιμων καρπών) για τη Μεταχείριση A (άρδευση βάση προβλέψεις διαπνοής και αισθητήρα εδαφικής υγρασίας) ήταν αυξημένη σε σύγκριση με αυτή της Μεταχείρισης B, όπως προκύπτει από τον αυξημένο αριθμό και βάρος των καρπών.

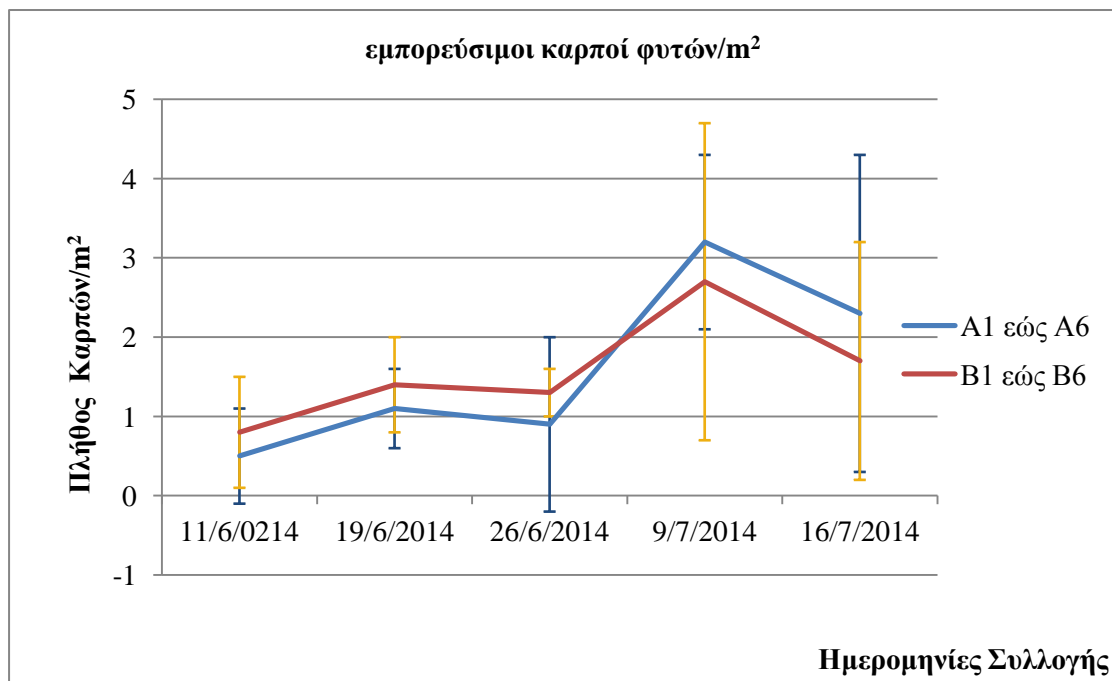
Η συνολική παραγωγή για τη μεταχείριση A (στην οποία η άρδευση γινόταν βάση προβλέψεις της διαπνοής των φυτών και μέτρηση της υγρασίας του υποστρώματος με αισθητήρα), ανήλθε στα 281,64 kg με μια μέση παραγωγή 2,23 kg εμπορεύσιμων καρπών ανά φυτό. Οι καρποί που συλλέχτηκαν από τη μεταχείριση A είχαν κατά μέσο όρο 35,34% αυξημένο μέσο βάρος σε σύγκριση με τους αντίστοιχους της μεταχείρισης B (223,48

gr/καρπός έναντι 144,48 gr/καρπός από τη μεταχείριση B). Για τη μεταχείριση B (σταθερή δόση άρδευσης) οι αντίστοιχες τιμές ήταν 221,98 kg, 1,755 Kg/φυτό. Σύμφωνα με τα δεδομένα παραγωγής από τα φυτά που είχαν σημανθεί για την κάθε μεταχείριση, η απόδοση της καλλιέργειας A κυμάνθηκε στα 9,70 kg/m² ενώ στην περίπτωση της μεταχείρισης B στα 6,92 kg/m².

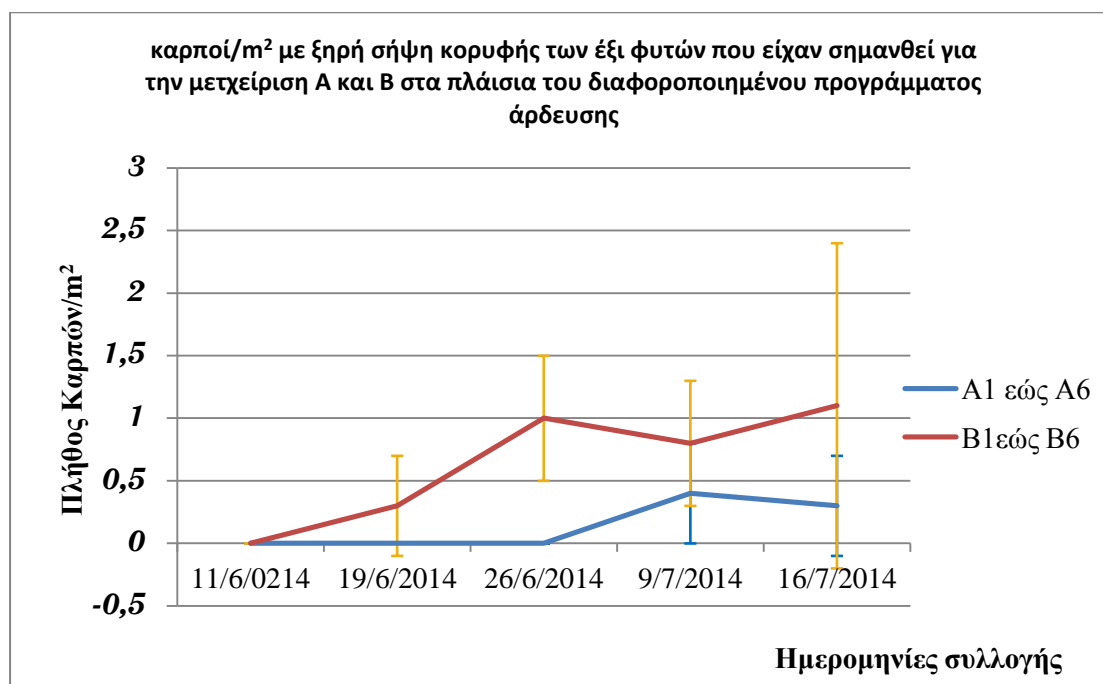
Σημαντικότερη ήταν η διαφορά μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων στο τελικό ποσοστό των καρπών που εμφάνισαν τη φυσιολογική ανωμαλία της ξηρής σήψης κορυφής. Έτσι για τη μεν μεταχείριση A το ποσοστό αυτό κυμάνθηκε στο 8,52% ενώ για τη μεταχείριση B άγγιξε το 28,17%. Η ανωμαλία αυτή προκαλείται από την τοπική έλλειψη ασβεστίου στους καρπούς γεγονός ικανό να διαταράξει την δομή των κυττάρων στο σημείο αυτό, ως αποτέλεσμα υδατικών καταπονήσεων, έλλειψη οξυγόνου στη ρίζα, υψηλή αλατότητα στο καλλιεργητικό μέσο από την θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα (Saure 2001; Navarro et. al., 2005). Σε μεγάλο βαθμό επηρεάζεται από τα άλατα καλίου στο θρεπτικό διάλυμα που από τη μια βελτιώνουν την ποιότητα των καρπών τομάτας (περιεχόμενο διαλυτών σακχάρων, βιταμίνη E, καροτονοειδή), από την άλλη μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την πρόσληψη μαγνησίου, ασβεστίου και βορίου από το θρεπτικό διάλυμα (Gent PPN. 2004; Ramirez et. al., 2012. Αυτή η ανταγωνιστική αλληλεπίδραση του καλίου μπορεί να μειώσει τη συγκέντρωση ασβεστίου στο μέσο. Υψηλότερες τιμές στο θρεπτικό διάλυμα ή του αρδευτικού νερού (γενικά στο καλλιεργητικό μέσο) μπορεί να μειώσουν την απόδοση της καλλιέργειας διότι μειώνεται το μέγεθος των καρπών.



Σχήμα 3.13: Διακύμανση παραγωγής (gr/m^2) και τυπικές αποκλίσεις από έξι φυτά που είχαν σημανθεί για τη μεταχείριση A και B στα πλαίσια εφαρμογής του διαφοροποιημένου προγράμματος άρδευσης για τη καλλιέργεια (μέσοι όροι)



Σχήμα 3.14: Αριθμός εμπορεύσιμων καρπών/m² (μέση τιμή και τυπικές αποκλίσεις) από έξι φυτά που είχαν σημανθεί για τη μεταχείριση A και B στα πλαίσια εφαρμογής του διαφοροποιημένου προγράμματος άρδευσης για τη καλλιέργεια



Σχήμα 3.15: Αριθμός καρπών που παρουσίασαν τη φυσιολογική ανωμαλία ξηρής σήψης κορυφής από έξι φυτά που είχαν σημειωθεί για τη μεταχείριση A και B στα πλαίσια εφαρμογής του διαφοροποιημένου προγράμματος άρδευσης για τη καλλιέργεια (μέσοι όροι και τυπικές αποκλίσεις)

Γ.8. Δείκτης παραγωγικότητας νερού

Ο δείκτης παραγωγικότητας νερού (water use efficiency WUE) για την καλλιέργεια της τομάτας (g L^{-1} ή kg m^{-3}) υπολογίζεται ως η αναλογία βάρους των εμπορεύσιμων καρπών (gr/φυτό) είτε προς τον όγκο του νερού άρδευσης (δείκτης παραγωγικότητας νερού εφαρμογής, WUE-applied) είτε προς τον όγκο του νερού που απορροφήθηκε από τα φυτά (όγκος νερού εφαρμογής μείον τον όγκο της απορροής) (δείκτης παραγωγικότητας ωφέλιμης χρήσης νερού WUE-used) (Saha et. al.,2008)

Για τη μεταχείριση A: $\text{WUE-applied}=22,95 \text{ kg/m}^3$

$\text{WUE-used}=34,07 \text{ kg/m}^3$

Για τη μεταχείριση B: WUE-applied=22,06 kg/m³

WUE-used=28,84 kg/m³

Τα αποτελέσματα (Πίνακας 3.1) έδειξαν ότι ο όγκος του νερού που χρησιμοποιήθηκε κατά την άρδευση της Μεταχείρισης A, με βάση προβλέψεις της διαπνοής των φυτών και τον αισθητήρα, ήταν μεγαλύτερος κατά 34,69% από αυτόν που χρησιμοποιήθηκε στην άρδευση της μεταχείρισης B. Για να παραχθεί 1 kg εμπορεύσιμων καρπών τομάτας απαιτήθηκαν 28,81 Lt και 34,71 Lt θρεπτικού διαλύματος αντίστοιχα για τη Μεταχείριση A και B.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα δυο διαφορετικών προγραμμάτων άρδευσης υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας, σε υπόστρωμα πετροβάμβακα. Στην μεταχείριση A εφαρμόστηκε ένα πρόγραμμα άρδευσης που ο προγραμματισμός του βασίστηκε στην διαπνοή των φυτών σε συνδυασμό με την μέτρηση της υγρασίας του υποστρώματος, ενώ στη μεταχείριση B η παρεχόμενη ποσότητα νερού βασίστηκε στην διαπνοή των φυτών και σε μία σταθερή ποσότητα παρεχόμενου νερού. Έγινε καταγραφή μετρήσεων και χαρακτηριστικών των φυτών ανά πρόγραμμα άρδευσης. Ειδικότερα, ανά πρόγραμμα άρδευσης καταγράφηκαν τιμές σχετικές με την υγρασία και την ηλεκτρική αγωγιμότητα σε επιλεγμένα σημεία του υποστρώματος, την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ ποσοτικό χαρακτηρισμό της καλλιέργειας καταγράφηκαν το ύψος και ο αριθμός φύλλων σε επιλεγμένο αριθμό φυτών. Επιπλέον καταγράφηκαν ο αριθμός των εμπορεύσιμων και μη εμπορεύσιμων καρπών ανά πρόγραμμα άρδευσης καθώς επίσης και η ποσότητα των παραγωγής. Η καταγραφή των παραπάνω δεδομένων πραγματοποιήθηκε από 1 Απριλίου έως 16 Ιουλίου.

Από την επεξεργασία των δεδομένων διαπιστώθηκε ότι, το πρόγραμμα άρδευσης που εφαρμόστηκε στην μεταχείριση B δεν κατάφερε να ελέγξει την υγρασία στο υπόστρωμα, με συνέπεια ο μέσος όρος της υγρασίας να είναι 46,69% έναντι της επιθυμητής τιμής 60%. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τα φυτά

να βιώσουν συνθήκες υδατικής καταπόνησης γεγονός που επηρέασε αρνητικά τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της παραγωγής.

Αντίθετα, το πρόγραμμα άρδευσης που εφαρμόστηκε στην μεταχείριση A κατάφερε να διατηρήσει το μέσο όρο του ποσοστού της υγρασίας στο υπόστρωμα στο 57,28%, τιμή η οποία πλησιάζει αρκετά την επιθυμητή 60%. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα το παραγόμενο προϊόν της μεταχείρισης A να υπερτερεί σε ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά.

Συμπερασματικά, ένα αποτελεσματικό πρόγραμμα άρδευσης θα πρέπει να διατηρεί την υγρασία στο υπόστρωμα κοντά στο επίπεδο του εύκολα διαθέσιμου νερού και πλησιέστερα στην υδατοϊκανότητα του φυτοδοχείου, χωρίς να αυξάνεται σημαντικά η ηλεκτρική αγωγιμότητα στην περιοχή της ριζοσφαίρας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ Κεφαλαίου Α

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization of the United States; Rome, Italy: 1999. FAO Irrigation and drainage paper 56
- Bacci I., Battista P., Cardarelli M., Carmassi G., Roupael Y., Incrocci L., Malorgio F., Pardossi A., Rapi B., Colla G., 2011. Modelling Evapotranspiration of Container Crop for Irrigation Scheduling Evapotranspiration – From Measurements to Agricultural and Environmental Applications, Dr. Gerosa G. (ED.), ISBN:978953-307-512-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/pdfs-wm/22700.pdf>
- Bacci L., Battista P., Rapi B. An Integrated method for irrigation scheduling of potted plants. *Sci. Hortic.* 2008;116:89–97
- Bacci L., Checcacci E. Il pilotaggio dell'irrigazione nelle colture florovivaistiche In: Pardossi A., Incrocci L., Marzietti P., editors. *Uso Razionale delle Risorse nel Florovivaismo: L'Acqua*. Vol. 5. ARSIA; Firenze, Italy: 2004. pp. 147–156
- Bailey B. J., Hagget B. G.D., Hunter A., Albert W.J., Svanberg L.R. 1988. Monitoring nutrient film solutions using ion-selective electrodes. *J. Agric. Engng. Res.*, 40:129-142
- Bailey B.J., Montero J.I., Biel C., Wilkinson D.J., Anton A., Joliet O. 1993. Transpiration of *Ficus benjamina*: comparison of measurement with predictions of Penman-Montheith model a simplified version. *Agricultural and Forest Meteorology* 65, 229-24
- Bailey, B.J. 2002. Control and monitoring of glasshouses. *Proceedings of the UK Controlled Environment Users' Group*. Vol. 13, 2-5.
- Baille A. 1994. Irrigation management strategy of greenhouse crops in Mediterranean countries. *Acta Horticulturae*, 361, 105-122
- Baille A., 1992. Water status monitoring in greenhouse *Acta Horticulturae*, 304, 15-2
- Baille M., Baille A., Laury D., 1994. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agricultural and Forest Meteorology* 71, 83-97

- Baille, M., Baille, A., Laury, J.C., 1994. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Sci. Hort.* 59, 217–232
- Batchelor, T.A., 2004. The impact of the Montreal Protocol and European Union controls on methyl bromide. *Proceedings of Fifth International Conference on Alternatives to Methyl Bromide. Lisbon Portugal, 27-30 Sept. 2004*, pp. 21-25.
- Beeson Jr, R., Arnold, M., Bilderback, T., Bolusky, B., Chandler, S., Gramling, H., Lea-Cox, J., Harris, J., Klinger, P., and Mathers, H., 2004. Strategic vision of container nursery irrigation in the next ten years. *J. Environ. Hort* 22:113-115.
- Belayneh, B.E., Lea-Cox, J.D., and Lichtenberg, E., 2013. Costs and Benefits of Implementing Sensor-controlled Irrigation in a Commercial Pot-in-Pot Container Nursery. *HortTechnology* 23:760-769
- Beltrão, N. de M.; Fideles, J. F.; Figueiredo, I. Uso adequado de casa-de-vegetação e de telados na e experimentação agrícola. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.3, p.547-552, 2002
- Ben-Yaakov S, Ben-Asher J. 1982. System design and analysis of a continuous monitoring of the environment in nutrient solution culture. *Journal of Plant Nutrition*, 5:45-55
- Bilderback, T.E. and W.C. Fonteno. 1987. Effects of container geometry and media physical properties on air and water volumes in containers. *J. Environ. Hort.* 5:180–182
- Bower H., 1990. Agricultural chemicals and groundwater quality. *J. Soil Water Conserv.* 45(2): 184-189
- Bower, C.A., Kratky, B.A., Ikeda, N., 1975. Growth of tomato on a tropical soil under plastic cover as influenced by irrigation practice and soil salinity. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 100, 519–521.
- Brooks, R. H. and A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Colorado State Univ., Hydrology Paper No. 3.*
- Brun R., Paris B., Hammelin I. 1995. Fertigation management of rose plants grown in greenhouse on rockwool. *Adv. Hort. Sci.*, 7, 145-1

- Burnett, S.E. and van Iersel, M.W. 2008. Morphology and irrigation efficiency of *Gaura lindheimeri* grown with capacitance-sensor controlled irrigation. *HortScience* 43:1555-1560
- Chappell, M., Dove, S.K., van Iersel, M.W., Thomas, P.A., and Ruter, J., 2013. Implementation of Wireless Sensor Networks for Irrigation Control in Three Container Nurseries. *HortTechnology* 23:747-753.
- Chappell, M., van Iersel, M., Lichtenberg, E., Majsztik, J., Thomas, P., Ruter, J., and Wells, S. 2012. Benefits of Precision Irrigation of *Gardenia augusta* "Heaven Scent"™: Reducing Shrinkage, Shortening the Cropping Cycle, and Economic Impact. *SNA Research Conference* vol. 57. 2012, pp:321
- Chartzoulakis K., Paranychianakis N. and Angelakis A., 2001. Water resources management in the island of Crete, Greece with emphasis on the agricultural use. *Water Policy* 3: 193-205
- De Boodt, M. and O. Verdonck. 1972. The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Hort.* 26:37-44
- De Graaf, R. (1988). Automation of the water supplied of glasshouse crops by means of calculating the transpiration and measuring the amount of drainage water. *Acta Hortic.* 229:219-231.
- De Pascale, S. and Paradiso, R. 2001. Water and nutrient uptake of roses growing in two inert media. *Acta Hort.* 548:631-640
- de Rijck, G.; Schrevens, E.; Baerdemaker, J. 1998. Thermal conductivity sensing for on-line monitoring and control of the moisture content in rockwool slabs. *Scientia Horticulturae*, v.74, p.p: 307-312
- De Villele O. (1974). Besoins en eau des cultures sous serres. Essai de conduit des arrosages en fonction de l'ensoleillement. *Acta Hort.* 35, 123-135.
- de Villèle O., 1972. Besoins en eau des cultures sous serre. *Acta Horticulturae*, 35, 123-1
- DIN EN 13041:2012-01, Standard-Beuth.eu
- Dudley H. *Hydroponics: The complete guide to Gardening Without Soil* 1998

- Dukes, M.D., Zotarelli, L., Morgan, K.T. (2010) Use of irrigation technologies for vegetable crops in Florida. *HortTechnology* 20:133–141
- Fonteno W. C. An approach to modeling air and water status of horticultural substrates. *Substrates in Horticulture*. 1989. *Acta Horticulture* 238: 67-74
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Crops and Drought - Making the Best Use of Water for Agriculture. FAO; Rome, Italy: 2002.
- Frantz, J.M., Welbaum, G.E., 1998. Producing horticultural crops using hydroponic tobacco transplant systems. *HortTechnology* 8, 392-395.
- Gieling T H; Van Os E A; De Jager A The application of chemo-sensors and bio-sensors for soilless cultures. *Acta Horticulturae*, 1988, 230, 357-361
- Girona, J., Mata, M., Fereres, E., Goldhamer, D.A., Cohen, M., 2002. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. *Agric. Water Manage.* 54,107–122.
- 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.
- Gruda, N. 2009. Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables? *J. of Applied Botany and Food Quality* 82: 141-147
- Hangland D.R., Arnon D.I., 1950. The water-culture method for growing plants without soil. *California Agr. Expt. Sta. Circular* 347, 1950
- Hartz, T.K., 1993. Drip-irrigation scheduling for fresh-market tomato production. *Hortscience* 28, 35–37.
- Hillel, D., 1997. Small scale irrigation for arid zones, principles and options. FAO, Rome, Italy.
- Hsiao T.C. 1990. Plant atmosphere interactions, evapotranspiration, and irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, 278, 55-
- HyunKyoung, C., SungMin, P., CheonSoon, J., 2001. Comparison of quality changes in soil and hydroponic cultured muskmelon fruits. *J. Korean Sc. Hortic. Sci.* 42(3):264-270

- Incrocci L., Incrocci G., Pardossi A., Lock G., Nicholl C., Balendonck J. (2009). The calibration of wet-sensor for volumetric water content and pore water electrical conductivity in different horticultural substrates. *Acta Horticulturae (ISHS)* 807:289-294
- Incrocci, L., Marzaletti, P., Incrocci, G., Di Vita, A., Balendonck, J., Bibbiani, C., Spagnol, S., and Pardossi, A., 2014. Substrate water status and evapotranspiration irrigation scheduling in heterogenous container nursery crops. *Agricultural Water Management* 131:30-40.
- Jemaa R., Boulard T., Baille A. (1995). Some results on water and nutrient consumption of a greenhouse tomato crop grown in rockwool. *Acta Hort* 408, 137-145.
- Jensen M.H. (1997). Hydroponics. *Hortscience* 32(6), 1018-1021
- Jolliet O., Bailey B.J. (1992). The effect of climate on tomato transpiration in greenhouse: measurements and models comparison. *Agric. Forest Meteor.* 58, 43-62
- Jones H.G. 2004. Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *J. Exp. Bot.* 55:2427–2436
- Jones, J.B., Jr., 1997. *Hydroponics. A Practical Guide for the Soilless Grower*. St. Lucie Press, Boca Raton, FL, USA In *Tecniche idroponiche per colture in serra* Tognoni F., Malorgio F., Incrocci L., Carmassi G., Massa D., Pardossi A. 2005.
- Kreij, C. de. Latest insights into water and nutrient control in soilless cultivation. *Acta Horticulturae*, v.408, p.47-61, 1995.
- Kruger E., Schmidt G., Bruckner U. Scheduling strawberry irrigation based upon tensiometer measurement and a climatic water balance model. *Sci. Hortic.* 1999;81:409–42
- Lazzara P., Rana G. The crop coefficient (Kc) values of the major crops grown under Mediterranean climate www.miraproject.eu/.../cropCoeff.pdf
- Majid Fandi, Jalal A. Al-Muhtaseb and Munir A. Hussein. Quality of Tomato as Affected by the Substrate in an Open Soilless Culture. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, Volume 4, No.1, 2008 -65- Yield and Fruit

- Malorgio F. (2005). Uso razionale delle risorse nel florovivaismo: l'acqua. Quaderno ARSIA 5/2004, 49-58.
- Malorgio, F., Scacco, M., Tognoni, F., Pardossi, A. (2001). Effect of nutrient concentration and water regime on cut rose production grown in hydroponic system. *Acta Hort.* 559:313-318.
- Maloupa E., Papadopoulos A., Bladenopoulou S., 1993. Evapotranspiration and preliminary crop coefficient of gerbera soilless culture grown in plastic greenhouse. *Acta Horticulturae* 335:519-52
- Martignon G., Pardossi A. 1993. Tecniche di coltivazione "senza suolo". *L'Informatore Agrario*, 7:61-65
- Mauro A., di Arena E., Fallico E., Lanza B., Passerini M. C., Maccarone E., 2001. Pfannhauser, W. Fenwick, G. R. Khokhar, S. A comparison of cherry tomato quality growth under alternative soil. In: *Biologically-active Phytochemicals in Food: Analysis, Metaboism, Bioavailability of EUROFOODHEM XI Meeting*, Norwich, UK. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK: 560-561
- Muñoz-Carpena, R., Dukes, M.D., Li, Y., Klassen, W. (2008). Design and field evaluation of a new controller for soil-water based irrigation. *Appl. Eng. Agr.* 24:183–191.
- Nemali, K.S., van Iersel, M.W., 2006. Calibration and performance of moisture sensors in soilless substrates: ECH2O and theta probes. *Sci. Hortic.* 112 (2007). 227-234
- Norrie J., Graham M.E.D., Dubé P.A., Gosselin A. Improvement in automatic irrigation of peat-grown greenhouse tomatoes. *Horttechnology.* 1994;4:154–159.
- Okuya A., Okuya T. 1988. The transpiration of greenhouse tomato plants in rockwool culture and its relationship to climatic factors. *Acta Horticulturae*, 230, 307-3
- Olle M , Ngouajio M , Anastasios Siomos A. Vegetable quality and productivity as influenced by growing medium: a review. *Žemdirbystė=Agriculture*, vol. 99, No. 4 (2012), p. 399–408

- O'Meara, L., M.R. Chappell, and M.W. van Iersel. 2014. Water use of *Hydrangea macrophylla* and *Gardenia jasminoides* in response to a gradually drying substrate. *HortScience* 49:493-498
- Osvald, J., Petrovic, N., 1996. Comparison of hydroponic and soil cultivation of chosen Solanaceae varieties in protected, non-heated areas. Proceeding of the 9th International Congress on Soilless Culture St. Helier, Jersey, Channel Islands (UK). International Society for Soilless Culture (ISOSC), Wageningen, Netherlands, 329-340. In *Tecniche idroponiche per colture in serra* Tognoni F., Malorgio F., Incrocci L., Carmassi G., Massa D., Pardossi A.2005.
- Pardossi A., Incrocci L., Incrocci G., Tognoni F., Marzialetti P. What limits and how to improve water use efficiency in outdoor container cultivation of ornamental nursery stocks. *Acta Hort. (ISHS)* 2009 , 843:73-80
- Pardossi, A. 1993. Le coltivazioni “senza suolo” per l’ ortofloricoltura protetta italiana L’ *Informatore Agrario*, 44: 39-41
- Pardossi, A., Incrocci, L., Incrocci, G., Malorgio, F., Battista, P., Bacci, L., Rapi, B., Marzialetti, P., Hemming, J., Balendonck, J. (2009). Root zone sensors for irrigation management in intensive agriculture. *Sensors* 9:2809–2835.
- Passam, H.C., Karapanos, I.C., Bebeli, P.J., Savvas, D., 2007. A review of recent research on tomato nutrition, breeding and post-harvest technology with reference to fruit quality. *European Journal of Plant Science and Biotechnology* 1, 1-21
- Puerta, A.R., Sato, S., Shinohara, Y., Maruo, T., 2007. A modified nutrient film technique system offers a more uniform nutrient supply to plants. *HortTechnology* 17, 227-233
- Ramin Shamshiri, Wan Ishak Wan Ismail. A Review of Greenhouse Climate Control and Automation Systems in Tropical Regions *J. Agric. Sci. Appl.* Volume 2, Issue 3 Sep. 2013 PP. 176-183
- Regan R.P. Water conservation in container production nurseries. *Irrigation scheduling. HortScience.* 1996; 31:917c

- Ristvey, A.G., Lea-Cox, J.D. and Ross, D.S. 2004. Nutrient uptake, partitioning and leaching losses from container-nursery production systems. *Acta Hort.* 630:321-328.
- Runia, W. (1994). Disinfection of recirculating water from closed production system. *Acta Hort.* 361:388-396
- Sadras, V.O., Milroy, S.P., 1996. Soil-water thresholds for the response of leaf expansion and gas exchange: a review. *Field Crops Res.* 47, 253–266.
- Santamaria, P., Gonnella, M., Elia, A., Parente, A., Serio, F., 2001. Ways of reducing rocket salad nitrate content. *Acta Hort.* 548: 529-536
- Savvas D.;Manos G. Automated Composition Control of Nutrient Solution in Closed Soilless Culture Systems *J. Agric. Engng Res.* (1999) 73, 29-33
- Savvas, D. Automated replenishment of recycled greenhouse effluents with individual nutrients in hydroponics by means of two alternative models. *Biosystems Engineering*, p.83, n.2, p.225-236, 2002
- Savvas, D., 2009. Modern developments in the use of inorganic media in greenhouse vegetable and flower production. *Acta Hort.* 819:73-86
- Savvas, D., Ntatsi, G., Passam, H.C. (2009). Plant nutrition and physiological disorder in greenhouse grown tomato, pepper and eggplant. *Eur. J of Plant Sci. and Biotec.*, 45-61.
- Savvas, D., Savva, A., Ntatsi, G., Ropokis, A., Karapanos, I., Krumbein, A., Olympios, C., 2011. Effects of three commercial rootstocks on mineral nutrition, fruit yield and quality in salinised tomatoes. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174, 154–162.
- Saxton K. E., Rawls W. J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2006;70:1569–1578.
- Schwarz, D., Kuchenbuch, P. (1998). Water uptake by tomato plants grown in closed hydroponic systems dependent on the EC-level. *Acta Hort.*, 458, 323-328.
- Sinclair, T.R., Hammond, L.C., Harrison, J., 1998. Extractable soil water and transpiration rate of soybean on sandy soils. *Agron. J.* 90, 363–368.

- Sonneveld C. (2000). Effect of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. PhD Thesis, Agricultural University, Wageningen, 151.
- Stanghellini C., Pardossi A., Kempkes F., Incrocci L. 2005. Closed water loop in greenhouses: effect of water quality and value of produce. *Acta Horticulturae* 691:233-242
- Stanghellini C., Van Meurers W.T.M. 1989. Crop transpiration: a greenhouse climate control parameter. *Acta Horticulturae*, 245, 384-3
- Stanghellini C., Van Meurers W.T.M. 1992. Environmental control of greenhouse crop transpiration. *J. Agric. Engng. Res.*, 51, 297-3
- Stanghellini, C. (1987). Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management. PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, the Netherlands, 150 pp.
- Steven R. E. Soil Water Measurement by Neutron Thermalization. *Encyclopedia of Water Science* 2003. pp:889-893
- Thompson R.B., Gallardo M., Valdez L.C., Fernández M.D. Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *Agric. Water Manage.* 2007;88:147–15
- Thompson, R.B., Martínez-Gaitan, C., Gallardo, M., Giménez, C., Fernández, M.D (2007). Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. *Agr. Water Mgt.* 89:261–274.
- Tüzel I.H., Tüzel Y., Meric M.K., Whalley R., Lock G. Response of cucumber to deficit irrigation. *Acta Hort. (ISHS)* 2009;807:259–264
- Van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
- Van Genuchten, M. T. and D. R. Nielsen. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *E. G. S.; Annales Geophysicae.* 3:615-628

- van Iersel, M., Seymour, R.M., Chappell, M., Watson, F., and Dove, S. 2009. Soil moisture sensor-based irrigation reduces water use and nutrient leaching in a commercial nursery. SNA Research Conference Vol. 54. 2009, pp.17
- Van Kooten, O., Heuvelink, E.; Stanghellini, C. (2008). New development in greenhouse technology can mitigate the water shortage problem of the 21st century. *Acta Hortic.* 767, 45-52.
- Van Noordwijk M. (1990). Synchronization of supply and demand is necessary to increase efficiency of nutrient use in soilless horticulture. *Plant Nutrition-physiology and applications*, 525-531
- Van Os E. A., 1995. Engineering and environmental aspects of soilless growing system. *Acta Horticulturae*, 396:25-32
- Van Os E. A., Ruijs M. N. A., van Weel P. A., 1991. Closed business system for less pollution from greenhouses. *Acta Horticulturae* 294:49-57
- Van Os, E.A., Wohanka, W., Bruins, M.A, Seidel, R. (2003). Disinfezioni delle soluzioni nutritive in sistemi fuori suolo a ciclo chiuso. *L'Informatore Fitopatologico* 51(3):30-34.
- Ventura F., Spano D., P. Duce P., Snyder R.L. 1999. An evaluation of common evapotranspiration equations. *Irrig Sci.* 18: 163–170
- Walter, I.A., R.G. Allen, R. Elliott, D. Itenfisu, P. Brown, M.E. Jensen, B. Mecham, T.A. Howell. R.L. Snyder, S. Eching, T. Spofford, M. Hattendorf, D. Martin, R.H. Cuenca, and J.L. Wright. 2002. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Rep. Task Com. on Standardized Reference Evapotranspiration. January, 2005, EWRI-Am. Soc. Civil. Engr. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/asceewri/main.pdf>
- Weathers, P.J., Zobel, R.W., 1992. Aeroponics for the culture of organisms, tissues and cells. *Biotechnology Advances* 10, 93-115.
- Wilson G.C.S. 1984. The physico-chemical and physical properties of horticultural substrates. *Acta Hort.* 150:19-32
- Yang X., Short T., Fox R., Bauerle W. (1990). Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of greenhouse cucumber crop. *Agric. Forest Meteor.* 5, 197-209.

- Zobel, R.W., Del Tredici, P., and Torrey, J.G., 1976. Methods for growing plants aeroponically. *Plant Physiol.* 57, 344–346.
- Zotarelli L, Scholberg M. J., Dukes D, M., Munoz-Carpena R., Icerman J (2007). Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agric. Water Manage.*, 96, 23-24.
- Zotarelli L., Scholberg M.J., Dukes M.D., Muñoz-Carpena R., Icerman J. Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agric. Water Manage.* 2009;96:23–24
- Λερός Α. 2005.. Σημειώσεις Μαθήματος Ευφυή Συστήματα με Εφαρμογή στη Γεωργική Μηχανική
- Κ. Γαύρος: Βιομηχανικά Συστήματα Ελέγχου; ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Ηλεκτρολογίας 2008. Σημειώσεις για το εργαστήριο του μαθήματος Σύστημα Αυτόματου Ελέγχου 1.
- Μπιλάλης, Δ., Κανάτας, Π., Ντζάνης, Η., Τραυλός, Η., Ζαφειρίου, Θ., 2007. Η πορεία του διαλελυμένου οξυγόνου της λεκάνης του υδροπονικού σπορείου (float system) κατά την ανάπτυξη βιολογικών σποροφύτων λαχανικών με χρήση διαφορετικών διαλυμάτων θρέψης. Πρακτικά 22ου Συνεδρίου ΕΕΕΟ, Πάτρα, 19-21 Οκτωβρίου 2005, τόμος 12Α', σ. 559-562

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ Κεφαλαίου Β

- Adams, P. 1989. Some effects of root temperature on the growth and nutrient uptake of tomatoes in NFT, p. 59–71. In: Proc. 7th Intl. Congr. Soilless Culture, ISOSC, Wageningen, The Netherlands
- Bogena H.R., Huisman J.A., Oberdörster C., Vereecken H. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *J. Hydrol.* 2007;344:32–42
- Cobos D. 2008. EC-5 Volume of Sensitivity Application Note (available at:www.onsetcomp.com/files/ec-5%20Volume%20of%20Sensitivity_0.pdf).
- Farina E., Bacci L. (2005). Sensori per l'irrigazione: Valutazione d'uso in substrati colturali e applicazione in campo. *Italus Hortus.* 12(6):69-82
- Francesca V., Osvaldo F., Stefano P., Paolo R.P. (2010): Soil moisture measurements: Comparison of instrumentation performance. *Journal of Irrigation and Drainage*, 136: 81–89
- Gent PPN. 2004. Effect of nitrogen and potassium supply on yield and composition of greenhouse tomato. *Acta Horticulturae.* 644,369-375
- Katsoulas N., Kittas c., Dimokas G., Lykas Ch. (2006): Effect of Irrigation Frequency on Rose Flower Production and Quality. *Biosystems Engineering* 93(2), 237-244
- Kizito F., Campbell C.S., Campbell G.S., Cobos D.R., Teare B.L., Carter B., Hopmans J.W. (2008): Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensors. *Journal of Hydrology*, 352: 367–378
- Lee A., 2010. Water and EC management. *Practical Hydroponics & Greenhouses*, March/April, 2010
- Li Y.L., Stanghelini C., 2001. Analysis of the effect of EC and potential transpiration on vegetative growth of tomato. *Scientia Horticulturae* vol. 89: 9-21
- Lizzaraga A., Boesveld H., Huibers F. and Robles C., 2003. Evaluating irrigation scheduling of hydroponic tomato in Navara, Spain. *Irrigation and drainage*: 52(177-188)

- Navarro JM., Carvajal M., Martinez V., 2005. Change in quality and yield of tomato fruit with ammonium, bicarbonate and calcium fertilization under saline conditions. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 80, 351-357.
- Parsons L.R., Bandaranayake W.M. (2009): Performance of a new capacitance soil moisture probe in sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 74: 1378–1385
- Ramirez SLF., Diaz SFR., Muro EJ. 2012. Relation between soilless tomato quality and potassium concentration in nutritive solution. *Acta Horticulturae* 947: 215-221
- Saha U., Papadopoulos A., Hao X. 2008. Irrigation Strategies for Greenhouse Tomato Production on Rockwool. *HortScience* 43(2):484-493
- Saito T., Fujimaki H., Yasuda H., Inoue M. (2009): Empirical temperature calibration of capacitance probes to measure soil water. *Soil Science Society of America Journal*, 73: 1931–1937
- Sakaki T., Limsuwat, A., Smits K.M., Illangasekare T.H. (2008): Empirical two-point alpha-mixing model for calibrating the ECH2O EC-5 soil moisture sensor in sands. *Water Resources Research*, 44: W00D08
- Saure MC. 2001. Blossom-end rot of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) a calcium – or a stress-related disorder. *Scientia Horticulturae* 90: 193-208
- Shelford, T.J., A.K. Lau, D.L. Ehret, and S.T. Chieng. 2004. Comparison of a new plant based irrigation control method with light based irrigation control for greenhouse tomato production. *Canadian Biosystem Engineering* 46:1.1–1.6.
- USDA (1976). United States standards for grades of fresh tomatoes. US Department of Agriculture. Agr. Mktg. Serv., Washington. D.C., pp. 10.
- Van Os, E.A. 1995. Engineering and environmental aspects of soilless growing systems. *Acta Hort.* 396:25–32.
- Wever G and van Leeuwen A.A., 1995. Measuring mechanical properties of growing media and the influence of cucumber cultivation on these properties. *Acta Hort.* 401:27-34

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ Κεφαλαίου Γ

- Adams, P. 1989. Some effects of root temperature on the growth and nutrient uptake of tomatoes in NFT, p. 59–71. In: Proc. 7th Intl. Congr. Soilless Culture, ISOSC, Wageningen, The Netherlands
- Gent PPN. 2004. Effect of nitrogen and potassium supply on yield and composition of greenhouse tomato. *Acta Hort.* 644,369-375
- Navarro JM., Carvajal M., Martinez V., 2005. Change in quality and yield of tomato fruit with ammonium, bicarbonate and calcium fertilization under saline conditions. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 80, 351-357.
- Ramirez SLF., Diaz SFR., Muro EJ. 2012. Relation between soilless tomato quality and potassium concentration in nutritive solution. *Acta Hort.* 947, 215-221
- Saha U., Papadopoulos A., Hao X. 2008. Irrigation Strategies for Greenhouse Tomato Production on Rockwool. *HortScience* 43(2):484-493
- Saure MC. 2001. Blossom-end rot of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) a calcium – or a stress-related disorder. *Scientia Hort.* 90, 193-208
- Shelford, T.J., A.K. Lau, D.L. Ehret, and S.T. Chieng. 2004. Comparison of a new plant based irrigation control method with light based irrigation control for greenhouse tomato production. *Canadian Biosystem Engineering* 46:1.1–1.6.
- Van Os, E.A. 1995. Engineering and environmental aspects of soilless growing systems. *Acta Hort.* 396:25–32.

