

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

**Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού
Περιβάλλοντος, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών:
«Αυτοματισμοί στις Αρδεύσεις, στις Γεωργικές Κατασκευές και στην
Εκμηχάνιση της Γεωργίας»
Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος**

**«Διερεύνηση δυνατοτήτων χρήσης συστήματος
παρακολούθησης κλιματικών και φυσιολογικών
παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο για έλεγχο της άρδευσης
στο θερμοκήπιο»**

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Παύλος Παπαδόπουλος

Επιβλέπων

Επικ. Καθηγητής Νικόλαος Κατσούλας

Βόλος, Νέα Ιωνία, 2012

**«Διερεύνηση δυνατοτήτων χρήσης συστήματος
παρακολούθησης κλιματικών και φυσιολογικών
παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο για έλεγχο της άρδευσης
στο θερμοκήπιο»**

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

N. Κατσούλας (Επιβλέπων)
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Σ. Φουντάς (Μέλος)
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Θ. Μπαρτζάνας (Μέλος)
Κ.Ε.ΤΕ.Α.Θ.

Επικ. Καθηγητής
Γεωργικές Κατασκευές
Επικ. Καθηγητής
Γεωργική Μηχανολογία
Ερευνητής Β'
Γεωργική Μηχανική

Πάυλος Παπαδόπουλος

**«Διερεύνηση δυνατοτήτων χρήσης συστήματος
παρακολούθησης κλιματικών και φυσιολογικών
παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο για έλεγχο της άρδευσης
στο θερμοκήπιο»**

LACEC ISBN no:

Περίληψη

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής ήταν η συγκριτική μελέτη τριών υποστρωμάτων σε καθεστώς ελλειμματικής άρδευσης. Στο θερμοκήπιο αναπτύχθηκε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας και για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε το σύστημα παρακολούθησης φυτού της εταιρίας PhyttechTM. Τα υποστρώματα που μελετήθηκαν ήταν του πετροβάμβακα (Expert), του περλίτη και της ελαφρόπετρας. Οι μετρήσεις περιλάμβαναν τόσο το κλίμα εντός του θερμοκηπίου όσο και τις φυσιολογικές αποκρίσεις των φυτών. Με την εφαρμογή της μεθόδου δοκιμής και λάθους του συστήματος σε συνδυασμό με την εξαγωγή δεικτών από τις μετρήσεις της μεταβολής διαμέτρου του βλαστού και δεικτών υδατικής καταπόνησης (CWSI, SDD) βγήκαν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα.

Σε δυσμενείς κλιματικές συνθήκες (υψηλή υγρασία, χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία) δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός των δεικτών και παρατηρήθηκε ότι το φυτό στο υπόστρωμα του περλίτη είχε τη μικρότερη αρνητική επίδραση στην ανάπτυξη του βλαστού του. Κατά την εφαρμογή ελλειμματικής άρδευσης διάρκειας 5 ωρών, όλα τα φυτά επηρεαστήκαν όσο αφορά την ανάπτυξη του βλαστού τους. Μεγαλύτερη υδατική καταπόνηση φάνηκε να υπάρχει στο φυτό της ελαφρόπετρας και μικρότερη στα φυτά του περλίτη και του πετροβάμβακα. Για διακοπή άρδευσης 3 ωρών, το φυτό του περλίτη δεν φάνηκε να επηρεάζεται. Παρατηρήθηκε επίσης ότι και στα 3 υποστρώματα ο δείκτης MDS (μέγιστη ημερήσια συρρίκνωση βλαστού) ήταν εξίσου ευαίσθητος στην υδατική καταπόνηση, ενώ στα υποστρώματα του περλίτη και της ελαφρόπετρας ευαίσθησία στην υδατική καταπόνηση παρουσίασε και ο δείκτης MNSD (ελάχιστη τιμή διαμέτρου βλαστού).

Πρόλογος και Ευχαριστίες

Εκφράζω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου, στον Λέκτορα του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, κ. Κατσούλα Νικόλαο που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με αυτό το θέμα, καθώς και για την ηθική υποστήριξη και κυρίως τη πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε στην αρτιότερη οργάνωση του πειράματος, τη συνεχή επιστημονική καθοδήγηση και τη συγγραφή της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Φουντά Σπύρο Επίκουρο Καθηγητή του Εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανικής του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας καθώς και τον κ. Μπαρτζάνα Θωμά Ερευνητή Β' του Κ.Ε.Τ.Ε.Α.Θ. για την συμμετοχή τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή και τη διόρθωση αυτής της πτυχιακής.

Τέλος, αλλά όχι λιγότερο, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και όλους εκείνους που βρίσκονταν κοντά μου κατά τη διάρκεια διεξαγωγής αυτής της διατριβής, για την ηθική υποστήριξη και τη συμπαράστασή τους.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 . Γενική Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά 3	
1.1.1 Ο κλάδος των θερμοκηπίων	3
1.1.2 Έλεγχος κλίματος και άρδευσης στο θερμοκήπιο	4
1.1.3 Σύγχρονες τάσεις στον έλεγχο του κλίματος και της άρδευσης.....	7
1.2 Αντικείμενο και δομή της εργασίας.....	11
Κεφάλαιο 2 . Θεωρητική Ανάλυση.....	13
2.1 Περιβάλλον θερμοκηπίου.....	15
2.1.1 Η Ηλιακή ακτινοβολία	15
2.1.1.1 <i>Συσχέτιση μεταξύ της εισερχόμενης ακτινοβολίας και της διαπνοής</i>	<i>16</i>
2.1.2 Η Υγρασία του αέρα	17
2.1.3 Η θερμοκρασία	18
2.1.4 Το διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	20
2.1.4.1 <i>Το Διοξείδιο του άνθρακα στο περιβάλλον του θερμοκηπίου (CO₂ ext)</i>	<i>21</i>
2.2 Δείκτες υδατικής και θερμικής κατάστασης και καταπόνησης της καλλιέργειας.....	22
2.2.1 Η μέτρηση της υδατικής κατάστασης του φυτού	22
2.2.2 Η μέθοδος μέτρησης της σχετικής περιεκτικότητας νερού.....	23
2.2.3 Η ενεργειακή κατάσταση	23
2.2.3.1 <i>Το υδατικό δυναμικό του φυτού και η μέτρηση του</i>	<i>24</i>
2.2.3.1.1 <i>Η ψυχομετρική τεχνική</i>	<i>24</i>
2.2.3.1.2 <i>Η τεχνική του θαλάμου πίεσης</i>	<i>25</i>
2.2.3.1.3 <i>Η τεχνική του ανιχνευτή πίεσης κυττάρου</i>	<i>26</i>
2.2.4 Έμμεσες μετρήσεις της υδατικής κατάστασης του φυτού.....	27
2.2.4.1 <i>Η μέτρηση της μεταβολής της διαμέτρου βλαστού.....</i>	<i>28</i>
2.2.5 Η υδατική και θερμοκρασιακή καταπόνηση του φυτού	29
2.2.5.1 <i>Ο δείκτης ημερήσιου βαθμού καταπόνησης (SDD)</i>	<i>29</i>
2.2.5.2 <i>Ο δείκτης ημερήσιας θερμοκρασιακής καταπόνησης (TSD)</i>	<i>30</i>
2.2.5.3 <i>Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης καλλιέργειας (CWSI)</i>	<i>31</i>
2.3 Παρουσίαση και ανάλυση υποστρωμάτων για υδροπονικές καλλιέργειες.....	34
2.3.1 Πετροβάμβακας	34

2.3.2	Περλίτης.....	36
2.3.3	Ελαφρόπετρα.....	38
2.4	Το σύστημα παρακολούθησης φυτού (Phytomonitoring).....	40
2.4.1	Το κανάλι πληροφοριών του συστήματος παρακολούθησης φυτού.....	40
2.4.2	Σύστημα παρακολούθησης φυτού: δομή και λειτουργίες.....	42
2.4.3	Πρότυπα του συστήματος παρακολούθησης φυτού.....	47
2.4.4	Οι μέθοδοι της διαδικασίας δοκιμή και λάθος.....	50
2.5	Συμπεράσματα.....	53
Κεφάλαιο 3 . Υλικά και Μέθοδοι.....		57
3.1	Εισαγωγή.....	59
3.2	Το θερμοκήπιο.....	60
3.3	Αερισμός.....	61
3.4	Θέρμανση.....	62
3.5	Η καλλιέργεια.....	62
3.5.1	Εγκατάσταση της καλλιέργειας.....	62
3.5.2	Διάταξη φυτών.....	63
3.5.3	Επιλογή φυτών – Υποστρώματα.....	63
3.5.3.1	<i>Πετροβάμβακας.....</i>	<i>64</i>
3.5.3.2	<i>Περλίτης.....</i>	<i>65</i>
3.5.3.3	<i>Ελαφρόπετρα.....</i>	<i>65</i>
3.5.4	Καλλιεργητικές επεμβάσεις.....	66
3.5.5	Άρδευση - Λίπανση.....	67
3.6	Μετρήσεις.....	68
3.6.1	Δοκιμές που έγιναν και πρωτόκολλο που χρησιμοποιήθηκε.....	70
3.6.2	Υπολογισμοί δεικτών και παραμέτρων.....	71
Κεφάλαιο 4 . Αποτελέσματα και Συζήτηση.....		73
4.1	Αποτελέσματα.....	75
4.1.1	Διάμετρος βλαστού: ημερήσια μεταβολή στα φυτά των υποστρωμάτων για καθαρές και συννεφιασμένες ημέρες.....	75
4.1.1.1	<i>Υπολογισμός του δείκτη υδατικής καταπόνησης CWSI για καθαρές και συννεφιασμένες ημέρες.....</i>	<i>77</i>
4.1.2	Μεταχειρίσεις στα φυτά των υποστρωμάτων: δεύτερη μέθοδος δοκιμής και σφάλματος.....	78

4.1.2.1	<i>Εφαρμογή της μεθόδου στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα</i>	78
4.1.2.2	<i>Ο δείκτης CWSI στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα.....</i>	81
4.1.2.3	<i>Εφαρμογή της μεθόδου στο υπόστρωμα του περλίτη</i>	82
4.1.2.4	<i>Ο δείκτης CWSI στο υπόστρωμα του περλίτη.....</i>	86
4.1.2.5	<i>Εφαρμογή της μεθόδου στο υπόστρωμα της ελαφρόπετρας.....</i>	87
4.1.2.6	<i>Ο δείκτης CWSI στο υπόστρωμα της ελαφρόπετρας.....</i>	90
4.1.3	Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης SDD για τα φυτά στα υποστρώματα του θερμοκηπίου.....	91

Κεφάλαιο 5 . Συμπεράσματα.....93

Βιβλιογραφία 98

Κεφάλαιο 1 . Γενική Εισαγωγή

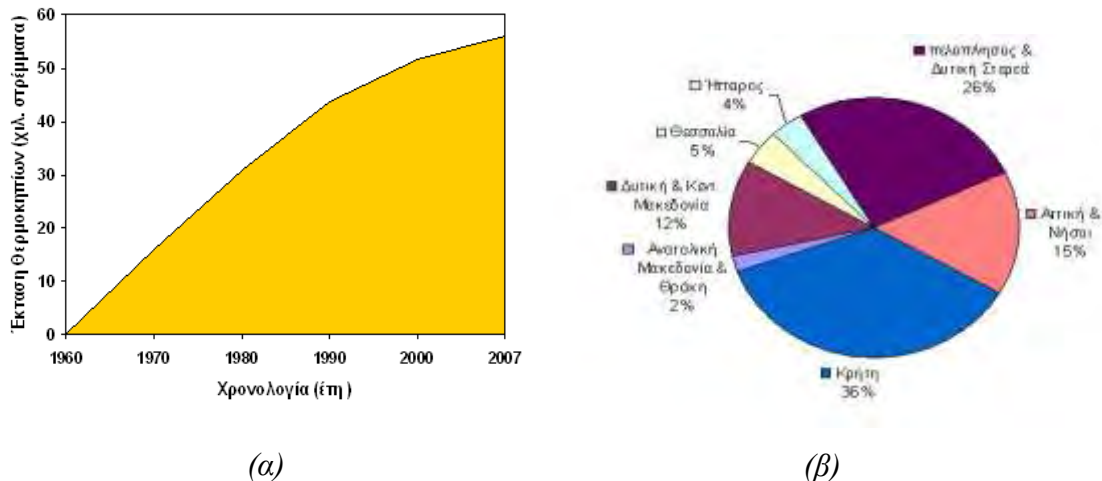
1.1 Γενικά

1.1.1 Ο κλάδος των θερμοκηπίων

Οι απαιτήσεις για παραγωγή φρέσκων λαχανικών και ανθέων κατά τη διάρκεια όλου του έτους έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ενδιαφέροντος για καλλιέργειες υπό κάλυψη. Τα θερμοκήπια, τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα καλλιέργειας υπό κάλυψη, έχουν αναπτυχθεί και βελτιωθεί σημαντικά εδώ και αρκετό καιρό. Ειδικά τα τελευταία χρόνια, οι προσπάθειες για περαιτέρω βελτίωση οδήγησαν στην εισαγωγή νέων υλικών κάλυψης, νέων μεθόδων κλιματισμού καθώς επίσης και στη χρήση της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών στο χώρο των θερμοκηπίων. Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν η κατασκευή θερμοκηπίων με χαρακτηριστικά που μπορούν να ανταποκριθούν στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της κάθε περιοχής και καλλιέργειας.

Στην Ελλάδα, η αύξηση των θερμοκηπιακών εκτάσεων ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακή την εικοσαετία 1960-1980 (Σχήμα 1.1.α). Κατά τη δεκαετία του '80 η αύξηση συνεχίστηκε αλλά με χαμηλότερους ρυθμούς, ενώ κατά την τελευταία δεκαετία οι ρυθμοί ήταν ακόμη χαμηλότεροι. Εν τούτοις, σε απόλυτα μεγέθη, οι θερμοκηπιακές εκτάσεις στην Ελλάδα δεν έχουν γνωρίσει την ανάπτυξη εκείνη που θα δικαιολογούσαν οι ευνοϊκοί παράγοντες που επικρατούν στη χώρα μας για τις καλλιέργειες αυτές. Κατά συνέπεια, η χώρα μας υστερεί σημαντικά στον τομέα αυτό έναντι άλλων χωρών με παρόμοιες κλιματολογικές συνθήκες, όπως είναι η Ισπανία και η Ιταλία.

Στην Ελλάδα, η Κρήτη κατέχει το μεγαλύτερο τμήμα της καλυμμένης έκτασης σε θερμοκήπια με ποσοστό περίπου 36% (Σχήμα 1.1.β).



Σχήμα 1.1. (α) Έκταση θερμοκηπιακών εκτάσεων στην Ελλάδα από το 1960 έως το 2007 (Πηγή: ΕΛ.ΣΤΑΤ.). (β) Γεωγραφική κατανομή των θερμοκηπιακών εκτάσεων στην Ελλάδα σε ποσοστό της συνολικής έκτασης (Πηγή: ΕΛ.ΣΤΑΤ.).

1.1.2 Έλεγχος κλίματος και άρδευσης στο θερμοκήπιο

Το θερμοκήπιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα όπου το έδαφος, η καλλιέργεια και η εσωτερική ατμόσφαιρα αλληλεπιδρούν. Οι κυριότεροι παράγοντες του περιβάλλοντος που επιδρούν άμεσα στα φυτά είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η ακτινοβολία, η ταχύτητα του αέρα και η συγκέντρωση του CO₂. Ο έλεγχος του κλίματος στο θερμοκήπιο πραγματοποιείται με τη ρύθμιση και τον έλεγχο αυτών των παραγόντων μέσω λειτουργιών όπως της θέρμανσης, του αερισμού, του δροσισμού, της σκίασης, του τεχνητού φωτισμού και του εμπλουτισμού με CO₂. Οι συνθήκες που επικρατούν εντός του θερμοκηπίου επηρεάζονται άμεσα από τις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος που μεταβάλλονται συνεχώς και ως εκ τούτου οι τιμές των παραγόντων αυτών μεταβάλλονται δυναμικά. Άμεσα συνδεδεμένες με αυτό το σύστημα είναι επίσης και οι ανάγκες της καλλιέργειας σε νερό άρα και η εφαρμογή της άρδευσης. Για ένα συγκεκριμένο θερμοκήπιο, η συχνότητα και η ποσότητα του νερού άρδευσης εξαρτάται κυρίως από το κλίμα, το φυτό και το έδαφος. Το κλίμα και το φυτό προσδιορίζουν κυρίως τη συχνότητα του ποτίσματος, ενώ οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους προσδιορίζουν την αρδευτική δόση (Μαυρογιαννόπουλος, 2005,σελ. 559). Η κατανόηση και η διαχείριση ενός τέτοιου συστήματος από τον

ανθρώπινο παράγοντα χωρίς κάποια πρόσθετη υποστήριξη είναι πολύ δύσκολη, γεγονός που οδήγησε στην εισαγωγή αυτόματων συστημάτων ελέγχου στο θερμοκήπιο. Ο παραγωγός έχει ως στόχο να διατηρεί το κλίμα σε βέλτιστο επίπεδο έτσι ώστε να πετύχει τη μεγιστοποίηση του κέρδους της επιχείρησης σε πρώτη φάση και δευτερευόντως την ελαχιστοποίηση των εισροών ενέργειας και τη μεγιστοποίηση της συγκομιζόμενης παραγωγής.

Στις μεσογειακές χώρες προκύπτουν κάποια προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι παραγωγοί. Κατά την περίοδο του καλοκαιριού η υψηλή θερμική ακτινοβολία μπορεί να δημιουργήσει το φαινόμενο της ξηρής σήψης στα φυτά, έτσι επιβάλλεται η εφαρμογή της σκίασης του θερμοκηπίου. Ο παραγωγός θα πρέπει να καταφύγει στη χρήση θερμοκουρτίνας ή σε μια πιο οικονομική λύση όπως το ασβέστωμα. Επίσης οι υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με χαμηλή υγρασία στο χώρο του θερμοκηπίου τους καλοκαιρινούς μήνες προκαλούν μείωση στη παραγωγή και την ποιότητα των προϊόντων. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την εξάτμιση νερού μέσα στο θερμοκήπιο, με συστήματα όπως της υδρονέφωσης και της υγρής παρειάς και ανεμιστήρων. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι η υψηλή υγρασία που αναπτύσσεται το χειμώνα, κάτι που καθιστά αναγκαία τη χρήση μεθόδων αφύγρανσης.

Ένα σημαντικό κομμάτι της λειτουργίας των θερμοκηπίων είναι η εξοικονόμηση ενέργειας και νερού. Μερικοί τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας είναι οι εξής:

- χρήση θερμοκουρτίνας
- τοποθέτηση ανεμοφρακτών
- ρύθμιση της θερμοκρασίας ανάλογα με την ταχύτητα του εξωτερικού αέρα
- τοποθέτηση φωτοεκλεκτικών πλαστικών φύλλων
- εφαρμογή της μεθόδου ολοκλήρωσης της θερμοκρασίας
- χρήση ανανεώσιμων μορφών ενέργειας

Η θερμοκουρτίνα απλώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας και απομονώνει την οροφή και τις πλευρές του θερμοκηπίου, μειώνοντας σημαντικά το συντελεστή θερμοπερατότητας του θερμοκηπίου και εξοικονομώντας ενέργεια μέχρι 50% (Μαυρογιαννόπουλος, 2005,σελ. 499).

Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί αύξηση των απωλειών θερμότητας ενός θερμαινόμενου θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα οι απώλειες ενέργειας

διπλασιάζονται με μια αύξηση της ταχύτητας της ταχύτητας του ανέμου από 0 σε 25 km h⁻¹. Όταν γίνεται αποτελεσματική χρήση του ανεμοφράκτη με μείωση κατά 50% της ταχύτητας του ανέμου, η ετήσια κατανάλωση καυσίμου μειώνεται κατά 3-6% (Μαυρογιαννόπουλος, 2005,σελ. 502).

Μια άλλη εφαρμογή της σχέσης απωλειών ενέργειας με την ταχύτητα του εξωτερικού αέρα είναι η ρύθμιση της θερμοκρασίας ανάλογα με την ταχύτητα του εξωτερικού αέρα. Αν τις ημέρες με υψηλές ταχύτητες μειώσουμε τη θερμοκρασία του θερμοστάτη και τις ημέρες με χαμηλές ταχύτητες αυξήσουμε τη θερμοκρασία, θα έχουμε κέρδος σε εξοικονόμηση ενέργειας 5-10% (Κατσούλας, Κίττας, Μπαρτζάνας, 2011).

Τα φωτοεκλεκτικά υλικά έχουν την δυνατότητα να τροποποιούν το φάσμα του φωτός. Αν εγκατασταθούν φωτοεκλεκτικά πλαστικά φύλλα που εγκλωβίζουν τη μακρινή υπέρυθη ακτινοβολία η μείωση των απωλειών θερμότητας θα είναι έως 15-35% (Κίττας, Κατσούλας, Μπαρτζάνας, 2011).

Η μέθοδος ολοκλήρωσης της θερμοκρασίας στηρίζεται στο γεγονός πως η επίδραση της θερμοκρασίας στην αύξηση και την ανάπτυξη των φυτών εξαρτάται από τη μέση τιμή σε ένα 24-ωρο και όχι από τις θερμοκρασίες ημέρας και νύχτας. Κατά την εφαρμογή τις μεθόδου μειώνεται η θερμοκρασία του θερμοστάτη τη διάρκεια της νύχτας και αυξάνεται τη διάρκεια της ημέρας. Η μέθοδος πρέπει να εφαρμοστεί με προσοχή, γιατί υπάρχουν όρια στις τιμές θερμοκρασίας που πρέπει να επιλεγούν για να έχουμε βέλτιστη ποιοτική και ποσοτική παραγωγή. Στα θερμοκήπια που βρίσκονται σε περιοχές με άφθονη ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του χειμώνα η μέθοδος έχει το επιπλέον πλεονέκτημα ότι η μειωμένη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της νύχτας μπορεί να αντισταθμιστεί την ημέρα μόνο με την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να φτάσει και το 20% (Κατσούλας, Κίττας, Μπαρτζάνας, 2011).

Για τη θέρμανση των θερμοκηπίων έχει υιοθετηθεί η χρήση εναλλακτικών μορφών ενέργειας για να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μορφές καυσίμων όπως πετρέλαιο ή μαζούτ. Μια προσιτή και ανεξάντλητη μορφή ενέργειας είναι η ηλιακή. Η συλλογή της γίνεται με ηλιακούς συλλέκτες και η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται ώστε να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της νύχτας μέσω ενός συστήματος διανομής θερμότητας (Μαυρογιαννόπουλος, 2005,σελ. 510). Επίσης στη χώρα μας μπορεί να χρησιμοποιηθεί η γεωθερμία επειδή λόγω ειδικών συνθηκών διαθέτει σε πολλές

περιοχές αξιόλογα ενεργειακά αποθέματα με τη μορφή γεωθερμικών ρευστών (Μαυρογιαννόπουλος, 2005,σελ. 523). Μια από τις πιο σημαντικές ανανεώσιμες μορφές ενέργειας είναι η βιομάζα. Στην Ελλάδα υπάρχουν 7.500.000 τόνοι υπολειμμάτων γεωργικών καλλιεργειών και 2.700.000 τόνοι δασικών υπολειμμάτων που αν υπήρχε δυνατότητα συλλογής και αξιοποίησης τους θα οδηγούσαν στην παραγωγή 5-6 ΜΤΠΠ ($5-6 * 10^6$ τόνους ισοδύναμου πετρελαίου), δηλαδή σε 50-60% της ετήσιας κατανάλωσης πετρελαίου στη χώρα μας (Κίττας, Κατσούλας, Μπαρτζάνας, 2011). Μια πρόσφατη τεχνολογική λύση είναι η ανάκτηση θερμότητας και νερού από τον αέρα του θερμοκηπίου κατά τον εξαερισμό ή από το εσωτερικό των κλειστών θερμοκηπίων, με τη βοήθεια εναλλακτών θερμότητας και συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας (Κίττας, Κατσούλας, Μπαρτζάνας, 2011).

Η έλλειψη νερού είναι ένα πρόβλημα με το οποίο έρχονται αντιμέτωποι οι παραγωγοί, έτσι άρχισαν να αναπτύσσονται μέθοδοι άρδευσης που έχουν ως στόχο την ελαχιστοποίηση της χρήσης νερού και ταυτόχρονα την βέλτιστη αποδοτικότητα του νερού στα φυτά.

Η μέθοδος της ρυθμιζόμενης ελλειμματικής άρδευση (RDI) στηρίζεται στο γεγονός ότι ένα μικρό έλλειμμα του φυτού σε νερό μπορεί να βελτιώσει τον διαμερισμό του υδατάνθρακα σε αναπαραγωγικές δομές όπως ο καρπός και επίσης να ελέγξει την υπερβολική φυτική ανάπτυξη (Chalmers et al, 1981, 1986, Jones 2004b). Μια εναλλακτική μέθοδος είναι η μερική ξήρανση της ζώνης του ριζοστρώματος (PRD), όπου η παρεχόμενη δόση άρδευσης εναλλάσσεται σε διαφορετικά τμήματα του ριζικού συστήματος (Dry and Loveys, 1998, Stoll et al., 2000, Jones 2004b).

1.1.3 Σύγχρονες τάσεις στον έλεγχο του κλίματος και της άρδευσης

Στη σημερινή εποχή έχει καθιερωθεί η αυτοματοποίηση των λειτουργιών σε ένα θερμοκήπιο. Όπως αναφέρει ο Χουδάλης (2011), οι βασικές λειτουργίες των συστημάτων αυτόματου ελέγχου κλίματος είναι:

- ο βέλτιστος έλεγχος των συνθηκών που επικρατούν στον εσωτερικό χώρο του κάθε διαμερίσματος της θερμοκηπιακής μονάδας
- η καταγραφή των δεδομένων αναφορικά με τις συνθήκες του περιβάλλοντος
- η καταγραφή και ενεργοποίηση σημάτων κινδύνου

Οι Van Straten et al. (2011, σελ. 11-13) περιγράφουν το μοντέλο ενός ιεραρχικού ελέγχου κλίματος μέσω αυτοματοποιημένων υπολογισμών. Η ιεραρχική δομή αποτελείται από τρία στοιχεία. Στην κορυφή βρίσκεται το πραγματικό φυσικό σύστημα θερμοκήπιο-καλλιέργεια που υφίσταται τη στιγμιαία επίδραση του αέρα, η οποία σε όρους ελέγχου είναι ένα μη ελεγχόμενο εξωτερικό σήμα εισόδου. Το δεύτερο στοιχείο είναι ο υπολογιστής κλίματος που μπορεί να είναι κάθε είδος αυτόματου ελεγκτή. Εντός του υπολογιστή κλίματος υπάρχουν ένα επίπεδο λειτουργίας που εκτελεί τον πραγματικό έλεγχο και ένα επίπεδο στρατηγικής που έχει το ρόλο του επόπτη. Το κύριο χαρακτηριστικό του λειτουργικού μέρους είναι η παρακολούθηση της φυσικής του θερμοκηπίου και πιθανόν της καλλιέργειας και η επιστροφή μεταβλητών ελέγχου με τη μορφή εντολών των ενεργοποιητών. Το καθήκον του επόπτη είναι η μετάφραση πληροφοριών στρατηγικού επιπέδου σε πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε λειτουργικό επίπεδο. Στη βάση της δομής είναι ο παραγωγός ο οποίος παρατηρώντας την καλλιέργεια αποφασίζει αν χρειάζεται να προβεί σε κάποιες διορθωτικές ενέργειες. Αυτές οι αποφάσεις βασίζονται σε εξωτερικές πληροφορίες όπως οι τιμές της αγοράς, τα προσχέδια και η εμπειρία του. Οι λειτουργίες του συστήματος συνοψίζονται ως εξής:

- Φροντίζει για την υλοποίηση ενός κατάλληλου προστατευμένου περιβάλλοντος παρά τη διακύμανση των εξωτερικών συνθηκών (λειτουργία ελεγκτή, επίπεδο λειτουργικότητας σε χρονική κλίμακα λεπτών)
- Ενεργεί σαν μνήμη προγράμματος και εποπτικό στρώμα, που μπορεί να λειτουργήσει από τον παραγωγό ως εργαλείο για την κατεύθυνση της καλλιέργειας του (λειτουργία επόπτη, επίπεδο στρατηγικής σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες)

Σε ένα σύγχρονο σύστημα άρδευσης ο ενσωματωμένος ρυθμιστής μπορεί να θέσει σε λειτουργία το υπάρχον αρδευτικό. Το πρόγραμμα άρδευσης μπορεί να ξεκινήσει την άρδευση, βασισμένο σε αισθητήριο ηλιακής ακτινοβολίας ή άλλους εξωτερικούς παράγοντες όπως υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλές θερμοκρασίες ή χαμηλή υγρασία (Χουδάλης, 2011).

Σήμερα τα σύγχρονα συστήματα καλλιεργειών εκτός εδάφους, ή αλλιώς υδροπονικές καλλιέργειες, παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως η απουσία παθογόνων εδάφους στο περιβάλλον τις ρίζας, η εκμετάλλευση νερού άρδευσης με

υψηλή περιεκτικότητα σε άλατα, η μείωση του κόστους θέρμανσης, η σημαντική προώμιση της πρώτης συγκομιδής, η απαλλαγή από τις εργασίες της προετοιμασίας του εδάφους, η δυνατότητα βελτιστοποίησης της θρέψης και της λίπανσης των φυτών και η δυνατότητα προστασίας του περιβάλλοντος μέσω της ανακύκλωσης των λιπασμάτων. Σε αυτές τις καλλιέργειες η τροφοδότηση των φυτών με νερό και θρεπτικά στοιχεία βασίζεται στη χορήγηση ενός τεχνητά παρασκευασμένου θρεπτικού διαλύματος. Οι ρίζες αναπτύσσονται είτε απευθείας στο θρεπτικό διάλυμα είτε σε πορώδη στερεά υλικά τα οποία καλούνται υποστρώματα. Τα υποστρώματα διαβρέχονται τακτικά με θρεπτικό διάλυμα το οποίο καλύπτει τις ανάγκες των φυτών τόσο σε θρεπτικά στοιχεία όσο και σε νερό (Σάββας, 2011).

Οι στόχοι της άρδευσης είναι (Μαυρογιαννόπουλος, 2011):

- να προμηθεύσει το νερό που περιέχεται στο σώμα των φυτών
- να καλύψει τις ανάγκες των φυτών σε νερό που είναι απαραίτητο για τη διαπνοή τους
- να καλύψει τις ανάγκες των φυτών σε ανόργανα θρεπτικά στοιχεία
- να διατηρηθεί η μεγαλύτερη δυνατή συγκέντρωση του οξυγόνου στη ρίζα

Υπάρχουν δυο ειδών υδροπονικά συστήματα, το ανοιχτό και το κλειστό. Στα ανοιχτά υδροπονικά συστήματα το νερό μετά το τέλος της άρδευσης συγκρατείται από το υπόστρωμα στους μικρότερους σε διάμετρο πόρους και απορρέει από τους μεγαλύτερους πόρους, επιτρέποντας έτσι την είσοδο φρέσκου αέρα στην περιοχή της ρίζας. Στα κλειστά υδροπονικά συστήματα η ποσότητα του θρεπτικού διαλύματος που παρέχεται κάθε φορά στη ρίζα (αρδευτική δόση) μπορεί να είναι υψηλότερη από την χρησιμοποιούμενη και η συχνότητα με την οποία παρέχεται το διάλυμα συνήθως είναι υψηλότερη από ότι απαιτεί η εξατμισοδιαπνοή. Σε αυτή τη περίπτωση, επειδή το κύκλωμα είναι κλειστό και ανακυκλώνεται το θρεπτικό διάλυμα, δεν παρουσιάζονται μεγάλες απώλειες νερού και θρεπτικών στοιχείων. Γενικά τα κλειστά συστήματα παρουσιάζουν πολύ καλύτερη αποτελεσματικότητα άρδευσης από τα ανοιχτά υδροπονικά συστήματα (Μαυρογιαννόπουλος, 2011).

Η αποτελεσματικότητα των διαφόρων αυτοματισμών άρδευσης εξαρτάται από το πρόγραμμα λειτουργίας που διαθέτουν και τη σωστή ρύθμισή τους στην κάθε περίπτωση. Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα ελέγχου της άρδευσης στα ανοιχτά

υδροπονικά συστήματα, χωρίζονται σε συστήματα με ανατροφοδότηση και σε συστήματα χωρίς ανατροφοδότηση (Μαυρογιαννόπουλος, 2011).

Στα συστήματα με ανατροφοδότηση καθορίζεται ο χρόνος έναρξης της άρδευσης και το αποτέλεσμα συμμετέχει στον έλεγχο της διαδικασίας. Δηλαδή η διακοπή της άρδευσης εξαρτάται από κάποιο αισθητήριο που θα δώσει εντολή για διακοπή. Ο έλεγχος της συχνότητας άρδευσης, δηλαδή κάθε πότε να ξεκινάει η άρδευση, γίνεται με τη χρήση μετρητή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στην περιοχή του υποστρώματος ή από μετρήσεις της μεταβολής της περιεκτικότητας του υποστρώματος σε νερό, με τη μέθοδο μέτρησης της διηλεκτρικής αγωγιμότητας του υποστρώματος (TDR). Η αποτελεσματικότητα άρδευσης στα συστήματα με ανατροφοδότηση είναι ικανοποιητική, αρκεί να υπάρχει ομοιομορφία παροχής στο αρδευτικό σύστημα και ο έλεγχος καλής λειτουργίας, η βαθμονόμηση, η συντήρηση των αισθητηρίων στάθμης και ηλεκτρικής αγωγιμότητας να γίνονται συχνά (Μαυρογιαννόπουλος, 2011).

Στα συστήματα χωρίς ανατροφοδότηση, αφού γίνει η έναρξη της άρδευσης παρέχεται μια προκαθορισμένη ποσότητα νερού, συνήθως με ένα χρονοδιακόπτη, χωρίς το αποτέλεσμα να συμμετέχει στον έλεγχο της διαδικασίας. Σε αυτή την περίπτωση πολύ συχνά γίνεται υπερβολική σπατάλη νερού και λιπασμάτων, γιατί η διάρκεια άρδευσης καθορίζεται εμπειρικά και πολλές φορές δεν διαφοροποιείται στα διαφορετικά υποστρώματα και την εποχή (Μαυρογιαννόπουλος, 2011).

1.2 Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Από την εισαγωγή που προηγήθηκε γίνεται φανερό ότι η εισαγωγή αυτόματων συστημάτων ελέγχου σε ένα δυναμικό σύστημα όπως το θερμοκήπιο έδωσε τη δυνατότητα στον παραγωγό να διαχειριστεί με ορθότερο τρόπο το κλίμα και την άρδευση στο θερμοκήπιο. Οι νέες τεχνολογίες τόσο σε κατασκευαστικό όσο και σε λειτουργικό επίπεδο συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας και νερού.

Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης της επίδρασης που έχει η αλλαγή του καθεστώτος άρδευσης σε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας. Γίνεται μελέτη της απόκρισης που έχουν τα φυτά σε καθεστώς μειωμένης άρδευσης σε τρία διαφορετικά υποστρώματα (πετροβάμβακα, περλίτη, ελαφρόπετρα). Οι πληροφορίες αυτές αναμένεται να βοηθήσουν στην εξοικονόμηση νερού.

Μετά τη γενική εισαγωγή που προηγήθηκε, στη συνέχεια γίνεται (*Κεφάλαιο 2*): (α) βιβλιογραφική ανασκόπηση της παρουσίας των παραγόντων στο περιβάλλον του θερμοκηπίου και της επίδρασης τους στην καλλιέργεια (β) περιγραφή των μεθόδων μέτρησης της υδατικής κατάστασης του φυτού και παρουσίαση των δεικτών υδατικής και θερμικής καταπόνησης του φυτού (γ) παρουσίαση και ανάλυση των χαρακτηριστικών των υποστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και (δ) παρουσίαση του συστήματος παρακολούθησης φυτού.

Κατόπιν, ακολουθεί το πειραματικό μέρος της εργασίας όπου στο *Κεφάλαιο 3* παρουσιάζεται ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και γίνεται περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του καθεστώτος ελλειμματικής άρδευσης στα φυτά.

Στη συνέχεια (*Κεφάλαιο 4*) γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων που βρέθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων χρησιμοποιώντας την τεχνική λήψης απόφασης δοκιμής και λάθους του συστήματος παρακολούθησης φυτού. Για την εξέταση συνθηκών υδατικής καταπόνησης στα φυτά εφαρμόστηκαν οι δείκτες CWSI και SDD όπως επίσης και εξαγόμενοι δείκτες από τις μετρήσεις της διαμέτρου βλαστού των φυτών.

Τέλος, στο *Κεφάλαιο 5* παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής όσο αφορά τους δείκτες που υπολογίσθηκαν από τη μελέτη των φυτών στα υποστρώματα και γίνεται μια αξιολόγηση του συστήματος παρακολούθησης φυτού.

Κεφάλαιο 2 . Θεωρητική Ανάλυση

2.1 Περιβάλλον θερμοκηπίου

2.1.1 Η Ηλιακή ακτινοβολία

Κατά τη διάρκεια της ημέρας η κύρια πηγή ενέργειας του θερμοκηπίου είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί την πηγή ενέργειας για τη φωτοσύνθεση των φυτών, καθώς και τη φυσική πηγή θερμότητας στο χώρο του θερμοκηπίου. Επηρεάζει δε σημαντικά τη διάρκεια ζωής των διαφανών πλαστικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πολλών θερμοκηπίων (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 57).

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια πάνω στη γη, εξαρτάται από την ακτινοβολία που εκπέμπει ο ήλιος, από το ύψος του ήλιου (εποχή, ώρα, γεωγραφικό πλάτος), από την κατάσταση της ατμόσφαιρας, από την κλίση της επιφάνειας και από το ύψος της επιφάνειας πάνω από το επίπεδο της θάλασσας (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 68).

Γνωρίζουμε ότι ένα απλό φύλλο φυτού απορροφά 80% περίπου από την προσπίπτουσα σ' αυτό φωτεινή ακτινοβολία, ενώ η υπόλοιπη ανακλάται. Από το μέρος που απορροφάται ένα πολύ μικρό μέρος χρησιμοποιείται για τη φωτοσύνθεση ($\approx 3\%$), ενώ το άλλο μετατρέπεται σε θερμότητα που αποβάλλεται κυρίως με τη διαπνοή, αλλά και με συναγωγή και ακτινοβολία (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 69).

Όταν όλοι οι παράγοντες που συμμετέχουν στη φωτοσύνθεση, όπως η φωτεινή ακτινοβολία, το διοξείδιο του άνθρακα, η θερμοκρασία, το νερό κ.ά. βρίσκονται στο άριστο επίπεδο, τότε και η φωτοσυνθετική δραστηριότητα, άρα και η ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών, βρίσκεται στο ανώτερο δυνατό επίπεδο. Αν ένας από αυτούς τους παράγοντες μειωθεί, όπως π.χ. η ένταση του φωτισμού, τότε η φωτοσυνθετική δραστηριότητα (και ανάπτυξη των φυτών) μειώνεται. Αν ένας από αυτούς τους παράγοντες αυξηθεί πάνω από το άριστο, επομένως και η ένταση του φωτισμού, πάλι μειώνεται η φωτοσυνθετική δραστηριότητα, π.χ. στην περίπτωση της υψηλής έντασης φωτισμού, επειδή βλάπτονται οι χλωροπλάστες (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 57-58).

Για να καλυφθούν οι ανάγκες σε φωτεινή ενέργεια για τη φωτοσύνθεση των περισσότερων κηπευτικών και των δρεπτών ανθέων, θα πρέπει να υπάρχει ένταση τουλάχιστον 235 watt m^{-2} στη μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία (105 watt m^{-2} στην ενεργό φωτοσυνθετικά ακτινοβολία, PAR) μέσα στο θερμοκήπιο. Στην περίπτωση που ένα θερμοκήπιο από την κατασκευή του μειώνει την είσοδο του φωτός κατά 50%, υπάρχει η επιθυμητή φωτεινή ένταση μέσα, μόνον όταν έξω προσπίπτουν 470 watt m^{-2} . Στη χώρα μας η ηλιακή ενέργεια μέσα στο θερμοκήπιο κατά τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, και Φεβρουάριο δεν καλύπτει όλες τις ανάγκες των καλλιεργειών που προαναφέρθηκαν (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 69-70).

2.1.1.1 Συσχέτιση μεταξύ της εισερχόμενης ακτινοβολίας και της διαπνοής

Η διαπνοή μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική συνάρτηση της ακτινοβολίας και της διαφοράς πίεσης υδρατμών μέσα στο θερμοκήπιο με την εξίσωση (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 143):

$$E_t = \alpha R_i + \beta (e_{\max} - e) \quad (2.1)$$

όπου E_t ($\text{Kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) είναι η διαπνοή του φυτού, R_i ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) η ακτινοβολία και $(e_{\max} - e)$ (kPa) η διαφορά πίεσης υδρατμών.

Μια εξειδικευμένη περίπτωση της παραπάνω εξίσωσης είναι η εξής (Jolliet, 1994, Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 143):

$$E_t = \frac{\delta}{\lambda} R_i + \frac{h_t}{\lambda \gamma \Phi} (e_{\max} - e) \quad (2.2)$$

όπου η διαπνοή είναι πάλι σε ($\text{Kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), $\delta = 0,145 \ln(1 + 1.1 \text{ LAI}^{1.13})$ για την τομάτα, h_t ($\text{W/m}^2 \text{ K}^{-1}$) = $1.65 \text{ LAI} (0.56 e^{-R_i/1.12})$ για την τομάτα, $\lambda = 2.5$ (MJ kg^{-1}) η λανθάνουσα θερμότητα του νερού στους 20°C , $\gamma = 0.0066$ (kPa K^{-1}) η ψυχομετρική σταθερά, $\Phi = 11.57$ (dMs^{-1}) ο συντελεστής μετατροπής δευτερολέπτων σε ημέρες και LAI ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας.

2.1.2 Η Υγρασία του αέρα

Ένας από τους βασικούς παράγοντες της σύστασης του περιβάλλοντος των φυτών είναι η υγρασία που εμπεριέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Ο ατμοσφαιρικός αέρας στη φυσική του κατάσταση είναι μίγμα αερίων, οξυγόνου, αζώτου, διοξειδίου του άνθρακα, αργού, άλλων αερίων σε ελάχιστες ποσότητες και υδρατμών. Η σύνθεση αυτή μεταβάλλεται λόγω των φαινομένων εξάτμισης, διαπνοής, αναπνοής, φωτοσύνθεσης και λόγω της δραστηριότητας του ανθρώπου στο χώρο του θερμοκηπίου, που προκαλεί αιώρηση οργανικών και ανόργανων ουσιών, όπως φυτοφαρμάκων, σκόνης κ.λπ. (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 125).

Η συγκέντρωση των υδρατμών μεταβάλλεται πολύ με την εξάτμιση και τη συμπύκνωση, η πίεση των υδρατμών επομένως μεταβάλλεται ανάλογα με τη συγκέντρωση των υδρατμών. Οι υδρατμοί στο χώρο του θερμοκηπίου κινούνται από τις περιοχές υψηλής πίεσης υδρατμών (υψηλής συγκέντρωσης), σε περιοχές χαμηλής πίεσης (χαμηλής συγκέντρωσης), έως ότου εξισωθεί η πίεση υδρατμών (οι συγκεντρώσεις) σε όλα τα σημεία του χώρου και δημιουργηθεί μια ισορροπία. Η διαφορά πίεσης υδρατμών επομένως είναι η κινητήρια δύναμη για τη μεταφορά υδρατμών από μια ελεύθερη επιφάνεια νερού ή την επιφάνεια των φύλλων (υψηλή πίεση) στον αέρα του θερμοκηπίου (χαμηλή πίεση), (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 125).

Η απόλυτη υγρασία μέσα στο χώρο του θερμοκηπίου, όταν έχει επέλθει ισορροπία, είναι ομοιόμορφη σε όλο το χώρο. Η θερμοκρασία όμως στα διάφορα σημεία του θερμοκηπίου ποικίλλει και αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες διαφορές σε σχετική υγρασία στα διάφορα σημεία του θερμοκηπίου. Αυτό επίσης προκαλεί όχι μόνο διαφορές στη διαπνοή των φυτών στις διάφορες θέσεις αλλά και διαφορετική συχνότητα συμπύκνωσης υδρατμών πάνω στα φυτά (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 132).

Εκτός από τη συμπύκνωση υδρατμών, που συνήθως συμβαίνει τη νύχτα πάνω στα φυτά, αυτό μπορεί να συμβεί και την ημέρα. Π.χ. κατά την ανατολή του ηλίου η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στα φύλλα αυξάνει τη θερμοκρασία τους αμέσως, γιατί η θερμοχωρητικότητα τους είναι πολύ μικρή. Επομένως αυξάνει η πίεση υδρατμών στα στόματα και αυξάνει η διαπνοή. Η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου αυξάνει, καθώς και η απόλυτη υγρασία. Η θερμοκρασία όμως των καρπών αυξάνει με μικρότερο βαθμό, γιατί έχουν μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα

(μεγαλύτερη μάζα ανά μονάδα επιφάνειας) και πολύ συχνά συμβαίνει συμπύκνωση των υδρατμών επάνω τους, με όλα τα δυσμενή αποτελέσματα (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 133).

Το σημαντικότερο πρόβλημα στο θερμοκήπιο δημιουργείται με τη συμπύκνωση των υδρατμών πάνω στα φυτά, η οποία ευνοεί τη βλάστηση των σπορίων των μυκήτων και την ανάπτυξη των βακτηρίων. Η συμπύκνωση συμβαίνει συνήθως τη νύχτα και είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας των φυτών, καθώς και της θερμοκρασίας και υγρασίας του αέρα. Μπορεί επομένως να αποφευχθεί με την κατάλληλη ρύθμιση αυτών των παραγόντων. Συγκεκριμένα, για να αποφευχθεί η επιφανειακή συμπύκνωση, προσπαθούμε να μειώσουμε την ποσότητα των υδρατμών του αέρα και να αυξήσουμε τη θερμοκρασία των φυτών. Για την αύξηση της θερμοκρασίας των φυτών χρησιμοποιούνται σωλήνες θέρμανσης ψηλά, που ακτινοβολούν θερμότητα στα φυτά, εξασφαλίζοντας θετικό ισοζύγιο ακτινοβολίας για τα φυτά. Επίσης, για την αποφυγή της συμπύκνωσης των υδρατμών πάνω στα φυτά μπορεί να τοποθετηθούν αερόθερμα που αυξάνουν το ρυθμό της συναγωγής στα φυτά, ώστε να μη φθάσει η θερμοκρασία τους το σημείο δρόσου (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 134).

Η διατήρηση ενός κατάλληλου περιβάλλοντος υγρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου είναι απαραίτητη όχι μόνο για τη διατήρηση της υδρικής ισορροπίας των φυτών μέσω της διαπνοής, αλλά και για λόγους θρέψης (π.χ. μεταφοράς ασβεστίου) και για την αποφυγή εκτεταμένης ανάπτυξης παθογόνων μικροοργανισμών, εντόμων και ακάρεων (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 138).

Γενικά, οι επιπτώσεις που δημιουργεί η σχετική υγρασία στα φυτά προέρχονται κυρίως από την επίδραση στη λειτουργία της διαπνοής και της θρέψης και από τη συμπύκνωση της υγρασίας στο φύλλωμα τους (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 138).

2.1.3 Η θερμοκρασία

Η θερμοκρασία των φυτών στο χώρο του θερμοκηπίου καθορίζεται κυρίως από την ακτινοβολία που δέχονται και εκπέμπουν, από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα, από τη θερμοχωρητικότητα τους και από τη λανθάνουσα θερμότητα που χάνουν ή δέχονται λόγω εξάτμισης (διαπνοής) ή συμπύκνωσης των υδρατμών επάνω τους (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 97).

Τα φυτά με το υπέργειο μέρος τους δέχονται κατά τη διάρκεια της ημέρας την ηλιακή ακτινοβολία. Ένα μέρος ανακλάται, περίπου 20%, ένα πολύ μικρό μέρος της ($\approx 3\%$) χρησιμοποιείται για φωτοσύνθεση, ενώ το υπόλοιπο αυξάνει τη θερμότητά τους. Ο μηχανισμός της αντιδράσεως των φυτών στη αύξηση της θερμοκρασίας τους είναι η ένταση της λειτουργίας της διαπνοής (εξαέρωση 1g νερού συνεπάγεται απώλεια ενέργειας 2,5 kJ), (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 97).

Τα φυτά επίσης, όπως όλα τα σώματα που έχουν μια θερμοκρασία, ακτινοβολούν θερμότητα στο διάστημα, με αποτέλεσμα να ψύχονται τα ίδια αλλά και να συμβάλουν στην πτώση της θερμοκρασίας του αέρα που τα περιβάλλει. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις νύχτες με άπνοια και καθαρό ουρανό συχνά η θερμοκρασία των φυτών να είναι χαμηλότερη από αυτή του αέρα, με συνέπεια να έχουμε συμπύκνωση υγρασίας πάνω σ' αυτά (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 97-98).

Η θερμοκρασία είναι ο παράγοντας που έχει την πιο πολύπλοκη επίδραση στην ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών, γιατί επηρεάζει σχεδόν όλες τις λειτουργίες του φυτού, όπως: φωτοσύνθεση, αναπνοή, διαπνοή, μεταφορά και κατανομή των μεταβολιτών. Πιθανόν δε να επηρεάζει για μεγάλο διάστημα χρόνο και όχι μόνο στιγμιαία τις μεταβολές που συμβαίνουν σ' αυτά. Επίσης, η ρύθμιση της θερμοκρασίας είναι ο παράγοντας που έχει τη μεγαλύτερη επίπτωση στο κόστος της παραγωγής στο θερμοκήπιο, μετά τον τεχνητό φωτισμό (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 98).

Οι Myster και Moe (1995) αναφέρουν για κάποιες θερμοκηπιακές καλλιέργειες ότι η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας ημέρας και νύχτας επηρεάζει το μήκος του μεσογονατίου διαστήματος στα φυτά, το ύψος του φυτού, τον προσανατολισμό του φύλλου, τον προσανατολισμό του νεαρού βλαστού, το περιεχόμενο της χλωροφύλλης, την πλευρική διακλάδωση και την επιμήκυνση των στελεχών του μίσχου και του άνθους. Το μήκος του μεσογονατίου διαστήματος αυξάνει καθώς η διαφορά θερμοκρασίας αυξάνει. Η απόκριση της επιμήκυνσης του βλαστού σε αυτή τη διαφορά είναι μεγαλύτερη καθώς η διαφορά θερμοκρασίας αυξάνει από μηδέν σε θετικές τιμές, παρά όταν η διαφορά είναι από το μηδέν σε αρνητικές τιμές. Επίσης η διαφορά θερμοκρασίας έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στο ύψος του φυτού κατά τη διάρκεια της ταχείας ανάπτυξης σε καθορισμένες καλλιέργειες. Η μέση ημερήσια θερμοκρασία μπορεί να επηρεάσει την επιμήκυνση των μεσογονατίων διαστημάτων σε μερικά είδη. Ο ρυθμός άνθισης των φύλλων επηρεάζεται από την μέση ημερήσια

θερμοκρασία αλλά όχι από τη διαφορά θερμοκρασίας ημέρας-νύχτας. Ο ρυθμός επιμήκυνσης βλαστού του φυτού δεν είναι σταθερός κατά τη διάρκεια ενός κύκλου ημέρας/νύχτας και αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της μορφογένεσης και της ανθοφορίας του φυτού με τις εναλλαγές ημερησίας και νυχτερινής θερμοκρασίας.

2.1.4 Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂)

Η ξηρά ουσία ενός φυτού αποτελείται κατά 40% περίπου από άνθρακα, τον οποίο αποσπά από το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) της ατμόσφαιρας. Εκτός από τον άνθρακα και το οξυγόνο (O₂) που περιέχουν τα φυτά, το λαμβάνουν από το CO₂ του ατμοσφαιρικού αέρα (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 148).

Το CO₂ της ατμόσφαιρας διαχέεται στα στόματα των φύλλων όταν είναι ανοιχτά και από κει στους μεσοκυττάριους χώρους, στα κύτταρα των φύλλων και στους χλωροπλάστες, όπου με την ηλιακή ενέργεια και το νερό, μέσω της φωτοσύνθεσης, μετασχηματίζεται σε υδατάνθρακες. Οι υδατάνθρακες μετακινούνται στα διάφορα μέρη του φυτού. Από τους υδατάνθρακες αρχικά προϊόντα σχηματίζονται όλες οι άλλες οργανικές ουσίες που βρίσκονται στα φυτά. Ένα μέρος των παραγόμενων οργανικών ενώσεων χρησιμοποιούνται στην κατασκευή του φυτού, ενώ ένα άλλο μέρος οξειδώνεται πάλι σε διοξείδιο του άνθρακα, για να αποσπάσει ενέργεια απαραίτητη στις ζωτικές λειτουργίες του φυτού (αναπνοή). Με άλλα λόγια, με τη φωτοσύνθεση δεσμεύεται CO₂ από την ατμόσφαιρα και παράγονται οργανικές ενώσεις, ενώ με την αναπνοή διασπώνται οι οργανικές ενώσεις και απελευθερώνεται CO₂. Το δεσμευόμενο βέβαια CO₂ με τη φωτοσύνθεση είναι πολύ περισσότερο από το παραγόμενο όλο το εικοσιτετράωρο με την αναπνοή (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 148).

Η φωτοσύνθεση επηρεάζεται άμεσα από το φως, τη συγκέντρωση του CO₂ στον αέρα, το νερό και όπως όλες οι βιοχημικές αντιδράσεις από τη θερμοκρασία. Μια αύξηση του παράγοντα που βρίσκεται στην ελάχιστη ποσότητα αυξάνει το ρυθμό της φωτοσύνθεσης (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 148).

Η αύξηση της συγκέντρωσης του CO₂ στον αέρα επηρεάζει, εκτός από τη λειτουργία της φωτοσύνθεσης, και τη μορφογένεση στα φυτά. Οι Thornley και Hurd (1974) αποδεικνύουν ότι όσο το φως και η συγκέντρωση του CO₂ αυξάνουν, η

αναλογία της επιφάνειας του φύλλου ως προς το ξηρό βάρος του (ειδική φυλλική επιφάνεια) μειώνεται (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 149).

Παρατηρείται ακόμη ότι η αύξηση της συγκέντρωσης CO₂ στο χώρο του θερμοκηπίου επιδρά ευνοϊκά στην αύξηση των αποδόσεων ορισμένων καλλιεργειών, ακόμα και κάτω από περιορισμένες συνθήκες φωτός (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 149).

2.1.4.1 Το Διοξείδιο του άνθρακα στο περιβάλλον του θερμοκηπίου (CO₂ ext)

Η συγκέντρωση του CO₂ στον αέρα σε κανονικές συνθήκες είναι 0.035% (= 350 ppm), που είναι αρκετή για την ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών στη φύση. Τα περισσότερα φυτά όμως έχουν την ικανότητα να αυξάνουν το ρυθμό της ανάπτυξης και την παραγωγή τους με μεγαλύτερη συγκέντρωση CO₂, μέχρι 0.2% (2000 ppm). Η ανάπτυξη των φυτών σταματά σε ελάχιστη συγκέντρωση CO₂, που ποικίλλει από φυτό σε φυτό. Στα φυτά που συνήθως καλλιεργούνται στο θερμοκήπιο συμβαίνει γύρω στην τιμή 0.0125% (= 125 ppm) (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 154).

Στην περιοχή των φυτών και ιδιαίτερα κοντά στην κόμη, λόγω της φωτοσύνθεσης υπάρχει μια ημερήσια διακύμανση στη συγκέντρωση CO₂. Η διακύμανση αυτή είναι πιο έντονη μέσα στο θερμοκήπιο λόγω του κλειστού χώρου. Γενικά, η συγκέντρωση στο θερμοκήπιο (CO₂ ext) χωρίς εμπλουτισμό ποικίλλει πάνω από 0.04% κατά τη διάρκεια της νύχτας, μέχρι και κάτω από 0.02% την ημέρα (Μαυρογιαννόπουλος, 2005, σελ. 154).

2.2 Δείκτες υδατικής και θερμικής κατάστασης και καταπόνησης της καλλιέργειας

2.2.1 Η μέτρηση της υδατικής κατάστασης του φυτού

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η ακριβής μέτρηση της υδατικής κατάστασης του φυτού και/ή του εδάφους είναι κρίσιμη σε κάθε πείραμα στο οποίο κάποιος ενδιαφέρεται για την κατανόηση της διαφοροποιημένης παροχής νερού. Τέτοιες μετρήσεις είναι ουσιαστικές στον καθορισμό των συνθηκών του πειράματος (σε όρους των μεταχειρίσεων που εφαρμόστηκαν μαζί με όρους των επιπτώσεων πάνω στα φυτά) και σαν ένα πρώτο βήμα στη διευκόλυνση της επανάληψης του πειράματος (που είναι ουσιαστικό κομμάτι της αυστηρής επιστημονικής μεθόδου). Ο ακριβής προσδιορισμός της υδατικής κατάστασης σε διαφορετικά τμήματα του συστήματος φυτό-έδαφος είναι επίσης απαιτούμενος για την διατύπωση και εξέταση κάθε αυστηρών μηχανιστικών υποθέσεων, όπως αυτές που σχετίζονται με τους μηχανισμούς της ανεκτικότητας στη ξηρασία ή με τις αποκρίσεις προσαρμοστικότητας σε κάθε φυτό. Είναι επίσης σημαντικό η μέτρηση της υδατικής κατάστασης που έχει επιλεγεί να είναι σχετική με τις φυσιολογικές διαδικασίες ενδιαφέροντος. Αξιόπιστες μετρήσεις υδατικής κατάστασης επίσης παρέχουν ισχυρά εργαλεία για διαχειριστικούς σκοπούς μιας καλλιέργειας όπου υπάρχει η ανάγκη για επαναλαμβανόμενο έλεγχο όπως στο σχεδιασμό άρδευσης (Jones, 2007).

Δυστυχώς δεν υπάρχει αναγκαστικά κάποια μοναδική ή «καλύτερη» μέτρηση της υδατικής κατάστασης που να εφαρμόζεται σε όλες τις περιπτώσεις. Η επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου ή μεθόδων για τη μέτρηση ή περιγραφή της υδατικής κατάστασης για κάθε περίπτωση εξαρτάται από το σκοπό του πειραματιστή και μπορεί να διαφέρει για (Jones, 2007):

- Αυτούς που ενδιαφέρονται κυρίως για πρακτική διαχείριση όπως σχεδιασμός άρδευσης ή ποσοτικοποίηση των πλεονεκτημάτων από τις μεταχειρίσεις της διαχείρισης όπως εδαφοκάλυψη ή κλάδεμα
- Αυτούς που στοχεύουν στην κατανόηση των μηχανισμών κίνησης του νερού
- Αυτούς που στοχεύουν στην κατανόηση των μηχανισμών που ενέχονται στα φαινόμενα υδατικής καταπόνησης της ανάπτυξης και της φυσιολογίας και τις αποκρίσεις προσαρμοστικότητας του φυτού

- Αυτούς που στοχεύουν στην αναγνώριση των διαφορών στην ανεκτικότητα στην ξηρασία, στην απομόνωση των ελεγκτικών γονιδίων, ή να αναπαράγουν ή να εξετάσουν ανεκτικούς στην ξηρασία γενοτύπους

2.2.2 Η μέθοδος μέτρησης της σχετικής περιεκτικότητας νερού

Υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις για τους φυτικούς ιστούς όπου το περιεχόμενο νερό μπορεί να εκφραστεί ανά μονάδα νωπού ή ανά μονάδα ξηρού βάρους (ή ακόμα σε όρους μονάδων φυλλικής επιφάνειας). Δυστυχώς αυτά τα ακατέργαστα υδατικά περιεχόμενα δεν είναι πολύ χρήσιμα για συγκρίσεις μεταξύ ειδών με διαφορετική μορφολογία όπως ο βαθμός ευχυμίας, για παράδειγμα, που επηρεάζει τις τιμές που λαμβάνονται, ακόμα και για φύλλα σε πλήρη σπαργή. Μια αποτελεσματική μέθοδος κανονικοποίησης τέτοιων δεδομένων είναι η χρήση της σχετικής περιεκτικότητας νερού που ορίζεται ως:

$$RWC = \frac{(FW-DW)}{(TW-DW)} \quad (2.3)$$

όπου FW είναι το νωπό βάρος, DW το ξηρό βάρος και TW το βάρος στη σπαργή του μετρούμενου φυτικού υλικού (Jones, 2007).

2.2.3 Η ενεργειακή κατάσταση

Ένα μεγάλο πρόβλημα με τις μετρήσεις της υδατικής περιεκτικότητας, ακόμα και των σχετικών μετρήσεων, όπως η παραπάνω, είναι ότι τέτοιες μετρήσεις δεν σχετίζονται απαραίτητα με την ευκολία με την οποία το νερό μπορεί να εξαχθεί ή της επίδρασης του στη λειτουργικότητα του φυτού (Jones, 2007).

Έχει αναγνωριστεί ότι οι μετρήσεις της υδατικής κατάστασης βασιζόμενες στην ενεργειακή κατάσταση πλεονεκτούν σε σχέση με τις καθαρά ογκομετρικές μετρήσεις. Για τα φυτά εισήχθη ο όρος «έλλειμμα μύζησης πίεσης» και αργότερα αυτή η ιδέα επαναδιατυπώθηκε σε θερμοδυναμική βάση με την εισαγωγή του όρου «υδατικό δυναμικό» (Ψ). Αργότερα εκφράστηκε το υδατικό δυναμικό σε μονάδες πίεσης, που

ήταν οικίες σε φυσιολόγους φυτού και εδαφολόγους, με τον ορισμό του σε όρους χημικού δυναμικού του νερού (μ) και διαιρώντας με το μερικό μοριακό όγκο του νερού:

$$\Psi = (\mu - \mu_0) / V_w = - (RT / V_w) \log_e (e / e_s) \sqrt{b^2 - 4ac} \quad (2.4)$$

όπου V_w είναι ο μερικός μοριακός όγκος του νερού (συνήθως υποθέτεται ότι ισοδυναμεί αυτό στην υγρή φάση) και μ_0 είναι το χημικό δυναμικό του καθαρού νερού σε ένα επίπεδο αναφοράς, R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων, T είναι η θερμοκρασία σε (K) και e/e_s είναι η πίεση υδρατμών σε ισορροπία με το περιεχόμενο σε νερό υπόβαθρο διαιρούμενη με την πίεση κορεσμού υδρατμών σε αυτή τη θερμοκρασία (Jones, 2007).

2.2.3.1 Το υδατικό δυναμικό του φυτού και η μέτρηση του

Οι μετρήσεις του υδατικού δυναμικού του φυτού γίνονται κυρίως με τη βοήθεια είτε ψυχομετρικών μεθόδων (εμπλέκοντας την εξισορρόπηση του ιστού με τον αέρα σε ένα κλειστό θάλαμο και τον υπολογισμό της πίεσης υδρατμών χρησιμοποιώντας υγρά και ξηρά θερμοζεύγη) ή με τη βοήθεια του θαλάμου πίεσης. Ο ανιχνευτής πίεσης κυττάρου είναι ένα ιδιαίτερα πολύτιμο εργαλείο για τη μελέτη σημαντικών υδραυλικών ιδιοτήτων όπως η ελαστικότητα του κυτταρικού τοιχώματος και η διαπερατότητες της κυτταρικής μεμβράνης. Επίσης υπάρχει ο ανιχνευτής πίεσης ξυλώματος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό ηπίων τάσεων του ξυλώματος, παρόλο που η χρήση του σε πιο ακραίες τάσεις είναι αμφισβητήσιμη (Jones, 2007).

2.2.3.1.1 Η ψυχομετρική τεχνική

Το ψυχρόμετρο θερμοζευγών βασίζεται στην αρχή που αναφέρει ότι η σχετική πίεση υδρατμών (e/e_0) ενός διαλύματος ή ενός τμήματος φυτικού υλικού σχετίζεται με το υδατικό δυναμικό της (Ψ) σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Psi = \left(RT / \bar{V} \right) \ln(e/e_0) \quad (2.5)$$

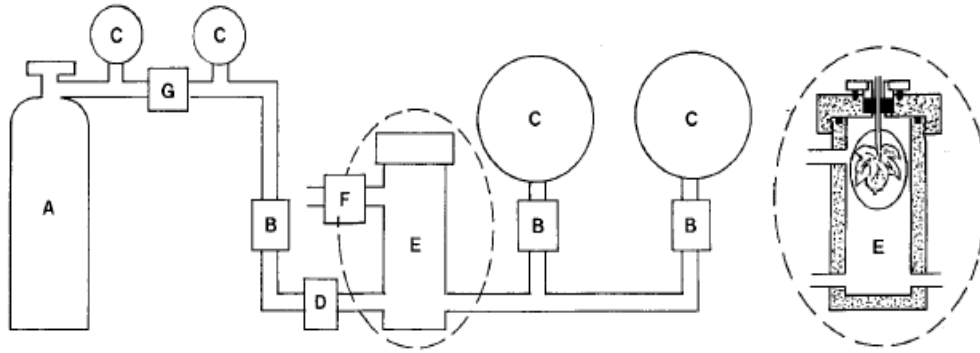
όπου R , T και \bar{V} , έχουν αναφερθεί στην εξίσωση 2.4, e είναι η πίεση υδρατμών του νερού μέσα στο διάλυμα ή ιστό και e_0 είναι η πίεση υδρατμών του καθαρού νερού σε ατμοσφαιρική πίεση.

Ένα δείγμα φυτικού υλικού που τοποθετείται μέσα σε ένα ερμητικά σφραγισμένο θάλαμο και αφήνεται να ισορροπήσει, θα δημιουργήσει μια σχετική πίεση υδρατμών ή σχετική υγρασία μέσα στο θάλαμο ισοδύναμη του ολικού υδατικού δυναμικού του ιστού τη στιγμή του σφραγίσματος μέσα στο θάλαμο. Στο ψυχρόμετρο θερμοζευγών, η σχετική υγρασία στο θάλαμο μετριέται καθορίζοντας την πτώση του υγρού βολβού, και στο υγρόμετρο του σημείου δρόσου, καθορίζοντας την πτώση του σημείου δρόσου (Turner, 1981).

2.2.3.1.2 Η τεχνική του θαλάμου πίεσης

Η ευρεία υιοθέτηση της τεχνικής του θαλάμου πίεσης για τη μέτρηση του ολικού δυναμικού προκύπτει από την ευκολία στη χρήση της, την ταχύτητα και την αξιοπιστία της, και στο γεγονός ότι δεν απαιτεί εξαιρετικό έλεγχο της θερμοκρασίας (Turner, 1981).

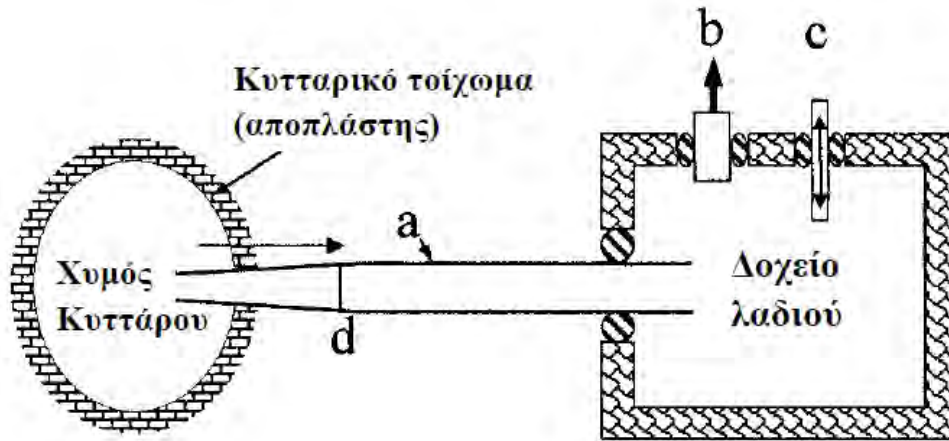
Σε αυτή τη τεχνική κόβεται ένα φύλλο ή ένα κλαδί και τοποθετείται σε ένα θάλαμο πίεσης με την κομμένη άκρη του μίσχου ή του βλαστού μόλις να προεξέχει από το θάλαμο μέσω ενός λαστιγένιου αδένα που χρησιμοποιείται για να σφραγίσει το θάλαμο (Σχήμα 2.1). Η πίεση στο θάλαμο αυξάνεται βαθμιαία με συμπιεσμένο αέρα (όχι οξυγόνο), άζωτο ή άλλο αδρανές αέριο από ένα κύλινδρο μέχρι ο χυμός να έχει μόλις επιστρέψει στις αποκομμένες άκρες των δοχείων του ξυλώματος. Η πίεση μέσα στο θάλαμο καταγράφεται, η πίεση εκλύεται και το δείγμα απομακρύνεται. Ανάλογα με την αφυδάτωση του ιστού, η όλη λειτουργία μπορεί να ολοκληρωθεί σε δυο λεπτά, επιτρέποντας 20 ως 30 δείγματα να μετρηθούν σε μια ώρα (Turner, 1981).



Σχήμα 2.1. Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος θαλάμου πίεσης: A, κύλινδρος αερίου αζώτου ή συμπιεσμένου αέρα. B, βαλβίδες διακοπής. C, μετρητές πίεσης. D, βαλβίδα μετρούμενης δόσεως. E, θάλαμος πίεσης. F, βαλβίδα εξαγωγής. G, μειωτής πίεσης. Η εικόνα που περικλείεται από διακεκομμένες γραμμές απεικονίζει το θάλαμο πίεσης πιο λεπτομερώς με ένα φύλλο στο εσωτερικό του θαλάμου, εσώκλειστο σε ένα σάκο πολυαιθυλενίου.

2.2.3.1.3 Η τεχνική του ανιχνευτή πίεσης κυττάρου

Ο ανιχνευτής πίεσης είναι ένα μικρομανόμετρο για την άμεση καταγραφή και ταυτόχρονα τον χειρισμό της υδροστατικής πίεσης ενός φυτικού κυττάρου (Σχήμα 2.2). Χρησιμοποιείται για να απεικονίσει στο χώρο και στο χρόνο τις πιέσεις σπαργής μεμονωμένων κυττάρων μέσα σε ιστούς και όργανα ακέραιων φυτών. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να μελετηθεί η υδραυλική αρχιτεκτονική των ιστών, η κίνηση του ιστού και οι αποκρίσεις των ιστών σε υδατική καταπόνηση. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να επαυξηθεί με την ταυτόχρονη μέτρηση της ωσμωτικής πίεσης ενός μεμονωμένου κυττάρου. Αυτό επιτρέπει στις υδραυλικές κινητήριες δυνάμεις διαμέσου επιλεκτικά περατών μεμβρανών και τοιχωμάτων, να μπορούν να εκτιμηθούν πλήρως. Με τη χειροκίνητη καθοδήγηση της πίεσης, η ελαστικότητα του κυτταρικού τοιχώματος και οι ιδιότητες του μπορούν επίσης να απεικονιστούν (Tomos, 2000).



Σχήμα 2.2. Διάγραμμα του ανιχνευτή πίεσης κυττάρου με το γυάλινο μικροτριχοειδές γεμισμένο με λάδι σιλικόνης. α) γυάλινο μικροτριχοειδές τοποθετημένο μέσα σε ένα φυτικό κύτταρο β) μετατροπέας πίεσης γ) τηλεχειριζόμενο έμβολο για τη ρύθμιση της πίεσης του λαδιού δ) ο ορατός μηνίσκος μεταξύ χυμού και λαδιού που χρησιμοποιείται σαν δεδομένη ένδειξη.

2.2.4 Έμμεσες μετρήσεις της υδατικής κατάσταση του φυτού

Υπάρχει ένας αριθμός ευρέως χρησιμοποιούμενων έμμεσων δεικτών υδατικής κατάστασης οι οποίοι βασίζονται στην ανάλυση της ανάπτυξης του φυτού ή των φυσιολογικών αποκρίσεων, γνωστοί ως ενδεικτικοί των ελλειμμάτων νερού. Αυτοί εκτείνονται από ορατές εκφράσεις αυξανόμενων υδατικών ελλειμμάτων στο φυτό όπως μαρανση, μέσω μορφομετρικών αλλαγών όπως συρρίκνωση βλαστού, φύλλου ή καρπού και τις πολύ γνωστές ελαττώσεις στη διόγκωση του κυττάρου και το ρυθμό αναπνοής που σχετίζονται με τα ελλείμματα νερού, ως τις φυσιολογικές αποκρίσεις όπως το κλείσιμο των στομάτων και μειώσεις στο ρυθμό φωτοσύνθεσης.

Είναι συχνά πιθανή η εξαγωγή επαναλαμβανόμενων καμπύλων βαθμονόμησης που επιτρέπουν τον υπολογισμό της υδατικής κατάστασης για μια δεδομένη καλλιεργητική ποικιλία, έτσι τέτοιες μέθοδοι είναι συχνά πολύτιμες στην αγρονομική πρακτική. Το θεμελιώδες πρόβλημα με όλες αυτές τις έμμεσες μεθόδους υδατικής κατάστασης είναι ότι παρόλο που μπορεί να είναι πολύτιμες για τον εντοπισμό των φυσιολογικών επακόλουθων των ελλειμμάτων νερού (είτε σε όρους καταστροφής, είτε για αποκρίσεις προσαρμογής όπως το κλείσιμο των στομάτων), δεν είναι πολύ

χρήσιμες σε μηχανιστικές μελέτες που έχουν ως στόχο την κατανόηση της προσαρμοστικότητας του φυτού ή την απόκριση του σε ελλείμματα νερού επειδή δεν είναι αυστηρά συνδεδεμένες με καμία από τις βασικές μετρήσεις της υδατικής κατάστασης. Ως αποτέλεσμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο με περίσκεψη όταν προσπαθούν να αναγνωρίσουν την ταυτότητα των μηχανισμών ανοχής στη ξηρασία για ενσωμάτωση σε προγράμματα φυτικής βελτίωσης. Εν τούτοις, αυτές οι τεχνικές, όπως η θερμική εικονοποίηση, που είναι κατάλληλες για απεικόνιση μεγάλου αριθμού φυτών, έχουν πραγματική αξία στις μελέτες ξηρασίας εφόσον υπενθυμίζονται οι περιορισμοί τους (Jones, 2007).

2.2.4.1 Η μέτρηση της μεταβολής της διαμέτρου βλαστού

Η καταγραφή της μεταβολής της διαμέτρου βλαστού σε ένα φυτό αποτελεί έναν ικανοποιητικό δείκτη για τη παρακολούθηση των αλλαγών που συμβαίνουν στη υδατική κατάσταση του φυτού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό της άρδευσης.

Από την ανάλυση των μεταβολών του βλαστού μπορούν να υπολογισθούν κάποιοι παράμετροι. Η διακύμανση της διαμέτρου βλαστού σε ένα φυτό είναι συνεχής κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας. Τις πρώτες πρωινές ώρες η διάμετρος του βλαστού παίρνει τη μέγιστη τιμή της (MXSD) και το απόγευμα παίρνει την ελάχιστη τιμή (MNSD), ενώ από την αφαίρεση αυτών των παραμέτρων προκύπτει η μέγιστη ημερήσια συρρίκνωση του βλαστού (MDS). Από τη διαφορά δυο διαδοχικών τιμών της παραμέτρου MXSD προκύπτει η ημερήσια ανάπτυξη του βλαστού (DG).

Οι τιμές του δείκτη υδατικού δυναμικού του βλαστού το μεσημέρι (Ψ_{stem}) χρησιμοποιούνται ευρέως για την πρόσβαση στο υδατικό δυναμικό του φυτού. Θεωρείται ότι είναι πιο ευαίσθητος δείκτης από άλλους όπως η στοματική αγωγιμότητα και ο καθαρός ρυθμός αφομοίωσης CO_2 , τουλάχιστον για μέτριες συνθήκες ελλείμματος νερού (Fernandez και Cuevas, 2010, Goldhamer et al., 1999, Moriana και Fereres, 2002). Οι μετρήσεις όμως του Ψ_{stem} δύσκολα μπορούν να αυτοματοποιηθούν και έτσι πολλοί ερευνητές συνέδεσαν τους εξαγόμενους δείκτες από τη μεταβολή της διαμέτρου βλαστού με το Ψ_{stem} με αποτέλεσμα σήμερα ο δείκτης MDS να θεωρείται εξίσου χρήσιμος με τον Ψ_{stem} (Fernandez και Cuevas, 2010).

2.2.5 Η υδατική και θερμοκρασιακή καταπόνηση του φυτού

Τα υγιή φυτά πρέπει να προμηθεύονται αρκετό νερό ώστε να ανταποκρίνονται στις εξατμιστικές ανάγκες για τη λειτουργία της διαπνοής. Η υδατική καταπόνηση του φυτού και σταδιακά η μάρανση του συμβαίνουν όταν οι απαιτήσεις για διαπνοή υπερβαίνουν το διαθέσιμο νερό που υπάρχει για το φυτό. Για την κατάλληλη εφαρμογή της διαχείρισης νερού σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον παραγωγής φυτών, είναι βασικό ο εντοπισμός της υδατικής καταπόνησης να γίνεται όσο το δυνατόν πιο νωρίς για τον έλεγχο του χρονοδιαγράμματος της άρδευσης. (Kacira et al, 2002).

Για τον σχεδιασμό της άρδευσης, έχουν προταθεί δείκτες όπως ο ημερήσιος βαθμός καταπόνησης (SDD), η ημερήσια θερμοκρασιακή καταπόνηση (TSD) και ο δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας (CWSI).

2.2.5.1 Ο δείκτης ημερήσιου βαθμού καταπόνησης (SDD)

Ένα μέσο για την αξιολόγηση της κατάστασης των υδάτων με τηλεμετρήσεις θα μπορούσε να ανοίξει το δρόμο για βελτιωμένες προβλέψεις παραγωγής και, σε αρδευόμενες εκτάσεις, για βελτιωμένους χρόνους προγραμματισμού. Η θερμοκρασία φυλλώματος ενός φυτού μπορεί να μετράται από απόσταση με ελαφριά, φορητά υπέρυθρα θερμομέτρα. Η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας φυλλώματος ενός φυτού και της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος αέρα ($T_c - T_a$) μπορεί να αποτελέσει δείκτη της υδατικής κατάστασης της καλλιέργειας, επειδή η έλλειψη νερού προκαλεί μερικό κλείσιμο των στομάτων, με αποτέλεσμα τη μείωση της διαπνοής και επιτρέπει στα φύλλα καλυμμένα από την ηλιακή ακτινοβολία να θερμανθούν πάνω από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος. Εισηχθη η ιδέα ενός δείκτη ημερήσιας υδατικής καταπόνησης (stress-degree-day, SDD). Ο δείκτης αυτός είναι η ημερήσια τιμή της διαφοράς $T_c - T_a$, μετρημένη τη στιγμή της μέγιστης επιφανειακής θερμοκρασίας (γενικά 1 με 1,5 ώρες μετά το ηλιακό μεσημέρι). Ο SDD ορίζεται ως εξής:

$$SDD = \sum_{n=i}^N (T_c - T_a)_n \quad (2.6)$$

όπου η θερμοκρασία T_a μετριέται 150 cm πάνω από το έδαφος και η διαφορά $T_c - T_a$ αθροίζεται για N μέρες ξεκινώντας από την μέρα i (Kirkham, 2005, σελ. 437-438).

Γενικά, αν ένα φυτό έχει επαρκή ποσότητα νερού, η διαφορά $T_c - T_a$ θα έχει τιμή κοντά στο μηδέν ή αρνητική· αν είναι υδατικά καταπονημένο, η τιμή αυτή θα είναι μεγαλύτερη του μηδενός. Έτσι, το άθροισμα των θετικών τιμών της διαφοράς $T_c - T_a$ μπορεί να χρησιμεύσει ως δείκτης του πότε θα πραγματοποιηθεί άρδευση. Οι Jackson et Al. (1977) καθόρισαν ένα θετικό δείκτη SDD ως εξής:

$$SDD_{pos} = \sum_{n=i}^N (T_c - T_a)_n \quad (2.7)$$

στον οποίο οι τιμές της διαφοράς $T_c - T_a$ που είναι μικρότερες από το μηδέν θέτονται ίσες με το μηδέν. Το i συμβολίζει την πρώτη μέρα έπειτα από άρδευση και το N τον αριθμό των ημερών που απαιτούνται για να φτάσει ο δείκτης την προτεινόμενη τιμή (Kirkham, 2005, σελ. 438-439).

2.2.5.2 Ο δείκτης ημερήσιας θερμοκρασιακής καταπόνησης (TSD)

Όπως αναφέρουν οι Hope και Jackson (1989), οι Gardner et al. (1981), εισήγαγαν ένα δείκτη για την υδατική καταπόνηση μιας καλλιέργειας που ονομάστηκε ημερήσια θερμοκρασιακή καταπόνηση (temperature-stress-degree, TSD). Ο δείκτης αυτός ορίζεται ως η διαφορά της θερμοκρασίας φυλλώματος μεταξύ μιας πειραματικής (δυσνητικά καταπονημένης) καλλιέργειας και μιας πλήρως αρδευόμενης καλλιέργειας ελέγχου που θεωρείται ότι διαπνέει με δυναμικό ρυθμό. Η μετεωρολογική ανεξαρτησία αυτού του δείκτη βασίζεται στην υπόθεση ότι οι περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη θερμοκρασία του φυλλώματος θα εκδηλωθούν εξίσου και στα δυο φυλλώματα και ότι η διαφορά της θερμοκρασίας, θα έχει αντίκτυπο μόνο στις διαφοροποιήσεις στην υδατική καταπόνηση.

Ο δείκτης TSD απαιτεί μια καλά αρδευόμενη καλλιέργεια αναφοράς, που μάλλον περιορίζει την εφαρμογή της μεθόδου. Μαζί με τον δείκτη SDD, βρέθηκαν να είναι κάπως μη ικανοποιητικοί, διότι το μέγεθος δεικτών όπως ο SDD ποικίλει ως λειτουργία των κλιματικών παραγόντων, από τους οποίους ο πιο σημαντικός θεωρείται ότι είναι η ατμοσφαιρική υγρασία. Σε πιο υγρά κλίματα, η συννεφιά γίνεται επίσης κρίσιμος παράγοντας (Jones, 2004a).

2.2.5.3 Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης καλλιέργειας (CWSI)

Όπως αναφέρει ο Kirkham (2005, σελ. 443), η βάση του δείκτη υδατικής καταπόνησης καλλιέργειας (crop-water-stress-index, CWSI) ή υδατικής καταπόνησης φυτού (plant-water-stress-index, PWSI), όπως αλλιώς συναντάται, εδραιώθηκε από την δουλειά του Ehrler (1973). Χρησιμοποίησε θερμοζεύγη για να μετρήσει την θερμοκρασία φύλλου τεσσάρων ποικιλιών βαμβακιού. Βρήκε ότι για καθαρές ημέρες με ηλιοφάνεια, η διαφορά θερμοκρασίας φύλλου-αέρα από τις ώρες 08:00 ως τις 18:00 ήταν γραμμική συνάρτηση του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών (VPD), εφόσον τα φυτά ήταν καλά τροφοδοτημένα με νερό.

Αυτή η σχέση, που εξήχθη από τις θεωρήσεις του ενεργειακού ισοζυγίου, μπορεί να εκφραστεί ως (Jackson et al., 1986, Monteith και Szeicz, 1962, Jackson et al., 1981):

$$T_c - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \frac{\gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} - \frac{\text{VPD}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (2.8)$$

όπου $T_c - T_a$ είναι όπως αναφέρθηκε η διαφορά θερμοκρασίας φυλλώματος-αέρα, r_a και r_c είναι οι αντιστάσεις, αεροδυναμική και φυλλώματος αντίστοιχα, ($s\ m^{-1}$), R_n είναι η καθαρή ακτινοβολία ($W\ m^{-2}$), ρC_p είναι η ογκομετρική θερμοχωρητικότητα του νερού ($J\ m^{-3}\ ^\circ C^{-1}$), VPD είναι το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών, γ η ψυχομετρική σταθερά ($Pa\ ^\circ C^{-1}$) και Δ είναι η κλίση της σχέσης θερμοκρασία-πίεση κορεσμού υδρατμών ($Pa\ ^\circ C^{-1}$)

Για καλά αρδευόμενα φυτά, η αντίσταση φυλλώματος (r_c) είναι χαμηλή άλλα συνήθως όχι μηδέν (Van Bavel και Ehrler, 1968). Υποθέτοντας ότι $5\ s\ m^{-1}$ είναι αντιπροσωπευτική τιμή της r_c στη δυναμική εξατμισοδιαπνοή, η διαφορά $T_c - T_a$ υπολογίστηκε ως συνάρτηση του VPD. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών δίνονται στο Σχήμα 2.3. Επίσης απεικονίζονται οι γραμμές για $r_c = 50, 500$ και ∞ , που αντιστοιχούν σε μέτρια, σοβαρή και άπειρη καταπόνηση. Όταν $r_c = \infty$, η εξίσωση (1) απλοποιείται σε:

$$T_c - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \quad (2.9)$$

που δείχνει ότι το ανώτερο όριο της θερμοκρασίας του φυτού εξαρτάται από την αεροδυναμική αντίσταση και την καθαρή ακτινοβολία (Jackson et al., 1986).

Το σημείο Β στο Σχήμα 2.3 αντιπροσωπεύει μια μετρημένη τιμή της διαφοράς $T_c - T_a$. Τα σημεία Α και C αντιπροσωπεύουν τις τιμές της διαφοράς $T_c - T_a$ που θα παρουσιαζόντουσαν εάν τα φυτά βρισκόντουσαν κάτω από μέγιστη και ελάχιστη καταπόνηση αντίστοιχα, σε μια συγκεκριμένη τιμή VPD. Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης καλλιέργειας (CWSI) ορίστηκε ως ο λόγος των αποστάσεων BC/AC.

Το μαθηματικό ισοδύναμο μπορεί επίσης να γραφτεί (Jackson et al., 1986, Idso et al., 1981, Jackson et al., 1981):

$$\text{CWSI} = \frac{\gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right) - \gamma^*}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (2.10)$$

$$\gamma^* = \gamma \left(1 + \frac{r_{cp}}{r_a}\right) \quad (2.11)$$

όπου r_{cp} είναι η αντίσταση του φυλλώματος σε δυναμική εξατμισοδιαπνοή

Μια ακόμα έκφραση της εξίσωσης είναι (Κατσούλας, 2002, Jackson et al., 1981):

$$\text{CWSI} = \frac{T_c - T_m}{T_M - T_m} \quad (2.12)$$

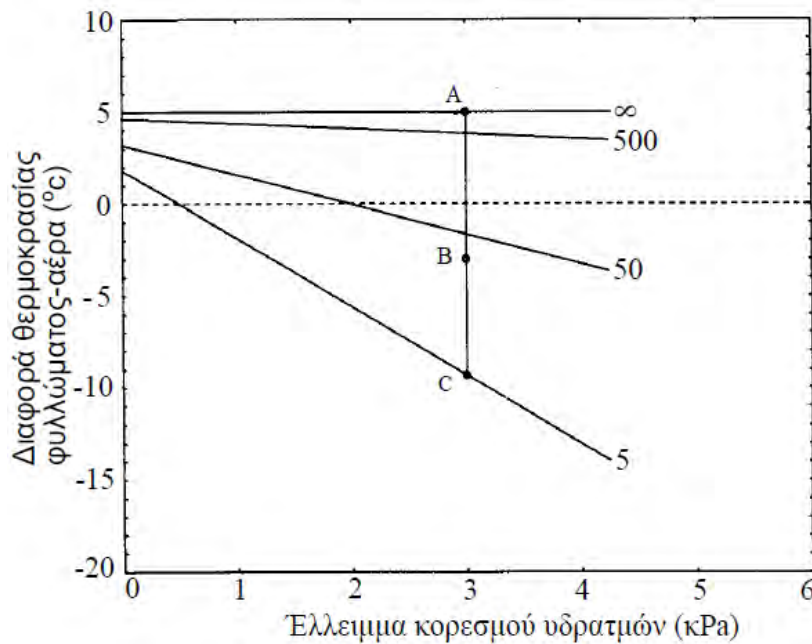
όπου T_c είναι η θερμοκρασία της καλλιέργειας και T_M και T_m είναι η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία αντίστοιχα που μπορεί να επιτευχθεί από την καλλιέργεια. Ο δείκτης αυτός παίρνει τιμές από 0 έως 1, με την καλλιέργεια να βρίσκεται στη μέγιστη υδατική καταπόνηση όταν ο δείκτης παίρνει την τιμή 1.

Η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία μπορούν να υπολογιστούν από τις σχέσεις:

$$T_M = T_a + \frac{R_n}{g_a \rho C_p} \quad (2.13)$$

$$T_m = T_a + \frac{\left(\frac{1}{g_a} + \frac{1}{g_M}\right) \frac{R_n}{\rho C_p} - \frac{D_{leaf-air}}{\gamma}}{1 + \frac{\Delta}{\gamma} + \frac{g_a}{g_M}} \quad (2.14)$$

όπου g_a είναι η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας σε $m s^{-1}$, g_M είναι η μέγιστη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας σε $m s^{-1}$ και $D_{leaf-air}$ είναι το έλλειμμα κορεσμού φύλλου-αέρα.



Σχήμα 2.3. Η θεωρητική σχέση μεταξύ της διαφοράς θερμοκρασίας-αέρα και του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών του αέρα. Τα νούμερα στο τέλος των γραμμών δηλώνουν τις τιμές της αντίστασης του φυλλώματος (r_c) που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς.

2.3 Παρουσίαση και ανάλυση υποστρώματων για υδροπονικές καλλιέργειες

Για τις ανάγκες του πειράματος που πραγματοποιήθηκε, η καλλιέργεια ντομάτας αναπτύχθηκε σε 3 διαφορετικά υποστρώματα: πετροβάμβακα, περλίτη και ελαφρόπετρα. Τα υποστρώματα που χρησιμοποιήθηκαν ανήκουν στην κατηγορία των ανόργανων υποστρώματων. Συγκεκριμένα, τα ανόργανα υποστρώματα μπορούν να ταξινομηθούν σε φυσικά μη τροποποιημένα υλικά (άμμος, ηφαιστειακή τέφρα, ελαφρόπετρα) και επεξεργασμένα υλικά (πετροβάμβακας, περλίτης, βερμικουλίτης, και διογκωμένη άργιλος και ζεόλιθος), (Ravin και Lieth 2008, σελ. 506).

2.3.1 Πετροβάμβακας

Η εφαρμογή των τροποποιημένων μορφών πετροβάμβακα ως υπόστρωμα για την καλλιέργεια οπωροκηπευτικών άρχισε στη Δανία το 1969 (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 516, Smith, 1987). Ο πετροβάμβακας που χρησιμοποιείται στα οπωροκηπευτικά χρησιμοποιείται κυρίως ως πλάκες ή τεμάχια συνδεδεμένων ινών, άλλα είναι επίσης διαθέσιμος με την μορφή κόκκων σαν συστατικό για μείγματα γλαστρών. Κατασκευάζεται με τη θέρμανση ενός μείγματος τριών φυσικών πρώτων υλών: 60% διαβάση (μια μορφή ενός βασαλτικού πετρώματος, όπως ο δολερίτης), 20% ασβεστόλιθο και 20% οπτάνθρακα. Γενικά, ο πετροβάμβακας είναι αποστειρωμένος, εύκολα διαχειρίσιμος και συνεπής σε απόδοση. Πρόκειται για ένα αποτελεσματικό μέσο ανάπτυξης για κηπευτικές καλλιέργειες, στις οποίες ο παραγωγός μπορεί εύκολα να χειριστεί την αναλογία μεταξύ νερού και αέρα και μεταξύ κάθε θρεπτικού στοιχείου στη ζώνη των ριζών (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 516, Papadopoulos et al., 1999). Από την άλλη πλευρά, δεν «συγχωρεί» τα διαχειριστικά λάθη, διότι στερείται ρυθμιστικής ικανότητας για τα θρεπτικά στοιχεία, το pH και το νερό και επίσης λόγω του μικρού όγκου των κοινών πλακών (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 516).

Φυσικά χαρακτηριστικά: Ο πετροβάμβακας είναι ένα ελαφρύ υπόστρωμα με χαμηλή φαινομενική πυκνότητα της τάξεως του $0.05-0.1 \text{ gr cm}^{-3}$ και όγκο πόρων 92-98%, ανάλογα με τον παραγωγό (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 516-517, Smith, 1987, 1998, Kipp et al., 2000). Εμφανίζει υψηλή κατακράτηση νερού σε χαμηλή τάση νερού και η περιεκτικότητα του νερού μειώνεται δραστικά καθώς η τάση αυξάνεται έτσι ώστε να μη διατηρείται ουσιαστικά καθόλου νερό σε μυζήσεις πάνω από 5 kPa

(Raviv και Lieth, 2008, σελ. 516-517, da Silva, 1991, da Silva et al., 1995). Ως αποτέλεσμα, η ρυθμιστική ικανότητα του νερού είναι χαμηλή και παρουσιάζεται απότομη κλίση του εδαφικού περιεχομένου από την κορυφή ως την βάση της πλάκας έπειτα από άρδευση και ελεύθερη στράγγιση. Ο όγκος του αέρα είναι χαμηλός στη βάση, μόλις 4% σε ύψος 1 cm από τη βάση, ενώ τα ανώτερα στρώματα είναι ξηρά. Το συνιστώμενο ύψος μιας πλάκας για τη βέλτιστη αναλογία νερού σε αέρα είναι 7.5-10 cm (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 516-517, Smith, 1987). Ένα ισχυρό φαινόμενο υστέρησης παρατηρήθηκε στον πρώτο κύκλο ύγρυνσης και ξήρανσης, αλλά μειώθηκε στους επόμενους κύκλους (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 516-517, da Silva et al, 1995). Η υδραυλική αγωγιμότητα στον κορεσμό είναι πολύ υψηλή (4.6 cm min^{-1}) αλλά είναι αισθητά μειωμένη με αυξημένη μύζηση (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 516-517, da Silva et al, 1995). Τέτοιες μειώσεις στην υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να οδηγήσουν σε φτωχή λήψη νερού και θρεπτικών στοιχείων και σε ταχεία ανάπτυξη υδατικής καταπόνησης αν καθυστερήσει η άρδευση. Ο πετροβάμβακας είναι ένα μαλακό και ελαστικό υλικό που συμπιέζεται κάτω από πίεση και διατηρεί το αρχικό ύψος του έπειτα από χαλάρωση, αλλά μετά από χρήση γίνεται μαλακότερος και λιγότερο ελαστικός (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 516-517, Wever και van Leeuwen, 1995).

Χημικά χαρακτηριστικά: Το κύριο χημικό χαρακτηριστικό του πετροβάμβακα είναι η σχετική αδράνεια του, όταν εκφράζεται με βάση τον όγκο, εκτός από μερικές ασήμαντες επιπτώσεις στο pH. Το αρχικό pH των εμπορικών προϊόντων πετροβάμβακα ήταν μάλλον υψηλό παλαιότερα (7.0-8.0) και έχουν καταγραφεί τιμές μέχρι και 9.5 (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 516-517, Smith, 1987). Ωστόσο, στις μέρες μας το βιομηχανικό πρότυπο έχει τιμές 6-6.5. Κάτω από pH 5.0 ο πετροβάμβακας αρχίζει να διαλύεται, έτσι χαμηλές τιμές pH πρέπει να αποφεύγονται. Ο πετροβάμβακας από μόνος του δεν έχει καμία επίδραση στη θρέψη των καλλιεργειών και όλα τα θρεπτικά στοιχεία πρέπει να παρέχονται μαζί με το νερό (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 516-517).

Αποστείρωση, επαναχρησιμοποίηση, και διάθεση αποβλήτων: Όντας ένα αποστειρωμένο προϊόν, ο καινούριος πετροβάμβακας παρέχει ένα περιβάλλον στις ρίζες που είναι αρχικά λιγότερο ευάλωτο σε επιθέσεις παθογόνων, ειδικά σε ένα κλειστό σύστημα καλλιέργειας με υδρολίπανση (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 517-518,

Tu et al., 1999). Ο πετροβάμβακας μπορεί να απολυμανθεί με ατμό πριν την επαναχρησιμοποίηση (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 517-518).

Μετά από ένα ή δυο καλλιεργητικούς κύκλους, ο πετροβάμβακας συνήθως απορρίπτεται και παράγει έναν μεγάλο όγκο αποβλήτων (περίπου 125 m³ ανά εκτάριο φυτικής παραγωγής. Αυτό το περιβαλλοντικό ζήτημα των αποβλήτων είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην κηπευτική χρήση του ορυκτοβάμβακα (mineral wool), καθώς δεν μπορεί εύκολα να επιστραφεί στη φύση. Η διάθεση του μεταχειρισμένου κηπευτικού πετροβάμβακα σε χώρους υγειονομικής ταφής έχει πραγματοποιηθεί σε όλες τις χώρες όπου οι καλλιέργειες έχουν αναπτυχθεί σε πετροβάμβακα· μια τέτοια μέθοδος διάθεσης είναι είτε όλο και λιγότερο διαθέσιμη ή μη βιώσιμη (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 518, Bussell και McKennie, 2004).

Μια από τις πιθανές χρήσεις των μεταχειρισμένων πλακών πετροβάμβακα είναι η ενσωμάτωση τους (σαν τεμαχισμένα μικρά σωματίδια) σε τύρφη-ή σε ένα μέσο βασισμένο σε κομπόστ για την παραγωγή κηπευτικών· αυτό παρέχει μια ευκαιρία για την ανακύκλωση μεταχειρισμένου πετροβάμβακα και τη μείωση της κατανάλωσης μη ανανεώσιμων πόρων, όπως η τύρφη (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 518).

2.3.2 Περλίτης

Ο περλίτης είναι ένα υαλώδη ηφαιστειακό πέτρωμα με ρυολιθική σύνθεση και 2-5% χημικά δεσμευμένο/συνδυασμένο νερό (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511, Alkan και Dogan, 1998, Dogan και Alkan, 2004). Ο περλίτης συχνά χρησιμοποιείται ως εδαφικό μείγμα γλαστρών και σαν αυτόνομο καλλιεργητικό υπόστρωμα (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511, Grillas et al., 2001, Gül et al., 2005). Παράγεται σε διάφορες βαθμίδες, με τις πιο συνηθισμένες να είναι 0-2 και 1.5-3.0 mm σε διάμετρο. Οι διάφορες βαθμίδες διαφέρουν στα φυσικά τους χαρακτηριστικά (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511).

Φυσικά χαρακτηριστικά: ο διογκωμένος περλίτης είναι πολύ ελαφρύς, με πυκνότητα τεμαχιδίων και φαινομενική πυκνότητα 0.9 και 0.1 gr cm⁻³, αντίστοιχα. Είναι πολύ πορώδες, έχει μια ισχυρή τριχοειδή δράση και μπορεί να κρατήσει 3-4 φορές το βάρος του σε νερό. Παρουσιάζει διαφορά στην ικανότητα συγκράτησης νερού ανάμεσα στα χονδρόκοκκα και στα λεπτόκοκκα κλάσματα η οποία υποδηλώνει

ότι το περισσότερο νερό κατακρατείται από τα χονδρόκοκκα τεμαχίδια στους εσωτερικούς πόρους (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511). Ωστόσο, αυτό δεν εξηγείται μόνο από τον όγκο του εσωτερικού πορώδους (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511, Burés et al., 1997a). Η κλίση της μείωσης του περιεχόμενου νερού καθώς η τάση του νερού αυξάνεται είναι μέτρια σε σχέση με την άμμο και τον πετροβάμβακα (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511, Burés et al., 1997a,b). Το διαθέσιμο και το μη διαθέσιμο νερό στον εμπορικό περλίτη διαμέτρου 0-4 mm ήταν 13.6 και 36.5% του όγκου του, αντίστοιχα (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511, Burés et al., 1997b). Η καμπύλη συγκράτησης νερού του περλίτη δείχνει μέτρια υστέρηση (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511, Burés et al., 1997b, Wever et al., 1997). Ο κορεσμός του περλίτη ήταν πολύ γρήγορος, ανεξάρτητα από την αρχική υγρασία του (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511, Wever et al., 1997). Η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται από τη διάμετρο των τεμαχιδίων (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511, Burés et al., 1997a). Για εμπορικό περλίτη διαμέτρου 0-4 mm, έχοντας το 50% των τεμαχιδίων μικρότερο από 0.5 mm, η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα ήταν 0.3 cm min^{-1} (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511, Burés et al., 1997b). Μια μείωση κατά 2 τάξεις μεγέθους στην υδραυλική αγωγιμότητα λήφθηκε, καθώς η μύζηση του νερού αυξήθηκε από 0-30 cm (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511, Burés et al., 1997a).

Χημικά χαρακτηριστικά: Ο περλίτης είναι ουδέτερος με pH 7.0-7.5, αλλά δεν έχει ρυθμιστική ικανότητα και δεν περιέχει μεταλλικά θρεπτικά στοιχεία. Όταν το pH είναι χαμηλό υπάρχει ο κίνδυνος απελευθέρωσης τοξικού Al μέσα στο διάλυμα (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511).

Αποστείρωση, επαναχρησιμοποίηση, και διάθεση αποβλήτων: Ο περλίτης είναι ένα αποστειρωμένο προϊόν καθώς παράγεται σε πολύ υψηλή θερμοκρασία. Χημικά ο περλίτης είναι ένα σταθερό υλικό, το οποίο μπορεί να διαρκέσει για αρκετά χρόνια· η σταθερότητα του δεν επηρεάζεται σημαντικά από οξέα ή μικροοργανισμούς. Όντας ένα αδρανές υλικό, η ανακύκλωση του περλίτη δεν δημιουργεί περιβαλλοντικά προβλήματα. Η επαναχρησιμοποίηση του περλίτη χωρίς επεξεργασία για την ανάπτυξη διαδοχικών καλλιεργειών είναι ενδεχομένως επικίνδυνη εξαιτίας της συμπίεσης του υλικού, της συσσώρευσης αλάτων και της μόλυνσης από παράσιτα (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 511-512, Hanna και Smith, 2002). Η αντικατάσταση μεταχειρισμένου περλίτη με καινούριο υλικό για την ανάπτυξη διαδοχικών καλλιεργειών είναι δαπανηρή, και η ανάκτηση των εξόδων από την πώληση του

προϊόντος σε υψηλότερη τιμή δεν μπορεί να λειτουργήσει καλά σε μια ανταγωνιστική αγορά. Η αποστείρωση με ατμό του μεταχειρισμένου περλίτη πριν την φύτευση μιας νέας καλλιέργειας έχει προταθεί για τη προστασία ενάντια στην μόλυνση από παθογόνα (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 512, Wilson, 1988). Ωστόσο, αυτή η μεταχείριση απαιτεί ακριβές γεννήτριες ατμού και μπορεί να μην είναι επαρκής λόγω της χαλαρής δομής του περλίτη και της μείωσης των αλάτων του υλικού (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 512, Hanna, 2005). Σε μια μελέτη που διεξήχθη για να διαπιστωθεί εάν η ανάπτυξη της ντομάτας (*Lycopersicon esculentum* Mill.) σε μεταχειρισμένο περλίτη, μετά από καθαρισμό και απολύμανση, θα ήταν πιο οικονομική από έναν καινούριο περλίτη και χωρίς καθόλου αρνητικές επιπτώσεις στην παραγωγή, εξήχθη το συμπέρασμα ότι ο μεταχειρισμένος περλίτης μπορεί να καθαρισθεί και να απολυμανθεί ανάλογα με τις ανάγκες και να ανακυκλωθεί για πολλά χρόνια διότι δεν είναι οργανικός και είναι φυσικά και χημικά σταθερός (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 512, Hanna, 2005).

2.3.3 Ελαφρόπετρα

Η ελαφρόπετρα, όπως η ηφαιστειακή τέφρα είναι ένα προϊόν ηφαιστειακής δραστηριότητας και συνήθως διαμορφώνεται από πυριτική λάβα που έχει αναπτυχθεί σε ρυολιθική σύνθεση, πλούσια σε αέρια και πτητικές ουσίες (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 509, Challinor, 1996). Οι φυσικές ιδιότητες της ελαφρόπετρας έχουν πολλές ομοιότητες με αυτές της ηφαιστειακής τέφρας, ενώ οι χημικές ιδιότητες, ειδικά η επιφανειακή δραστηριότητα και φορτίο, είναι πολύ διαφορετικά. Ενώ η ηφαιστειακή τέφρα έχει μόνιμες και μεταβλητές επιφάνειες φορτίου, και διαθέτει ρυθμιστική ικανότητα θρεπτικών στοιχείων, η ελαφρόπετρα είναι ένα αδρανές αργιλοπυριτικό υλικό (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 509-510).

Φυσικά χαρακτηριστικά: η ελαφρόπετρα είναι ένα ελαφρύ αδρανές, με χαμηλή φαινομενική πυκνότητα $0.4-0.8 \text{ gr cm}^{-3}$ και ολικό πορώδες 70-85% (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 510, Boertje, 1994, Challinor, 1996, Ravin et al., 1999), ανάλογα με την προέλευση της ελαφρόπετρας και την διαδικασία κοσκινίσματος/αλέσματος. Η ελαφρόπετρα διαθέτει μεγάλους πόρους και κατά συνέπεια το ογκομετρικό περιεχόμενο νερού μειώνεται απότομα καθώς αυξάνεται η μύζηση του νερού (Ravin

και Lieth, 2008, σελ. 510, Boertje, 1994, Raviv et al., 1999). Η ικανότητα συγκράτησης νερού της ελαφρόπετρας είναι σχετικά χαμηλή συγκριτικά με αυτή του πετροβάμβακα, του περλίτη ή των οργανικών υποστρωμάτων και μπορεί να περιορίσει τη λήψη νερού και θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά, ιδιαίτερα σε ζεστά κλίματα (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 510, Raviv et al., 1999). Η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα της Σικελικής και της Ελληνικής ελαφρόπετρας μειώθηκε κατά σχεδόν 4 και 6 τάξεις μεγέθους, αντίστοιχα, καθώς η μύζηση του νερού αυξήθηκε από 0 σε 10 kPa (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 510, Raviv et al., 1999). Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η πολύ συχνή άρδευση για φυτά που αναπτύσσονται σε ελαφρόπετρα (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 510).

Χημικά χαρακτηριστικά: η ελαφρόπετρα είναι ένα αργιλοπυριτικό αδρανές υλικό που αποτελείται κυρίως από διοξείδιο του πυριτίου και Al-οξείδιο, αλλά μπορεί επίσης να περιέχει οξείδια μετάλλων, ασβεστίτη ή άλατα. (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 510). Η ελαφρόπετρα δεν έχει καθόλου ρυθμιστική ικανότητα και διαθέτει πολύ χαμηλό επιφανειακό φορτίο που προήλθε από προσμίξεις περιεχόμενων ανθρακικών και μετάλλων και το υλικό είναι σταθερό ακόμα και σε τιμή pH 2.5 (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 510). Ωστόσο, συνίσταται προσοχή όταν χρησιμοποιείται το νέο υλικό της ελαφρόπετρας, επειδή στην αρχή της χρήσης υπάρχει έκλυση υψηλών συγκεντρώσεων Na (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 510).

Αποστείρωση, επαναχρησιμοποίηση, και διάθεση αποβλήτων: Η ελαφρόπετρα είναι βιολογικά αδρανής και δεν περιέχει παθογόνα ή σπόρους ζιζανίων (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 511, Challinor, 1996). Είναι σταθερή και μπορεί να ξαναχρησιμοποιηθεί, πρακτικά, επ' αόριστον. Όντας ένα φυσικό προϊόν, μπορεί να απομακρυνθεί χωρίς να προκαλέσει περιβαλλοντική μόλυνση (Raviv και Lieth, 2008, σελ. 511).

2.4 Το σύστημα παρακολούθησης φυτού (Phytomonitoring)

Οι Ton και Koryt (2003a) αναφέρουν ότι στη σύγχρονη βιομηχανία των θερμοκηπίων, ο ανθρώπινος παράγοντας εξακολουθεί να είναι απαραίτητος για την αποκομιδή οφελών. Στην πραγματικότητα, ένας παραγωγός είναι ένα βασικό πρόσωπο για την επιθεώρηση των συνθηκών της καλλιέργειας, για τον χειρισμό του εξοπλισμού ελέγχου και για τον σχεδιασμό και την εφαρμογή των απαραίτητων μεταχειρίσεων για την καλλιέργεια. Οι αποφάσεις του παραγωγού βασίζονται συνήθως σε άμεσες παρατηρήσεις (που γίνονται επίσης με τη χρήση των διαθέσιμων οργάνων) και εργαστηριακές αναλύσεις καθώς και σε διαθέσιμες συστάσεις από εμπειρογνώμονες. Πρόσφατα, οι παραγωγοί αξιοποιούσαν συστήματα, τα οποία χρησιμοποιούν διατάξεις αισθητήρων ακριβείας για τα φυτά και το περιβάλλον (Wolf, 1996). Στο πλαίσιο αυτό, το σύστημα παρακολούθησης φυτού έχει γίνει η πιο εξελιγμένη ολοκληρωμένη τεχνική στη βιομηχανία δενδροκηποκομίας (Ton 1997, Koryt et al., 2001, Ton et al., 2001).

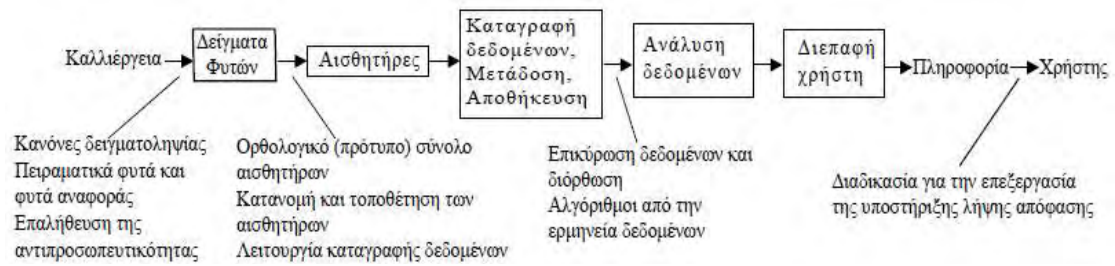
2.4.1 Το κανάλι πληροφοριών του συστήματος παρακολούθησης φυτού

Η τυπική δομή του καναλιού πληροφοριών του συστήματος παρακολούθησης φυτού φαίνεται στο *Σχήμα 2.4*. Ένα αντικείμενο του συστήματος παρακολούθησης φυτού είναι μια καλλιέργεια που είναι ένα σημείο εκκίνησης στο διάγραμμα ροής του καναλιού. Εφόσον θεωρούμε το σύστημα παρακολούθησης φυτού ένα τεχνολογικό εργαλείο, μια μονάδα καλλιεργητικής έκτασης πρέπει να είναι ομοιόμορφη από διάφορες απόψεις: ποικιλία, στάδιο ανάπτυξης, εγκαταστάσεις ελέγχου, καθεστώς ελέγχου, μεταχειρίσεις και περιβαλλοντικές συνθήκες. Ορισμένη ετερογένεια των φυτών είναι αποδεκτή, διότι σε κάθε περίπτωση, το τεχνολογικό περιβάλλον και τα καθεστώτα εφαρμόζονται στη καλλιεργούμενη περιοχή ως σύνολο. Στην πράξη, μάλλον ένα μικρό τμήμα μπορεί να αντιπροσωπεύσει μια μεγάλη εμπορική μονάδα μέχρι 1-2 εκτάρια (Ton και Koryt, 2003a, Adams et al., 2000).

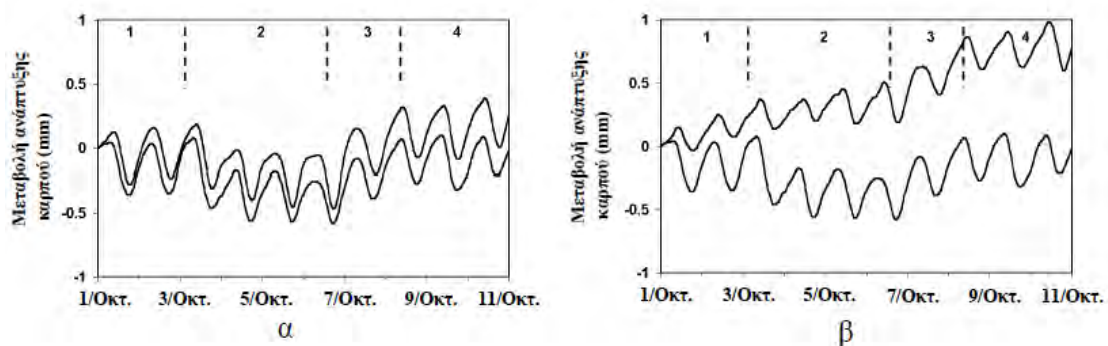
Ένα δείγμα φυτού είναι το πρώτο ευαίσθητο στοιχείο του καναλιού του συστήματος παρακολούθησης φυτού. Σύμφωνα με την τεχνική του συστήματος αυτού, λίγα οπτικώς αντιπροσωπευτικά δειγματοληπτικά φυτά θα πρέπει να εντοπιστούν κάπου στο κέντρο της καλλιεργούμενης περιοχής. Ο ελάχιστος αριθμός

δειγματοληψίας είναι δυο φυτά: ένα πειραματικό φυτό και ένα φυτό αναφοράς. Τα δύο ή περισσότερα φυτά επιτρέπουν την κανονική επαλήθευση της εσωτερικής αντιπροσωπευτικότητας μέσα στις δειγματοληψίες και, συνεπώς, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα για όλη την ομάδα δειγματοληψίας να είναι αντιπροσωπευτική. Η τόσο περιορισμένη δειγματοληψία είναι ένα αξιοσημείο αποτέλεσμα της προσέγγισης μέσω του συστήματος παρακολούθησης φυτού. Είναι φανερό ότι το σημείο παρακολούθησης κάθε τιμής σχετική με το φυτό (θερμοκρασία φύλλου ή διάμετρος βλαστού, για παράδειγμα) παρέχει τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια των καταγραφών. Ωστόσο, αυτές οι καταγραφές είναι εφαρμόσιμες μόνο στο δείγμα φυτού ενώ θέλουμε να τις χρησιμοποιήσουμε για όλη την καλλιέργεια. Η αρχική προσέγγιση του συστήματος παρακολούθησης φυτού προϋποθέτει ότι ακόμα κι αν τα δεδομένα (τιμές) δεν είναι αντιπροσωπευτικά από μόνα τους, υπάρχουν συγκεκριμένα παράγωγα χαρακτηριστικά από αυτά τα μη αντιπροσωπευτικά δεδομένα, που είναι αντιπροσωπευτικά σε μεγάλο βαθμό για όλη την καλλιέργεια.. Ένα παράδειγμα, που φαίνεται στο *Σχήμα 2.5*, απεικονίζει την ιδέα (Ton και Kopyt, 2003a).

Ορθολογικά, ένα σύνολο αισθητήρων πρέπει να είναι ενημερωτικό, χρήσιμο (ερμηνεύσιμο), ελάχιστο, μη παρεμβατικό, και χαμηλού κόστους. Οι ακόλουθοι κύριοι περιβαλλοντικοί αισθητήρες περιλαμβάνονται επίσης στο πρότυπο σύνολο του συστήματος παρακολούθησης φυτού: ηλιακής ακτινοβολίας (ολικής και/ή φωτοσυνθετικής), θερμοκρασίας και υγρασίας του αέρα, ορίου αντίστασης (ρυθμός ανανέωσης του αέρα), θερμοκρασίας και υγρασίας του υποστρώματος. Η τυποποίηση των αισθητήρων, το πρωτόκολλο μετρήσεων (κατανομή, τοποθέτηση) και οι τεχνικές ερμηνείας δεδομένων είναι εξαιρετικά σημαντικά για τη συγκρισιμότητα και την δυνατότητα αναπαραγωγής των δεδομένων. Η ερμηνεία των δεδομένων βασίζεται στην ανάλυση των τάσεων και στη δυναμική της αλληλεπίδρασης φυτού-περιβάλλοντος (Ton και Kopyt, 2003a, Ton 1997, Kopyt et al., 2001, Ton et al., 2001).



Σχήμα 2.4. Μια τυπική δομή του καναλιού του συστήματος παρακολούθησης φυτού και των συναφών τεχνικών εφαρμογής.



Σχήμα 2.5. Ένα παράδειγμα της ανάλυσης τάσεων. α) Δυο καρποί καταδεικνύουν την ίδια τάση κατά τη διάρκεια όλων των τεσσάρων χαρακτηριστικών περιόδων. β) Οι τάσεις είναι πολύ πιο αντιπροσωπευτικές από τις απόλυτες τιμές μεγέθους και ρυθμού αύξησης. Ένα διαφορετικό ζευγάρι καρπών παρουσιάζει διαφορετικές τάσεις στις περιόδους 1 και 2. Ταυτόχρονα, και στα δυο γραφήματα τα ζευγάρια καρπών εκδηλώνουν επιβράδυνση του ρυθμού αύξησης στην περίοδο 2 σε σύγκριση με την περίοδο 1. Έτσι, σε όρους απόκλισης τάσεως, τα αποτελέσματα είναι ομοιόμορφα για όλους τους καρπούς (Αρχικά δεδομένα, αβοκάντο, Ισραήλ, 2000).

2.4.2 Σύστημα παρακολούθησης φυτού: δομή και λειτουργίες

Ο σκοπός του συστήματος παρακολούθησης φυτού είναι η υποστήριξη μιας διαδικασίας λήψης αποφάσεων για τη ρύθμιση του κλίματος και τον έλεγχο της άρδευσης στα θερμοκήπια που είναι το τελικό σημείο στο διάγραμμα του Σχήματος 2.4. Η εκτίμηση της απόδοσης της καλλιέργειας (πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής και άλλων αποτελεσμάτων σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή) φαινόταν να είναι η ως επί το πλείστον επιθυμητή έξοδος ενός τέτοιου καναλιού παρακολούθησης

φυτού (Udin ten Gate et al., 1978). Εντούτοις, είναι κατά κύριο λόγο αδύνατο να αναπτυχθούν αισθητήρες για την άμεση εκτίμηση της απόδοσης της καλλιέργειας, ο μόνος εφικτός στόχος είναι η ανίχνευση των συνθηκών καταπόνησης στην καλλιέργεια.(Challa et al., 1995). Επομένως, η έγκαιρη ανίχνευση των απροσδόκητων διαταραχών στα φυτά πρόκειται να είναι η πρώτη πρακτική λειτουργία του καναλιού πληροφοριών του συστήματος παρακολούθησης φυτού. Η δεύτερη, συγκεκριμένη λειτουργία του συστήματος παρακολούθησης φυτού είναι η ρύθμιση του κλίματος και ο έλεγχος της άρδευσης με την προσέγγιση της μεθόδου δοκιμής και λάθους. Δεδομένου ότι η απόλυτη εκτίμηση της κατάστασης της καλλιέργειας είναι ανέφικτη, η μέτρηση της απόκλισης που παρουσιάζει η τάση της κατάστασης του φυτού σε απόκριση ενός εναλλακτικού περιβάλλοντος είναι μια καλή βάση για τις βελτιώσεις της μεθόδου δοκιμής και λάθους (Σχήμα 2.6), (Ton και Koryt, 2003a).

Η πλήρης δομή των συστημάτων πληροφοριών του συστήματος παρακολούθησης φυτού φαίνεται στον Πίνακα 2.1. Η γενική θεωρία συστημάτων ταξινομεί τα συστήματα πληροφοριών σύμφωνα με το επίπεδο δόμησης από το αντίστοιχο διαχειριστικό καθήκον ή, με άλλα λόγια, από το βαθμό διαμόρφωσης ενός κατάλληλου αλγορίθμου λήψης-απόφασης. Όλες, αλλά περισσότερο οι πραγματικές διαδικασίες λήψης-απόφασης που βασίζονται σε μετρήσεις σχετικά με το φυτό μπορούν να αποδοθούν στην κατηγορία των εν μέρει δομημένων (Ton και Koryt, 2003a).

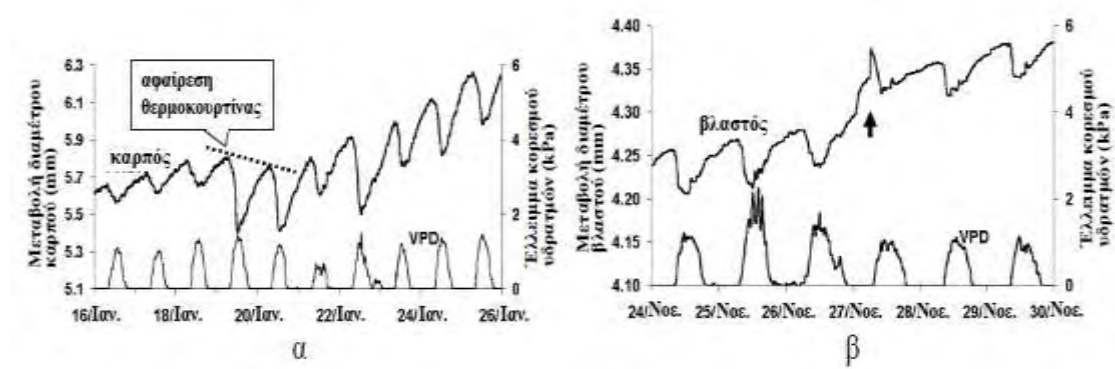
Οι εκθέσεις εξαιρέσεων (ή προειδοποιήσεων) υποδεικνύουν ασυνήθιστες, ενδεχομένως καταστροφικές συνθήκες για την καλλιέργεια. Οι δείκτες του συστήματος παρακολούθησης φυτού όσο αναφορά τις φυσιολογικές δυσλειτουργίες του φυτού είναι απαραίτητες ιδιότητες ενός τέτοιου συστήματος πληροφοριών. Παραδείγματα εφαρμογών παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.7 (Ton και Koryt, 2003a).

Τα συστήματα υποστήριξης-απόφασης αποτελούν την τελευταία κατηγορία χωρίς τυπικά μοντέλα λήψης-απόφασης. Περιλαμβάνουν μια ποικιλία από αναλυτικές τεχνικές με, κατά πρώτο λόγο, την ανάλυση Τι-Εάν. Χαρακτηριστικά, τα συστήματα Τι-Εάν βασίζονται σε μαθηματικά μοντέλα ελεγχόμενων διαδικασιών. Κάνοντας δοκιμές με ένα αόριστο μοντέλο είναι κάτι απολύτως ασφαλές και γρήγορο. Ωστόσο, η απουσία μαθηματικών μοντέλων για κάθε συγκεκριμένη καλλιέργεια το καθιστά ανέφικτο. Η μέθοδος δοκιμής και λάθους είναι μια σαφής και συγκεκριμένη εναλλακτική της μεθόδου Τι-Εάν. Αλλά υπάρχει μόνο μια εμπλοκή: ένας παραγωγός

διατρέχει τον κίνδυνο της μη αναστρέψιμης επίδρασης όταν τοποθετεί μια πραγματική καλλιέργεια υπό δοκιμή. Ευτυχώς, η εξαιρετικά μεγάλη ευαισθησία και ο σύντομος χρόνος απόκρισης του καναλιού του συστήματος παρακολούθησης φυτού μειώνει τον κίνδυνο σε σχεδόν ασήμαντο επίπεδο. Ένας παραγωγός μπορεί να κάνει μια μικρή τροποποίηση ενός καθεστώτος ελέγχου και έπειτα μπορεί να πάρει ανιχνεύσιμη απόκριση από τα φυτά μέσα σε 1-2 ημέρες. Δίνει στον παραγωγό τις υψηλές πιθανότητες να κρατήσει έναν τροποποιημένο μεμονωμένο παράγοντα κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής και να αποτρέψει μια σημαντική επίδραση στην κατάσταση της καλλιέργειας. Παραδείγματα εφαρμογών παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.8 (Ton και Koryt, 2003a).

Πίνακας 2.1. Μια τυπική δομή του συστήματος πληροφοριών του συστήματος παρακολούθησης φυτού.

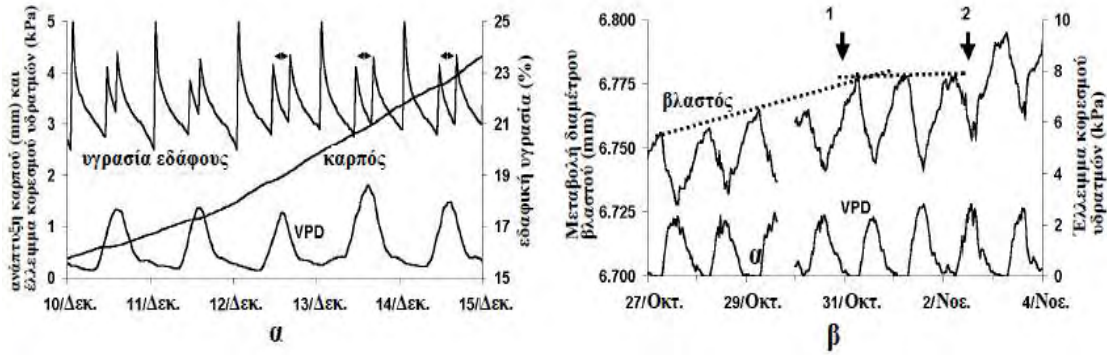
Κατηγορία	Τύπος διεπαφής (έξοδος)	Χαρακτηριστικά
Συστήματα πληροφοριών	Τυποποιημένη Έκθεση λειτουργικότητας (δεδομένα)	Αλγόριθμος τυπικής λήψης απόφασης
	Έκθεση λειτουργικότητας καθορισμένη από το χρήστη (δεδομένα)	Διαδικασίες λήψης απόφασης υποβοηθούμενες από ανθρώπινο παράγοντα
	Έκθεση εξαιρέσεων (Προειδοποιήσεις)	Δείκτες φυσιολογικών διαταραχών του φυτού
Σύστημα υποστήριξης απόφασης	Τι-Εάν στον τύπο Δοκιμή και λάθος	Δυναμικοί δείκτες βελτίωσης ή επιδείνωσης του φυτού



Σχήμα 2.7. Παραδείγματα από εκθέσεις εξαιρέσεων (Αρχικά δεδομένα, πιπεριά, Ισραήλ 2001-2002).

α) Ένα παράδειγμα από μια ένδειξη προειδοποίησης που προέκυψε από έμμεσο τεχνολογικό σφάλμα. Στις 19 Ιανουαρίου, η απότομη απομάκρυνση της κουρτίνας σκίασης προκάλεσε σοκ ακτινοβολίας που εκδηλώθηκε σε μια παροδική συρρίκνωση και μια επακόλουθη κατάπτωση στο επόμενο διήμερο της ανάπτυξης του καρπού

β) Ένα παράδειγμα μιας ένδειξης προειδοποίησης που προκλήθηκε από ένα τυχαίο σπάσιμο ενός σταλακτηφόρου σωλήνα. Η περίσσεια του νερού ανιχνεύτηκε σε μια ασυνήθιστη διόγκωση της διαμέτρου βλαστού (που συμβολίζεται με το βέλος).



Σχήμα 2.8. Παραδείγματα της εφαρμογής της μεθόδου δοκιμή και λάθος (Αρχικά δεδομένα, πιπεριά, Ισραήλ 2001-2002).

α) Ένα παράδειγμα μιας επιτυχούς δοκιμαστικής εφαρμογής είναι το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ανάμεσα στις αρδεύσεις που εφαρμόστηκε ανάμεσα στην δεύτερη και στην τρίτη καθημερινή άρδευση. Αυτό οδήγησε σε μια ορισμένη ανύψωση της ελάχιστης εδαφικής υγρασίας και σε σημαντική επιτάχυνση της ανάπτυξης του καρπού. Η θετική απόκριση του καρπού έγινε εμφανής μια ημέρα μετά την εφαρμογή του νέου προγράμματος άρδευσης

β) Ένα παράδειγμα αποτυχημένης εφαρμογής της μείωσης της άρδευσης. Στις 31 Οκτωβρίου, το ποσό του αρδευτικού νερού μειώθηκε στο 70% του προηγούμενου κανόνα (1). Εξαιτίας της σχεδόν άμεσης κατάπτωσης της ανάπτυξης του βλαστού, το καθεστώς άρδευσης αποκαταστάθηκε (2) με την επακόλουθη αναπλήρωση του αποθεματικού νερού στα φυτά. Η δοκιμή διήρκησε 3 ημέρες.

2.4.3 Πρότυπα του συστήματος παρακολούθησης φυτού

- Τεχνική μέτρησης (πρωτόκολλο)

Κατά κανόνα, οι τυπικές απαιτήσεις του πρωτοκόλλου μέτρησης είναι αρκετά απλές. Ένας χρήστης θα ακολουθήσει αυτές τις απαιτήσεις προκειμένου να παρέχει ακριβή και ξεκάθαρη ερμηνεία των καταγεγραμμένων δεδομένων (Ton και Koryt, 2003b).

Το πρωτόκολλο ξεκινάει από τους κανόνες για την επιλογή των δειγμάτων των φυτών. Στη συνέχεια καθορίζει μια προτεινόμενη ομάδα αισθητήρων σχετιζόμενων με την καλλιέργεια και την κατανομή τους στα φυτά-δείγματα. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας μέτρησης της μικρό-διακύμανσης του βλαστού μπορεί να εγκατασταθεί

είτε σε ένα βραδέως αναπτυσσόμενο κορμό είτε σε ένα ταχέως αναπτυσσόμενο βλαστό. Προφανώς, η ερμηνεία των ενδείξεων του αισθητήρα είναι διαφορετική ανάλογα με τη θέση του. Έτσι, το πρότυπο τοποθέτησης των αισθητήρων είναι το ουσιαστικό κομμάτι του πρωτοκόλλου μέτρησης (Ton και Koryt, 2003b).

Η αντιπροσωπευτικότητα των φυτών-δειγμάτων επιτυγχάνεται από δυο παράγοντες: προσεκτική δειγματοληψία και χρήση αρκετών φυτών-δειγμάτων για τη σύγκριση αρχείων και περαιτέρω αποκλεισμό πιθανόν ακραίων τιμών (Ton και Koryt, 2003b).

Η περίοδος συγχρονισμού που θα παρθούν οι μετρήσεις πρέπει να ταιριάζει με τις ελεγκτικές διαδικασίες. Πρακτικά, η ορθολογική χρονική κλίμακα είναι η ακόλουθη: από λεπτά έως ώρες για επιδράσεις που συνδέονται με τη διακύμανση της διαπνοής και τη σπαργή του κυττάρου (Ton και Koryt, 2003b, Geiger και Servaites, 1991).

- *Ερμηνεία δεδομένων*

Η ερμηνεία των δεδομένων του συστήματος παρακολούθησης φυτού είναι επίσης ένα αντικείμενο ειδικής ρύθμισης. Ορισμένοι περιορισμοί σχετίζονται με το γεγονός ότι, στην πράξη, ο αριθμός των φυτών-δειγμάτων είναι πολύ μικρότερος από αυτόν που απαιτείται για αξιόπιστη στατιστική μεταχείριση. Επομένως, οι εφαρμόσιμοι δείκτες της κατάστασης του φυτού πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικοί σε περιορισμένη δειγματοληψία. Τέτοιοι δείκτες έχουν αναπτυχθεί για το σύστημα παρακολούθησης φυτού. Βασίζονται στην ανάλυση των τάσεων που παρατηρούνται αντί των απόλυτων στιγμιαίων ενδείξεων (Ton και Koryt, 2003b, Ton 1997, Ton et al. 2001, Koryt et al. 2001, Ton et al. 2002). Η προσέγγιση αυτή έρχεται σε αντίθεση με την τεχνική ανατροφοδότησης ελέγχου, η οποία βασίζεται στην ποσοτική σύγκριση μετρούμενων και προκαθορισμένων τιμών. Για παράδειγμα, η απόκριση της θερμοκρασίας φύλλου στη διακύμανση της υγρασίας του αέρα είναι ξεχωριστή για κάθε φύλλο, ακόμα και για κάθε κατάτμηση του φύλλου. Για να βρεθεί μια στατιστικά αποδεδειγμένη τιμή, πρέπει κάποιος να πραγματοποιήσει δεκάδες μετρήσεις σε δεκάδες δείγματα. Σύμφωνα με την προσέγγιση του συστήματος παρακολούθησης φυτού, οι ίδιες παρατηρήσεις διατυπώθηκαν σε όρους όπως «η θερμοκρασία έχει αυξηθεί», «η θερμοκρασία έχει μειωθεί» και «καμία σημαντική αλλαγή». Αυτή η φόρμουλα παρέχει δυο μεγάλα πλεονεκτήματα. Πρώτον, το αποτέλεσμα είναι υψηλά αντιπροσωπευτικό-όλα τα καλώς συμπεριφερόμενα φύλλα παρουσιάζουν την ίδια τάση στη θερμοκρασία τους. Για παράδειγμα, όλα τα φύλλα

ψύχονται ως απόκριση στη μείωση της υγρασίας του αέρα. Δεύτερον, η παρουσίαση των δεδομένων με αυτόν τον τρόπο εξακολουθεί να είναι ενημερωτική. Αν τα φυτά αντιμετωπίζουν έλλειμμα νερού, τα φύλλα μπορεί να μειώσουν τη διαπνοή με το κλείσιμο των στομάτων. Συνεπώς, στο παραπάνω παράδειγμα, η απόκριση της θερμοκρασίας φύλλου θα είναι αντίθετη-«καμία αλλαγή» ή ακόμα «η θερμοκρασία έχει αυξηθεί». Έτσι το σύστημα παρακολούθησης φυτού παρέχει τόσο υψηλή ενημερωτική αξία όσο και μια πρωτοφανή αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων, που έχουν εξαχθεί από τον περιορισμένο αριθμό των δειγμάτων (Ton και Koryt, 2003b).

Οι ακόλουθες σχετικές με το φυτό μεταβλητές μετρήθηκαν και επεξεργάστηκαν για τη διάγνωση της κατάστασης φυτού και της τάσης: η μέγιστη ημερήσια διάμετρος βλαστού και το ημερήσιο εύρος συρρίκνωσης, η δυναμική του ρυθμού ανάπτυξης καρπού και/ή βλαστού, οι τάσεις που παρουσιάζονται στην αναλογία της ροής χυμού και στη διαφορά θερμοκρασίας φύλλου-αέρα (Ton και Koryt, 2003b).

- *Πρωτόκολλα εφαρμογής*

Αμφότερες οι τυπικές και οι μη-τυπικές διαδικασίες της διαγνωστικής των καλλιεργειών και της υποστήριξης-απόφασης αποτελούν αναπόσπαστα μέρη του συστήματος παρακολούθησης φυτού. Αυτές οι διαδικασίες, που ονομάστηκαν πρωτόκολλα εφαρμογής παρέχουν γενική προσβασιμότητα της τεχνικής στους κοινούς καλλιεργητές. Υπάρχουν τρεις πιθανές μορφές αξιοποίησης της πληροφορίας του συστήματος παρακολούθησης φυτού στην πρακτική της λήψης απόφασης (Ton και Koryt, 2003b):

- Πρότυπο υποβολής έκθεσης: η είσοδος των τυπικών ή μερικώς τυπικών διαδικασιών ανάλυσης δεδομένων, με την βοήθεια του ανθρώπινου παράγοντα, για την τακτική καθημερινή λειτουργία της λήψης απόφασης
- Υποβολή έκθεσης εξαίρεσης: η είσοδος μιας ομάδας αλγορίθμων για ανάλυση δεδομένων από προειδοποιήσεις, που επιτρέπει την αποκάλυψη της ανάπτυξης φυσιολογικών διαταραχών στα φυτά και, όσο το δυνατόν, τη διάγνωση αυτών των διαταραχών
- Λήψη απόφασης με τη μέθοδο δοκιμή και λάθος: η είσοδος μιας ομάδας δοκιμαστικών λειτουργιών, με στόχο την επικύρωση και την προσαρμογή των καθεστώτων ελέγχου, που ξεκινάει από τον χρήστη

2.4.4 Οι μέθοδοι της διαδικασίας δοκιμή και λάθος

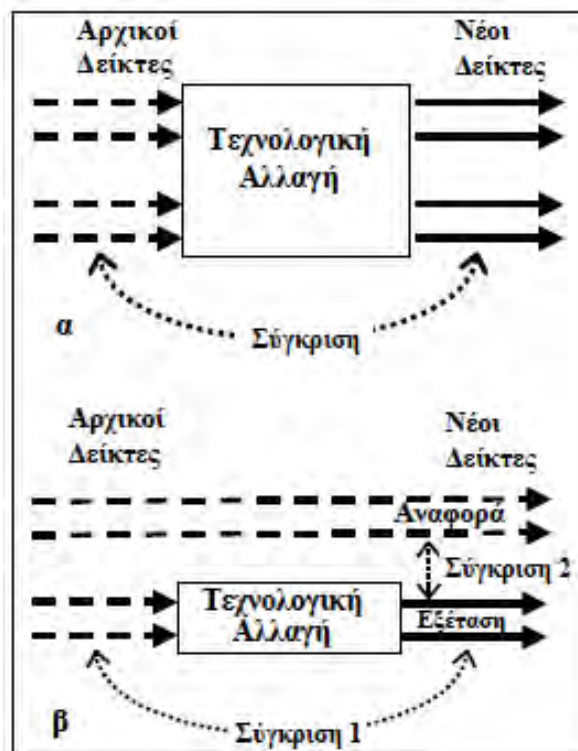
Υπάρχουν δυο πιθανές μέθοδοι της δοκιμής. Η πρώτη φαίνεται σχηματικά στο *Σχήμα 2.9α*. Οι δείκτες της κατάστασης του φυτού συγκρίνονται στο χρόνο: πριν και μετά την τροποποίηση του καθεστώτος ελέγχου. Αυτή η μέθοδος απαιτεί την διατήρηση ενός μεμονωμένου παράγοντα που έχει διαφοροποιηθεί. Ως εκ τούτου, υπάρχει ορισμένος κίνδυνος για μια μη ελεγχόμενη απόκλιση ενός φυσικού παράγοντα. Όσο συντομότερη είναι η δοκιμή, τόσο μικρότερος είναι ο κίνδυνος να παρουσιαστεί μια τέτοια περίπτωση (Ton και Koryt, 2003b).

Η δεύτερη μέθοδος φαίνεται στο *Σχήμα 2.9β*. Προϋποθέτει τη σύγκριση δυο καλλιεργούμενων κομματιών: Του εξεταζόμενου και αυτού της αναφοράς. Σε αυτή τη μέθοδο, η απαίτηση του μεμονωμένου παράγοντα δεν είναι τόσο αυστηρή. Αλλά ταυτόχρονα, η ανάγκη για τη διατήρηση του κομματιού αναφοράς, που είναι εξοπλισμένο με μια δεύτερη ομάδα αισθητήρων, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα συγκεκριμένο μειονέκτημα της μεθόδου (Ton και Koryt, 2003b).

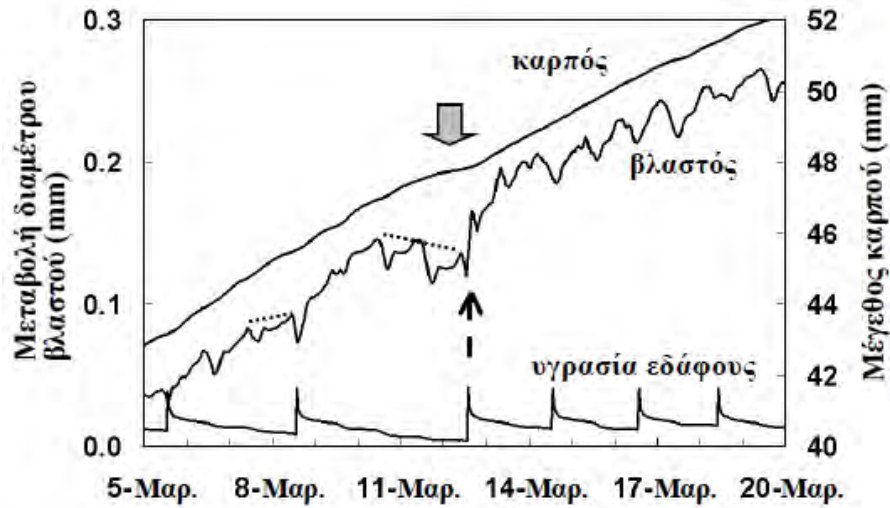
Παραδείγματα και των δυο μεθόδων φαίνονται στα *Σχήματα 2.10* και *2.11*. Οι καταγραφές που λήφθηκαν από φυτά τομάτας παρουσιάζονται στο *Σχήμα 2.10*. Αρχικά, η άρδευση είχε προγραμματιστεί δυο φορές την εβδομάδα με διάστημα τριών και τεσσάρων ημερών. Όπως υποδεικνυαν οι καταγραφές της διαμέτρου του βλαστού και του καρπού, η ανάπτυξη του βλαστού επιβραδύνθηκε την τρίτη ημέρα μετά την άρδευση, και αμφότεροι ο βλαστός και ο καρπός εκδήλωσαν εμφανή υστέρηση την τέταρτη ημέρα (που υποδεικνύεται με το γκρι βέλος). Επιπλέον, η διάμετρος του βλαστού διογκώθηκε απότομα μετά από την άρδευση που έγινε κατά την τέταρτη ημέρα (υποδεικνύεται από το διακεκομμένο βέλος). Η εφαρμογή πιο συχνών αρδεύσεων μετά τις 12 Μαρτίου είχε τη σημαντική θετική επίπτωση: Η απόκριση του βλαστού και του καρπού στην άρδευση εξαφανίστηκε.

Το παράδειγμα της συγκριτικής εξέτασης φαίνεται στο *Σχήμα 2.11*. Δυο διαφορετικά κομμάτια καλλιεργούμενης πιπεριάς είχαν ισοδύναμη άρδευση. Δυο ομάδες ελεγχόμενων φυτών παρουσίασαν συγκεκριμένη τάση στην ανάπτυξη της διαμέτρου βλαστού. Εξαιτίας του περιορισμένου αριθμού δειγμάτων των φυτών, η απόλυτες τιμές του ρυθμού ανάπτυξης βλαστού δεν είχαν νόημα για σύγκριση. Στη συνέχεια ο παραγωγός εφάρμοσε τη δοκιμή μεγαλύτερου ρυθμού άρδευσης κατά 30% στο πρώτο κομμάτι (έντονη καμπύλη στο *σχήμα 2.11*). Συγκρίνοντας τις περιόδους 1

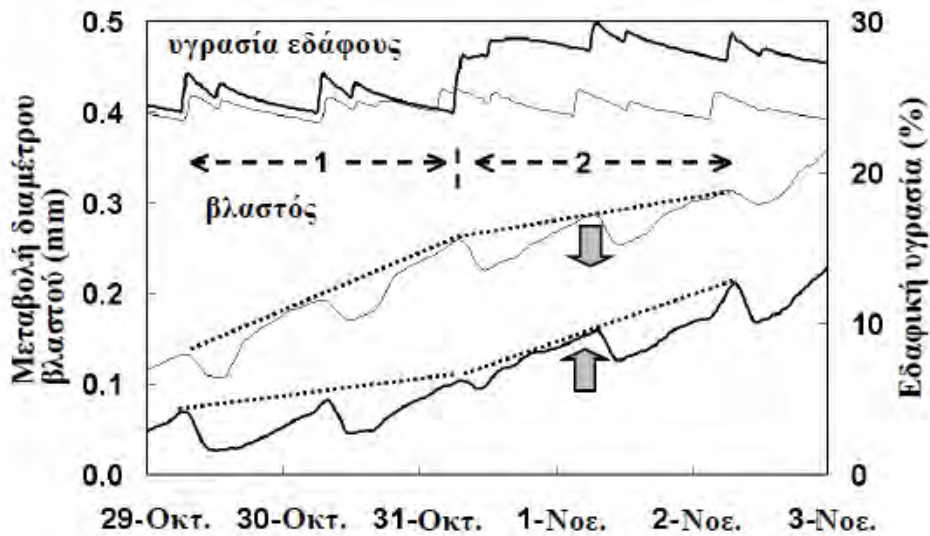
και 2, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι ο ρυθμός ανάπτυξης βλαστού στο πρώτο κομμάτι αυξήθηκε ενώ στο δεύτερο κομμάτι αναφοράς μειώθηκε κίολας, για κάποιους φυσικούς λόγους. Έτσι, η ανάλυση των πρότυπων τάσεων έδωσε τη δυνατότητα για να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ο υψηλότερος ρυθμός άρδευσης ήταν ευνοϊκός σε αυτές τις συγκεκριμένες συνθήκες.



Σχήμα 2.9. Δυο μέθοδοι της διαδικασίας δοκιμή και λάθος.



Σχήμα 2.10. Επικύρωση και ρύθμιση του σχεδιασμού άρδευσης σε φυτά τομάτας (Αλμερία, Ισπανία, 2002). Η καμπύλη της εδαφικής υγρασίας δεν έχει κλίμακα.



Σχήμα 2.11. Επικύρωση και ρύθμιση του σχεδιασμού άρδευσης σε φυτά πιπεριάς. (Ζοφάρ, Ισραήλ, 2001).

2.5 Συμπεράσματα

Η μέτρηση της υδατικής κατάστασης του φυτού μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους χωρίς, ωστόσο, να υπάρχει κάποια ιδανική λύση. Η επιλογή της μεθόδου θα πρέπει να γίνει κάθε φορά ανάλογα με τον σκοπό του ερευνητή.

Οι αλλαγές στο υδατικό περιεχόμενο του ιστού είναι ευκολότερο να μετρηθούν και να αυτοματοποιηθούν χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του υδατικού δυναμικού. Σε πολλές περιπτώσεις η σχετική περιεκτικότητα νερού (RWC) μπορεί να σχετιστεί πιο άμεσα με τις φυσιολογικές λειτουργίες από ότι το ολικό υδατικό δυναμικό. Η χρήση οργάνων για τη μέτρηση του υδατικού περιεχομένου ιστού είναι γενικά περίπλοκη ή ακριβή και είναι δύσκολη η ικανοποιητική απόκριση τους (Jones, 2004b).

Τα ψυχρόμετρα είναι αξιόπιστα, μετράνε την υδατική κατάσταση με βάση τη θερμοδυναμική και μπορούν να αυτοματοποιηθούν αλλά απαιτούν εξεζητημένο εξοπλισμό και υψηλό επίπεδο τεχνικών ικανοτήτων (Jones, 2004b).

Η τεχνική του θαλάμου πίεσεως είναι μια ευρέως αποδεκτή τεχνική αναφοράς και είναι πολύ χρήσιμη για τον υπολογισμό του υδατικού δυναμικού του βλαστού, όμως είναι αργή και απαιτεί εντατική εργασία, άρα ακριβή. Επίσης δεν μπορεί να αυτοματοποιηθεί (Jones, 2004b).

Ο ανιχνευτής πίεσης μπορεί να μετρήσει τη συνιστώσα πίεση του υδατικού δυναμικού που είναι η κινητήρια δύναμη για τη ροή στο ξύλωμα και ιδιαίτερα για τη λειτουργία του κυττάρου (π.χ. ανάπτυξη). Είναι όμως κατάλληλος μόνο για πειραματικά ή εργαστηριακά συστήματα (Jones, 2004b).

Οι Fernandez και Cuevas (2010) αναφέρουν ότι οι εξαγόμενοι δείκτες από τις μεταβολές της διαμέτρου βλαστού (SDV) μπορούν να αυτοματοποιηθούν, έτσι πολλοί ερευνητές τους συσχέτισαν με δείκτες υδατικού δυναμικού. Σε πειράματα που έγιναν για δενδρώδεις καλλιέργειες κάποιοι ερευνητές αναφέρουν ότι ο δείκτης MDS ήταν πιο χρήσιμος από τον δείκτη Ψ_{stem} για τον εντοπισμό πρώιμης υδατικής καταπόνησης ενώ άλλοι ερευνητές βρήκαν αντίθετα αποτελέσματα. Παρατηρήθηκε σε σταθερή περιβαλλοντική κατάσταση ότι οι δείκτες SDV ήταν στενά συσχετιζόμενοι με τον δείκτη Ψ_{leaf} αλλά σε μη σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως αυτές στον αγρό, οι αλλαγές στη διάμετρο του βλαστού μπορεί να παρουσιάζουν υστέρηση σε σχέση με το Ψ_{leaf} από λεπτά έως ώρες (Fernandez και Cuevas, 2010, Scholz et al., 2008). Η σχέση MDS και Ψ_{stem} είναι σημαντικά βελτιωμένη όταν παίρνονται υπόψη τα

δεδομένα διαφορετικών φαινολογικών σταδίων παρά ως σύνολο για την καλλιεργητική περίοδο (Fernandez και Cuevas, 2010).

Από τους δείκτες υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας που παρουσιάστηκαν, χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια του πειράματος οι δείκτες SDD και CWSI. Όπως αναφέρει ο Kirkham (2005, σελ 443) η έρευνα των Jackson et al. (1977) έδειξε ότι η ιδέα του SDD μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης για τον καθορισμό των χρονικών στιγμών και των ποσοτήτων άρδευσης και επίσης ότι η προβλεπόμενη εξατμισοδιαπνοή, η οποία εκφράστηκε σε σχέση με την καθαρή ακτινοβολία και τη διαφορά $T_c - T_a$, και το μετρούμενο νερό συμφωνούσαν σε λογικό βαθμό, έτσι ώστε η έκφραση αυτή μπορεί να είναι χρήσιμη για τον καθορισμό των ποσοτήτων του αρδευτικού νερού που θα εφαρμοστεί. Όμως, ο δείκτης SDD μπορεί να επηρεαστεί από παράγοντες όπως η πίεση υδρατμών του αέρα, η καθαρή ακτινοβολία και η ταχύτητα του αέρα (Kirkham 2005, σελ 443, Idso et al., 1981). Επειδή ήταν να σημαντικό να καθοριστεί η σημασία αυτών των παραγόντων και να επινοηθεί ένα μέσο που θα ρυθμίζεται για αυτούς τους παράγοντες, εισήχθη ο δείκτης CWSI που ουσιαστικά κανονικοποιεί την τιμή του SDD (Kirkham 2005, σελ 443). Η διαφορά $T_c - T_a$ σε αναλογία με το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών για καλά αρδευόμενα φυτά φαίνεται να αποδίδει μια μοναδική γραμμική σχέση κάτω από συγκεκριμένη κλιματική συνθήκη. Παρόλα αυτά ο καθορισμός της καταπόνησης με αυτόν τον τρόπο μειώνει τη δυνατότητα για ποσοτικοποίηση με σιγουριά του CWSI κάτω από συνθήκες χαμηλού ελλείμματος κορεσμού υδρατμών, έτσι είναι σημαντικό να υπάρχει ένα μεγάλο εύρος τιμών ελλείμματος κορεσμού υδρατμών για την ορθότερη αξιολόγηση των εξαγόμενων δεικτών CWSI (Kirkham 2005, σελ 451).

Η επιλογή του κατάλληλου μέσου ανάπτυξης για ένα δεδομένο είδος φυτού μαζί με την κατάλληλη διαχείριση θρεπτικών και νερού συνήθως έχει μεγάλο αντίκτυπο στην ποσότητα και στην ποιότητα της παραγωγής σε καλλιέργειες εκτός εδάφους. Ο ρόλος του μέσου ανάπτυξης θεωρείται ότι είναι η μηχανική υποστήριξη του ριζικού συστήματος, διατηρώντας τις βέλτιστες φυσικές συνθήκες, συγκεκριμένα τις σχέσεις αέρα-νερού. Αυτό σημαίνει ότι οι υδροφυσικές ιδιότητες των υποστρωμάτων μπορούν να θεωρηθούν πιο σημαντικές από τις χημικές τους ιδιότητες όσο αφορά τη βέλτιστη ανάπτυξη του φυτού. Καθώς οι υδροφυσικές ιδιότητες των υποστρωμάτων δεν μπορούν να συντονιστούν κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, πρέπει να είναι βέλτιστες από την αρχή. Αντίθετα, οι χημικές ιδιότητες μπορούν να

προσαρμοστούν σε βέλτιστες συνθήκες κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης μέσων ανάπτυξης εκτός εδάφους σε σχέση με την καλλιέργεια εντός εδάφους είναι ότι η πρώτη καθιστά ικανό τον εύκολο έλεγχο της θρεπτικής κατάστασης στη ζώνη των ριζών και τα υδροφυσικά χαρακτηριστικά αντιστοιχούν στην ικανότητα της ταυτόχρονης παροχής επαρκών επιπέδων οξυγόνου και νερού στις ρίζες. Επιπλέον, υπάρχουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε όρους υγείας του φυτού, αν χρησιμοποιούνται αποστειρωμένα υλικά ή αν τα υποστρώματα είναι αποστειρωμένα με ατμό ή με καπνό ανάμεσα στις καλλιέργειες. Ακόμα, ένα μέσο ανάπτυξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί αρκετές φορές μετά την προηγούμενη απολύμανση του (Ravin και Lieth, 2008, σελ. 536).

Το σύστημα παρακολούθησης φυτού αποτελεί έναν ολοκληρωμένο συνδυασμό υλικού (ειδικοί φυτικοί και περιβαλλοντικοί αισθητήρες, καταγραφέας δεδομένων, μονάδα μετάδοσης δεδομένων), λογισμικού και τεχνικών εφαρμογής (πρωτόκολλο μέτρησης και τεχνικές ερμηνείας δεδομένων). Σε σύγκριση με τις τρέχουσες τεχνικές για την εκτίμηση των φυσιολογικών συνθηκών του φυτού, το σύστημα παρακολούθησης φυτού έχει τρία κρίσιμα πλεονεκτήματα (Ton και Koryt, 2003a):

- Ευρύ φάσμα πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση της καλλιέργειας, οι οποίες περιλαμβάνουν τόσο τις βραχυπρόθεσμες επιδράσεις που αντιπροσωπεύονται κυρίως από την υδατική κατάσταση του φυτού όσο και μακροπρόθεσμα τις αθροιστικές επιδράσεις όπως ο ρυθμός αύξησης διαφορετικών οργάνων του φυτού
- Ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την παροχή πληροφοριών της κατάστασης του φυτού σε ένα χρήστη. Όσο μικρότερος είναι ο χρόνος για τη γνωστοποίηση της απόκρισης του φυτού, τόσο μεγαλύτερες είναι οι πιθανότητες της επίδρασης ενός μεμονωμένου παράγοντα και, κατά συνέπεια, της ορθής ερμηνείας
- Υψηλή αντιπροσωπευτικότητα δεδομένων με περιορισμένη δειγματοληψία που παρέχονται από ειδικές τεχνικές ανάλυσης δεδομένων. Δίνεται η δυνατότητα για έρευνα της απόκρισης της καλλιέργειας χρησιμοποιώντας λίγα δείγματα φυτών εξοπλισμένα με αισθητήρες του συστήματος παρακολούθησης φυτού

Η επιλογή του λιγότερου δυνατού αριθμού πληροφοριακών συνόλων αισθητήρων σχετιζόμενων με την καλλιέργεια, η τυποποίηση των αισθητήρων, τα πρωτόκολλα μετρήσεων και οι τεχνικές ερμηνείας δεδομένων ήταν τα πιο σημαντικά καθήκοντα που εκτελέστηκαν κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του συστήματος. Αυτό θα σήμαινε μια μετάβαση από τον ρόλο των σχετιζόμενων με το φυτό αισθητήρων ως συμπληρωματικοί είσοδοι των συστημάτων ελέγχου σε κατάλληλα συστήματα πληροφοριών και υποστήριξης αποφάσεων (Ton και Koryt, 2003a).

Κεφάλαιο 3 . Υλικά και Μέθοδοι

3.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να μελετηθεί η απόκριση υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας υπό καθεστώς μειωμένης άρδευσης σε υποστρώματα πετροβάμβακα, περλίτη και ελαφρόπετρας, έγιναν μετρήσεις κατά τη διάρκεια του έτους 2009 χρησιμοποιώντας εξοπλισμό του συστήματος παρακολούθησης φυτού.

Τα πειράματα έγιναν σε τροποποιημένο τοξωτό απλό θερμοκήπιο του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο αγρόκτημα του Βελεστίνου. Το αγρόκτημα απέχει 17 km από τον Βόλο, το υψόμετρο της περιοχής είναι 85 m και βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος 39° 44' και γεωγραφικό μήκος 22° 79'. Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως Μεσογειακό - Ηπειρωτικό, με ήπιους χειμώνες και ξηροθερμικές συνθήκες το καλοκαίρι. Όσον αφορά την μέση θερμοκρασία, αυτή κυμαίνεται από περίπου 4 °C κατά τον ψυχρότερο μήνα και 37 °C περίπου κατά τον θερμότερο μήνα.

3.2 Το θερμοκήπιο

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου ήταν: επιφάνεια 160 m², μήκος 20 m, πλάτος 8 m, ύψος ορθοστάτη 2,4 m και ύψος κορφιά 4,1 m. Το έδαφος του θερμοκηπίου ήταν πλήρως καλυμμένο με αδιαφανές, διπλής όψεως ασπρόμαυρο πλαστικό. Το υλικό του σκελετού ήταν γαλβανισμένος χάλυβας ενώ ως υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκαν φύλλα πολυαιθυλενίου (*Εικόνα 3.1*).



Εικόνα 3.1. Εξωτερική άποψη του πειραματικού θερμοκηπίου.

3.3 Αερισμός

Ο αερισμός του θερμοκηπίου πραγματοποιούνταν από πλαϊνά ανοίγματα, που βρίσκονταν κατά μήκος των δύο μεγάλων πλευρών, με διαστάσεις 0,9 m * 15 m έκαστο, καθώς και από ένα άνοιγμα στην οροφή, διαστάσεων 0,8 m * 20 m. Τα παράθυρα αερισμού, άνοιγαν με βάση την θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Ο αερισμός γινόταν και για λόγους αφύγρανσης του θερμοκηπίου, ανεξαρτήτως της εσωτερικής θερμοκρασίας του αέρα. Στην περίπτωση αυτή είτε ορίζονταν συγκεκριμένες ώρες ανοίγματος των παραθύρων, ανεξαρτήτως των κλιματικών συνθηκών που επικρατούσαν εντός του θερμοκηπίου, είτε εξετάζονταν οι τιμές της σχετικής υγρασίας, του ελλείμματος κορεσμού, και λοιπών παραμέτρων. Ο αερισμός από 2/2 έως 20/3/2009 γινόταν από 09:00 το πρωί μέχρι 16:00 το απόγευμα με 30% άνοιγμα οροφής, ενώ στον Πίνακα 3.1. δίνονται οι τιμές-στόχοι της θερμοκρασίας, στις επόμενες περιόδους του πειράματος, όπως αυτές είχαν οριστεί.

Πίνακας 3.1. Τιμές θερμοκρασίας όπου πραγματοποιούνταν τα ανοίγματα των πλαϊνών και των παραθύρων οροφής.

Ημερομηνία	Θερμοκρασία για το άνοιγμα πλαϊνών παραθύρων		Θερμοκρασία για το άνοιγμα παραθύρων οροφής	
	Έναρξη ανοίγματος	Μέγιστο άνοιγμα	Έναρξη ανοίγματος	Μέγιστο άνοιγμα
20/3 έως 9/4/2009	26 °C	32 °C	22 °C	30 °C
9/4 έως 25/6/2009	24 °C	30 °C	22 °C	28 °C

3.4 Θέρμανση

Για τη θέρμανση του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκε ένας καυστήρας πετρελαίου ισχύος 50 kW. Ο λεβητοκαυστήρας ήταν τοποθετημένος μέσα στο θερμοκήπιο και χρησίμευε στην παραγωγή ζεστού νερού. Η θέρμανση γινόταν με αερόθερμο το οποίο είχε τοποθετηθεί σε απόσταση 2.5 m από το έδαφος του θερμοκηπίου και με εύκαμπτους σωλήνες διανομής διαμέτρου 25 mm που είχαν τοποθετηθεί επάνω στο έδαφος, κοντά στα φυτά. Το αερόθερμο και οι σωλήνες τροφοδοτούταν από το ζεστό νερό που παρήγαγε ο καυστήρας. Μέσα στο θερμοκήπιο υπήρχε και ένας θερμοστάτης, τοποθετημένος στο κέντρο του θερμοκηπίου, 2m πάνω από το έδαφος (στο ύψος του φυλλώματος περίπου), ο οποίος έλεγχε την θερμοκρασία του αέρα. Η επιθυμητή θερμοκρασία κατά την διάρκεια της ημέρας ήταν 21 °C και κατά την διάρκεια της νύχτας 15 °C. Όταν η θερμοκρασία του θερμοκηπίου έπεφτε κάτω από τις επιθυμητές θερμοκρασίες, τότε ο θερμοστάτης έκλεινε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα και ενεργοποιούσε την κυκλοφορία του ζεστού νερού. Αντίθετα, όταν η θερμοκρασία του αέρα υπερέβαινε τις επιθυμητές θερμοκρασίες τότε ο θερμοστάτης άνοιγε το ηλεκτρικό κύκλωμα με αποτέλεσμα η παραγωγή και η μεταφορά της θερμότητας να σταματά.

3.5 Η καλλιέργεια

3.5.1 Εγκατάσταση της καλλιέργειας

Χρησιμοποιήθηκαν φυτά τομάτας *Lycopersicon esculentum*, var. Lorelay. Το υβρίδιο αυτό είναι τύπου cluster, αυτογονιμοποιούμενο, απεριόριστης ανάπτυξης και ο καρπός του χαρακτηρίζεται από μεγάλη διάρκεια ζωής. Η μεταφύτευση των φυτών στο θερμοκήπιο έγινε στις 2 Φεβρουαρίου 2009, στο στάδιο των πέντε πραγματικών φύλλων και η καλλιέργεια διήρκησε μέχρι τις 25 Ιουνίου 2009.

3.5.2 Διάταξη φυτών

Τα φυτά ήταν τοποθετημένα σε τέσσερις διπλές σειρές, που απείχαν μεταξύ τους 1.5 m. Μεταξύ των διπλών γραμμών υπήρχε διάδρομος με πλάτος 1 m. Οι αποστάσεις φύτευσης επί των απλών γραμμών ήταν 0,33 m, ενώ η απόσταση μεταξύ των γραμμών των διπλών σειρών φύτευσης ήταν 0,75 m. Ο πληθυσμός των φυτών ήταν 2, 1 φυτά/ m² (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2. Σχηματική απεικόνιση της διάταξης των φυτών στο θερμοκήπιο.

3.5.3 Επιλογή φυτών – Υποστρώματα

Σε πρώτη φάση επιλέχθηκαν από το θερμοκήπιο τυχαία 3 φυτά, φυτεμένα σε υποστρώματα περλίτη, πετροβάμβακα τύπου GRODAN Expert, και ελαφρόπετρα (1 φυτό από το κάθε υπόστρωμα). Έπειτα επιλέχθηκαν 3 φυτά στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα, στη συνέχεια 3 φυτά στο υπόστρωμα του περλίτη και τέλος 3 φυτά στο υπόστρωμα της ελαφρόπετρας. Η επίδραση του περιθωρίου εξαλείφθηκε με την επιλογή φυτών από τις 2 εσωτερικές διπλές σειρές και κάθε πειραματικό φυτό έφερε ατομικό καρτελάκι με αύξοντα αριθμό. Όλα τα υποστρώματα εκτός της ελαφρόπετρας ήταν τοποθετημένα σε σάκους μήκους 1 m. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 102 σάκοι, οι οποίοι είχαν τοποθετηθεί πάνω σε πάγκους, ύψους

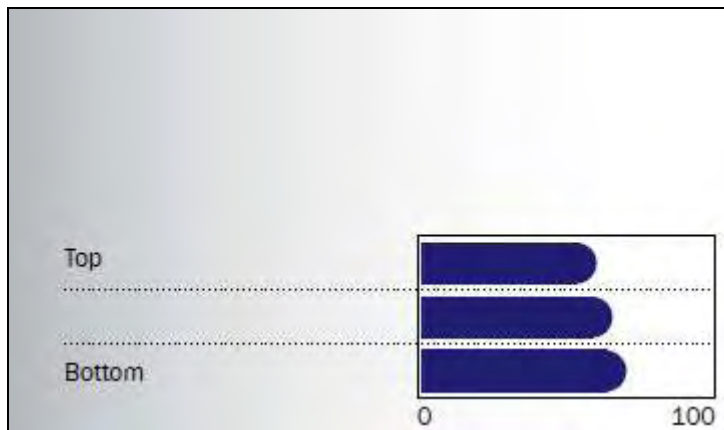
0,5 πάνω από το έδαφος. Για την υποβοήθηση της στράγγισης οι πάγκοι είχαν 1-2% κλίση. Η ελαφρόπετρα ήταν τοποθετημένη σε γλάστρες διαμέτρου 20 cm, που βρίσκονταν πάνω σε πάγκους και σε κάθε γλάστρα είχε τοποθετηθεί ένα φυτό. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 37 γλάστρες.

3.5.3.1 Πετροβάμβακας

Το υπόστρωμα του πετροβάμβακα είχε τη μορφή πλάκας (Εικόνα 3.3). Οι πλάκες του πετροβάμβακα αποτελούνται από υδρόφιλες ίνες που απορροφούν νερό. Το pH του πετροβάμβακα είναι περίπου 7 και παρουσιάζει πολύ χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Οι πόροι καταλαμβάνουν το 87-96% του όγκου του και έχει βάρος 52-75 κιλά ανά m³. Στον πετροβάμβακα τύπου Expert ο έλεγχος του περιεχόμενου νερού έχει εύρος 50 με 80% (www.grodan.com). Στο υπόστρωμα τύπου Expert διαπιστώνεται ότι από το ανώτερο προς το κατώτερο στρώμα της πλάκας η κατανομή του νερού αυξάνεται βαθμιαία (Σχήμα 3.1).



Εικόνα 3.3. Πλάκα πετροβάμβακα.



Σχήμα 3.1. Η κατανομή του νερού στα στρώματα της πλάκας του Expert. (www.grodan.com).

3.5.3.2 Περλίτης

Ο περλίτης είχε διάμετρο κόκκων 1,5 - 3 mm. Το pH του περλίτη είναι 7,0 - 7,5 και δεν έχει σημαντική ρυθμιστική ούτε και εναλλακτική ικανότητα ιόντων. Έχει υψηλό πορώδες 65 - 82% και το βάρος του είναι 94 - 128 κιλά ανά m³.

3.5.3.3 Ελαφρόπετρα

Η ελαφρόπετρα που χρησιμοποιήθηκε είχε διάμετρο κόκκων 5 - 10 mm. Το pH της ελαφρόπετρας είναι σχεδόν ουδέτερο, η ηλεκτρική της αγωγιμότητα είναι χαμηλή και χαρακτηρίζεται από πορώδη δομή (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4. Καλλιέργεια σε υπόστρωμα ελαφρόπετρας.

3.5.4 Καλλιεργητικές επεμβάσεις

Για την ανάπτυξη της καλλιέργειας ακολουθήθηκαν οι συνήθειες καλλιεργητικές πρακτικές που εφαρμόζονται στα εμπορικά θερμοκήπια, δηλαδή διατήρηση ενός βλαστού ανά φυτό και 5 καρποί σε κάθε ταξικαρπία. Για την υποστήριξη των φυτών χρησιμοποιήθηκαν πλαστικοί σπάγκοι, οι οποίοι ήταν δεμένοι σε οριζόντια σύρματα που υπήρχαν εντός του θερμοκηπίου. Καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος πραγματοποιούταν τακτική αφαίρεση των πλάγιων βλαστών, χειρωνακτικά. Επίσης μετά την συγκομιδή των καρπών κάθε ταξικαρπίας αφαιρούνταν τα υποκείμενα φύλλα (αποφύλλωση). Αυτό συνέβαλλε στη μείωση της υγρασίας στα κατώτερα μέρη των φυτών (δηλαδή προαγόταν ο αερισμός) και συνεπώς στην αποφυγή ανάπτυξης ασθενειών, στην αύξηση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας και στην ταχύτερη ωρίμανση των καρπών. Για την καλύτερη γονιμοποίηση των ανθέων είχαν τοποθετηθεί μία κυψέλη με έντομα του γένους *Bombus terrestris*. Για τον έλεγχο εντόμων, είχαν τοποθετηθεί στο θερμοκήπιο παγίδες κόλλας κίτρινου χρώματος για τον έλεγχο του αλευρώδη, της λυριόμυζας και της αφίδας και μπλε για τον θρίπα. Τέλος πραγματοποιήθηκε κορυφολόγημα των φυτών πριν την όγδοη (1,5 μήνα πριν το τέλος της συγκομιδής) ταξιανθία, προκειμένου να ωριμάσουν γρηγορότερα οι ήδη υπάρχοντες, στα φυτά, καρποί και για να σταματήσει η παραγωγή νέων φύλλων και ταξιανθιών, που δεν θα προλάβαιναν να ωριμάσουν.

3.5.5 Άρδευση - Λίπανση

Η παροχή του νερού και του λιπάσματος γινόταν με το σύστημα της στάγδην άρδευσης. Οι σωληνώσεις που οδηγούσαν το θρεπτικό διάλυμα από τις δεξαμενές στους σταλάκτες και από εκεί στα φυτά ήταν κατασκευασμένες από PVC. Οι σταλάκτες ήταν τύπου στενής οπής, με παροχή 1 L/ h και σε κάθε φυτό είχε τοποθετηθεί ένας σταλάκτης. Η δόση και η διάρκεια της άρδευσης και η ποιότητα του θρεπτικού διαλύματος ελέγχονταν αυτόματα με το πρόγραμμα Management and Control for Quality in Greenhouse (MACQU). Εφαρμόστηκε ανοιχτό υδροπονικό σύστημα με το οποίο το απορρέον θρεπτικό διάλυμα δεν επαναχρησιμοποιείται. Η παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος πραγματοποιούνταν με τη χρήση ενός Η/Υ με κατάλληλο λογισμικό (MACQU), μιας σειράς δοσομετρικών αντλιών, ενός pHμέτρου, ενός αγωγιμομέτρου και τριών δεξαμενών. Το pH του θρεπτικού διαλύματος ήταν 5,6 και η τιμή της ηλεκτρικής του αγωγιμότητας (EC) ανερχόταν στα 2,1 dSm-1. Η σύσταση του θρεπτικού διαλύματος φαίνεται στον Πίνακα 3.2. Η άρδευση βασιζόταν στην ηλιακή ακτινοβολία και πραγματοποιούνταν όταν η διαπνοή των φυτών ξεπερνούσε τα 120 ml για την περίπτωση της ελαφρόπετρας, τα 150 ml για τον περλίτη και τα 240 για τον πετροβάμβακα τύπου Expert. Ο ρυθμός απορροής dr διατηρούνταν στο 35% περίπου.

Πίνακας 3.2. Η σύσταση του θρεπτικού διαλύματος που εφαρμοζόταν στα φυτά.

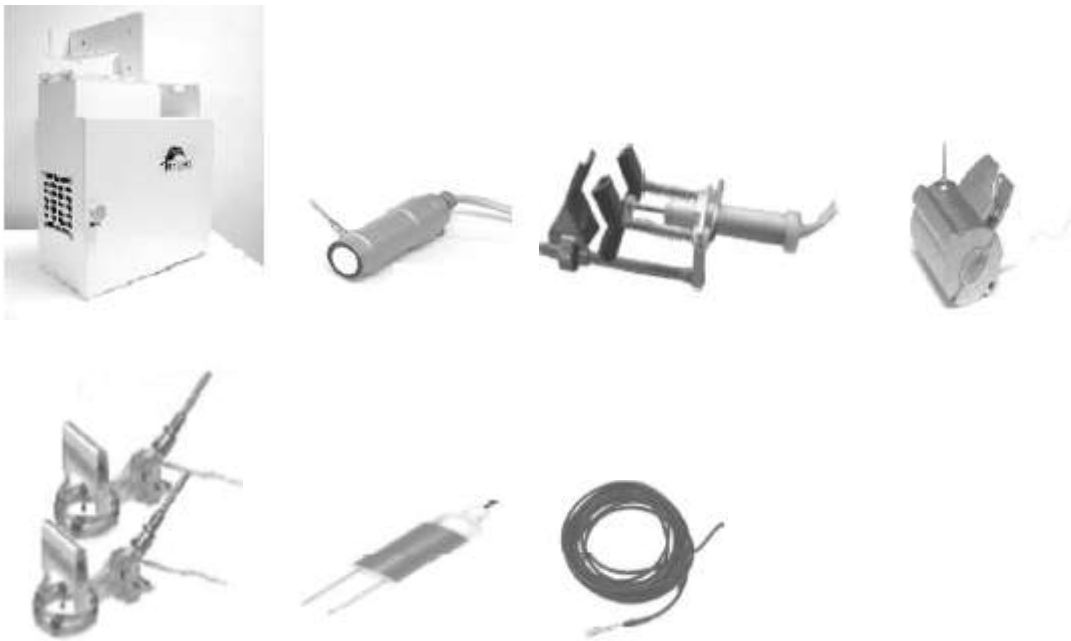
Στοιχείο	ppm
K ⁺	280
Mg ²⁺	46
SO ₄ ⁼	40
PO ₄ ⁼	40
Ca ⁺²	164
NO ₃ ⁻	233

3.6 Μετρήσεις

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες του συστήματος παρακολούθησης φυτού (Phytomonitoring™) της εταιρίας Phyttech™. Συγκεκριμένα:

- Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στο περιβάλλον του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο RS-ATH-5FR +AD-9 (230V to 24VAC, 0.6 A) με χαρακτηριστικά (κλίμακα -10 έως 50 °C και 0-100% RH, ακρίβεια θερμοκρασίας +/- 0.3 °C, ανάλυση 0.5 °C, σχετικής υγρασίας +/- 5%, σταθερότητα +/-0.3 °C και 2% RH)
- Για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την καλλιέργεια χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο RS-TIR-4R με χαρακτηριστικά (εύρος 0 έως 1200 w/m² και ακρίβεια 10%)
- Για τη μέτρηση της διαμέτρου βλαστού χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SD-5M με χαρακτηριστικά (γραμμικό εύρος 0-5 mm και κατάλληλο πάχος βλαστών 4-25 mm)
- Για τη μέτρηση της ροής χυμού χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο SF-5M με χαρακτηριστικά (προσεγγιστικό εύρος ±3 ml/h και κατάλληλη διάμετρος βλαστών 1-5 mm)
- Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας φύλλου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο LT-2M, 2 channels με χαρακτηριστικά (εύρος 5-500 C, ακρίβεια ± 0.20 C και σταθερότητα ± 0.50 C)
- Για τη μέτρηση της υγρασίας των υποστρωμάτων χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο RSD-SMS-2R με χαρακτηριστικά (εύρος μέτρησης 0-70% και εύρος θερμοκρασίας -20 °C έως 70 °C)
- Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του υποστρώματος χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο RS-ST-5R με χαρακτηριστικά (εύρος μέτρησης -10 °C έως 50°C και ανάλυση 0.5 °C)

Το σύστημα περιλάμβανε επίσης έναν αναμεταδότη δεδομένων AC και ένα μόντεμ για την επικοινωνία με τον αναμεταδότη. Η επικοινωνία των αισθητήρων με το σύστημα ήταν ασύρματη και τα δεδομένα ανέβαιναν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή που είχε εγκατασταθεί το λογισμικό πρόγραμμα Phytalk PC Software. Η δειγματοληψία των δεδομένων γινόταν ανά 10 λεπτά.



Εικόνα 3.5. Αισθητήρες του συστήματος παρακολούθησης φυτού για τη λήψη δεδομένων εντός του θερμοκηπίου. Διακρίνονται οι εξής αισθητήρες: (επάνω, από αριστερά προς τα δεξιά) θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας, διαμέτρου βλαστού, ροής χυμού, (κάτω, από αριστερά προς τα δεξιά) θερμοκρασίας φύλλου, υγρασίας υποστρώματος, θερμοκρασίας υποστρώματος.



Εικόνα 3.6. Ο αναμεταδότης δεδομένων (αριστερά) και το μόντεμ επικοινωνίας με τον αναμεταδότη (δεξιά).

3.6.1 Δοκιμές που έγιναν και πρωτόκολλο που χρησιμοποιήθηκε

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τους αισθητήρες του συστήματος παρακολούθησης φυτού έλαβαν χώρα τους μήνες Μάρτιο έως Ιούνιο. Σε αυτό το χρονικό διάστημα, κατά τους δυο πρώτους μήνες υπήρξε μια απλή καταγραφή των δεδομένων ενώ στους δυο επόμενους μήνες έγιναν οι μεταχειρίσεις στα φυτά.

Σύμφωνα με τα πρότυπα του συστήματος παρακολούθησης φυτού, χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία της δοκιμής και λάθους. Συγκεκριμένα όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 2.3.4 εφαρμόστηκε η δεύτερη μέθοδος της διαδικασίας. Έτσι, οι μεταχειρίσεις έγιναν ως εξής:

- 2^η μέθοδος δοκιμής και λάθους

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής έγινε μεταφορά των αισθητήρων του συστήματος σε τρία φυτά ενός υποστρώματος για κάθε μια μεταχείριση ξεχωριστά. Έτσι για κάθε ένα υπόστρωμα (πετροβάμβακας-περλίτης-ελαφρόπετρα) επιλέχθηκαν ένα φυτό αναφοράς και ένα ή δύο πειραματικά φυτά. Με αυτό τον τρόπο έγινε σύγκριση μεταξύ ενός πλήρως αρδευόμενου φυτού και ενός ή δυο πειραματικών φυτών σε καθεστώς ελλειμματικής άρδευσης. Αναλυτικά:

- 1) *Υπόστρωμα πετροβάμβακα*: επιλογή ενός φυτού αναφοράς και ενός πειραματικού φυτού. Η μεταχείριση πραγματοποιήθηκε στις 25 Μαΐου. Στο φυτό αναφοράς συνεχίστηκε κανονικά το πρόγραμμα άρδευσης ενώ στο πειραματικό φυτό έγινε διακοπή της άρδευσης τις ώρες 09:00 έως 14:00
- 2) *Υπόστρωμα περλίτη*: επιλογή ενός φυτού αναφοράς και δυο πειραματικών φυτών. Η μεταχείριση πραγματοποιήθηκε στις 1 Ιουνίου. Στο φυτό αναφοράς συνεχίστηκε κανονικά το πρόγραμμα άρδευσης. Στο πρώτο πειραματικό φυτό έγινε διακοπή της άρδευσης τις ώρες 10:00 έως 13:00 και στο δεύτερο έγινε διακοπή τις ώρες 10:00 έως 15:00
- 3) *Υπόστρωμα ελαφρόπετρας*: επιλογή δυο πειραματικών φυτών. Η μεταχείριση πραγματοποιήθηκε στις 18 Ιουνίου. Στο πρώτο πειραματικό φυτό έγινε διακοπή της άρδευσης τις ώρες 09:00 έως 12:00 και στο δεύτερο έγινε διακοπή τις ώρες 09:00 έως 14:00

3.6.2 Υπολογισμοί δεικτών και παραμέτρων

Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις της καθημερινής εξέλιξης της διαμέτρου του βλαστού των φυτών μέσω των αντίστοιχων αισθητήρων, πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή μιας ομάδας παραμέτρων που αναφέρουν οι *Fernandez και Cuevas (2010)*. Παρακάτω παρουσιάζεται η ομάδα και οι υπολογισμοί που έγιναν, ενώ στο *Σχήμα 3.1* απεικονίζονται οι παράμετροι σε έναν εξελισσόμενο βλαστό:

- Μέγιστη διάμετρος βλαστού (**MXSD**)
- Ελάχιστη διάμετρος βλαστού (**MNSD**)
- Μέγιστη ημερήσια συρρίκνωση βλαστού (**MDS_{DOY}**)

$$MDS_{DOY} = MXSD_{DOY} - MNSD_{DOY}$$
- Ημερήσια ανάκαμψη βλαστού (**DR_{DOY}**)

$$DR_{DOY} = MXSD_{DOY+1} - MNSD_{DOY}$$
- Ημερήσια ανάπτυξη βλαστού (**DG_{DOY}**)

$$DG_{DOY} = MXSD_{DOY+1} - MXSD_{DOY}$$
- Ρυθμός ανάπτυξης βλαστού (**SGR_{DOY}**)

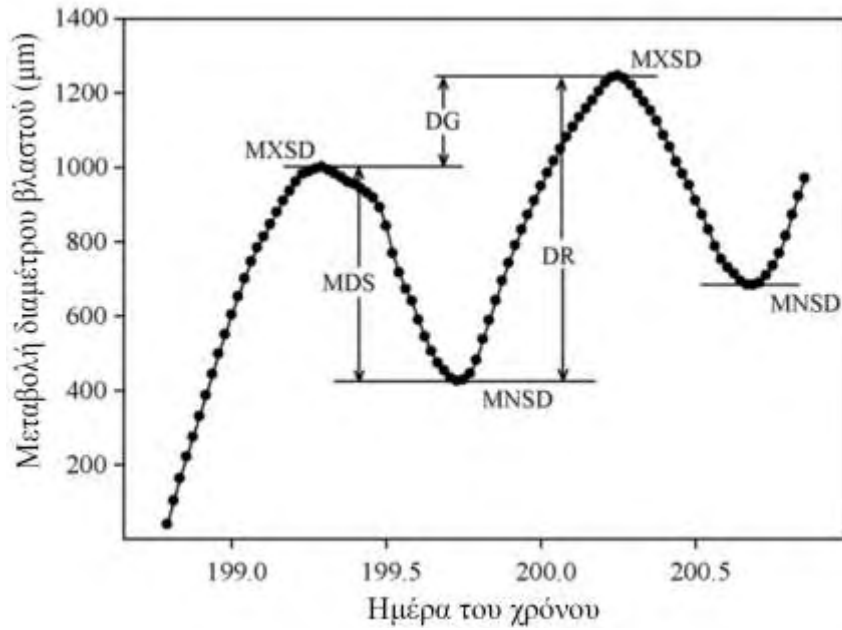
$$SGR_{DOY} = DG \text{ για } N \text{ ημέρες} = MXSD_{DOY+1} - MXSD_{DOY-N}$$
- Αθροιστική ανάπτυξη (**CG**)

$$CG = \sum_{DOY-N}^{DOY} CG, \text{ για } N \text{ ημέρες,}$$
- Μέση ημερήσια ανάπτυξη βλαστού (**ADG_{DOY}**)

$$ADG_{DOY} = \text{Μέση τιμή (DG), για } N \text{ ημέρες,}$$

όπου DOY = ημέρα του χρόνου

Επίσης υπολογίσθηκαν οι δείκτες υδατικής καταπόνησης CWSI και SDD σύμφωνα με τις εξισώσεις (2.12) και (2.6) αντίστοιχα.



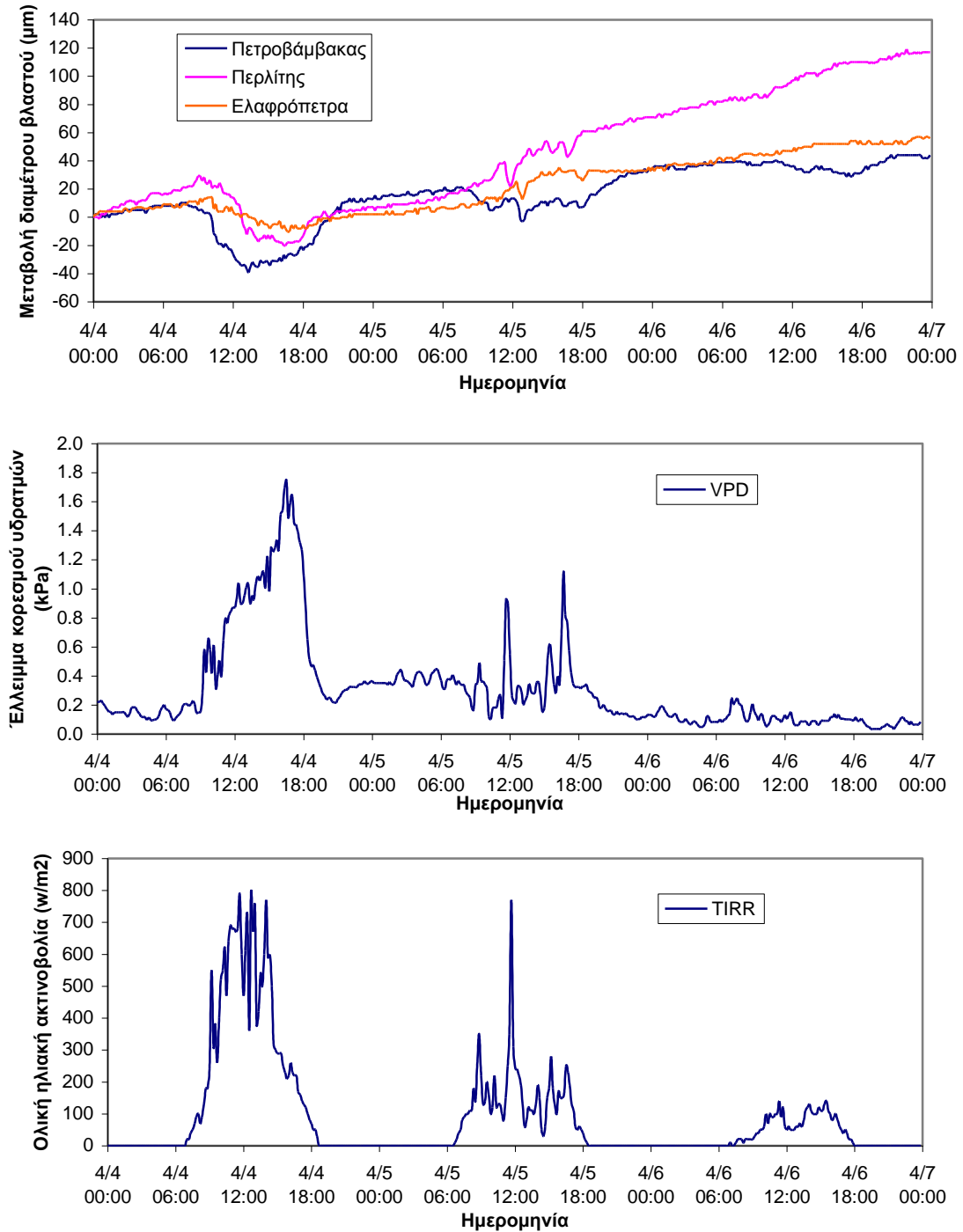
Σχήμα 3.1. Εξαγόμενοι δείκτες της μεταβολής διαμέτρου του βλαστού. Τα δεδομένα που απεικονίζονται, καταγράφηκαν από τους Fernandez και Cuevas (2010) με έναν LVDT αισθητήρα που εγκαταστάθηκε σε ένα 37 ετών δέντρο ελιάς 'Manzanilla de Sevilla'.

Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα και Συζήτηση

4.1 Αποτελέσματα

4.1.1 Διάμετρος βλαστού: ημερήσια μεταβολή στα φυτά των υποστρώματων για καθαρές και συννεφιασμένες ημέρες

Στο *σχήμα 4.1* παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία της μεταβολής της διαμέτρου βλαστού (SDV) τριών πλήρως αρδευόμενων φυτών στα αντίστοιχα υποστρώματα πετροβάμβακα, περλίτη, ελαφρόπετρας και η ημερήσια πορεία της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (TIRR) και του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών (VPD) για τρεις συνεχόμενες ημέρες. Στις 4 Απριλίου (καθαρή ημέρα) διακρίνονται οι τρεις φάσεις του κύκλου της ημερήσιας εξέλιξης διαμέτρου βλαστού των φυτών στα υποστρώματα (συρρίκνωσης, ανάκαμψης και αύξησης). Η ημερήσια ανάπτυξη της διαμέτρου βλαστού ήταν 11, 19 και 14 μm για τα φυτά του πετροβάμβακα του περλίτη και της ελαφρόπετρας αντίστοιχα. Την επόμενη ημέρα (5 Απριλίου, συννεφιασμένη ημέρα), είναι εμφανής η άμεση επίδραση που είχε η περιορισμένη ηλιακή ακτινοβολία και η χαμηλή εξατμιστική ανάγκη στη συρρίκνωση και ανάκαμψη της διαμέτρου βλαστού των φυτών. Παρόμοιο αποτέλεσμα παρουσίασαν οι *Zhang et al. (2006)* για καλλιέργεια βαμβακιού. Την Τρίτη συνεχόμενη ημέρα (6 Απριλίου συννεφιασμένη ημέρα), σε ακόμα πιο χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία και έλλειμμα κορεσμού υδρατμών μόνο το φυτό στον πετροβάμβακα παρουσίασε τη φάση συρρίκνωσης και ανάκαμψης, με τη μικρότερη τιμή MDS των τριών ημερών. Συνολικά, το φυτό που δεν εμφάνισε σημάδια καταπόνησης ήταν αυτό στο υπόστρωμα του περλίτη και στο πέρας των τριών ημερών είχε τη μεγαλύτερη ανάπτυξη βλαστού, ενώ αντίθετα τα φυτά στα υποστρώματα του πετροβάμβακα και της ελαφρόπετρας επηρεάστηκαν από τις συνθήκες και παρουσίασαν πολύ μικρότερη ανάπτυξη βλαστού.



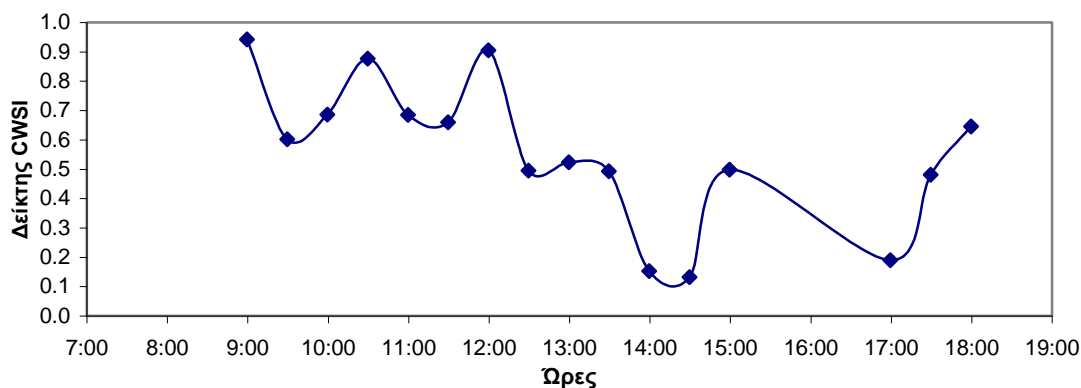
Σχήμα 4.1. Εξέλιξη της διαμέτρου βλαστού στα τρία υποστρώματα και η πορεία του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών (VPD) και της ηλιακής ακτινοβολίας (TIRR), στις 4, 5 και 6 Απριλίου.

4.1.1.1 Υπολογισμός του δείκτη υδατικής καταπόνησης CWSI για καθαρές και συννεφιασμένες ημέρες

Σύμφωνα με την εξίσωση (2.12) έγινε ο υπολογισμός του δείκτη CWSI στο υπόστρωμα του περλίτη για τις τρεις ημέρες που αναφέρονται παραπάνω. Οι τιμές του δείκτη τις πρώτες πρωινές ώρες και τις ώρες μετά το απόγευμα όπου το επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ χαμηλό δεν υπολογίσθηκαν.

Η πρώτη παρατήρηση είναι ότι τις ημέρες με τις μη φυσιολογικές συνθήκες περιβάλλοντος οι περισσότερες τιμές του δείκτη ήταν λανθασμένες, δηλαδή εκτός των ορίων από 0 έως 1 που πρέπει να παίρνει ο δείκτης. Άρα σε αυτές τις περιπτώσεις δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο δείκτης για τον έλεγχο της υδατικής καταπόνησης στην καλλιέργεια.

Η πορεία του δείκτη κατά της διάρκειας την ημέρας (4 Απριλίου) φαίνεται στο *Σχήμα 4.2*. Από τις 9:00 έως τις 12:00 υπάρχει μια αυξομείωση του δείκτη από 0.6 έως 0.9 που αντιστοιχεί σε μέση μέχρι υψηλή καταπόνηση. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην πτώση των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας και την αύξηση της σχετικής υγρασίας του αέρα στο θερμοκήπιο εκείνες τις ώρες όπως φαίνεται στο *Σχήμα 4.1*. Από το μεσημέρι μέχρι το απόγευμα οι τιμές του δείκτη κυμάνθηκαν από 0.1 ως 0.5 κάτι που σημαίνει ότι στο φυτό είχε από ελάχιστη έως ήπια καταπόνηση. Οι Chamont et al. (1995), αναφέρουν ότι σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια αγγουριού σε υπόστρωμα πετροβάμβακα ο δείκτης CWSI για συνθήκες ελλείμματος κορεσμού υδρατμών $VPD \leq 2.2$ kPa ή $VPD \leq 3.5$ kPa ήταν σχεδόν ίσος ή ελαφρός μεγαλύτερος από τον δείκτη σε ελεγχόμενο περιβάλλον με $VPD \leq 1$ kPa, αν και για την περίπτωση όπου $VPD \leq 3.5$ kPa παρατηρήθηκε αύξηση του δείκτη το απόγευμα. Η υδατική καταπόνηση που εμφανίστηκε κάτω από συνθήκες υψηλού ελλείμματος κορεσμού θεωρήθηκε ως ήπια καταπόνηση.



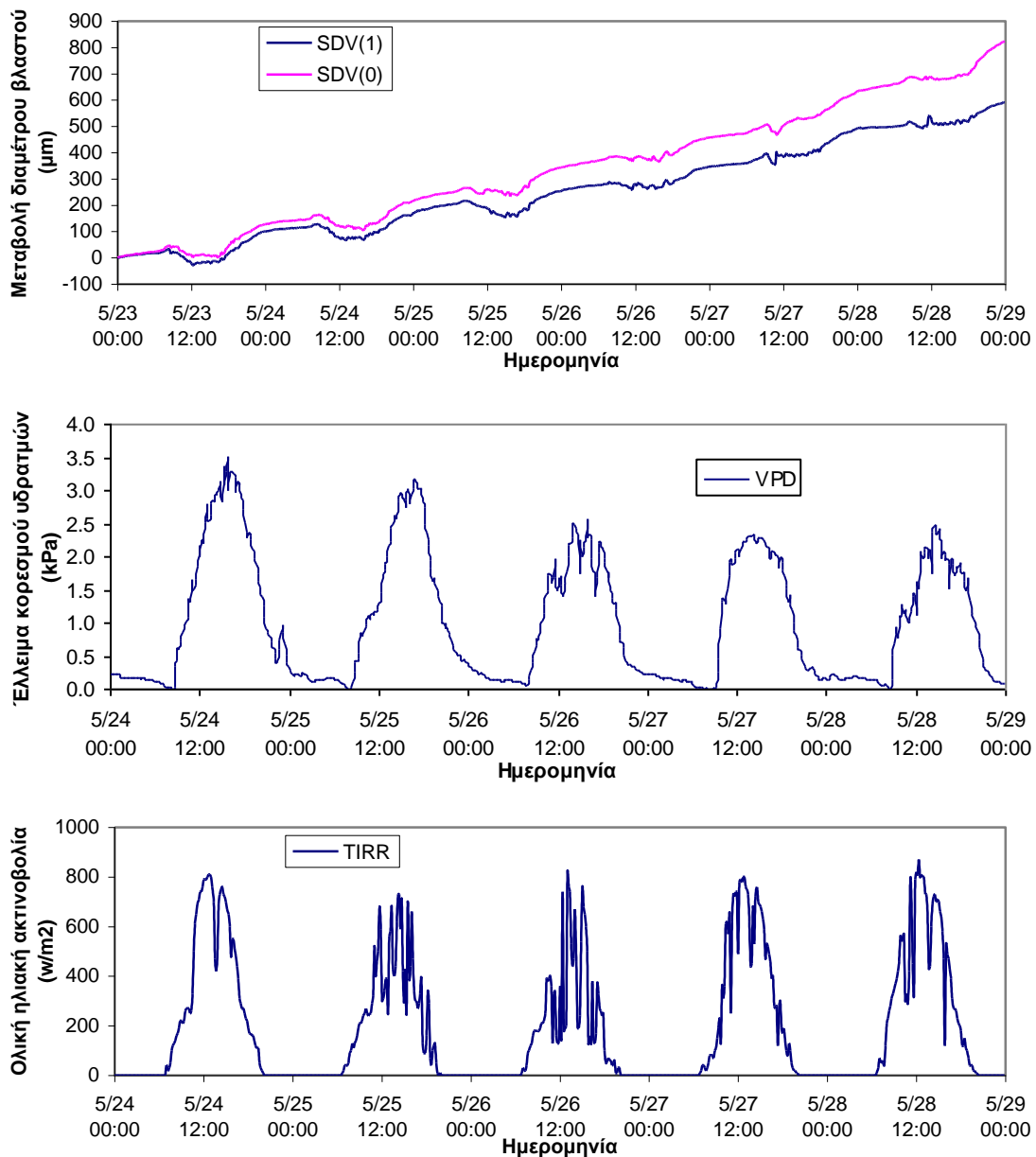
Σχήμα 4.2. Η πορεία του δείκτη υδατικής καταπόνησης CWSI υπολογισμένος για φυτό σε υπόστρωμα περλίτη στις 4 Απριλίου.

4.1.2 Μεταχειρίσεις στα φυτά των υποστρωμάτων: δεύτερη μέθοδος δοκιμής και σφάλματος

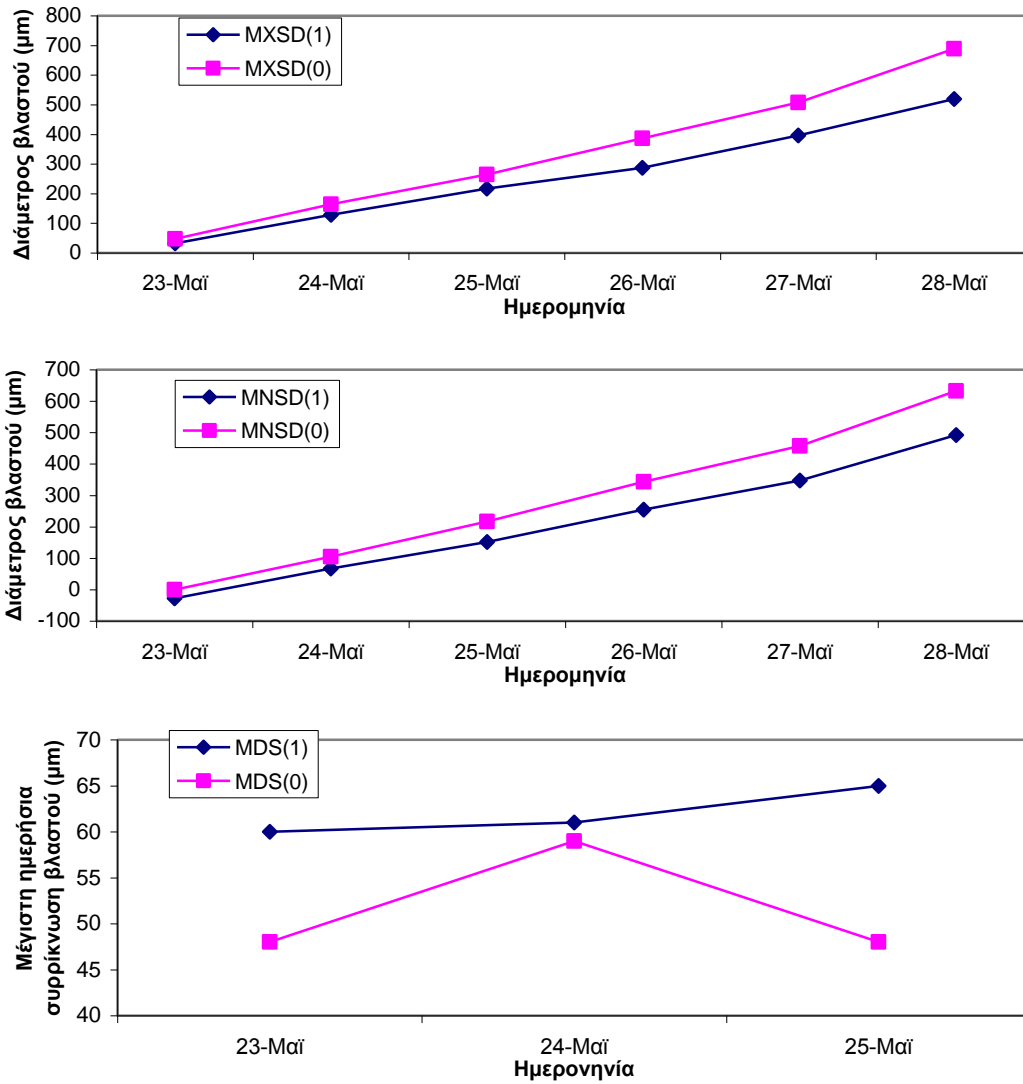
4.1.2.1 Εφαρμογή της μεθόδου στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η εξέλιξη βλαστού τριών φυτών στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες. Στις 26 και 27 Μαΐου οι εξατμιστικές απαιτήσεις ήταν μικρότερες από τις δυο προηγούμενες ημέρες κάτι που είχε σαν αποτέλεσμα μικρότερη φάση συρρίκνωσης τις πρωινές ώρες και μεγαλύτερη ημερήσια ανάπτυξη του βλαστού. Επίσης παρατηρώντας το έλλειμμα κορεσμού και την ηλιακή ακτινοβολία αυτών των ημερών βλέπουμε ότι στις 26 από τις 11:00 ως τις 18:00 υπήρχε μεγάλη διακύμανση των παραμέτρων αυτών κάτι που δεν εμφανίστηκε την επόμενη ημέρα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1 η ημερήσια ανάπτυξη βλαστού στις 27 του μηνός ήταν μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στις 26 και στα δυο φυτά. Την ημέρα της μεταχείρισης (25/5) η ημερήσια ανάπτυξη του βλαστού στο πειραματικό φυτό μειώθηκε σε αντίθεση με το φυτό αναφοράς που είχε ανοδική πορεία. Στο Σχήμα 4.4 φαίνονται οι δείκτες MXSD, MNSD και MDS. Την ημέρα της μεταχείρισης η μέγιστη και ελάχιστη διάμετρος βλαστού δεν υποδηλώνουν την παρουσία καταπόνησης στο πειραματικό φυτό. Ο δείκτης μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού παρουσίασε πτώση στο φυτό αναφοράς και μια μικρή άνοδο στο πειραματικό φυτό και μπορεί να χαρακτηριστεί ευαίσθητος δείκτης στην μεταβολή

της υδατικής κατάστασης του φυτού. Στις 26, 27 και 28 Μαΐου όπου δεν είναι εμφανής η φάση συρρίκνωσης του βλαστού ο δείκτης MDS δεν λαμβάνεται υπόψη. Η δοκιμή της μεταχείρισης για διακοπή της άρδευσης τις ώρες 09:00 έως 14:00 είχε αρνητικό αποτέλεσμα στην ανάπτυξη του βλαστού και δεν μπορεί να συμπεριληφθεί στον σχεδιασμό της άρδευσης.



Σχήμα 4.3. Εξέλιξη της διαμέτρου βλαστού στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα, *SDV(0)* είναι το φυτό αναφοράς και *SDV(1)* το πειραματικό φυτό και οι πορεία του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών (*VPD*) και της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (*TIRR*).



Σχήμα 4.4. Οι δείκτες μέγιστης και ελαχίστης ημερησίας διαμέτρου βλαστού (MXSD, MNSD) και μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού (MDS) στο φυτό αναφοράς (0) και στο πειραματικό φυτό (1). Η μεταχείριση πραγματοποιήθηκε στις 25 Μαΐου.

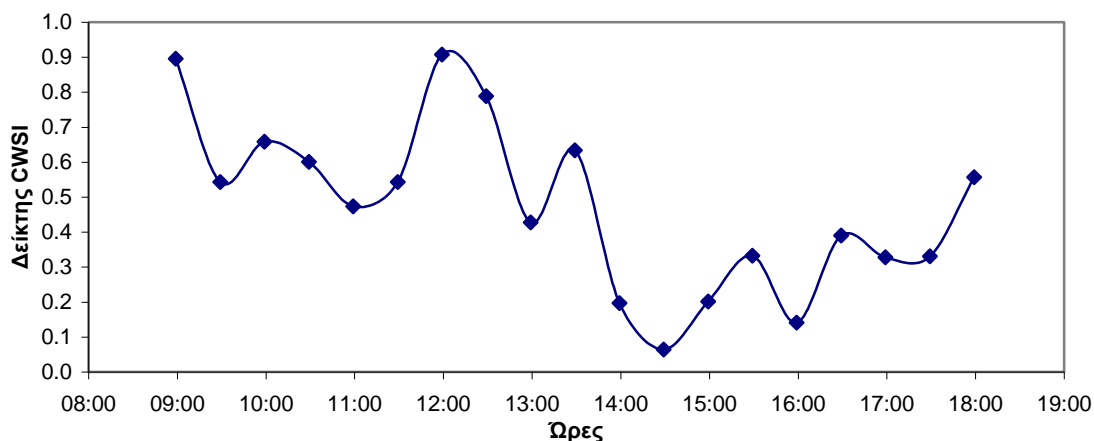
Πίνακας 4.1. Η ημερήσια ανάπτυξη των φυτών στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα(DG) και η αθροιστική τους ανάπτυξη (CG).

	<i>DG Πειραματικό φυτό (I)</i>	<i>DG Φυτό αναφοράς (II)</i>
23-Μαΐου	96	116
24-Μαΐου	89	101
25-Μαΐου	70	121
26-Μαΐου	109	121
27-Μαΐου	123	182
CG	487	641

4.1.2.2 Ο δείκτης CWSI στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται η πορεία του δείκτη για το φυτό στο οποίο εφαρμόστηκε διακοπή της άρδευσης τις ώρες 09:00 έως 14:00. Οι τιμές τις πρωινές ώρες μέχρι τις 13:30 κυμαίνονται από 0.45 έως 0.65 με εξαίρεση τις ώρες 12:00 - 12:30 όπου ο δείκτης ήταν σε υψηλό επίπεδο, με τιμές 0.8-0.9. Από το μεσημέρι μέχρι το απόγευμα όπως φαίνεται δεν εμφανίστηκαν σημάδια καταπόνησης.

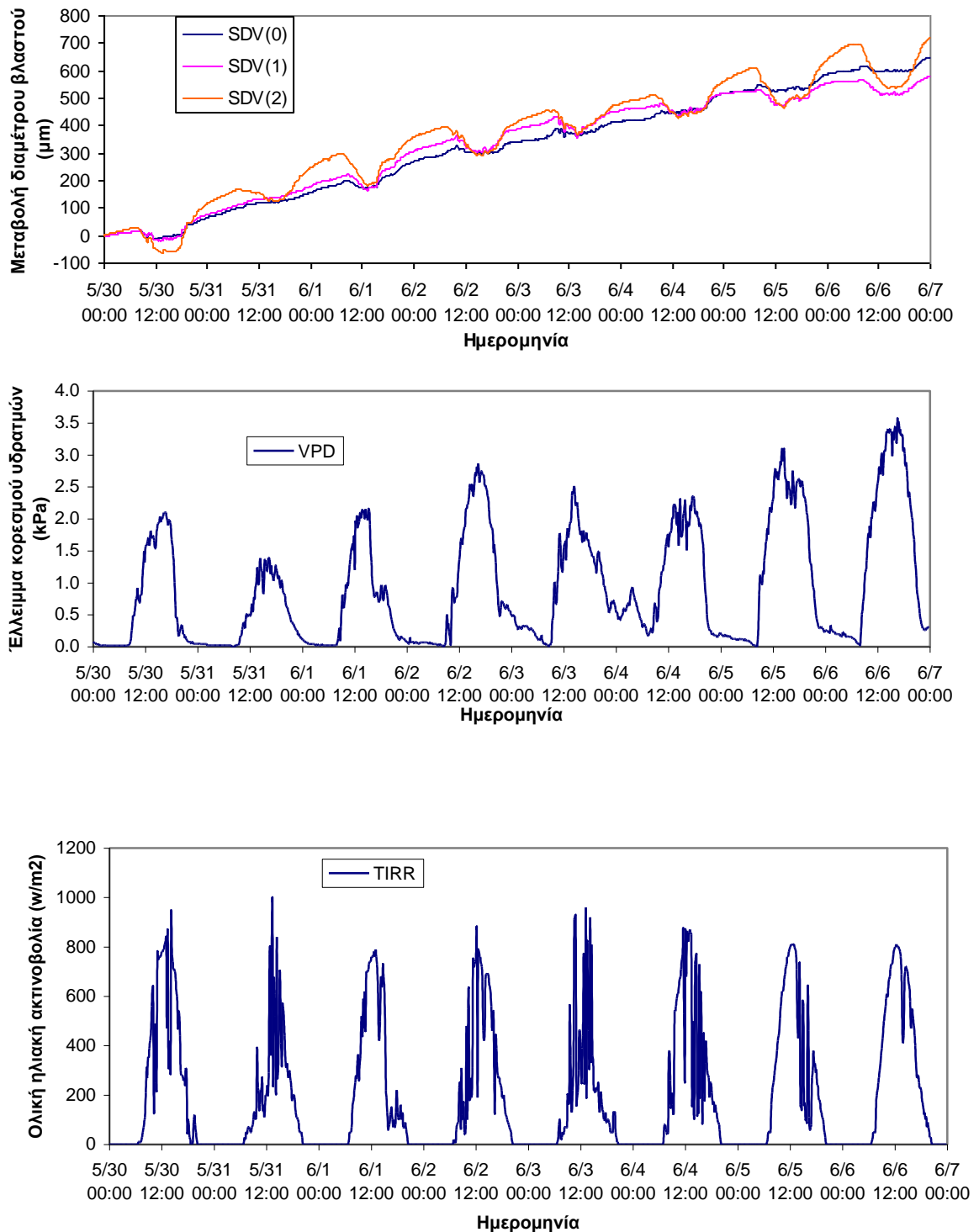
Οι Mahan et al. (2005) χρησιμοποίησαν το πρωτόκολλο σχεδιασμού άρδευσης (BIOTIC), το οποίο βασίζεται στη θερμοκρασία του φυτού, σε υδροπονική καλλιέργεια φιστικιού σε υπόστρωμα πετροβάμβακα. Η θερμοκρασία του φυλλώματος υπολογίστηκε για κάθε χρονικό βήμα των μετεωρολογικών δεδομένων όταν η θερμοκρασία του αέρα ήταν πάνω από το βιολογικό όριο, η καθαρή ακτινοβολία ήταν θετική και η σχετική υγρασία δεν ήταν περιοριστική. Ο δείκτης CWSI που υπολογίστηκε είχε τιμές κοντά στο μηδέν (μεταξύ 0 και 0.05). Οι Katsoulas et al. (2009) βρήκαν ότι για θερμοκηπιακή καλλιέργεια μελιτζάνας σε υπόστρωμα πετροβάμβακα ο δείκτης CWSI ήταν γύρω στο 0.1 κάτω από συνθήκες τεχνητής ομίχλης και ελαφρές συνθήκες καταπόνησης (CWSI, ανάμεσα σε τιμές 0.2 και 0.4) χωρίς τη λειτουργία του συστήματος τεχνητής ομίχλης.



Σχήμα 4.5. Η πορεία του δείκτη υδατικής καταπόνησης CWSI υπολογισμένος για φυτό σε υπόστρωμα πετροβάμβακα στις 25 Μαΐου.

4.1.2.3 Εφαρμογή της μεθόδου στο υπόστρωμα του περλίτη

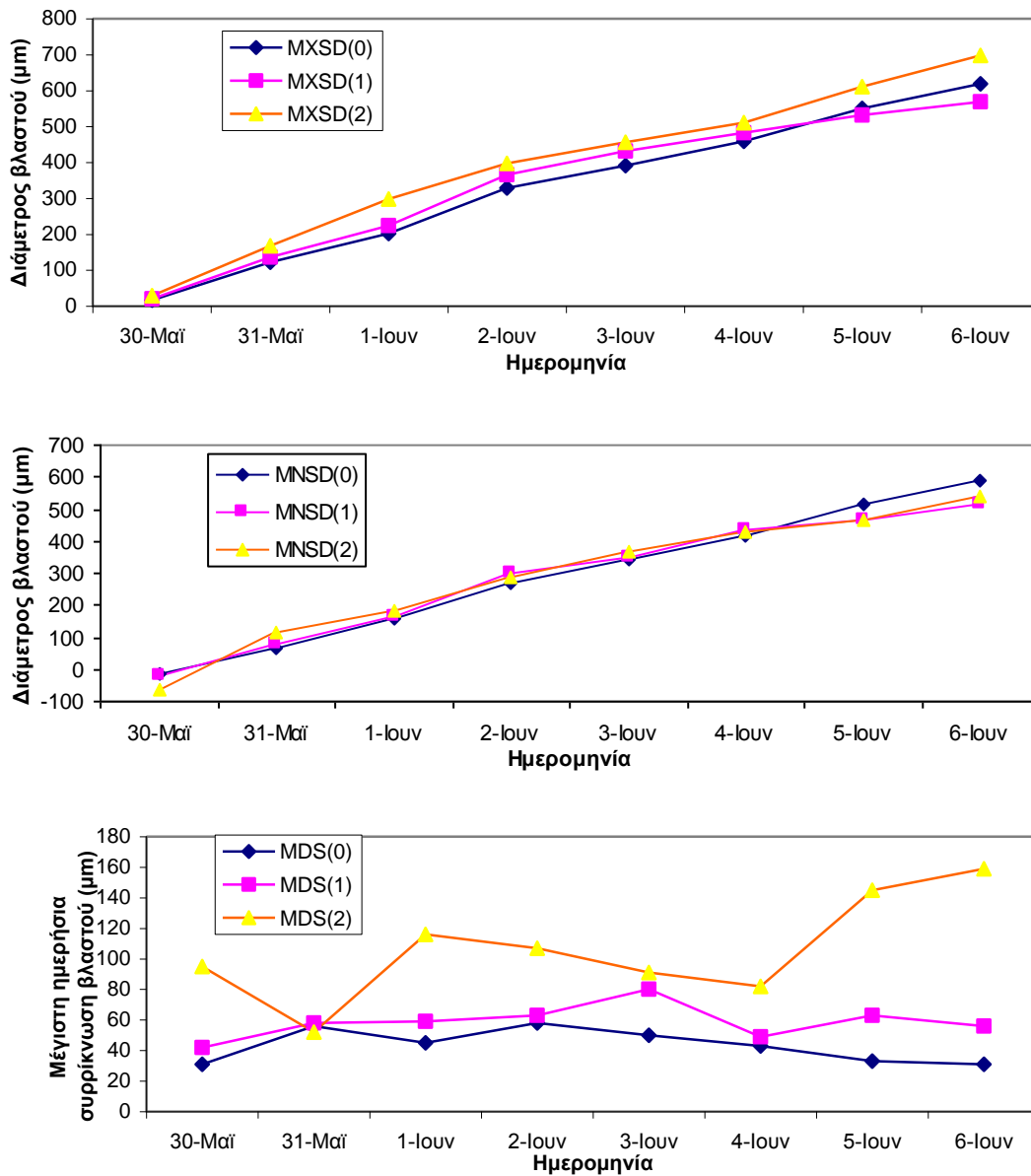
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 η διαφορά του ελλείμματος κορεσμού ανάμεσα στις δυο πρώτες ημέρες και επηρέασε την ημερήσια ανάπτυξη που παρουσίασε πτώση στα δυο από τα τρία φυτά (Πίνακας 4.2). Η απόκριση των πειραματικών φυτών στη μεταχείριση που έγινε (1/6) ήταν η μείωση της ημερήσιας ανάπτυξης στο πειραματικό φυτό 2 (διακοπή άρδευσης τις ώρες 10:00 έως 15:00) κατά 23.84%, ενώ στο πειραματικό φυτό 1 (διακοπή άρδευσης τις ώρες 10:00 έως 13:00) δεν υπήρξε φαινόμενο υδατικής καταπόνησης και είχε αυξημένη ανάπτυξη κατά 61.36% παραπλήσια του φυτού αναφοράς που ήταν 58.75%. Στο σχήμα 4.7 φαίνεται στις 1 Ιουνίου η απόκριση του MNSD στη διακοπή της άρδευσης του πειραματικού φυτού 2, ενώ δεν υπήρχε αντίδραση από το πειραματικό φυτό 1. Αντίθετα ο δείκτης MXSD δεν είχε κάποια απόκριση στο πειραματικό φυτό 2. Ανάλογα φαίνεται και η άνοδος του δείκτη MDS στο πειραματικό φυτό 2, στο πειραματικό φυτό 1 το MDS παρέμεινε σταθερό, ενώ στο φυτό αναφοράς μειώθηκε. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι δείκτες MNSD και MDS είχαν άμεση απόκριση στην υδατική καταπόνηση του πειραματικού φυτού 2. Έτσι θα μπορούσε να επιλέγει ως νέο καθεστώς άρδευσης η μεταχείριση που έγινε στο πειραματικό φυτό 1, δηλαδή η παύση της άρδευσης τις ώρες 10:00 έως 13:00.



Σχήμα 4.6. Εξέλιξη της διαμέτρου βλαστού στο υπόστρωμα του περλίτη, $SDV(0)$ είναι το φυτό αναφοράς και $SDV(1)$, $SDV(2)$ τα πειραματικά φυτά και οι πορείες του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών και της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

Πίνακας 4.2. Η ημερήσια ανάπτυξη των φυτών στο υπόστρωμα του περλίτη (DG) και η αθροιστική τους ανάπτυξη (CG).

	<i>DG Φυτό αναφοράς (0)</i>	<i>DG Πειραματικό φυτό(1)</i>	<i>DG Πειραματικό φυτό(2)</i>
30-Μαΐου	105	116	139
31-Μαΐου	80	88	130
1-Ιουνίου	127	142	99
2-Ιουνίου	62	66	59
3-Ιουνίου	68	51	55
4-Ιουνίου	91	49	100
5-Ιουνίου	69	37	87
CG	602	549	669

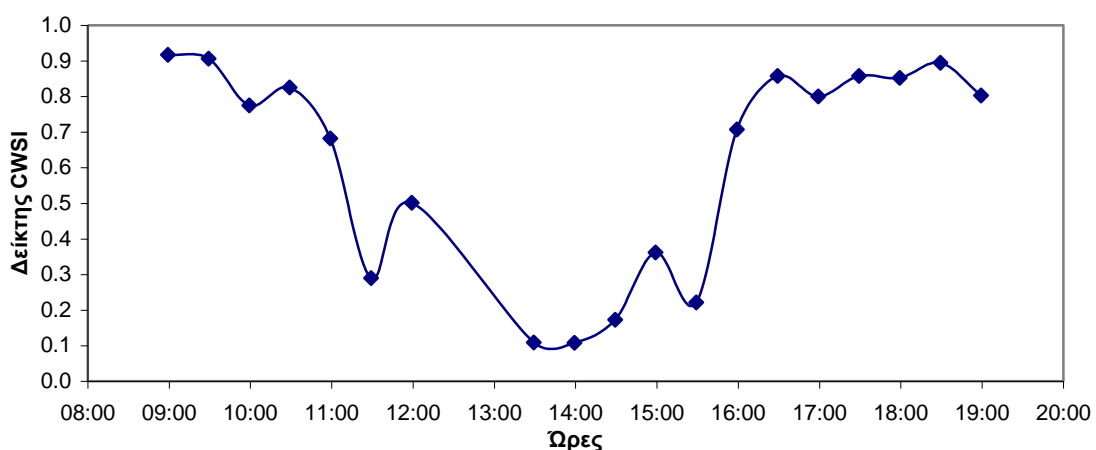


Σχήμα 4.7. Οι δείκτες μέγιστης και ελαχίστης ημερησίας διαμέτρου βλαστού (MXSD, MNSD) και μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού (MDS) στο φυτό αναφοράς (0) και στα πειραματικά φυτά (1) και (2). Η μεταχείριση πραγματοποιήθηκε στις 1 Ιουνίου.

4.1.2.4 Ο δείκτης CWSI στο υπόστρωμα του περλίτη

Οι υπολογισμένες τιμές του δείκτη CWSI φαίνονται στο Σχήμα 4.8 και αφορούν το φυτό στο οποίο εφαρμόστηκε διακοπή της άρδευσης τις ώρες 10:00-15:00. Μέχρι τις 11:00 ο δείκτης έδειξε ότι υπήρχε υψηλή καταπόνηση (0.7-0.9), έπειτα μέχρι τις 15:30 η καταπόνηση ήταν από χαμηλή ως μέση (0.1-0.5), αλλά το απόγευμα το φυτό παρουσίασε πάλι υψηλή υδατική καταπόνηση σε επίπεδο 0.7-0.9. Αυτό οφείλεται στην πτώση του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών κάτω από 1 kPa μετά τις 16:00, όπου η υψηλή υγρασία αποτέλεσε περιοριστικό παράγοντα στη διαπνοή του φυτού.

Ο Κατσούλας (2002) υπολόγισε το δείκτη CWSI για καλλιέργεια τριανταφυλλιάς σε υδροπονική καλλιέργεια περλίτη. Συγκρίνοντας τον δείκτη για φυσικό και δυναμικό αερισμό του θερμοκηπίου βρήκε παρόμοιες τιμές και για τις δυο περιπτώσεις, δηλαδή την εμφάνιση σχετικής καταπόνησης με μέση τιμή του δείκτη γύρω στο 0.6. Ακόμα χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της σκίασης με άσπρισμα του θερμοκηπίου βρήκε ότι η δείκτης πριν το άσπρισμα ήταν υψηλός με τιμές γύρω στο 0.9 τις πρωινές ώρες και 0.7 το απόγευμα, ενώ μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου ο δείκτης είχε σημαντική μείωση με τιμές 0.4-0.5 μετά από μια βδομάδα. Χρησιμοποιώντας επίσης το σύστημα δροσισμού βρήκε ότι η καλλιέργεια δε βρισκόταν υπό συνθήκες καταπόνησης, ενώ όταν δε λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού ο δείκτης πήρε τιμές 0.15 νωρίς το πρωί έως 0.25 αργά το απόγευμα, δηλαδή συνθήκες χαμηλής καταπόνησης για την καλλιέργεια.



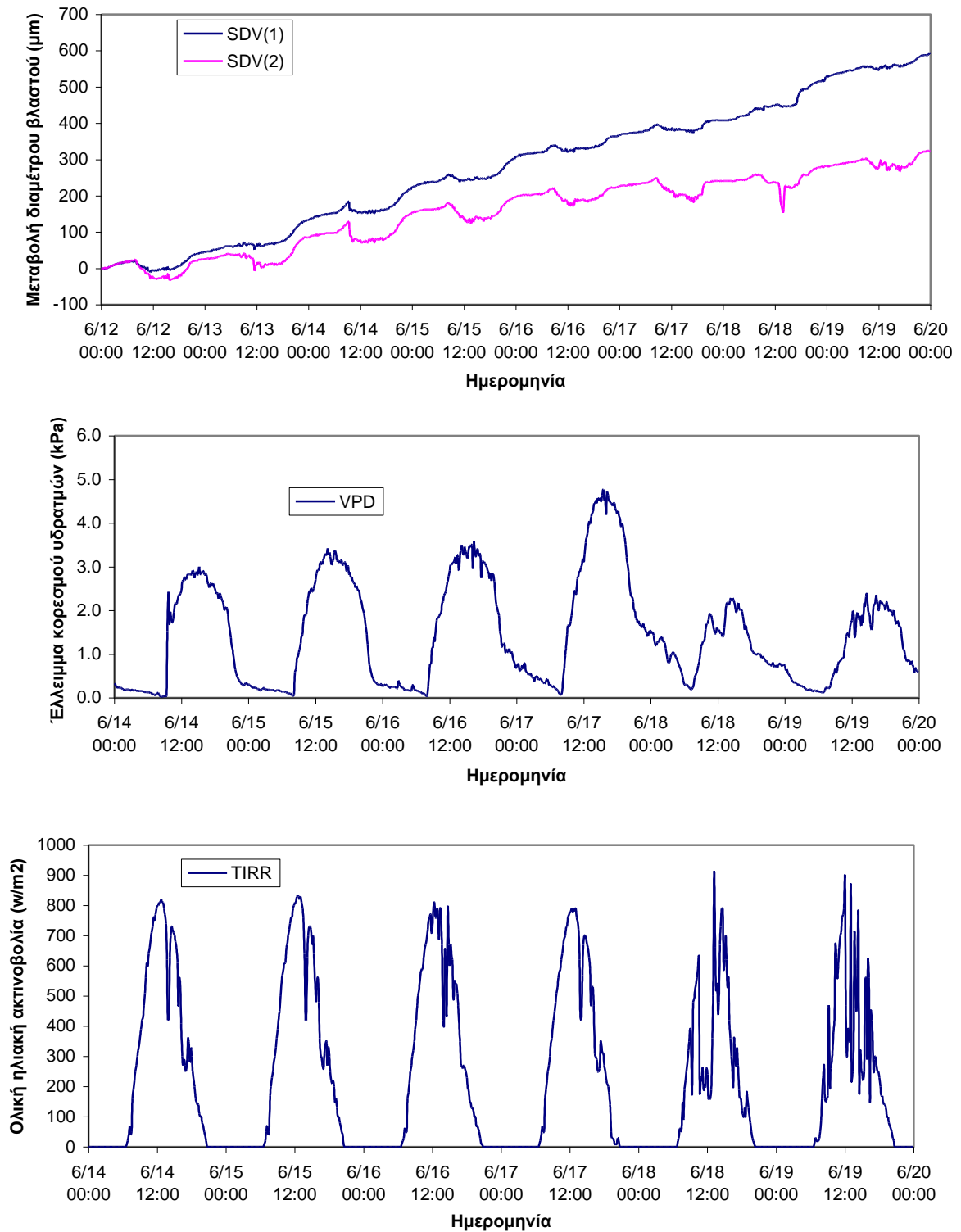
Σχήμα 4.8. Η πορεία του δείκτη υδατικής καταπόνησης CWSI υπολογισμένος για φυτό σε υπόστρωμα περλίτη στις 1 Ιουνίου.

4.1.2.5 Εφαρμογή της μεθόδου στο υπόστρωμα της ελαφρόπετρας

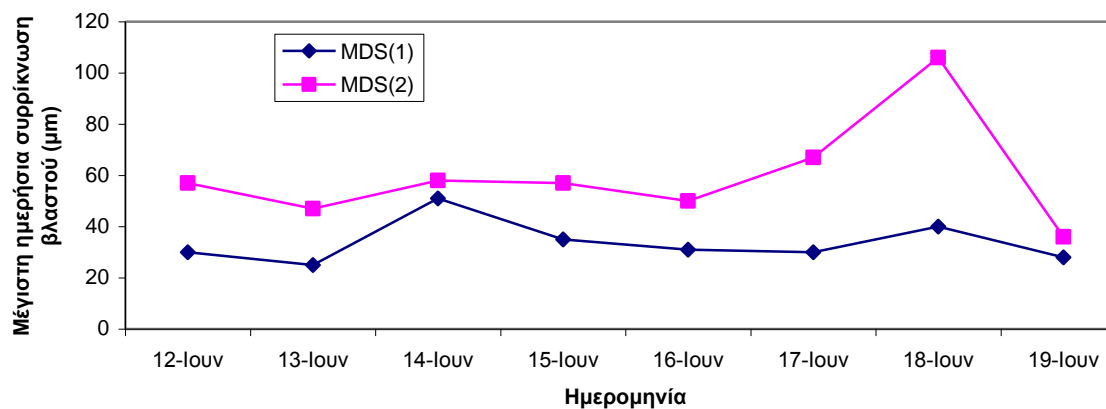
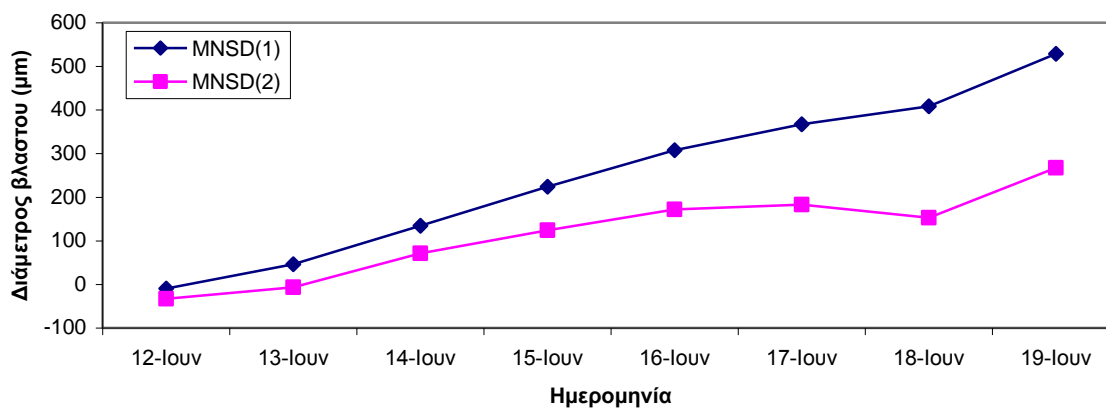
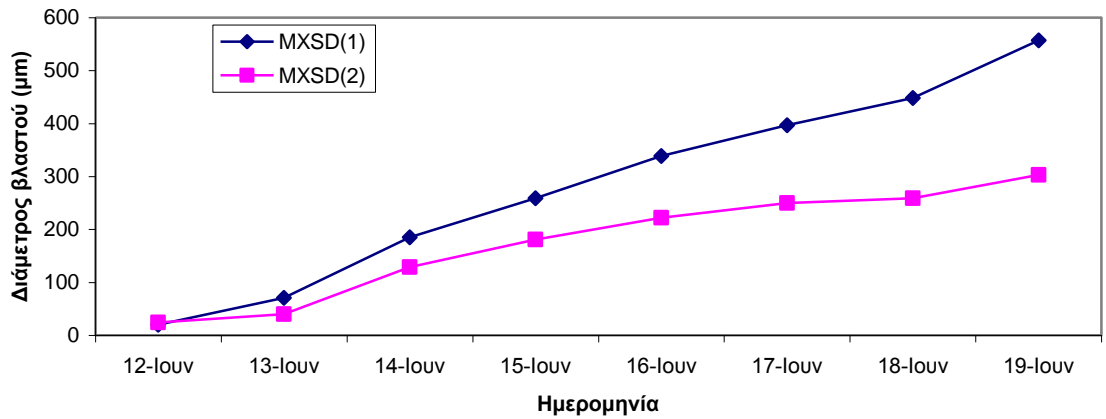
Αυτή η μεταχείριση αφορούσε δυο πειραματικά φυτά στο υπόστρωμα της ελαφρόπετρας. Η ημερήσια ανάπτυξη των δυο πειραματικών φυτών την ημέρα της μεταχείρισης (18 Ιουνίου) φαίνεται στον πίνακα 4.3. Ο βλαστός στο πειραματικό φυτό 1 αυξήθηκε κατά 109 μm και στο πειραματικό φυτό 2 κατά 44 μm . Κατά τη μεταχείριση του πειραματικού φυτού 2 παρατηρείται μια περίοδος απότομης συρρίκνωσης του βλαστού τις ώρες 13:00 έως 14:00 κάτι που δεν παρατηρείται στο πειραματικό φυτό 1 στο οποίο η διακοπή της άρδευσης περιελάμβανε τις ώρες 09:00 έως 12:00. Στο Σχήμα 4.10 φαίνεται ακριβώς αυτή η αντίδραση να αντικατοπτρίζεται και στους τρεις δείκτες και πιο έντονα στους δείκτες MNSD και MDS στους βλαστούς και των δυο φυτών. Η εικόνα της ανάπτυξης των δυο φυτών συνολικά είναι πολύ διαφορετική. Σε όλες τις παρατηρούμενες ημέρες στο πειραματικό φυτό 2 παρουσιάζει πολύ χαμηλότερη ημερήσια ανάπτυξη βλαστού και φαίνεται να επηρεάζεται από τις κλιματικές συνθήκες σε μεγαλύτερο βαθμό από το πειραματικό φυτό 1 όπου είχε διπλάσια αθροιστική ανάπτυξη βλαστού από το πειραματικό φυτό 2 (Πίνακας 4.3). Χαρακτηριστικά, στις 17 Ιουνίου όπου το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών ήταν πολύ υψηλό φτάνοντας περίπου τα 4.5 kPa είχε αρνητική συνέπεια στην ανάπτυξη του βλαστού (Σχήμα 4.9).

Πίνακας 4.3. Η ημερήσια ανάπτυξη των φυτών στο υπόστρωμα της ελαφρόπετρας (DG) και η αθροιστική τους ανάπτυξη (CG).

	DG Πειραματικό φυτό (1)	DG Πειραματικό φυτό (2)
12-Ιουνίου	51	16
13-Ιουνίου	114	89
14-Ιουνίου	74	52
15-Ιουνίου	80	41
16-Ιουνίου	58	28
17-Ιουνίου	51	9
18-Ιουνίου	109	44
CG	537	279



Σχήμα 4.9. Εξέλιξη της διαμέτρου βλαστού στο υπόστρωμα της ελαφρόπετρας, όπου SDV(1) και SDV(2) είναι τα πειραματικά φυτά και οι πορεία του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών και της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

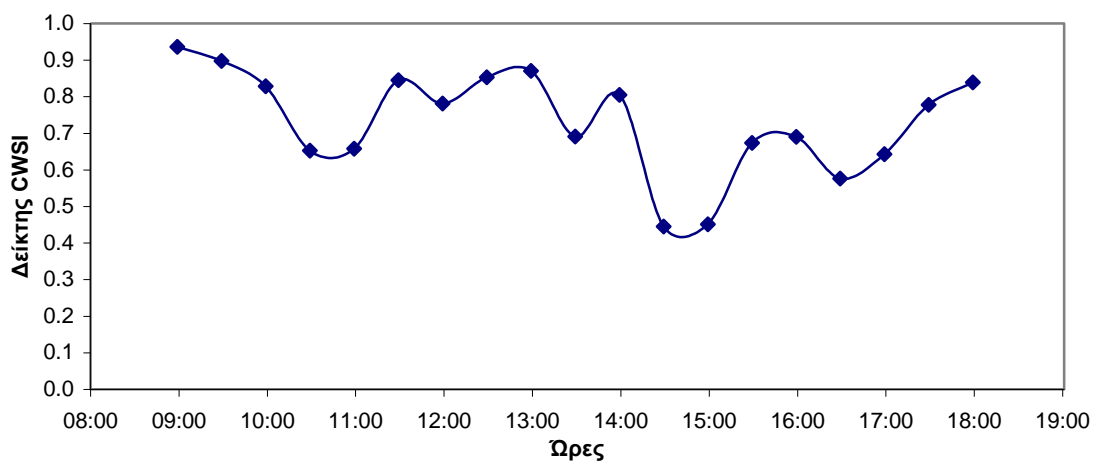


Σχήμα 4.10. Οι δείκτες μέγιστης και ελαχίστης ημερήσιας διαμέτρου βλαστού (MXSD, MNSD) και μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού (MDS) στα πειραματικά φυτά (1) και (2). Οι μεταχειρίσεις πραγματοποιήθηκαν στις 18 Ιουνίου.

4.1.2.6 Ο δείκτης CWSI στο υπόστρωμα της ελαφρόπετρας

Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζεται ο δείκτης υδατικής καταπόνησης για το φυτό στο οποίο έγινε η μεταχείριση της διακοπής άρδευσης κατά τις ώρες 09:00 έως 14:00. Το φυτό παρουσίασε συνθήκες υψηλής καταπόνησης εκτός από τις ώρες 14:30 έως 15:00 όπου η τιμή του δείκτη ήταν κοντά στο 0.45. Τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες ο δείκτης έφτασε πολλές φορές την τιμή γύρω στο 0.85 ενώ το απόγευμα ήταν γύρω στο 0.65-0.7.

Οι Gizas και Savvas (2007) παρατήρησαν ότι το αγγούρι και ειδικά η γυψοφύλλη είχαν φτωχή απόδοση όταν αναπτύχθηκαν σε λεπτά κλάσματα ελαφρόπετρας (0-2 mm) τοποθετημένα σε ρηχούς σάκους. Αυτό είναι αποτέλεσμα της υψηλής ευπάθειας στην περιορισμένη παροχή οξυγόνου. Αντίθετα, το λάχανο και ειδικά τα τριαντάφυλλα φάνηκαν να είναι πιο ανεχτικά στις διακυμάνσεις στην ισορροπία αέρα και νερού στη ζώνη των ριζών που προέρχονται από διαφορές στις φυσικές ιδιότητες του μέσου ανάπτυξης.

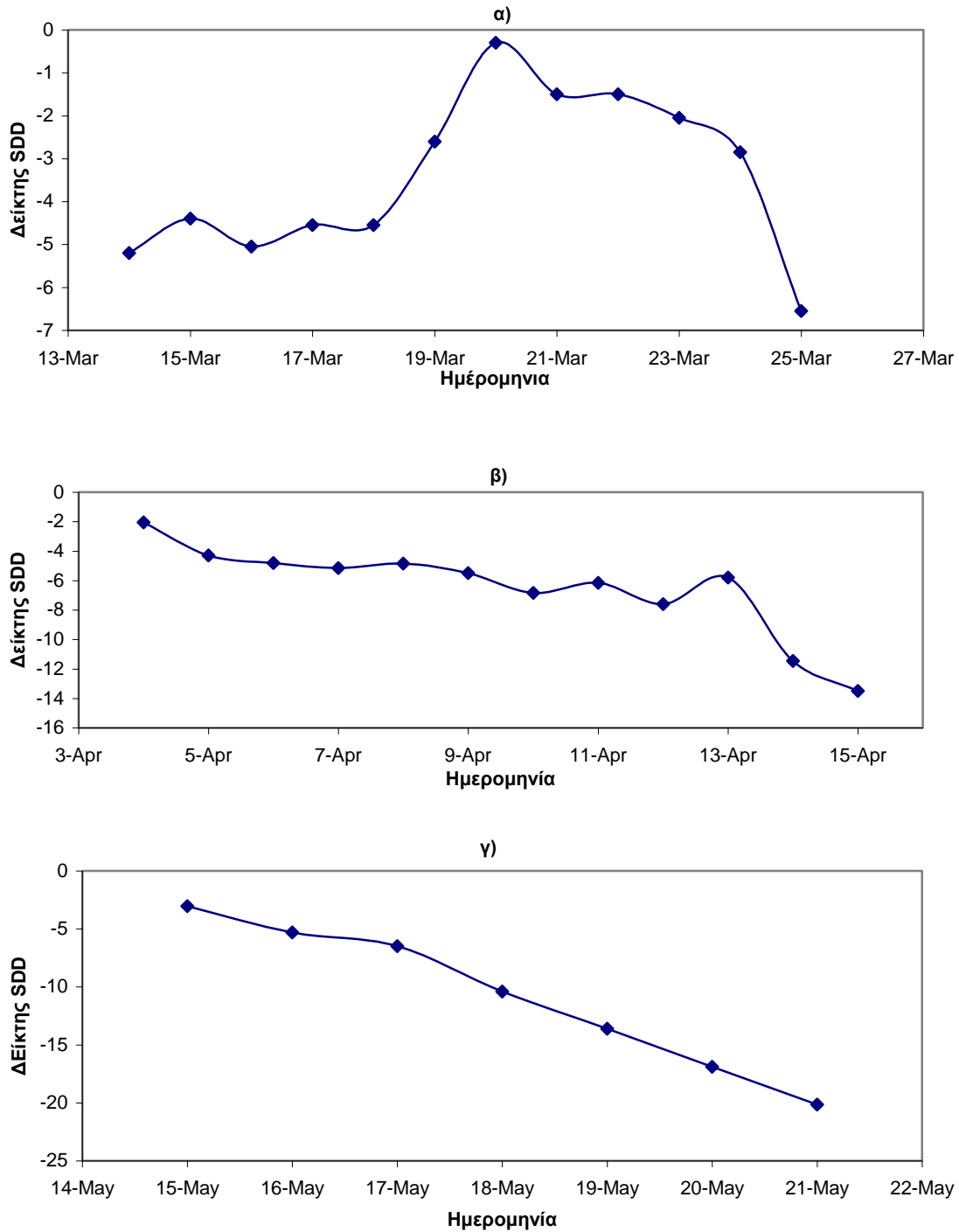


Σχήμα 4.11. Η πορεία του δείκτη υδατικής καταπόνησης CWSI υπολογισμένος για φυτό σε υπόστρωμα ελαφρόπετρας στις 18 Ιουνίου.

4.1.3 Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης SDD για τα φυτά στα υποστρώματα του θερμοκηπίου

Στο παρατηρούμενο φυτό στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα με κανονικό πρόγραμμα άρδευσης ο δείκτης SDD υπολογίσθηκε για τα μέσα μέχρι τέλη Μαρτίου. Όπως φαίνεται στο *Σχήμα 4.12α* το φυτό βρίσκεται σε συνθήκες υδατικής καταπόνησης μέχρι τις 20 Μαρτίου, ενώ τις επόμενες ημέρες υπάρχει η αντίστροφη κατάσταση όπου το φυτό δεν εμφανίζει σημάδια καταπόνησης. Στις αρχές ως τα μέσα Απριλίου ο υπολογισμός του δείκτη για φυτό σε υπόστρωμα περλίτη δείχνει ότι δεν υπάρχει φαινόμενο υδατικής καταπόνησης (*Σχήμα 4.12β*). Η εξέταση του φυτού στο υπόστρωμα της ελαφρόπετρας στα μέσα Μαΐου ως προς τον δείκτη SDD είχε το ίδιο αποτέλεσμα με αυτό του φυτού στον περλίτη μην εμφανίζοντας φαινόμενο υδατικής καταπόνησης (*Σχήμα 4.12γ*).

Οι Jackson et al. (1977) υπολόγισαν τον δείκτη για καλλιέργεια σιταριού εφαρμόζοντας διαφορετικά καθεστώτα άρδευσης σε 6 τμήματα εδάφους. Σε δυο τμήματα εφαρμόστηκαν ακραίες μεταχειρίσεις με ελάχιστη και υπερβολική άρδευση αντίστοιχα ενώ στα υπόλοιπα τμήματα η άρδευση ήταν ενδιάμεση των αναφερθέντων τμημάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι πορείες των δεικτών ήταν αντιπροσωπευτική για όλες τις υδατικές συνθήκες που υποβλήθηκαν τα τμήματα της καλλιέργειας.



Σχήμα 4.12. Ο δείκτης SDD υπολογισμένος για φυτά τομάτας για συνθήκες κανονικής άρδευσης σε α) υπόστρωμα πετροβάμβακα, β) υπόστρωμα περλίτη και γ) υπόστρωμα ελαφρόπετρας

Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Συμπεράσματα

Στις σύγχρονες θερμοκηπιακές μονάδες η εφαρμογή αυτόματων συστημάτων ελέγχου κλίματος και της παρακολούθησης της κατάστασης της καλλιέργειας δίνουν τη δυνατότητα για την ορθολογικότερη διαχείριση τους. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιώντας το σύστημα παρακολούθησης φυτού μελετήθηκε η απόκριση υδροπονικής καλλιέργειας τομάτας σε καθεστώς ελλειμματικής άρδευσης σε τρία διαφορετικά υποστρώματα (πετροβάμβακας, περλίτης, ελαφρόπετρα) καθώς και η επίδραση των περιβαλλοντικών παραγόντων.

Ως πρωτόκολλο εφαρμογής του συστήματος παρακολούθησης φυτού χρησιμοποιήθηκε η τεχνική λήψης απόφασης με τη μέθοδο δοκιμής και λάθους. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται η αξιολόγηση του νέου καθεστώτος που εφαρμόστηκε, για να αποφασιστεί έπειτα η επικύρωση ή την απόρριψή του. Στο συγκεκριμένο πείραμα εφαρμόστηκε καθεστώς ελλειμματικής άρδευσης και εξετάστηκε η επίδραση που είχε στα φυτά με στόχο την εφαρμογή στο μέλλον ενός διαφορετικού σχεδιασμού άρδευσης. Για τον έλεγχο υδατικής καταπόνησης στα φυτά επιλέχθηκαν οι δείκτες CWSI και SDD όπως επίσης και οι εξαγόμενοι δείκτες από μέτρηση της μεταβολής διαμέτρου βλαστού. Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Κάτω από δυσμενείς κλιματικές συνθήκες στο περιβάλλον του θερμοκηπίου το φυτό στο υπόστρωμα του περλίτη φάνηκε να επηρεάζεται λιγότερο. Επίσης, τις συγκεκριμένες ημέρες οι τιμές των εξαγόμενων δεικτών από τη μέτρηση της μεταβολής διαμέτρου βλαστού στα φυτά των υποστρωμάτων δεν μπορούσαν να δώσουν σωστές πληροφορίες προς ανάλυση. Το ίδιο συνέβη και ως προς τον δείκτη CWSI όπου οι τιμές ήταν εκτός των ορίων μεταξύ 0 και 1
- Η μεταχείριση που πραγματοποιήθηκε στο φυτό στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα φάνηκε να επηρεάζει την ανάπτυξη του αρνητικά σε σχέση με το φυτό ελέγχου. Ο δείκτης CWSI παρουσίασε τιμές υψηλής υδατικής καταπόνησης τις ώρες που εφαρμόστηκε η διακοπή της άρδευσης
- Στο υπόστρωμα του περλίτη η μελέτη δυο πειραματικών φυτών εμφάνισε διαφορές. Το φυτό που μεταχειρίστηκε με μεγαλύτερη διακοπή άρδευσης αποκρίθηκε αρνητικά ως προς την ανάπτυξη του βλαστού του, ενώ στο

αντίστοιχο φυτό με μικρότερη διακοπή άρδευσης δεν υπήρχε ουσιαστική διαφορά σε σχέση με το φυτό ελέγχου. Ο δείκτης CWSI για το φυτό με την αρνητική απόκριση υποδείκνυε παρουσία υδατικής καταπόνησης τις πρωινές ώρες αλλά και το απόγευμα έως τις βραδινές ώρες

- Στο υπόστρωμα της ελαφρόπετρας η μελέτη δυο φυτών έδειξε ότι κατά τη διάρκεια των ημερών πριν από την μεταχείριση το ένα από τα δυο φυτά επηρεάστηκε περισσότερο αρνητικά από τους κλιματικούς παράγοντες. Το ίδιο φυτό είχε μικρότερη ανάπτυξη βλαστού την ημέρα της μεταχείρισης και ο δείκτης CWSI υποδείκνυε συνθήκες υδατικής καταπόνησης σε όλη τη διάρκεια της ημέρας

Σε περιοριστικές συνθήκες περιβάλλοντος όπως η χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία και το χαμηλό έλλειμμα κορεσμού το φυτό στο υπόστρωμα του περλίτη επηρεάστηκε λιγότερο συγκριτικά με τα φυτά στα υποστρώματα του πετροβάμβακα και της ελαφρόπετρας. Όσο αναφορά τις μεταχειρίσεις, το φυτό στο υπόστρωμα της ελαφρόπετρας φάνηκε να έχει τη μεγαλύτερη αρνητική απόκριση, ενώ και στα άλλα δυο υποστρώματα παρατηρήθηκε μείωση της ανάπτυξης του βλαστού. Ωστόσο, η μεταχείριση που περιλάμβανε μικρότερη διακοπή άρδευσης στο φυτό του περλίτη είχε παραπλήσια ανάπτυξη με αυτήν του φυτού ελέγχου.

Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία οι εξαγόμενοι δείκτες από τη μέτρηση της διαμέτρου του βλαστού είναι ευαίσθητοι στις μεταβολές της υδατικής κατάστασης του φυτού και χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση συνθηκών υδατικής καταπόνησης. Στη συγκεκριμένη εργασία αξιολογήθηκαν οι δείκτες MXSD, MNSD και MDS. Όπως προέκυψε από τις μεταβολές της διαμέτρου βλαστού σε συνθήκες θερμοκρασιακής και υγρασιακής καταπόνησης, δεν ήταν δυνατός ο σωστός υπολογισμός των συγκεκριμένων δεικτών. Επίσης, στα μεταχειριζόμενα φυτά διαπιστώθηκαν τα εξής:

- Στο υπόστρωμα του πετροβάμβακα, διαπιστώθηκε ότι ο δείκτης MDS ήταν ο πιο ευαίσθητος στην υδατική καταπόνηση του φυτού
- Στο υπόστρωμα του περλίτη οι δείκτες που ανταποκρίθηκαν στην υδατική καταπόνηση του φυτού ήταν ο MDS και ο MNSD, όχι όμως ο MXSD
- Στο υπόστρωμα της ελαφρόπετρας, όπου και παρατηρήθηκε ο μεγαλύτερος βαθμός υδατικής καταπόνησης του φυτού, αποκρίθηκαν και οι τρεις δείκτες *άλλα* πιο έντονα οι MDS και MNSD

Το σύστημα παρακολούθησης φυτού μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τον παραγωγό. Υπάρχει η δυνατότητα συνεχούς καταγραφής δεδομένων για τη συνεχή παροχή πληροφοριών της κατάστασης της καλλιέργειας κάτι που είναι σημαντικό όσο αφορά την έγκαιρη παρέμβαση του παραγωγού στα διάφορα προβλήματα που μπορεί να δημιουργηθούν. Σημαντικό επίσης είναι το γεγονός ότι ο παραγωγός μπορεί να προχωρήσει σε αλλαγές του υπάρχοντος καθεστώτος ελέγχου και να έχει μέσω του συστήματος άμεση εμφάνιση των συνεπειών αυτής της αλλαγής στην καλλιέργεια. Έτσι, είναι εφικτή η διερεύνηση του καταλληλότερου καθεστώτος ελέγχου χωρίς να υπάρξει μη αναστρέψιμη ζημιά για την καλλιέργεια. Στο μέλλον πρέπει να συνεχιστεί η έρευνα ως προς τη λειτουργία του συστήματος σε ένα μεγάλο αριθμό καλλιεργειών και με τη μελέτη όσο μεγαλύτερου αριθμού φυτών εντός της καλλιέργειας, ώστε το σύστημα παρακολούθησης φυτού να ισχυροποιήσει τη δυναμική του.

Βιβλιογραφία

-
- Adams, S. R., Valdes, V. M., Hamer, P. J. C., Bailey, B. J., 2000. Spatial variation and comparison of yields of tomatoes grown in small experimental compartments with those in large commercial units. *Acta Horticulturae*, 534: 93-100
- Alkan, M., Dogan, M., 1998. Surface titrations of perlite suspensions. *J. Colloid Interface Sci.*, 207: 90–96
- Boertje, G. A., 1994. Chemical and physical characteristics of pumice as a growth medium. *Acta Horticulturae*, 401: 85–87
- Bures, S., Gago, M. C., Martinez, F. X., 1997a. Water characterization in granular materials. *Acta Horticulturae*, 450: 389–396
- Bures, S., Marfa, O., Perez, T., Tebar, J. A., Lloret, A., 1997b. Measure of substrates unsaturated hydraulic conductivity. *Acta Horticulturae*, 450: 297–304.
- Bussell, W. T., McKennie, S., 2004. Rockwool in horticulture, and its importance and sustainable use in New Zealand. *New Zealand J. Hort. Sci.*, 32: 29–37
- Challa, H., Bakker, J. C., 1995. Synthesis. In: Bakker, J.C., Bot, G.P.A, Challa, H. and Van de Braak, N.J., (Eds). *Greenhouse Climate Control: an integrated approach. Wageningen Pers. Wageningen: 97-100*
- Challinor, P. F., 1996. The use of pumice in horticulture. *In Proceedings of 9th International Congress Soilless Culture, St Helier, Jersey. ISOSC, Wageningen, The Netherlands. 101–104 pp.*
- Chalmers D. J, Burge G., Jerie P. H, Mitchell P. D., 1986. The mechanism of regulation of Bartlett pear fruit and vegetative growth by irrigation withholding and regulated deficit irrigation. *Journal of the American Society of Horticultural Science*, 111: 904–907
- Chalmers D. J, Mitchell P. D, Vanheek L., 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *Journal of the American Society of Horticultural Science*, 106: 307–312
- Chamont, S., Strainchamps D., Thunot S., 1995. Short- and Long-term Stomatal Responses to Fluctuations in Environment in Southern European Greenhouses. *Annals of Botany*, 75: 39-47
- da Silva, F. F., 1991. Static and dynamic characterization of container media for irrigation management. *M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, The Hebrew University of Jerusalem (in English)*

- da Silva, F. F., Wallach, R., Chen, Y., 1995. Hydraulic properties of rockwool slabs used as substrates in horticulture. *Acta Horticulturae*, 401: 71–75
- Dogan, M. and Alkan, M., 2004. Some physiochemical properties of perlite as an adsorbent. *Fresenius Environ. Bull.*, 13: 252–257.
- Dry P. R., Loveys B. R., 1998. Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 4: 140–148
- Ehrler, W. L., 1973. Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. *Agronomy Journal*, 65: 404–409
- Fernandez, J.E., Cuevas, M.V., 2010. Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 135–151
- Geiger D. R., Servaites J. C., 1991. Carbon allocation and responses to stress. In: Mooney H. A., Winner W. E., Pell E. J, (Eds). Responses of plants to multiple stresses. *London, Academic Press*: 103-127.
- Gardner, B. R., Blad B. L., Garrity D. P., Watts D. P., 1981. Relationships between crop temperature, grain yield, evapotranspiration and phenological development in two hybrids of moisture stressed sorghum. *Irrigation Science*, 2: 213-224
- 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
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Mata, M., Girona, J., Cohen, M., 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 124 (4): 437–444
- Grillas, S., Lucas, M., Bardopoulou, E., et al., 2001. Perlite based soilless culture systems: current commercial applications and prospects. *Acta Horticulturae*, 548: 105–113
- Gul, A., Erogul, D. and Ongun, A. R., 2005. Comparison of the use of zeolite and perlite as substrate for crisp-head lettuce. *Sci. Hort.*, 106: 464–471
- Hanna, H. Y., 2005. Properly recycled perlite saves money, does not reduce greenhouse tomato yield, and can be re-used for many years. *HortTechnology*, 15: 342–345

-
- Hanna, H. Y., Smith, D. T., 2002. Recycling perlite for more profit in greenhouse tomatoes. *Louisiana Agr.*, 45: 9
- Hope, A. S., Jackson, R. D., 1989. Early morning canopy temperatures for evaluating water stress in a wheat crop. *Journal of the American Water Resources Association*, 25(5): 1009-1014
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Jr, Reginato, R. B. and Hatfield, J. L., 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24(1): 45-55
- Jackson, R. D., Idso S. B., Reginato R. B., Pinter P. J., Jr, 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4): 1133-1138
- Jackson, R. D., Pinter P. J., Jr, Reginato R. B., Idso S. B., 1986. Detection and Evaluation of Plant Stresses for Crop Management Decisions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 24(1): 99-106
- Jackson, R. D., Reginato, R. J., Idso, S. B., 1977. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13: 651–656
- Jones, H.G., 2004a. Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology. *Advances in Botanical Research*, 41: 107-163, 133 pp
- Jones, H.G., 2004b. Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55: 2427-2436
- Jones, H.G., 2007. Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 58(2): 119-130
- Jolliet, O., 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouse. *Journal of agricultural engineering research*, 57: 23-27
- Kacira, M., Ling, P.P., Short T. H., 2002. Establishing crop water stress index (CWSI) threshold values for early, non-contact detection of plant water stress. *American Society of Agricultural Engineers*, 45(3): 775-780
- Katsoulas, N., Savvas, D., Tsirogiannis, I., Merkouris, O., Kittas, C., 2009. Response of an eggplant crop grown under Mediterranean summer conditions to greenhouse fog cooling. *Scientia Horticulturae*, 123: 90–98

- Kipp, J. A., Wever, G., de Kreij, C., 2000. International Substrate Manual. The Netherlands: *Elsevier*
- Kirkham, M. B., 2005. Principles of soil and plant water relations. *Elsevier Academic Press*
- Kopyt, M., Ton, Y., Ben-Ner, Z., Bachrach, A., 2001. A trial of the Phytomonitoring technique for roses. *Acta Horticulture*, 547: 205-212
- Mahan, J.R, Burke J.J, Wanjura, D.F., Upchurch, D.R, 2005. Determination of temperature and time thresholds for BIOTIC irrigation of peanut on the Southern High Plains of Texas. *Irrigation Science*, 23: 145–152
- Monteith, J. L., Szeicz, G., 1962. Radiative temperature in the heat balance of natural surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 88(378):496-507
- Moriana, A., Fereres, E., 2002. Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees. *Irrigation Science*, 21: 83–90
- Myster, J., Moe, R., 1995. Effect of diurnal temperature alternations on plant morphology in some greenhouse crops-a mini review. *Scientia Horticulturae*, 62: 205-215
- Papadopoulos, A. P., Hao, X., Tu, J. C., Zheng, J., 1999. Tomato production in open or closed rockwool culture systems with NFT or rockwool nutrient feedings. *Acta Horticulturae*, 481: 89–91
- Raviv, M., Lieth, J. H., 2008. Soilless Culture: Theory and Practice. First edition, *Elsevier*
- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A., 1999. The effect of hydraulic characteristics of volcanic material on yield of roses grown in soilless culture. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 124: 205–209
- Scholz, F. G., Bucci, S. J., Goldstein, G., Meinzer, F. C., Franco, A. C., Miralles-Wilhelm, F., 2008. Temporal dynamics of stem expansion and contraction in savanna trees: withdrawal and recharge of stored water. *Tree Physiology* (28): 469-480.
- Smith, D. L. (1987). Rockwool in Horticulture. London, UK: *Grower Books*.
- Stoll M., Dry P., Loveys B., Stewart D., McCarthy M. ,2000. Partial rootzone drying: effects on root distribution and commercial application of a new irrigation technique. *Australian and New Zealand Wine Industry Journal*, 15: 74-76

-
- Thornley, J. H. M., Hurd, R. G., 1974. An analysis of the growth of young tomato plants in water culture at different light integrals and CO₂ concentrations II. A mathematical model. *Annals of Botany*, 38(2): 389-400
- Tomos, D., 2000. The plant cell pressure probe. *Biotechnology Letters*, 22: 437-442
- Ton, Y., 1997. Phytomonitoring system. *Proc. IV International congress on new agricultural technologies. Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico 16-19 April*. 89-95 pp.
- Ton, Y., Nilov, N., and Kopyt, M., 2001. Phytomonitoring: The new information technology for improving crop production. *Acta Horticulture*, 562: 257-262
- Ton, Y., Kopyt, M., 2003a. Phytomonitoring: A bridge from sensors to information technology for greenhouse control. *Acta Horticulturae*, 614: 639-644
- Ton, Y., Kopyt, M., 2003b. Phytomonitoring information and decision support system for crop growing. *Proceedings of second international symposium on intelligent information technology in agriculture (ISITA2003)*. 39-43 pp
- Tu, J. C., Papadopoulos, A. P., Hao, X., Zheng, J., 1999. The relationship of Pythium root rot and rhizosphere microorganisms in a closed circulating and an open system in rockwool culture of tomato. *Acta Horticulturae*, 481: 577-583
- Turner, N. C., 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and soil*, 58: 339-366
- Udink ten Cate, A. J., Bot, C. P. A., Van Dixtorn, J. J., 1978. Computer control of greenhouse climates. *Acta Horticulturae*, 87: 265-272
- Van Bavel, C.H.M., Ehrlar, W.L., 1968. Water Loss from a Sorghum Field and Stomatal Control. *Agronomy Journal*, 60: 84-86
- Van Straten, G., Van Willigenburg, G., Van Henten, E., Van Ooteghem, R., 2011. Optimal control of greenhouse cultivation. *Taylor and Francis Group, LLC*
- Wever, G., van Leeuwen, A. A., 1995. Measuring mechanical properties of growing media and the influence of cucumber cultivation on these properties. *Acta Horticulturae*, 401: 27-34
- Wever, G., van Leeuwen, A. A., van der Meer, M. C., 1997. Saturation rate and hysteresis of substrates. *Acta Horticulturae*, 450: 287-295
- Wilson, G. C. S., 1988. The effect of various treatments on the yield of tomatoes in reused perlite. *Acta Horticulturae*, 221: 379-382
- Wolf, B., 1996. Diagnostic techniques for improving crop production. *The Haworth Press, NY*: 401pp

- Zhang J., Duan A., Meng Z., LIU Z., 2006. Suitability of stem diameter variations as an indicator of water stress of cotton. *Agricultural Sciences in China*, 5(5): 356-362
- Κατσούλας, Ν., 2002. Επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη διαπνοή τριανταφυλλιάς υπό κάλυψη. *Διδακτορική διατριβή*, Γεωργικό Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 216 pp
- Κατσούλας, Ν., Κίττας, Κ., Μπαρτζάνας, Θ., 2011. Ενεργειακές ανάγκες και εξοικονόμηση ενέργειας στο θερμοκήπιο. *Γεωργία και κτηνοτροφία*, 10: 54-57
- Κίττας, Κ., Κατσούλας, Ν., Μπαρτζάνας, Θ., 2011. Δυνατότητες και προοπτικές εξάπλωσης θερμοκηπίων στην Ελλάδα. *Γεωργία και κτηνοτροφία*, 10: 19-28
- Μαυρογιαννόπουλος, Γ. Ν., 2005. Θερμοκήπια. Δ΄ έκδοση, Αθήνα: *Εκδόσεις Σταμούλη*
- Μαυρογιαννόπουλος, Γ. Ν., 2011. Η άρδευση των καλλιεργειών στα ανοιχτά υδροπονικά συστήματα. *Γεωργία και κτηνοτροφία*, 10: 100-106
- Σάββας, Δ., 2011. Συστήματα καλλιέργειας εκτός εδάφους. *Γεωργία και κτηνοτροφία*, 10: 82-98
- Χουδάλης, Π., 2011. Αυτοματισμοί θερμοκηπίων: Συστήματα αυτόματου ελέγχου κλίματος, με παράλληλο έλεγχο άρδευσης-υδρολίπανσης. *Γεωργία και κτηνοτροφία*, 10: 46-52



