



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Αυτοματισμοί στις Αρδεύσεις, στις Γεωργικές Κατασκευές και στην
Εκμηχάνιση της Γεωργίας»

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος

Μεταπτυχιακή Διατριβή



«Χρήση αισθητήρων παρακολούθησης της ανάπτυξης και υδατικής
καταπόνησης των φυτών για υποβοήθηση της διαχείρισης του κλίματος και της
άρδευσης καλλιεργειών υπό κάλυψη»

Επιβλέπων Καθηγητής: **Κωνσταντίνος Κίττας**

Δερμάτη Κανέλλη

Βόλος, 2013

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**«Αυτοματισμοί στις Αρδεύσεις, στις Γεωργικές Κατασκευές και στην
Εκμηχάνιση της Γεωργίας»**

Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος

Μεταπτυχιακή Διατριβή : Δερμάτη Κανέλλη

**«Χρήση αισθητήρων παρακολούθησης της ανάπτυξης και υδατικής
καταπόνησης των φυτών για υποβοήθηση της διαχείρισης του κλίματος και της
άρδευσης καλλιεργειών υπό κάλυψη»**

Η τριμελής επιτροπή αποτελείται από τους :

- **Κωνσταντίνος Κίττας** (επιβλέπων),
Γεωργικές κατασκευές, Καθηγητής Π.Θ.
- **Νικόλαος Κατσούλας** (μέλος),
Γεωργικές Κατασκευές με έμφαση στα θερμοκήπια. Επίκ. Καθηγητής ΠΘ
- **Θωμάς Μπαρτζάνας** (μέλος),
Ερευνητής Β, Γεωργική Μηχανική με έμφαση στις Γεωργικές Κατασκευές

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θεωρώ υποχρέωση μου να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων Καθηγητή μου Κωνσταντίνο Κίττα, Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος και Διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών για την διδασκαλία του, την πολύτιμη βοήθεια του και την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το θέμα. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική στην ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου Νικόλαο Κατσούλα, Επίκουρο καθηγητή στο Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών για την ουσιαστική βοήθεια που μου παρείχε με τη διδασκαλία του, για την αμέριστη συμπαράσταση του καθώς και για τις σημαντικές διορθώσεις και επισημάνσεις που ήταν απαραίτητες για την αριότερη οργάνωση του πειράματος και την συγγραφή της παρούσας διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Θωμά Μπαρτζάνα, Β' ερευνητή του ΕΚΕΤΑ για την συμμετοχή του στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή και την διόρθωση αυτής της εργασίας.

Τέλος, χρέος μου θεωρώ να ευχαριστήσω τους γονείς μου Γεώργιο και Μαρία Δερμάτη, για την ανιδιοτελή ηθική και οικονομική υποστήριξη τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

*«Στη μνήμη της γιαγιάς μου,
Κανέλλης Τζερεφού»*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εκτίμηση της υδατικής κατάστασης των φυτών, δίνει την δυνατότητα διαχείρισης της άρδευσης. Δείκτες όπως ο CWSI και δείκτες μεταβολής βλαστού (SDVI) μπορούν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για την υδατική κατάσταση των φυτών. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η εύρεση δεικτών που θα μας βοηθήσουν στην διαχείριση της άρδευσης καλλιεργειών υπό κάλυψη. Κατά το πρώτο μέρος του πειράματος, μετρήθηκαν οι περιβαλλοντικές συνθήκες και η μεταβολή της διαμέτρου του βλαστού σε αναπτυγμένα φυτά τομάτας που καλλιεργούνταν σε κλειστό και ανοιχτό υδροπονικό σύστημα. Αντίστοιχες μετρήσεις έγιναν κατά το δεύτερο μέρος του πειράματος σε νεαρά φυτά τομάτας που αναπτύσσονταν σε δύο τύπους ημίκλειστου υδροπονικού συστήματος (12,5 και 25 mmol/L Na) με διαφορετική συγκέντρωση αλάτων. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν οι αισθητήρες του Συστήματος Παρακολούθησης Φυτών (Phytomonitoring). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει κάποια συσχέτιση μεταξύ της υδατικής καταπόνησης των φυτών και της μεταβολής της διαμέτρου του βλαστού τους. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της αλατότητας στο υπόστρωμα των καλλιεργειών αποτελεί περιοριστικό παράγοντα αύξησης της διαμέτρου του βλαστού των φυτών.

ABSTRACT

Indicators such as the CWSI and SDV indicators can provide information on the water status of plants. The purpose of this study is to present indicators that can be useful in irrigation crop management. The first part of the experiment included the measurement of environmental conditions and the change of stem diameter in mature tomato plants grown in closed and open hydroponic circuit. Similar measurements were made in the second part of the experiment in young tomato plants grown in two types of semi- closed hydroponic circuit (12.5 and 25 mmol / L Na) with different salinity. Phytomonitoring sensors were used to evaluate crop response in climate changes. The results showed that there is a correlation between water stress and the change in stem diameter of plants. Furthermore, it was observed that the salinity and the VPD constitute limiting factors in the increase of stem diameter.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΓΕΝΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1. ΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	9
1.2. ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ-ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ.....	12
1.3. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ	14
1.4. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ- ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ	16
1.5. ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	17
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	18
2.1. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΖΟΥΝ ΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	18
2.2. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΥΞΗΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ 19	
2.2.1. Η ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	19
2.2.2. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ	21
2.2.2.1. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ	24
2.2.3. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟ ΈΛΛΕΙΜΜΑ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΤΟΥ ΑΕΡΑ.....	25
2.2.4. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	27
2.3. ΔΕΙΚΤΕΣ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ	29
2.3.1. Ο ΗΜΕΡΗΣΙΟΣ ΒΑΘΜΟΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ (SDD).....	31
2.3.2. Η ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ (TSD).....	32
2.3.3. Ο ΗΜΕΡΗΣΙΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ (WSDI)	33
2.3.4. Ο ΔΕΙΚΤΗΣ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ (CWSI).....	34
2.3.5. Ο ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ Η ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ	37
2.4. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΡΔΕΥΣΗΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ	39
2.4.1. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΦΥΤΩΝ -PHYTOMONITORING	39
2.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	44
3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	46
3.1. ΤΟΠΟΣ ΚΑΙ ΕΠΟΧΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ	46
3.2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ-ΒΑΣΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ 47	
3.2.1. ΑΕΡΙΣΜΟΣ.....	47
3.2.2. ΘΕΡΜΑΝΣΗ	48
3.2.3. ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	48
3.3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΟΡΓΑΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ	49
3.3.1. ΔΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	49
3.3.2. ΔΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΥΓΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΑ	50
3.3.3. ΔΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΒΛΑΣΤΟΥ	51
3.3.4. ΔΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΡΟΗΣ ΧΥΜΟΥ	52
3.3.5. ΔΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΦΥΛΛΟΥ	53
3.3.6. ΔΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΚΑΡΠΟΥ	53
3.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΔΕΙΚΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	54
3.4.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΛΛΕΙΜΜΑΤΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ ΤΟΥ ΑΕΡΑ (VPD).....	54
3.4.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΔΕΙΚΤΗ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ (CWSI)	55
3.4.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΠΝΟΗΣ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ.....	56
3.4.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΒΛΑΣΤΟΥ	56
3.5. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΙΜΩΝ	58

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	59
4.1. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΒΛΑΣΤΟΥ ΦΥΤΩΝ ΤΟΜΑΤΑΣ.....	60
4.1.1. ΔΕΙΚΤΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΒΛΑΣΤΟΥ (SDV INDICATORS)	67
4.1.2. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΙ MDS.	70
4.1.3. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ VPD ΚΑΙ MDS	72
4.1.4. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΔΙΑΠΝΟΗΣ ΚΑΙ MDS	78
4.1.5. Ο CWSI ΓΙΑ ΚΑΘΑΡΗ ΚΑΙ ΣΥΝΝΕΦΙΑΣΜΕΝΗ ΜΕΡΑ.	79
4.1.5.1. ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΟΥ CWSI ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΒΛΑΣΤΟΥ	82
4.2. ΡΟΗ ΧΥΜΟΥ: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ ΥΔΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΦΥΤΩΝ	84
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	86
ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	96

1. Γενική Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας, η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού και οι ολοένα αυξανόμενες διατροφικές απαιτήσεις, αποτελούν σημαντικά κίνητρα για την αύξηση και την βελτίωση των αγροτικών προϊόντων. Τα θερμοκήπια αποτελούν μέσα παραγωγής λαχανοκομικών και ανθοκομικών προϊόντων καθ' όλη την διάρκεια του έτους, καθώς προσφέρουν την δυνατότητα ελέγχου του κλίματος.

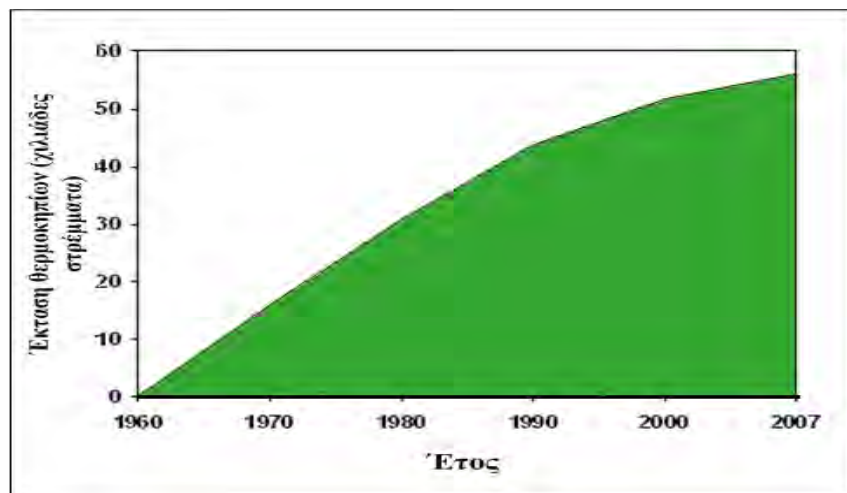
Η εισαγωγή συστημάτων αυτόματου ελέγχου στα θερμοκήπια αποτέλεσε μια σημαντική εξέλιξη στο χώρο της γεωργίας. Η «βιομηχανία» παραγωγής αγροτικών προϊόντων αποτελεί πια μια πραγματικότητα. Παρ' όλα αυτά, η χώρα μας εμφανίζει μια καθυστέρηση στο τομέα των θερμοκηπίων σε σχέση με άλλες μεσογειακές χώρες, όπως η Ισπανία και η Ιταλία, ενώ διαθέτει όλες τις προϋποθέσεις ανάπτυξης τους. Το ήπιο κλίμα, η γεωγραφική θέση της χώρας και η κατακερματισμένη γεωργική γη σε πολλά σημεία της Ελλάδας, αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που ευνοούν την ανάπτυξη των θερμοκηπιακών καλλιεργειών, στην πρωτογενή παραγωγή.

Παραδοσιακά, τα θερμοκηπιακά προϊόντα που καλλιεργούνταν στην χώρα μας αποτελούσαν συμπλήρωμα των καλλιεργειών αγρού. Πιθανόν, αυτή είναι και η αιτία της αργής εξέλιξης των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων. Τα τελευταία χρόνια όμως, η ανάγκη για την ανάπτυξη της πρωτογενούς παραγωγής, ειδικά με την οικονομική κρίση που διέρχεται η χώρα μας, φαίνεται ότι θα δώσει ένα προβάδισμα, στην εξέλιξη και τον εκσυγχρονισμό των θερμοκηπιακών μονάδων της Ελλάδας, που υστερούν. Στην Ελλάδα ελάχιστες είναι οι θερμοκηπιακές μονάδες που λειτουργούν με υδροπονικές εγκαταστάσεις παρά το γεγονός ότι όλες οι έρευνες δείχνουν ότι είναι αποδοτικότερες σε σχέση με τις συμβατικές.

Στη παρούσα μελέτη θα εξεταστεί το ζήτημα της υδατικής καταπόνησης φυτών τομάτας σε καλλιέργειες υπό κάλυψη. Η σωστή διαχείριση του νερού άρδευσης φαίνεται να είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, καθώς έχει άμεση επίδραση στην παραγωγή και στην ποιότητα των αγροτικών προϊόντων. Επίσης η υπερκατανάλωση αρδευτικού νερού αυξάνει το κόστος παράγωγής και εντείνει το φαινόμενο της λειψυδρίας.

1.1. Τα θερμοκήπια στην Ελλάδα

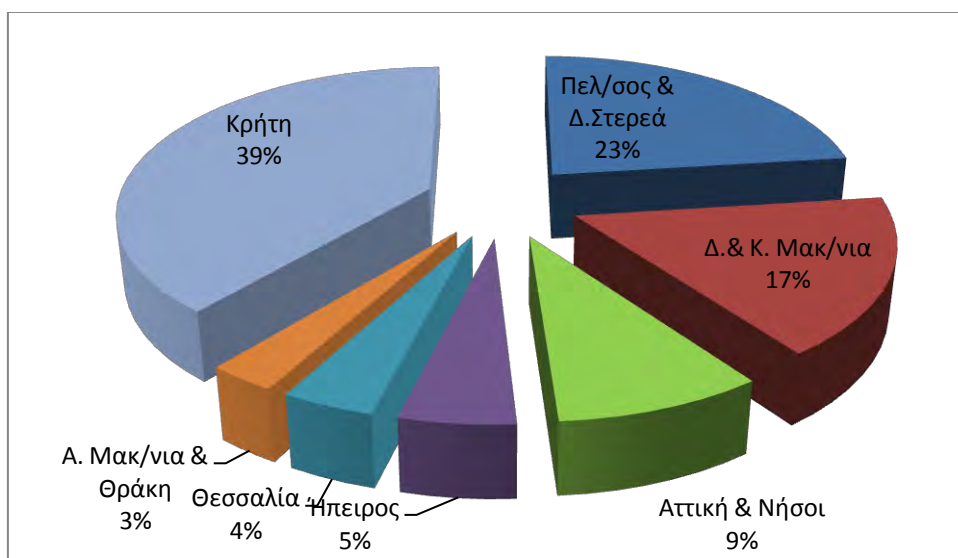
Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες φαίνεται να αποτελούν έναν από τους σπουδαιότερους παράγοντες στον γεωργικό χώρο παγκοσμίως. Στη χώρα μας, οι θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις θεωρούνται πεπαλαιωμένες και ταυτόχρονα καλύπτουν πολύ μικρή έκταση, σε σχέση με τις δυνατότητες που προσφέρει η χώρα. Στην Ελλάδα, η επέκταση των θερμοκηπίων ξεκίνησε μετά την δεκαετία του '60 και μέχρι το 1982 ήταν εντυπωσιακή, καθώς σχεδόν δεκαπλασιάστηκε. Σε αυτό βέβαια συντέλεσε και η γεωργική πολιτική που ακολουθούσε τότε το κράτος και ενθάρρυνε την προώθηση των καλλιεργειών αυτών. Αξιοσημείωτο είναι, ότι τα θερμοκήπια τα τελευταία χρόνια αυξήθηκαν ελάχιστα (Σχήμα 1.1.).



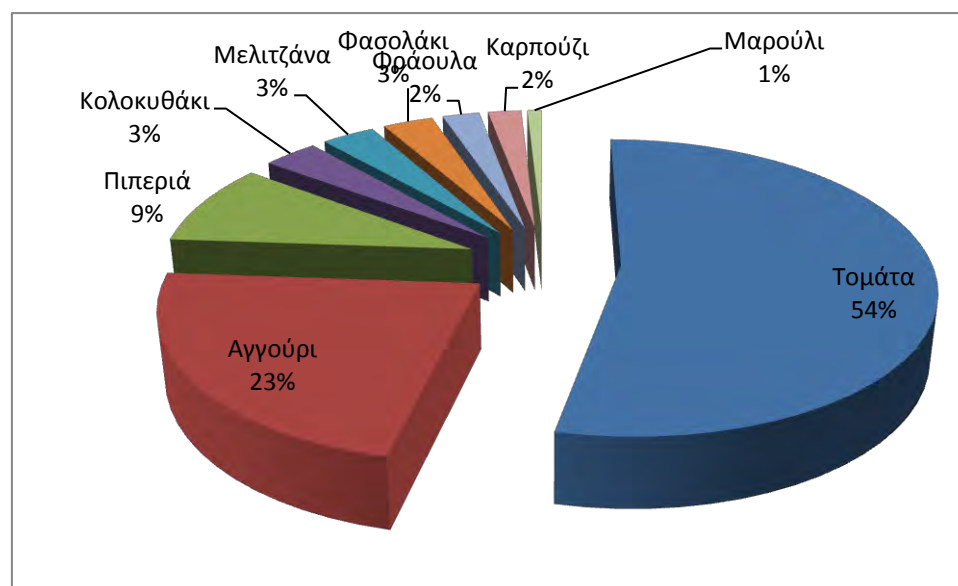
Σχήμα 1.1. Εξέλιξη των θερμοκηπίων στην Ελλάδα από το 1960 έως το 2007

(Πηγή ΕΛ.ΣΤΑΤ).

Στην Ελλάδα, το μεγαλύτερο ποσοστό καλλιεργειών υπό κάλυψη παράγεται στην Κρήτη που όπως φαίνεται καλύπτει σχεδόν το 40% (Σχήμα 1.2.) της εγχώριας παραγωγής. Στην συνέχεια ακολουθεί η Πελοπόννησος με την Δυτική Στερεά, με ποσοστό 23% ενώ η Ανατολική Μακεδονία και Θράκη εμφανίζουν το χαμηλότερο ποσοστό παραγωγής καλλιεργειών υπό κάλυψη. Τα λαχανοκομικά είδη είναι εκείνα που καλλιεργούνται επί το πλείστον με την τομάτα να ανέρχεται σε ποσοστό μεγαλύτερο από το 54% ενώ το μαρούλι, η φράουλα και το καρπούζι καταλαμβάνουν πολύ μικρά ποσοστά της εγχώριας παραγωγής. (Σχήμα 1.3).

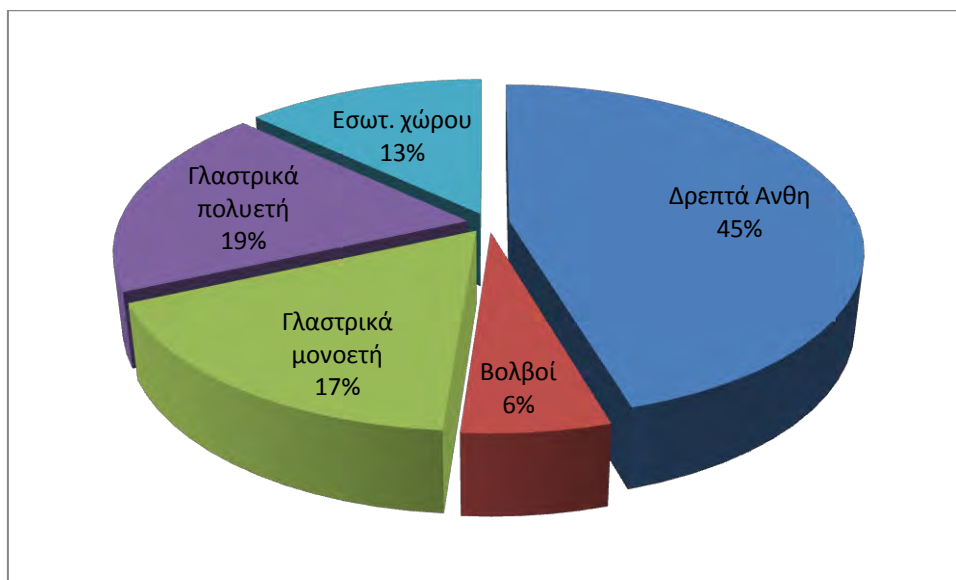


Σχήμα 1.2. Παρουσίαση παραγωγής θερμοκηπιακών καλλιεργειών στην Ελλάδα.



Σχήμα 1.3. Παρουσίαση των ποσοστών των καλλιεργούμενων κηπευτικών ειδών σε θερμοκήπια στην Ελλάδα.

Τέλος, ελάχιστες θερμοκηπιακές εκτάσεις στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ανθοκομικών προϊόντων. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η ποσοτική κατανομή των διάφορων τύπων ανθοκομικών ειδών που παράγονται στην Ελλάδα (Σχήμα 1.4.).



Σχήμα 1.4. Παρουσίαση των ποσοτών των καλλιεργούμενων ανθοκομικών ειδών σε θερμοκήπια στην Ελλάδα

1.2. Υπάρχουσα κατάσταση-Προβλήματα

Η αργή εξέλιξη των θερμοκηπίων στη Ελλάδα αποτελεί συνέπεια πολλών παραγόντων –προβλημάτων, που αντιμετωπίζουν σήμερα οι παραγωγοί. Οι δυνατότητες που προσφέρει οι χώρα για την ανάπτυξη του τομέα των θερμοκηπίων, υποδηλώνει ότι υπάρχουν πολλά περιθώρια ανάπτυξης. Η παραγωγή των προϊόντων στη χώρα μας γίνεται σε εγκαταστάσεις (Εικ.1.1.), που απέχουν πολύ από τις αντίστοιχες εκσυγχρονισμένες εγκαταστάσεις (Εικ. 1.2.) άλλων ευρωπαϊκών χωρών (π.χ. Ολλανδία), οι οποίες σημειώνουν ποσοτική και ποιοτική ανάπτυξη στην παραγωγή των θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Χαρακτηριστικά, τα θερμοκήπια στην Ελλάδα υστερούν σε στοιχειώδη εξοπλισμό, όπως συστήματα θέρμανσης δροσισμού και αερισμού, με αποτέλεσμα να μην δημιουργούνται εντός του θερμοκηπίου, ιδανικές συνθήκες για την ανάπτυξη των φυτών.

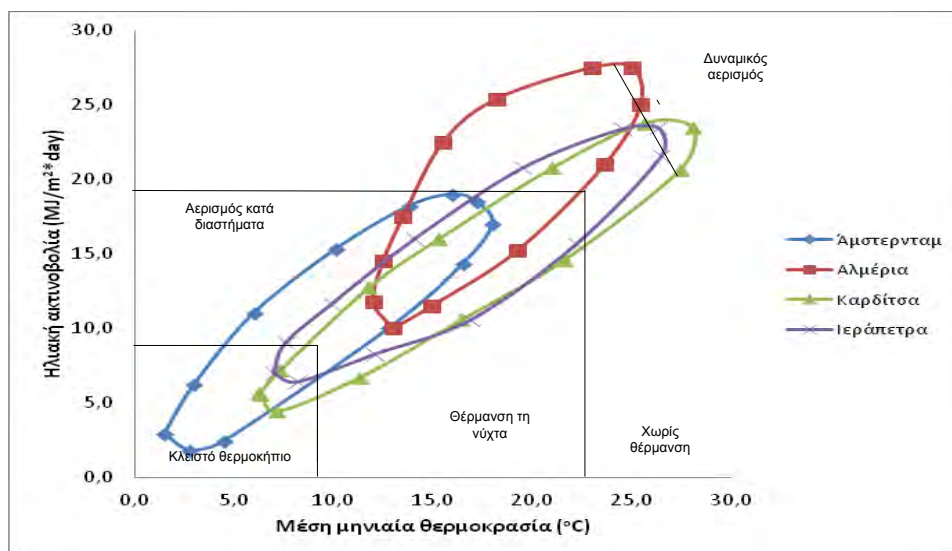


Εικόνα 1.1. Φωτογραφικό υλικό, από θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις τομάτας στην Ιεράπετρα Λασιθίου



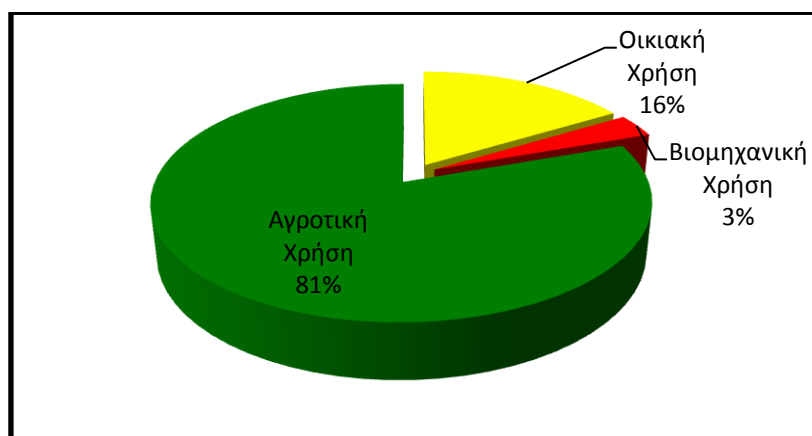
Εικόνα 1.2. Φωτογραφικό υλικό από τις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις της εταιρίας Sunny Tom στην Ολλανδία

Αν και η χώρα μας χαρακτηρίζεται από ήπιο κλίμα, οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες χρίζουν κατάλληλου εξοπλισμού, για την βελτίωση του μικροκλίματος. Στο Σχήμα 1.5., που κατασκευάστηκε από κλιματικά δεδομένα (θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία) διαφόρων πόλεων, μπορούμε να διαπιστώσουμε την ανάγκη ενσωμάτωσης διαφόρων συστημάτων με σκοπό την δημιουργία ιδανικών συνθηκών ανάπτυξης των καλλιεργούμενων φυτών.



Σχήμα 1.5. Αναγκαίες παρεμβάσεις για την δημιουργία κατάλληλου κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου σε τέσσερις ευρωπαϊκές πόλεις.

Η άποψη μου είναι ότι οι θερμοκηπιακές επιχειρήσεις πρέπει να είναι βιώσιμες, η αδυναμία εκσυγχρονισμού των θερμοκηπίων στην Ελλάδα, μάλλον στηρίζεται στο γεγονός της πενιχρής κρατικής βοήθειας. Χαρακτηριστικά, σε άρθρο του Διαμαντόπουλου (Γεωργία – Κτηνοτροφία, 2008), τα προβλήματα των Ελλήνων παραγωγών θερμοκηπιακών προϊόντων είναι το υψηλό κόστος καλλιέργειας και η έλλειψη υποδομών. Οι Έλληνες παραγωγοί τονίζουν ότι η ανυπαρξία αγροτικού οδικού δικτύου, το υψηλό κόστος πετρελαίου και το ανεβασμένο ΦΠΑ για τις πρώτες ύλες αποτελούν τροχοπέδη ανάπτυξης του τομέα των θερμοκηπίων στη χώρα μας. Ταυτόχρονα σημαντικό πρόβλημα αποτελεί και η δυνατότητα υδροδότησης σε ορισμένες περιοχές (π.χ. Λαφονήσι). Στην Ελλάδα υπολογίζεται ότι περίπου το 80% του νερού καταναλώνεται για αγροτική χρήση (Σχήμα 1.6.), αυτό σημαίνει ότι απαιτείται μελέτη για την ορθή διαχείριση του, τόσο για οικολογικούς όσο και για περιβαλλοντικούς λόγους.



Σχήμα 1.6. Χρήσεις νερού στην Ελλάδα

Ένα επιπλέον πρόβλημα που έχουν να αντιμετωπίσουν οι θερμοκηπιακές επιχειρήσεις, είναι ο ισχυρός ανταγωνισμός από άλλες χώρες (Ισπανία, Τουρκία, Μαρόκο, Ολλανδία), που αυτή την εποχή κυριαρχούν, παράγοντας μεγάλες ποσότητες προϊόντων που διατίθενται στις αγορές σε ιδιαίτερα χαμηλές τιμές. Ελπιδοφόρο είναι πάντως το γεγονός ότι η Ελλάδα διαθέτει ιδανικό κλίμα για την παραγωγή θερμοκηπιακών προϊόντων, καθώς και τεχνογνωσία από εξειδικευμένα εργαστήρια.

1.3. Διαχείριση του κλίματος και της άρδευσης

Οι κυριότεροι παράγοντες που επιδρούν, στην δημιουργία του περιβάλλοντος εντός του θερμοκηπίου είναι οι κλιματικοί παράγοντες. Αυτοί είναι, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του αέρα, η σχετική υγρασία του αέρα και η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα. 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 και αποτελεί σπουδαίο παράγοντα στην ανάπτυξη και εξέλιξη των φυτών.

Η ανάγκη για την δημιουργία συστημάτων αυτόματου ελέγχου του θερμοκηπίου, οφείλεται κυρίως στην αύξηση του μεγέθους των εγκαταστάσεων, στην αύξηση του κόστους παραγωγής και στην ανάγκη παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων καλλιεργούμενων προϊόντων σε υψηλή ποιότητα.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας, έχει ανοίξει εδώ και αρκετό καιρό δρόμους προς τον πλήρη έλεγχο των κλιματικών συνθηκών εντός του θερμοκηπίου. Τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί και κυκλοφορήσει στην αγορά διάφορα εξελιγμένα συστήματα αυτόματου ελέγχου και ρύθμισης του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, βασισμένα στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών υπολογιστών και στις δυνατότητες προγραμματισμού. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται έξυπνος έλεγχος στα διάφορα συστήματα του θερμοκηπίου. Τα συστήματα αυτά, διαθέτουν αισθητήρια όργανα μέτρησης των κλιματικών παραγόντων και σε συνδυασμό με μαθηματικές προσομοιώσεις οδηγούν στην λήψη λογικών αποφάσεων, με σκοπό την ρύθμιση του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Επίσης, σε μία σύγχρονη θερμοκηπιακή εγκατάσταση, είναι απαραίτητος ο έλεγχος της άρδευσης, μέσω κάποιου προγραμματιστή άρδευσης, με σκοπό την χρήση της απαραίτητης ποσότητας νερού που χρειάζονται τα φυτά για την ανάπτυξη τους;

Τα σημαντικότερα οφέλη που ο παραγωγός αποκομίζει από την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων ελέγχου είναι τα εξής (Χουδάλης, 2011):

- Ποσοτική αύξηση και ποιοτική βελτίωση των παραγόμενων ειδών.
- Αύξηση της ανθεκτικότητας σε ασθένειες- προσβολές των φυτών
- Μείωση των απαιτούμενων φυτοφαρμάκων
- Εξοικονόμηση ενέργειας
- Εξοικονόμηση νερού-λιπασμάτων
- Μείωση ζημιών λόγω λάθους ή απροσεξίας
- Μείωση εργατικών

Όπως παρουσιάστηκε ανωτέρω, η έλλειψη νερού είναι ένα πρόβλημα με το οποίο έρχονται αντιμέτωποι οι παραγωγοί, έτσι άρχισαν να αναπτύσσονται μέθοδοι

άρδευσης που έχουν ως στόχο την εξοικονόμηση του νερού και ταυτόχρονα την βέλτιστη αποδοτικότητα του νερού στα φυτά. Οι δύο βασικοί παράμετροι που πρέπει να ελέγχονται με σκοπό την ορθή άρδευση είναι η συχνότητα των αρδεύσεων, που συνιστά πόσο συχνά θα πρέπει να γίνεται η άρδευση και η αρδευτική δόση που συνιστά την ποσότητα του νερού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Στις καλλιέργειες υπό κάλυψη τα φυτά δεν έχουν την δυνατότητα πρόσληψης του βρόχινου νερού επομένως, οι ανάγκες τους θα πρέπει να καλύπτονται τεχνητά. Στην πραγματικότητα τα φυτά θα πρέπει να αναπληρώνουν το νερό το οποίο χάνουν, λόγω απορροής, εξάτμισης και διαπνοής. Η μέθοδος της ρυθμιζόμενης ελλειμματικής άρδευσης (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

1.4. Σύγχρονες τάσεις- Υδροπονικά συστήματα

Υδροπονία ή ανέδαφος γεωργία, είναι η ανάπτυξη των φυτών χωρίς τη χρήση εδάφους, με την παρουσία ή απουσία κάποιου μέσου (υπόστρωμα) και με παροχή από το σύστημα των συνολικών απαιτήσεων των φυτών σε νερό και θρεπτικά στοιχεία. (Jensen, 1999; Hanger, 1993). Η υδροπονία αποτελεί μια προηγμένη και εξελιγμένη τεχνική ανάπτυξης καλλιεργειών στην οποία μπορούν να ενσωματωθούν συστήματα αυτόματου ελέγχου με σκοπό τις υψηλές αποδόσεις των καλλιεργειών και την παραγωγή ποιοτικών προϊόντων με όσο το δυνατόν χαμηλό κόστος καθώς, αποβλέπει στην μειωμένη χρήση φυτοφαρμάκων. Υπάρχουν πολλά συστήματα με τα οποία εφαρμόζονται υδροπονικές καλλιέργειες. Η κατάταξή τους με βάση την επαναχρησιμοποίηση ή μη του θρεπτικού διαλύματος, τα διακρίνει σε *Ανοιχτά* και *Κλειστά Υδροπονικά Συστήματα*. Στα Ανοιχτά υδροπονικά συστήματα, το απορρέον θρεπτικό διάλυμα από τον χώρο των ριζών μετά την άρδευση, δεν συγκεντρώνεται σε κάποια δεξαμενή ώστε να επαναχρησιμοποιηθεί, αλλά απορροφάται από το έδαφος ή συλλέγεται και απορρίπτεται εκτός του θερμοκηπίου. Στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, το απορρέον θρεπτικό διάλυμα από τον χώρο των ριζών μετά την

άρδευση, συγκεντρώνεται ξανά σε δεξαμενή και ανακυκλώνεται, ώστε να επαναχρησιμοποιηθεί. (Σιώμος,2002).

Σε μια πλήρως αυτοματοποιημένη καλλιέργεια, το μηχάνημα αυτόματης άρδευσης-λίπανσης αποτελεί την καρδιά του υδροπονικού συστήματος και η επιλογή του είναι καθοριστική για την επιτυχία της καλλιέργειας. Το σύστημα άρδευσης ενεργοποιείται και απενεργοποιείται ανάλογα με την εκτίμηση των αισθητήριων οργάνων (πυρανόμετρο, υγρασιόμετρο κ.α.). Στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες είναι απαραίτητη η ύπαρξη προγραμματιστή άρδευσης που θα διαχειρίζεται την άρδευση, βάση προγράμματος που θα έχει επιλέξει ο παραγωγός, ο οποίος ορίζει τη σειρά των ηλεκτροβανών, τον χρόνο άρδευσης και τις συνθήκες έναρξης της άρδευσης, ενώ ταυτόχρονα υπάρχει και η δυνατότητα χειροκίνητης άρδευσης (Χουδάλης, 2011).

Στην αγορά διατίθενται πλέον πολλά συστήματα ελέγχου του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Το Phytomonitoring αποτελεί μια σύγχρονη μέθοδο ελέγχου των κλιματικών συνθηκών, καθώς δίνει την δυνατότητα ελέγχου της αντίδρασης των φυτών σε οποιαδήποτε αλλαγή των περιβαλλοντικών συνθηκών σε πραγματικό χρόνο (Ton et all, 2001).

1.5. Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Τα τελευταία χρόνια, η εμφάνιση του φαινομένου της λειψυδρίας ωθεί τους απασχολούμενους στη γεωργία στην αναθεώρηση του ζητήματος της άρδευσης. Η εκτίμηση της αρδευτικής δόσης και της συχνότητας των αρδεύσεων, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο περιβάλλον αλλά και στη τσέπη του παράγωγου.

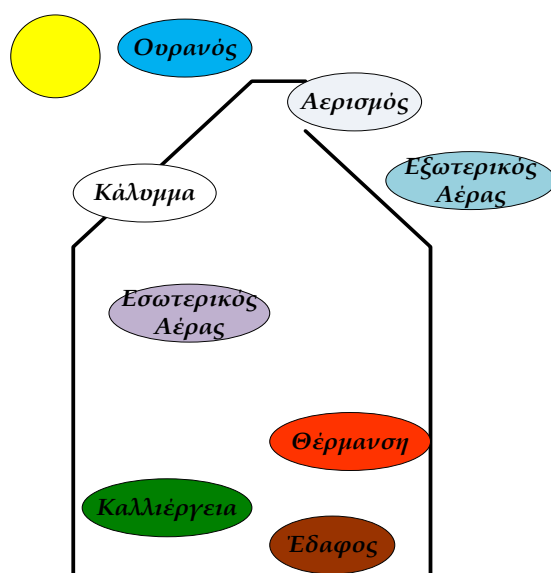
Η παρούσα μελέτη διεξάγεται, με σκοπό την ανίχνευση υδατικής καταπόνησης φυτών τομάτας σε διαφορετικό καθεστώς ανάπτυξης των φυτών με τη χρήση των αισθητήριων οργάνων που διαθέτει το Phytomonitoring. Αναλυτικά, παρουσιάστηκε η κατάσταση και το επίπεδο των θερμοκηπίων στην Ελλάδα και σε σύγκριση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες. Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό την κατανόηση του ζητήματος. Στη συνέχεια (Κεφάλαιο 3), παρουσιάζονται τα υλικά και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση του πειράματος. Στο Κεφάλαιο 4 ακολουθούν τα αποτελέσματα της έρευνας και τέλος στο Κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της έρευνας.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1. Παράγοντες που χαρακτηρίζουν το μικροκλίμα του θερμοκηπίου

Η κατάσταση του κλίματος που επικρατεί σε έναν καλλιεργήσιμο χώρο επηρεάζει άμεσα την αύξηση και την ανάπτυξη των καλλιεργούμενων φυτών. Με τον όρο μικροκλίμα αναφερόμαστε στην ατμοσφαιρική εκείνη ζώνη γύρω από την καλλιέργεια, η κατάσταση της οποίας ευθύνεται για την αύξηση και ανάπτυξη της καλλιέργειας και ως εκ τούτου είναι απαραίτητη η μελέτη των παραγόντων που την χαρακτηρίζουν.

Οι κλιματικοί παράγοντες που επηρεάζουν το περιβάλλον ανάπτυξης των φυτών είναι η Ηλιακή Ακτινοβολία, η Θερμοκρασία και η Σχετική Υγρασία του αέρα και η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα ($[CO_2]$). Στην πραγματικότητα όμως λόγω της εισαγωγής καινοτομιών υπάρχουν πολλοί παράγοντες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και μεταβάλλουν την κατάσταση του μικροκλίματος, εντός του θερμοκηπίου. Το κάλυμμα, η καλλιέργεια, το έδαφος, η κατάσταση του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα, ο ουρανός, ο αερισμός και η θέρμανση (Σχήμα 2.1.) επηρεάζουν το μικροκλίμα του θερμοκηπίου.



Σχήμα 2.1. Σχηματική παρουσίαση παραγόντων που επηρεάζουν το μικροκλίμα του θερμοκηπίου.

Η επίδραση όλων αυτών των παραμέτρων και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου δημιούργησε την ανάγκη κατασκευής προσομοιωμάτων κατάλληλων για την πρόβλεψη του μικροκλίματος του θερμοκηπίου.

2.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την αύξηση και την ανάπτυξη της καλλιέργειας

Η ανάπτυξη των φυτών σε ένα θερμοκήπιο χαρακτηρίζεται από τον έλεγχο ορισμένων παραγόντων που η τεχνολογία μας δίνει την δυνατότητα να τους μετρήσουμε και επομένως να τους ελέγξουμε. Αυτοί οι παράγοντες είναι η Ηλιακή Ακτινοβολία, η Θερμοκρασία του Αέρα, η Σχετική Υγρασία του αέρα και η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα. Η άρδευση αποτελεί έναν επιπλέον παράγοντα που επιδρά στην ανάπτυξη των καλλιεργειών και έχει απασχολήσει ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια τους επιστήμονες για λόγους κυρίως εξοικονόμησης ύδατος. Η αρδευτική δόση καθώς και η συχνότητα ποτίσματος μιας καλλιέργειας παίζει καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της καλλιέργειας και στην εξέλιξη της γεωργίας από οικονομική και οικολογική σκοπιά.

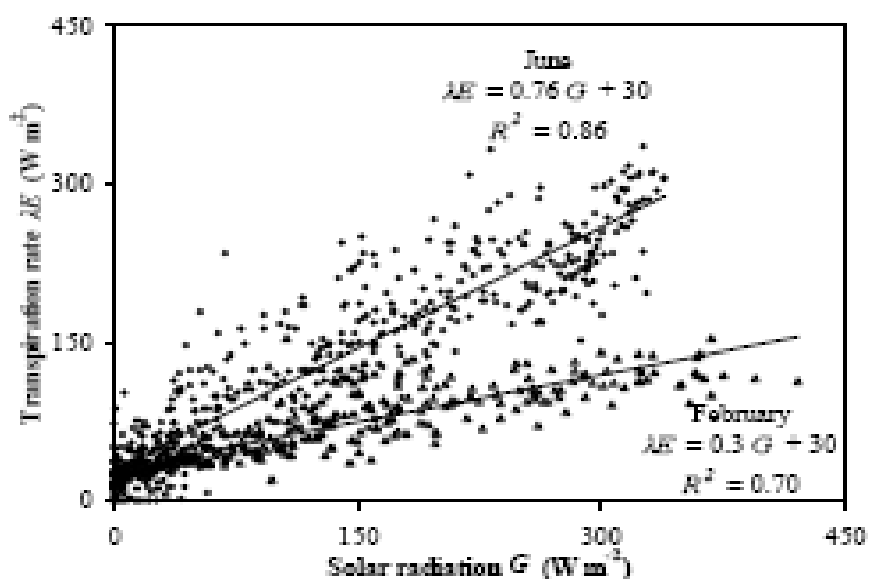
2.2.1. Η ρόλος της ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί την κύρια πηγή ενέργειας για τη φωτοσύνθεση των φυτών, καθώς και τη φυσική πηγή θερμότητας στο χώρο του θερμοκηπίου. 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, με συναγωγή και ακτινοβολία.

Η ορατή ακτινοβολία, αποτελεί το 44% της Ηλιακής Ακτινοβολίας (Nelson,1991) και μόνο αυτή επιδρά στην φυσιολογία του φυτού, γι αυτό καλείται φωτοσυνθετικά ενεργώς ακτινοβολία (McCree, 1972). Μέσα στο θερμοκήπιο η ποσότητα αυτή μειώνεται, εξαιτίας της μερικής διαπερατότητας των υλικών κάλυψης και έτσι επηρεάζεται η φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών. Οι Cocksholl et al. το

1992 παρατήρησαν ότι η απόδοση της καλλιέργειας τομάτας, αυξήθηκε κατά 1% όταν αυξήθηκε κατά το ίδιο ποσοστό η φωτοσυνθετικά ενεργώς ακτινοβολία.

Η ηλιακή ακτινοβολία επιδρά και στην διαπνοή των φυτών (Kittas et al., 1999). Στο Σχήμα 2.2. διακρίνεται η σχέση μεταξύ διαπνοής και ηλιακής ακτινοβολία σε καλλιέργεια τριαντάφυλλων για δύο διαφορετικές περιόδους. Το καλοκαίρι, όπου το έλλειμμα κορεσμού είναι μεγαλύτερο από το χειμώνα, ο ρυθμός διαπνοής είναι μεγαλύτερος.



Σχήμα 2.2. Σχέση μεταξύ ηλιακής ακτινοβολίας και διαπνοής σε καλλιέργεια τριαντάφυλλων, χειμώνα και καλοκαίρι. (Katsoulas and Kittas, 2011)

Ένας ακόμα παράγοντας που επιδρά στην ηλιακή ακτινοβολία εντός του θερμοκηπίου, είναι το υλικό κάλυψης του θερμοκηπίου, καθώς τροποποιεί το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας εξαιτίας των οπτικών ιδιοτήτων του. Αυτές οι ποιοτικές αλλαγές στη διερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να επηρεάσουν τη δομή και το σχήμα των φυτών αλλά ακόμα και την παραγωγική αξία, όπως συμβαίνει στα καλλωπιστικά φυτά (Kittas et al., 1999).

2.2.2. Ο ρόλος της θερμοκρασίας αέρα

Η θερμοκρασία αποτελεί έναν σπουδαίο παράγοντα για την βλάστηση την ανάπτυξη και την καρπόδεση όλων των καλλιεργειών. Η θερμοκρασία στον χώρο του θερμοκηπίου αποτελεί συνιστώσα πολλών παραγόντων, οι οποίοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, όπως το υλικό κάλυψης, η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, το έδαφος και η καλλιέργεια.

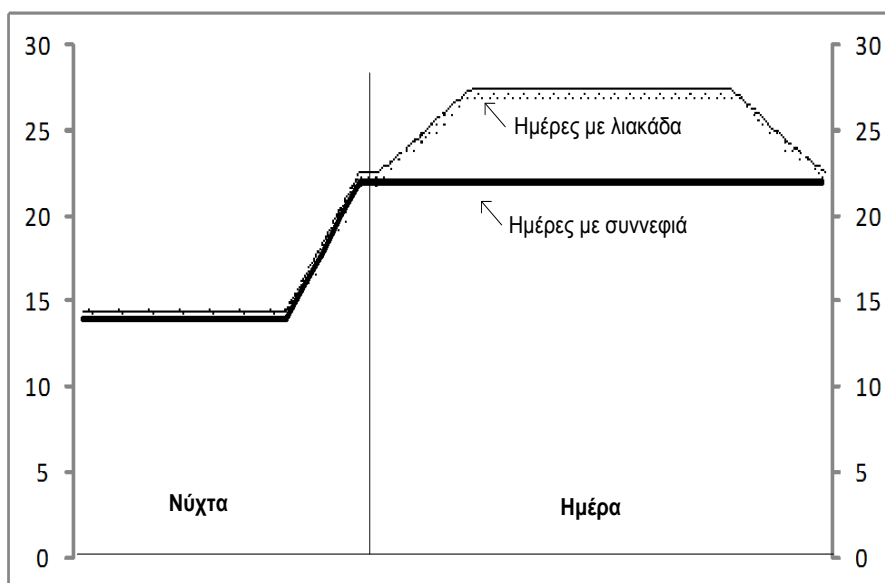
Οι Baille et al. (2001), έδειξαν ότι το άσπρισμα του υλικού κάλυψης επιδρά άμεσα στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, την αισθητή θερμότητα με αποτέλεσμα τα φυτά να μειώνεται η υδατική καταπόνηση των φυτών. Επίσης κατά την διάρκεια της ημέρας, ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται από το κάλυμμα, την καλλιέργεια, τον σκελετό και την επιφάνεια του εδάφους, με αποτέλεσμα να αυξάνει η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα (Papadakis et al., 2000). Από την άλλη, κατά την διάρκεια της νύχτας η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα είναι χαμηλότερη από την εξωτερική καθώς ο αέρας του θερμοκηπίου χάνει θερμότητα λόγω της μεταφοράς της στο ψυχρότερο κάλυμμα.

Στην πραγματικότητα για την ορθή λειτουργία και ομαλή ανάπτυξη των φυτών υπάρχει ένα οριοθετημένο εύρος θερμοκρασιών ή ζώνη άνεσης που συνήθως στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες είναι από 10 έως 30° C. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται βέλτιστες τιμές θερμοκρασίας για την σωστή εξέλιξη μιας καλλιέργειας. Ενδεικτικά στον Πίνακα 2.1. παρουσιάζονται οι ιδανικές θερμοκρασίες για τις σημαντικότερες θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Επιπλέον, όπως δείχνουν μελέτες, η μέση ημερήσια θερμοκρασία φαίνεται να επηρεάζει περισσότερο την ανάπτυξη πολλών ειδών σε σχέση με την πορεία εξέλιξης της θερμοκρασίας κατά την διάρκεια της ημέρας (Vogelezang et al., 2000). Επίσης σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των φυτών παίζει η διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας νύχτας και θερμοκρασίας ημέρας (Ντόγρας, 2001). 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, 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. Στο Σχήμα 2.3. παρουσιάζεται η διαφορά στις άριστες θερμοκρασίες

αύξησης της τομάτας κατά την διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου για ημέρες με υψηλή και χαμηλή ένταση φωτός.

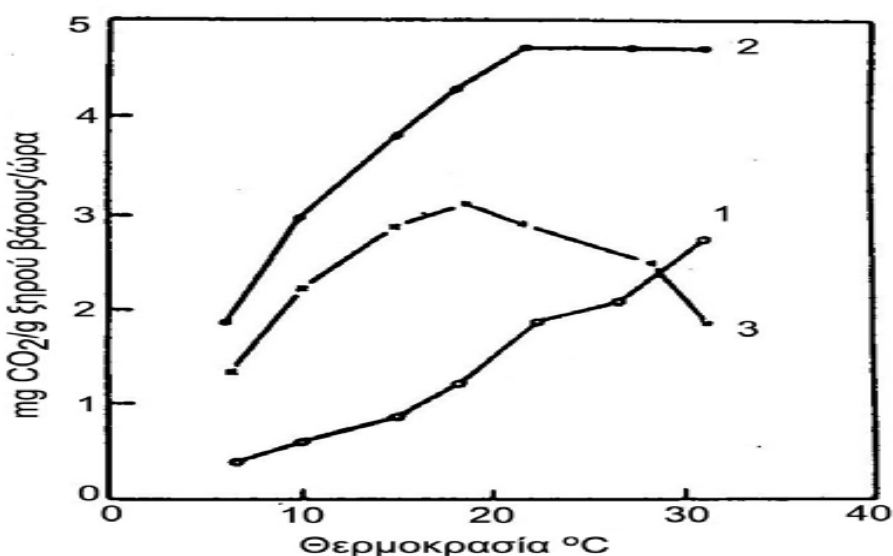
Πίνακας 2.1. Ιδανικές θερμοκρασίες για την ανάπτυξη θερμοκηπιακών καλλιεργειών (Ντόγρας, 2001; Οικονόμου, 1992)

Καλλιέργεια	Θερμοκρασίας Ημέρας (°C)	Θερμοκρασία Νύχτας (°C)
Αγγούρι	24-26	20-21
Μαρούλι	17-24	10-12
Μελιτζάνα	18-20	15-16
Πιπεριά	20-25	16-20
Τομάτα	20-25	16-20
Τριαντάφυλλο	20-24	16-17
Χρυσάνθεμο	17-21	16-17



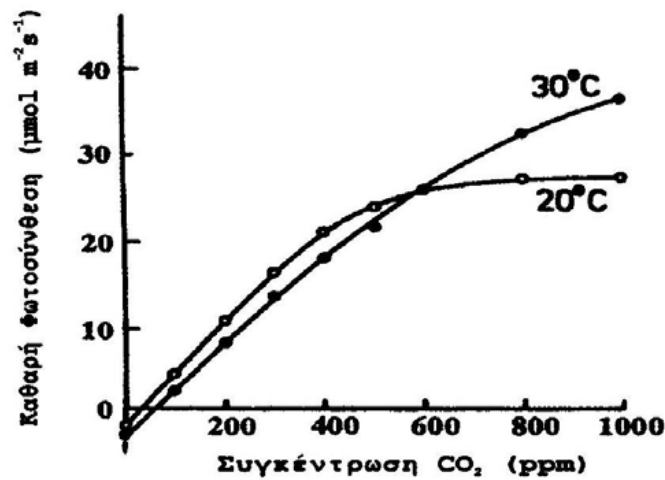
Σχήμα 2.3. Απαιτούμενες θερμοκρασίες κατά την διάρκεια του 24ώρου για καλλιέργεια τομάτας σε θερμοκήπιο για ημέρες με υψηλή και χαμηλή ένταση φωτός. (Μαυρογιανόπουλος, 2005)

Ανάλογα με την ένταση της Ηλιακής Ακτινοβολίας παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στην ιδανική θερμοκρασία για τα φυτά. Με την αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, άρα και της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο, εντείνεται ο ρυθμός διαπνοής και αναπνοής των φυτών. Όταν όμως η θερμοκρασία ξεπεράσει ένα κρίσιμο σημείο, η καθαρή φωτοσύνθεση ελαττώνεται (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4. Επίδραση της θερμοκρασίας στην αναπνοή (1), στη φωτοσύνθεση (2) και στην καθαρή φωτοσύνθεση (3) (Hanan et all, 1978).

Η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα φαίνεται να επηρεάζει την θερμοκρασία στο περιβάλλον του θερμοκηπίου. Σε ένα θερμοκήπιο με δεδομένο ότι η θερμοκρασία είναι σταθερή και δεν υπάρχει κάποιος άλλος περιοριστικός παράγοντας, ο εμπλουτισμός με διοξείδιο του άνθρακα αυξάνει την φωτοσυνθετική δραστηριότητα, η οποία αυξάνεται περισσότερο, με αύξηση της θερμοκρασίας (Ludwig και Withers, 1984). Στο Σχήμα 2.5. παρουσιάζεται η επίδραση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στην φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών σε σχέση με την θερμοκρασία.



Σχήμα 2.5. Επίδραση της περιεκτικότητας του διοξειδίου του άνθρακα στην καθαρή φωτοσύνθεση σε συνάρτηση με την θερμοκρασία (Ludwig και Withers, 1984).

2.2.2.1. Ο ρόλος της θερμοκρασίας της καλλιέργειας

Ένας άλλος παράγοντας που επεμβαίνει στην κατάσταση του μικροκλίματος, είναι η θερμοκρασία της καλλιέργειας. Η θερμοκρασία των φυτών εντός του θερμοκηπίου καθορίζεται κυρίως από την ακτινοβολία που δέχονται από το έδαφος και τον ουρανό, από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος, από την θερμοχωρητικότητα τους και από την λανθάνουσα θερμότητα που χάνουν ή δέχονται, λόγω συμπύκνωσης ή εξάτμισης των υδρατμών.

Η θερμοκρασία της καλλιέργεια είναι ένας πολύ σπουδαίος παράγοντας καθώς επηρεάζει όλες τις φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών, όπως φωτοσύνθεση, αναπνοή και διαπνοή (Acock, 1986; Baldocchi, 2005; Jones, 1992; Van Pee and Berckmans, 1998). Οι Roh et al. το 2007 χρησιμοποίησαν την θερμοκρασία της καλλιέργειας ως παράγοντα ελέγχου του περιβάλλοντος στο θερμοκήπιο. Παρατήρησαν ότι η θερμοκρασία της καλλιέργειας ήταν μικρότερη από αυτή του εσωτερικού αέρα λόγω της σκίασης, ενώ η θερμοκρασία της ανταποκρινόταν γρηγορότερα στις αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας από ότι αυτή του αέρα. Επίσης μείωση της θερμοκρασίας της καλλιέργειας παρατήρησαν όταν το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ήταν υψηλό. Κατά την διάρκεια της νύχτας η χαμηλή

θερμοκρασία της καλλιέργειας προκάλεσε πιθανότατα μείωση των φυσιολογικών διεργασιών των φυτών καθώς μειώθηκε ο ρυθμός της ροής χυμού κατά την διάρκεια της επόμενης μέρας.

2.2.3. Ο ρόλος της Σχετικής Υγρασίας και το Έλλειμμα Κορεσμού του αέρα

Η εξατμισοδιαπνοή είναι κύριος λόγος αύξησης της υγρασίας στο θερμοκήπιο, ενώ ο αερισμός και η συμπύκνωση αποτελούν λόγους μείωσης της. Η διατήρηση ενός κατάλληλου περιβάλλοντος υγρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου είναι απαραίτητη όχι μόνο για τη διατήρηση της υδατική ισορροπία των φυτών μέσω της διαπνοής, αλλά και για λόγους θρέψεως (π.χ. μεταφοράς ασβεστίου) και για την αποφυγή εκτεταμένης ανάπτυξης παθογόνων μικροοργανισμών, εντόμων και ακάρεων. Πειραματικά, έχει βρεθεί ότι το ποσοστό προσλαμβανόμενου νερού, που επιστρέφει μέσω της διαπνοής στην ατμόσφαιρα είναι 99% (Καράταγλης, 1999)

Τα επίπεδα υγρασίας στο θερμοκήπιο μεταβάλλονται ανάλογα με την εποχή και είναι δυνατόν να ελεγχθούν με την τεχνολογία (π.χ. αερισμός). Αύξηση της Σχετικής Υγρασίας στο θερμοκήπιο προκαλεί μείωση του ρυθμού διαπνοής και φωτοσύνθεσης και το αντίστροφο. Η επίδραση της Σχετικής Υγρασίας στα φυτά σχετίζεται με τα επίπεδα θερμοκρασίας. Έτσι, όταν κυμαίνεται μεταξύ 55 -90% στους 20° C δεν επηρεάζει την ανάπτυξη των περισσότερων φυτών (Grange and Hand, 1978). Από την άλλη, πολύ χαμηλές τιμές υγρασίας μπορεί να προκαλέσουν μαρασμό, καθώς το φυτό είναι αδύνατον να αναπληρώσει τις απώλειες. Στον Πίνακα 2.2. παρουσιάζονται, άριστες συνθήκες Σχετικής Υγρασίας για τις σημαντικότερες θερμοκηπιακές καλλιέργειες.

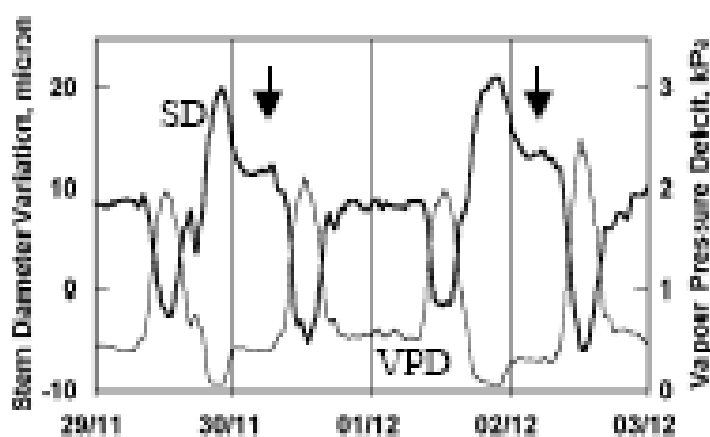
Πίνακας 2.2. Άριστα επίπεδα Σχετικής Υγρασίας για την ανάπτυξη των σημαντικότερων θερμοκηπιακών καλλιεργειών (Γραφιαδέλλης, 1987; Ντόγρας, 2001)

Καλλιέργεια	Σχετική Υγρασία (%)
Τομάτα	60-75
Αγγούρι	75-80
Πιπεριά	70-80
Μελιτζάνα	79-80
Μαρούλι	65-80

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η Σχετική Υγρασία είναι ένας παράγοντας που πρέπει να ελέγχεται ταυτόχρονα με την θερμοκρασία του αέρα. Αυτή την δυνατότητα μας την δίνει το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ή το έλλειμμα της τάσης των ατμών (Vapor Pressure Deficit-VPD). Το VPD είναι η διαφορά ανάμεσα στην τάση των υδρατμών και στην μέγιστη τάση των υδρατμών (Αναλυτικά, παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3.).

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, σε περιοχές χαμηλής πίεσης, έως ότου ισορροπήσει η πίεση υδρατμών σε όλα τα σημεία του χώρου. Η διαφορά πίεσης υδρατμών επομένως είναι η κινητήρια δύναμη για τη μεταφορά υδρατμών από την καλλιέργεια στον αέρα του θερμοκηπίου και το αντίθετο. Σε σχετικές μελέτες παρουσιάστηκε ότι το έλλειμμα κορεσμού του αέρα σχετίζεται με τον ρυθμό διαπνοής και την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς οι συντελεστές συσχέτισης κυμαίνονταν από 0,7 έως 0,94 (Kittas et al., 1999; Yang et al., 1990)

Σχετική μελέτη το 2001 από τους Koryt et al. για την αλληλεπίδραση του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου και της καλλιέργειας τριαντάφυλλων έδειξε ότι η αύξηση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα μείωνε τον ρυθμό αύξησης της διαμέτρου του βλαστού (Σχήμα 2.6.).

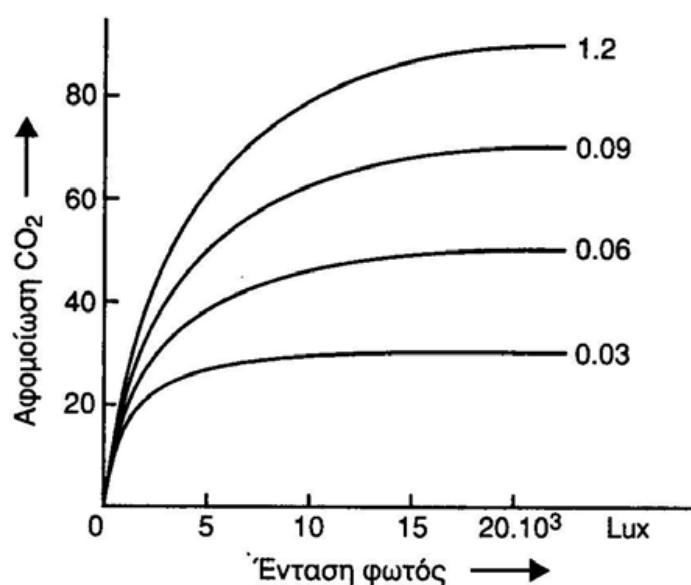


Σχήμα 2.6. Σχηματική αναπαράσταση της πορείας ανάπτυξης του βλαστού σε φυτά τριανταφυλλιάς σε σχέση με την πορεία του ελλείμματος κορεσμού σε ένα θερμοκήπιο.

Το έλλειμμα κορεσμού του αέρα βρέθηκε ότι επηρεάζει την διαπνοή των φυτών τομάτας σε μεγαλύτερο βαθμό από την Ηλιακή Ακτινοβολία και την Θερμοκρασία του αέρα (Joillet and Bailey, 1992), με την διευκρίνιση ότι η Θερμοκρασία του αέρα σχετίζεται άμεσα με την αντίστοιχη τιμή VPD. Αυτό ισχύει κυρίως για τις περιοχές της βόρειας Ευρώπης. Η επίδραση του ελλείμματος κορεσμού όμως έχει αποδειχτεί και στην ανάπτυξη των καρπών τομάτας από τους Leonardí et al (2000), όπου παρατήρησαν ότι ο ρυθμός αύξησης των καρπών τομάτας ήταν μεγαλύτερος κατά τις πρωινές ώρες σε συνθήκες μειωμένου ελλείμματος κορεσμού σε αντίθεση με τους καρπούς που αναπτύσσονταν σε συνθήκες αυξημένης τιμής ελλείμματος κορεσμού.

2.2.4. Ο ρόλος της συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακα

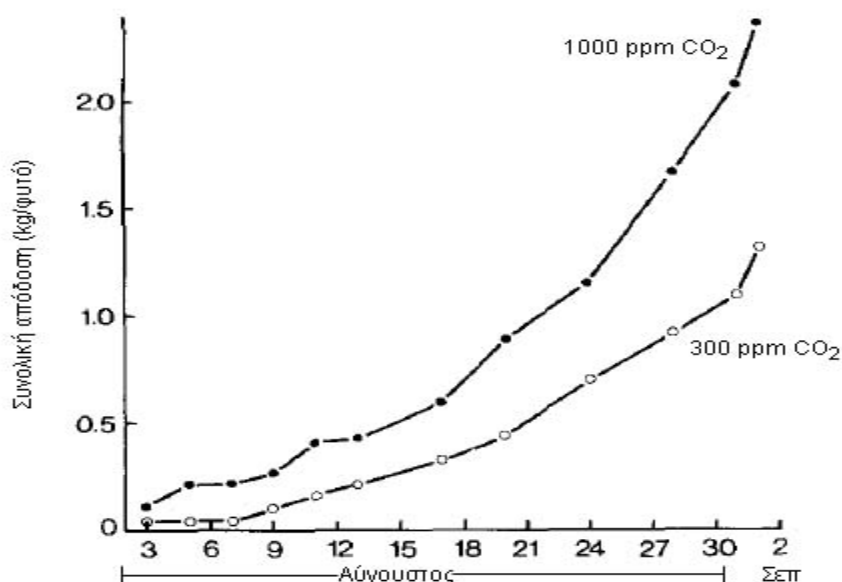
Το CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα), είναι το συστατικό με το οποίο τα φυτά οικοδομούν τις οργανικές του ενώσεις, γι αυτό η μελέτη του είναι πρωταρχικής σημασίας. Περίπου το 50% της ξηρής ουσίας των φυτών αποτελείται από άνθρακα (Levanon et al., 1986). Έχει βρεθεί πως όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα του αέρα σε διοξείδιο του άνθρακα, τόσο αυξάνεται η φωτοσυνθετική δραστηριότητα (Σχήμα 2.7.)



Σχήμα 2.7. Σχηματική απεικόνιση της επίδρασης του CO₂ στην φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών (Καράταγλης, 1999)

Στο θερμοκήπιο, η συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα, παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Κατά την διάρκεια της ημέρας, όπου εκτελείται φωτοσύνθεση η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα μειώνεται. Το χειμώνα, όπου τα παράθυρα μένουν κλειστά και δεν γίνεται ανανέωση του αέρα η περιεκτικότητα του αέρα σε CO₂ μπορεί να φτάσει και τα 100ppm. Όταν η συγκέντρωση CO₂ είναι χαμηλότερη από 300 ppm τότε η φωτοσυνθετική δραστηριότητα μειώνεται (Nederhoff, 1996). Αντίθετα κατά την διάρκεια της νύχτας η συγκέντρωση CO₂ αυξάνεται λόγω της αναπνοής και αφετέρου λόγω της μη χρησιμοποίησης του από την φωτοσυνθετική δραστηριότητα.

Οι θετικές επιπτώσεις του εμπλουτισμού της ατμόσφαιρας, με διοξείδιο του άνθρακα έχει επιβεβαιωθεί από πολλές μελέτες, όπου παρατηρήθηκε ότι σε καλλιέργεια τομάτας η παραγωγή αυξήθηκε από 30-50%, επιταχύνθηκε η αρχική ανάπτυξη των φυτών και αυξήθηκε το βάρος των καρπών (Hand and Soffe, 1971; Nilsen et al., 1983; Hand and Slack, 1988; Nederhoff, 1994). Στο Σχήμα 2.8. παρουσιάζεται η απόδοση των φυτών τομάτας σε δύο διαφορετικά επίπεδα συγκέντρωσης CO₂.



Σχήμα 2.8. Παρουσίαση της απόδοσης φυτών τομάτας σε περιβάλλον με χαμηλή και σε περιβάλλον με υψηλή συγκέντρωση CO₂. (Nilsen et all, 1983)

Βέβαια, η περίσσεια διοξειδίου του άνθρακα είναι δυνατόν αν προκαλέσει προβλήματα στην ομαλή ανάπτυξη των φυτών. Χαρακτηριστικά, ο Berkel (1984) παρατήρησε ότι σε συγκεντρώσεις πάνω από 1000ppm διοξειδίου του άνθρακα, τα φύλλα τομάτας παρουσίασαν χλώρωση, συστροφή και νέκρωση.

Η ανάπτυξη των φυτών μέσα στο θερμοκήπιο δεν εξαρτάται μόνο από το περιβάλλον του θερμοκηπίου (Θερμοκρασία, Σχετική υγρασία κ.α.), σπουδαίο ρόλο επίσης παίζει η ορθολογική άρδευση. Ο σχεδιασμός του κατάλληλου αρδευτικού συστήματος βασίζεται στην γνώση της υδατικής κατάστασης και θερμικής κατάστασης των φυτών.

2.3.Δείκτες υδατικής και θερμικής κατάστασης των φυτών

Μέσα στο θερμοκήπιο, δεν υπάρχει φυσική βροχόπτωση με αποτέλεσμα όλο το νερό που χάνεται μέσω της εξατμισοδιαπνοής και της στράγγισης, να πρέπει να αναπληρώνεται από τον καλλιεργητή, ώστε τα φυτά να βρίσκονται πάντα στην άριστη υδατική κατάσταση. Έτσι η ακριβής μέτρηση της υδατικής κατάστασης του φυτού και/ή του εδάφους είναι κρίσιμη, καθώς η γνώση της υδατικής κατάστασης των φυτών μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για τον σχεδιασμό της άρδευσης σε μία θερμοκηπιακή μονάδα.

Δυστυχώς δεν υπάρχει 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 ανά περίπτωση ανάλογα με τον στόχο του πειράματος (Jones, 2007).

Η μέθοδος μέτρησης της σχετικής περιεκτικότητας του νερού δίνει την δυνατότητα μέτρησης του περιεχόμενου νερού στον φυτικό ιστό και περιγράφεται από την Σχέση 2.1.

$$RWC = \frac{(FW - DW)}{(TW - DW)} \quad (2.1.)$$

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

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 από τον φυτικό ιστό (Jones, 2007), γι αυτό χρησιμοποιούνται μέθοδοι βασισμένες στην ενεργειακή κατάσταση του φυτού. 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 υδατικό δυναμικό εκφρασμένος σε μονάδες πίεσης (Σχέση 2.2.).

$$\psi = \frac{(\mu - \mu_0)}{V_w} = - \left(\frac{RT}{V_w} \right) \log_e \left(\frac{e}{e_s} \right) \sqrt{b^2 - 4ac} \quad (2.2.)$$

όπου V_w είναι ο μερικός μοριακός όγκος του νερού (συνήθως 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).

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 οι δείκτες οφείλονται σε ορατές αλλαγές των φυτών όπως μάρανση, συρρίκνωση βλαστού, φύλλου ή καρπού και σε φυσιολογικές αποκρίσεις των φυτών όπως ελαττώσεις στον ρυθμό αναπνοής και φωτοσύνθεσης. 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 μάρανσή του συμβαίνουν όταν οι απαιτήσεις για διαπνοή υπερβαίνουν τον ρυθμό παροχής του νερού από την ρίζα προς 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 που χαρακτηρίζουν την υδατική κατάσταση των φυτών (π.χ. CWSI - Crop Water Stress Index) και παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω.

2.3.1. Ο ημερήσιος βαθμός καταπόνησης (SDD)

Ένα μέσο για την αξιολόγηση της υδατικής κατάστασης των φυτών θα μπορούσε να ανοίξει το δρόμο για βελτιωμένες προβλέψεις παραγωγής, σε αρδευόμενες εκτάσεις. Η θερμοκρασία φυλλώματος ενός φυτού μπορεί να μετράται από απόσταση με ελαφριά, φορητά υπέρυθρα θερμοόμετρα. 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 να θερμανθούν εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας, πάνω από τη θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος. Πολυάριθμες μελέτες που σχετίζονται με την θερμοκρασία του φυλλώματος έχουν γίνει με σκοπό την πρόβλεψη της υδατικής κατάστασης των φυτών. Σε αυτές τις μελέτες βρέθηκε συσχέτιση της θερμοκρασίας του φυλλώματος και της εδαφικής υγρασίας (Jackson et al., 1977a; Jackson, 1982), της θερμοκρασίας του φυλλώματος και της υδατικής καταπόνησης των φυτών (Jackson et al., 1977b; Idso et al., 1978; Jackson and Pinter, 1981), ενώ άλλες μελέτες έδειξαν συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού διαπνοής και της θερμοκρασίας των φύλλων (Idso et al., 1977a; Jackson et al., 1983).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, δημιουργήθηκε ένας δείκτης 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 (Σχέση (2.3.)):

$$SDD = \sum_{n=i}^N (T_c - T_a)_n \quad (2.3.)$$

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).

Γενικά, αν ένα φυτό έχει επαρκή ποσότητα νερού, η διαφορά $T_c - T_a$ θα έχει τιμή κοντά στο μηδέν ή αρνητική και τιμή μεγαλύτερη του μηδενός αν είναι υδατικά καταπονημένο. Έτσι, το άθροισμα των θετικών τιμών της διαφοράς $T_c - T_a$ αποτελεί ένα χρήσιμο δείκτη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διαχείριση της άρδευσης καλλιεργειών στον αγρό όπως τα σιτηρά (Jackson et al., 1977). Οι Walker και Hatfield (1979) χρησιμοποίησαν τον δείκτη σε υπαίθρια καλλιέργεια φασολιού και βρήκαν αρνητική συσχέτιση ($r^2=-0.83$) μεταξύ του δείκτη και της ποσότητας αρδευτικού νερού στην καλλιέργεια. Οι Jackson et al. (1977) καθόρισαν ένα θετικό δείκτη SDD ως εξής:

$$SDD_{pos} = \sum_{n=i}^N (T_c - T_a)_n \quad (2.4.)$$

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).

2.3.2. Η ημερήσια θερμοκρασιακή καταπόνηση (TSD)

Οι Hope και Jackson (1989) και 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. Η λειτουργία 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. Ο TSD και ο SDD, δεν αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για την πρόβλεψη της υδατικής και θερμοκρασιακής καταπόνησης των φυτών, διότι οι τιμές τους ποικίλλουν ανάλογα με τους κλιματικούς παράγοντες, από τους οποίους ο πιο σημαντικός θεωρείται ότι είναι η ατμοσφαιρική υγρασία. Σε πιο υγρά κλίματα, η συννεφιά γίνεται επίσης κρίσιμος παράγοντας (Jones, 2004a)

2.3.3. Ο ημερήσιος δείκτης υδατικής καταπόνησης (WSDI)

Οι Hiler και Clark το 1971 χρησιμοποίησαν μια ποσοτική μέθοδο πρόβλεψης της υδατικής καταπόνησης των φυτών κατά την διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης τους στηριζόμενη στην μετακίνηση του νερού από το έδαφος και την καλλιέργεια στην ατμόσφαιρα, μέσω της εξάτμισης και της ειδικής ευαισθησίας των φυτών. Ο δείκτης SDI (Stress Day Index), μελετήθηκε από τους Hiler και Howell (1983) σχετικά με την χρησιμότητα για την δημιουργία σχεδίων άρδευσης, στην πραγματικότητα η δυνατότητα αυτή δεν έχει ακόμα βρει εφαρμογή. Οι Katerji et al. το 2003 βασιζόμενοι στις παραπάνω μελέτες χρησιμοποίησαν τον ημερήσιο δείκτη υδατικής καταπόνησης (WSDI-Water Stress Day Index), όπως παρουσιάζεται στην Σχέση 2.5., με σκοπό να ελέγξουν τις επιπτώσεις της αλατότητας στην παραγωγή διάφορων καλλιεργειών.

$$WSDI = \sum_{1}^{n} \frac{\psi_c - \psi_s}{n} \quad (2.5.)$$

όπου ψ_c είναι η ημερήσια τιμή υδατικού δυναμικού των φύλλων στο ελεγχόμενο σύστημα, ψ_s το υδατικό δυναμικό των φύλλων στον σύστημα με αυξημένη αλατότητα και n ο αριθμός των ημερών από την εμφάνιση των φύλλων μέχρι την μάρανση του φυτού.

2.3.4. Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας (CWSI)

Όπως αναφέρει ο Kirkham (2005), 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 Ehler (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.

Ο δείκτης αυτός στηρίζεται στην θερμοκρασία της καλλιέργειας και φαίνεται πως σχετίζεται με την υγρασία του εδάφους, την αλατότητα του εδάφους, το υδατικό δυναμικό των φυτών και του εδάφους, την φωτοσύνθεση, την αντίσταση του φυλλώματος στη μεταφορά υδρατμών και κατ'επέκταση με την παραγωγή (Jackson, 1987; Idso et al., 1986).

Η σχέση 2.6., που εξήχθη από τις θεωρήσεις του ενεργειακού ισοζυγίου, μπορεί να εκφραστεί ως (Jackson et al., 1986; Monteith και Szeicz, 1962; Jackson et al., 1981):

$$T_c - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \frac{\gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} - \frac{VPD}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (2.6.)$$

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

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 είναι αντιπροσωπευτική τιμή της r_c , η διαφορά $T_c - T_a$ υπολογίστηκε ως συνάρτηση του VPD. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών δίνονται στο Σχήμα 2.9. 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:

$$T_c - T_a = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \quad (2.7.)$$

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

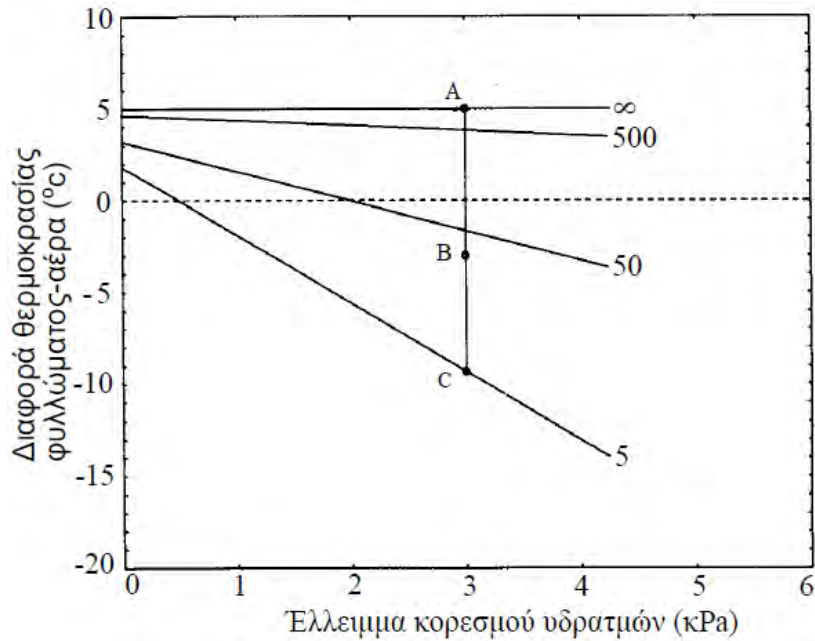
Το σημείο Β στο Σχήμα 2.9. αντιπροσωπεύει μια μετρημένη τιμή της διαφοράς $T_c - T_a$. Τα σημεία Α και C αντιπροσωπεύουν τις τιμές της διαφοράς $T_c - T_a$ που θα παρουσιαζόντουσαν εάν τα φυτά βρισκόντουσαν κάτω από μέγιστη και ελάχιστη καταπόνηση αντίστοιχα, σε μια συγκεκριμένη τιμή VPD. Ο δείκτης υδατικής 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., 198; Jackson et al., 1981):

$$CWSI = \frac{\gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right) - \gamma^*}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (2.8.)$$

$$\text{όπου, } \gamma^* = \gamma \left(1 + \frac{r_{cp}}{r_a}\right) \quad (2.8.1.)$$

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



Σχήμα 2.9. Η θεωρητική σχέση μεταξύ της διαφοράς θερμοκρασίας φύλλου-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.

Ο δείκτης CWSI έχει χρησιμοποιηθεί σε μελέτες για την πρόβλεψη της υδατικής κατάστασης των φυτών με σκοπό τον σχεδιασμό της άρδευσης σε διάφορες καλλιέργειες (Idso, 1982; Howell et al., 1986; Nielsen and Gardner, 1987; Nielsen, 1990; Gardner et al., 1992; Alderfasi and Nielsen, 2001)

Οι Jackson et al. το 1981, παρουσίασαν μια άλλη μαθηματική έκφραση του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας (Σχέση 2.9.).

$$CWSI = \frac{T_c - T_m}{T_M - T_m} \quad (2.9.)$$

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.

Οι παράμετροι της Σχέσης αυτής θα αναλυθούν λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3.

2.3.5. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της άρδευσης

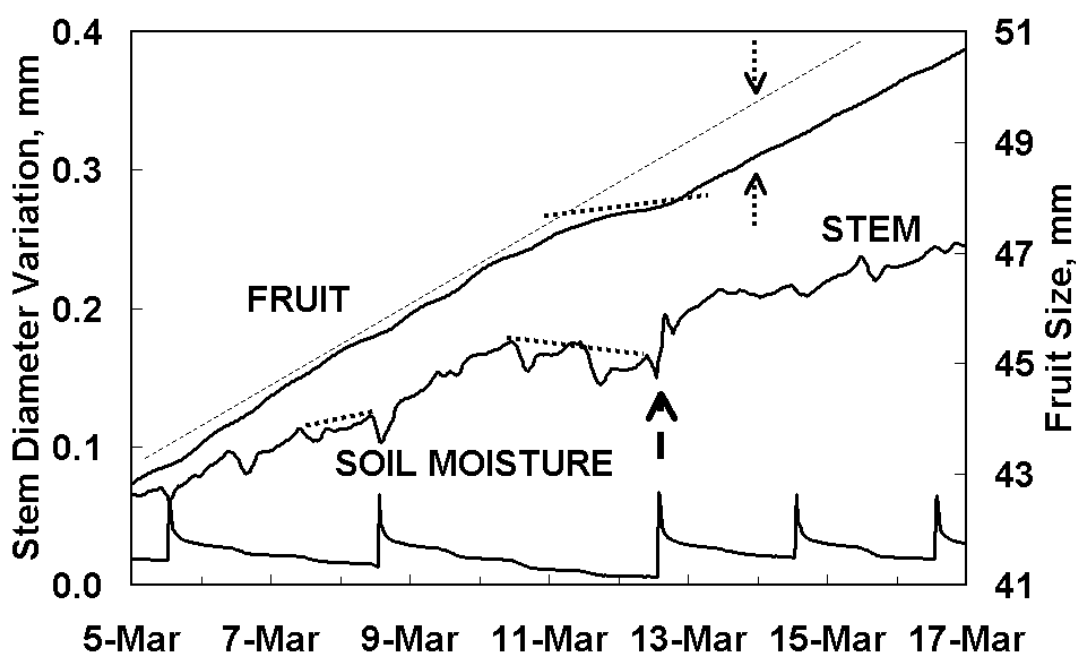
Το νερό αποτελεί ένα από τα απαραίτητα συστατικά της ανάπτυξης των φυτών. Μέσα στο θερμοκήπιο δεν υπάρχει φυσική βροχόπτωση, επομένως το νερό αποδίδεται μόνο με την άρδευση. Στις μέρες μας, για την άρδευση των καλλιεργειών σε ένα θερμοκήπιο χρησιμοποιούνται χρονικά προγράμματα άρδευσης, που δίνουν την δυνατότητα της ρύθμισης της συχνότητας και της διάρκειας που θα έχει η άρδευση. Η άρδευση μέσα στο θερμοκήπιο μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:

1. Χειροκίνητα, όπου η άρδευση ξεκινά κατόπιν εντολής από τον χρήστη.
2. Σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, όπου η άρδευση ξεκινά σε συγκεκριμένη ώρα.
3. Ανά καθορισμένο χρονικό διάστημα, όπου η άρδευση γίνεται περιοδικά μέσα σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα.
4. Με χρήση μοντέλου εξατμισοδιαπνοής, όπου η άρδευση ξεκινά όταν το μοντέλο εξατμισοδιαπνοής υπολογίσει ότι καταναλώθηκε η προηγούμενη δόση.
5. Βάση της ένδειξης κάποιου οργάνου (π.χ. υγρασία εδάφους), όπου η άρδευση ξεκινά όταν το επιτρέψει η ένδειξη του οργάνου.

Οι δύο τελευταίες μέθοδοι, συνήθως χρησιμοποιούνται συνδυαστικά, ώστε ο έλεγχος τελικά να γίνεται από αυτοπροσαρμοζόμενο μοντέλο. Το μοντέλο μπορεί να υπολογίσει την ποσότητα νερού που έχει καταναλωθεί και συνεπώς να προγραμματίσει και το χρονοδιάγραμμα της άρδευσης. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την απευθείας αναγνώριση των αναγκών των φυτών σε νερό και επιπρόσθετα παρέχει πληροφορίες για την δημιουργία μοντέλων διαπνοής. Ένα τέτοιο μοντέλο εξαρτάται από περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η ηλιακή ακτινοβολία και η σχετική υγρασία (Αναστασίου και Φερεντίνος, 1999). Βέβαια, για την επίλυση μοντέλων εξατμισοδιαπνοής απαιτούνται συντελεστές που διαφέρουν ανάλογα την καλλιέργεια (Μαυρογιανόπουλος, 2005)

Τα τελευταία χρόνια πολλές μελέτες παρουσιάζουν την δυνατότητα, ο σχεδιασμός της άρδευσης να γίνεται σύμφωνα με τις πληροφορίες που δίνει το ίδιο το φυτό για την υδατική του κατάσταση. Στην αγορά υπάρχουν διαθέσιμα όργανα που

μετρούν μεταβλητές σχετικές με την κατάσταση του φυτού. Η διαφορά θερμοκρασίας φύλλου και αέρα, η ροή χυμού και η μεταβολή της διαμέτρου του βλαστού έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίδραση της άρδευσης στην ανάπτυξη των φυτών, τόσο σε δενδροκομικές καλλιέργειες, όσο και σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες (Fernandez et Cuevas, 2010; Ton et Koryt, 2003). Στο Σχήμα 2.10. παρουσιάζεται ένα παράδειγμα, κατά το οποίο ο ρυθμός αύξησης του βλαστού και η αύξηση του μεγέθους του καρπού σε φυτά τομάτας μειώνονται κατά την τρίτη μέρα μετά την άρδευση, αντίθετα η άρδευση επιδρά θετικά στην αύξηση και των δύο.



Σχήμα 2.10. Παρουσίαση της επίδρασης της άρδευσης στην ανάπτυξη του βλαστού και του καρπού σε φυτά τομάτα.

Η σωστή ανάπτυξη των φυτών απαιτεί τον έλεγχο του κλίματος και της άρδευσης, για τον λόγο αυτό έχουν δημιουργηθεί συστήματα βελτιστοποίησης ελέγχου του κλίματος και της άρδευσης στο θερμοκήπιο.

2.4.Συστήματα βελτιστοποίησης ελέγχου του κλίματος και της άρδευσης στο θερμοκήπιο

Όπως παρουσιάζεται παραπάνω, η αύξηση και η ανάπτυξη των φυτών σε ένα περιβάλλον επηρεάζεται από αβιοτικούς παράγοντες που συνιστούν το κλίμα και την άρδευση. Ο έλεγχος αυτών των παραγόντων έχει ως αποτέλεσμα τον έλεγχο της καλλιέργειας, σε αυτήν την αρχή βασίστηκε η δημιουργία συστημάτων βελτιστοποίησης ελέγχου του κλίματος και της άρδευσης στα θερμοκήπια. Τα συστήματα αυτά συνδυάζουν τις γνώσεις της γεωπονικής επιστήμης με την τεχνολογία και επιτρέπουν την ορθή εξέλιξη των καλλιεργούμενων φυτών.

Στη σύγχρονη βιομηχανία των θερμοκηπίων, ο ανθρώπινος παράγοντας εξακολουθεί να είναι απαραίτητος. Στην πραγματικότητα, ένας παραγωγός είναι ένα βασικό πρόσωπο για την επίβλεψη 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 και εργαστηριακές αναλύσεις καθώς και σε διαθέσιμες συστάσεις από εμπειρογνώμονες. Στο πλαίσιο αυτό, τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται ραγδαία ανάπτυξη της δημιουργίας τέτοιων συστημάτων που διατίθενται στην αγορά από διάφορες εταιρίες. Το σύστημα παρακολούθησης φυτού αποτελεί την πιο εξελιγμένη ολοκληρωμένη τεχνική στη βιομηχανία παραγωγής θερμοκηπιακών και δενδρωδών καλλιεργειών (Ton, 1997; Kopyt et al., 2001; Ton et al., 2001).

2.4.1. Το σύστημα παρακολούθησης φυτών -Phytomonitoring

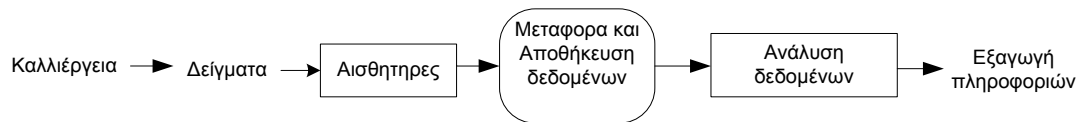
Στις σύγχρονες εγκαταστάσεις θερμοκηπίων έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα καθώς και συστήματα ελέγχου των συνθηκών του περιβάλλοντος μέσα στο θερμοκήπιο, όπως θερμοκρασία, συμπύκνωση, αερισμός κ.α., με σκοπό την μεγαλύτερη παραγωγή και κατ'επέκταση το υψηλότερο κέρδος. Γεγονός αποτελεί, πως μέχρι σήμερα, όλα τα συστήματα ελέγχου του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου βασίζονται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες και όχι σε φυσιολογικούς παράγοντες (παράγοντες σχετικοί με την φυσιολογική κατάσταση του φυτού). Μέχρι τώρα η

εκτίμηση της κατάστασης των φυτών γινόταν μέσω παρατήρησης και βασισμένη σε βιβλιογραφικές αναλύσεις. Τα τελευταία 20 χρόνια οι εμπειρογνώμονες έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους σε μια άλλη προσέγγιση, γνωστή ως “speaking plant” (Udink ten Cate et al., 1987), σύμφωνα με αυτή, ένας κλιματικός παράγοντας είναι αδύνατον να δώσει πληροφορίες για το φυτό, μόνο το ίδιο το φυτό είναι δυνατόν να το δείξει.

Η εξέλιξη των θερμοκηπίων ως «βιομηχανικές» μονάδες παραγωγής αγροτικών προϊόντων απομακρύνει όλο και περισσότερο τον ανθρώπινο παράγοντα από το ρόλο του καλλιεργητή. Την τελευταία δεκαετία η Ισραηλινή εταιρία Phyttech Ltd ανέπτυξε ένα σύστημα παρακολούθησης φυτών, το Phytomonitoring. Στην πραγματικότητα σκοπός της δημιουργίας αυτού του συστήματος ήταν ο έλεγχος των πολλαπλών συνθηκών που επικρατούν σε ένα θερμοκηπιακό χώρο (θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία κ.α.) με παράλληλη εκτίμηση της επίδρασης αυτών στα ίδια τα φυτά (θερμοκρασία φύλλου, διάμετρος καρπού κ.α.). Η έγκαιρη ανίχνευση των προβλημάτων που δύναται να παρουσιαστούν σε μία καλλιέργεια αποτελεί και το βασικό του πλεονέκτημα. (Ton et Koryt, 2000). Το Phytomonitoring, δίνει την δυνατότητα στον καλλιεργητή να εκτιμήσει πως ανταποκρίνεται η καλλιέργεια σε οποιαδήποτε αλλαγή του κλίματος ή της άρδευσης σε πραγματικό χρόνο. Η διαδικασία της μέτρησης βασίζεται σε δύο τεχνικές. Η πρώτη τεχνική όπως εξηγούν οι Ton και Koryt (2000) είναι η reproducibility, που δίνει την δυνατότητα στον παραγωγό να συγκρίνει δεδομένα κατά την διάρκεια διαφορετικών χρονικών περιόδων. Η δεύτερη τεχνική αναφέρεται ως comparability, που δίνει την δυνατότητα σύγκρισης δεδομένων της καλλιέργειας σε διαφορετικά σημεία.

Η τυπική δομή του συστήματος παρακολούθησης φυτών

Το Phytomonitoring αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα, και συμπεριλαμβάνεται από τις συσκευές, το λογισμικό και τις τεχνικές που δίνουν την δυνατότητα λήψης απόφασης. Η βασική δομή ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11 (Ton Y. and M. Koryt, 2003b).



Σχήμα 2.11. Η τυπική δομή του συστήματος παρακολούθησης φυτών.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.11. τα αισθητήρια όργανα λαμβάνουν μετρήσεις σχετικές με την κατάσταση της καλλιέργειας (ή του περιβάλλοντος), από την οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μόνο φυτό (ή δύο, το δεύτερο ως φυτό αναφοράς). Οι αισθητήρες μετρούν τις προκαθορισμένες παραμέτρους και οι πληροφορίες μεταφέρονται ασύρματα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου συγκρίνονται με δείκτες. Το σύστημα εξάγει τις βασικές πληροφορίες για την καλλιέργεια με σκοπό την στήριξη λήψης αποφάσεων για την συγκεκριμένη καλλιέργεια. Η διαδικασία στήριξης αποφάσεων (Decision Support System) αποτελεί το τελικό στάδιο και μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση με την μέθοδο “what-if,” όπου βασίζεται σε μαθηματικά μοντέλα και δίνει έγκυρα και έγκαιρα αποτελέσματα. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιείται η μέθοδος “trial-and-error”.

Τα αισθητήρια όργανα του Phytomonitoring

Όπως αναφέρθηκε, το Phytomonitoring αποτελεί μια νέα πρακτική παρακολούθησης φυτών σε πραγματικό χρόνο και συνδυάζει πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον ανάπτυξης των φυτών και πληροφορίες σχετικές με την φυσιολογική κατάσταση των φυτών. Οι αισθητήρες αποτελούν τα βασικά όργανα ενός τέτοιου συστήματος, καθώς είναι αυτοί που λαμβάνουν την πληροφορία από το φυτό ή από το περιβάλλον του μέσω κάποιου γνωστού φυσικού μεγέθους. Τα αισθητήρια όργανα που διατίθενται μαζί με το σύστημα παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2.3..Πληροφορίες σχετικές με την ροή χυμού, τη διάμετρο του στελέχους των φυτών και την θερμοκρασία της καλλιέργειας μπορούν να εκτιμήσουν την υδατική κατάσταση που βρίσκονται τα φυτά και που οφείλεται σε φυσικούς και ανθρωπογενείς λόγους (Ton et all, 2001).

Πίνακας 2.3. Παρουσίαση των αισθητήρων του Phytomonitoring σε δύο κατηγορίες.-
Αισθητήρες φυτών και Αισθητήρες περιβάλλοντος.

Αισθητήρες φυτών	Αισθητήρες περιβάλλοντος
Θερμοκρασία φύλλου	Ηλιακή Ακτινοβολία
Ροή χυμού	Θερμοκρασία & Σχετική Υγρασία αέρα
Διάμετρος βλαστού	Υγρασία εδάφους
Μέγεθος καρπού	Θερμοκρασία εδάφους

Οι τιμές που λαμβάνονται από τους αισθητήρες, δίνουν την δυνατότητα σύγκρισης δεδομένων μεταξύ διαφορετικών αισθητήρων (reproducibility) και την δυνατότητα σύγκρισης δεδομένων από διαφορετικά σημεία της ίδιας καλλιέργειας (comparability) (Ton et Kopyt, 2000).

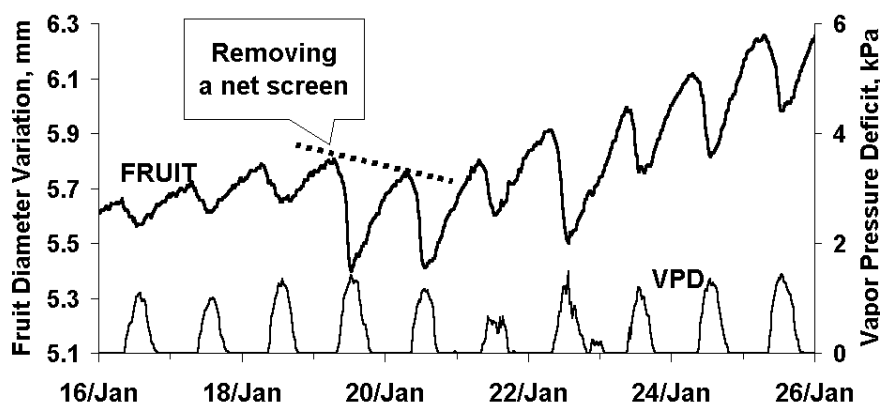
Σύστημα Πληροφόρησης και Υποστήριξη Λήψης Απόφασης

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 συστήματος (Udink ten Gate et al., 1978). Βέβαια, 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).

Το σύστημα πληροφόρησης του Phytomonitoring μπορεί να εξέγει δεδομένα (π.χ. δεδομένα Ηλιακής Ακτινοβολίας κ.α.) που μπορούν άμεσα να χρησιμοποιηθούν από τον παραγωγό για την διαχείριση του κλίματος και της άρδευσης (π.χ. υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής). Επίσης, το Phytomonitoring δύναται να προειδοποιήσει τον παραγωγό για κάποιο ασυνήθιστο ή τυχαίο συμβάν με αρνητικές επιπτώσεις στην καλλιέργεια (π.χ. μη αναμενόμενη διακοπή άρδευσης), με αποτέλεσμα την παροχή δυνατότητας άμεσης επέμβασης στον παραγωγό. Η δυνατότητα λήψης απόφασης απόφασης για την διαχείριση του κλίματος και της άρδευσης, γίνεται μέσα απο μαθηματικά μοντέλα και από την μέθοδο δοκιμής και λάθους (Trial-and-Error) (Ton and Kopyt, 2003a-b).

Ο τελικός στόχος της χρήσης του συστήματος παρακολούθησης φυτού είναι η δυνατότητα λήψης αποφάσεων (Decision Support System-DSS) για τη ρύθμιση του κλίματος και τον έλεγχο της άρδευσης στα θερμοκήπια. Το DSS του Phytomonitoring περιλαμβάνει δύο τεχνικές. Η πρώτη τεχνική είναι η “What-if”, η ανάλυση της στηρίζεται στην χρήση μαθηματικών μοντέλων ελέγχου μιας διαδικασίας. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι κάνοντας δοκιμές με ένα αόριστο μοντέλο είναι ασφαλές και σύντομο. Από την άλλη όμως η τεχνική αυτή δεν γίνεται αν βρει εφαρμογή όταν δεν έχουμε μαθηματικά μοντέλα. Η δεύτερη τεχνική, η “Trial-and-Error” είναι μια εναλλακτική της “What- if”, δίνει την δυνατότητα στον παραγωγό να ανιχνεύσει την κατάσταση της καλλιέργειας του σε μια αλλαγή που θα επιβάλλει στο περιβάλλον ή στην άρδευση 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 συστήματος παρακολούθησης φυτού μειώνει τον κίνδυνο σε σχεδόν ασήμαντο επίπεδο (Ton, Y. and Koryt, M. 2003a).

Η τεχνική “Trial-and-Error” περιλαμβάνει δύο μεθόδους. Στην πρώτη μέθοδο συγκρίνονται οι δείκτες των φυτών σε διαφορετικές χρονικές περιόδους (reproducibility) πριν και μετά την επέμβαση – αλλαγή στο περιβάλλον ή στην άρδευση της καλλιέργειας (Σχήμα 2.12). Στη δεύτερη μέθοδο συγκρίνονται τα διαγράμματα από δύο μεταχειρήσεις στην ίδια καλλιέργεια, μεταξύ των οποίων αλλάζει ένας παράγοντας (comparability) (Ton, Y. and Koryt, M. 2003a).



Σχήμα 2.12. Παρουσίαση της μεταβολής της αύξησης του καρπού σε φυτά πιπεριάς. Η αφαίρεση της θερμοκουρτίνας προκάλεσε μείωση της αύξησης του καρπού.

2.5.Συμπεράσματα

Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες συνιστούν έναν από τους σημαντικότερους τομείς της ελληνικής γεωργίας. Το θερμοκήπιο δίνει την δυνατότητα να ρυθμιστούν οι παράγοντες του περιβάλλοντος (Ηλιακή ακτινοβολία, Θερμοκρασία αέρα, Σχετική Υγρασία κ.τ.λ.) που επιδρούν στην ανάπτυξη των φυτών. Επίσης τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου καθιστούν δυνατό τον έλεγχο και την ρύθμιση της ορθής άρδευσης μέσα στο θερμοκήπιο.

Η δυνατότητα γνώσης της υδατικής κατάστασης ενός φυτού, δίνει ταυτόχρονα την δυνατότητα ορθής επέμβασης από τον παραγωγό στην καλλιέργεια του. Πολλές μελέτες έχουν γίνει, με σκοπό την εκτίμηση της υδατικής και θερμικής καταπόνησης των φυτών, για την σωστή διαχείριση της άρδευσης. Η μέτρηση της υδατικής κατάστασης του φυτού μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους χωρίς, ωστόσο, να υπάρχει κάποια ιδανική λύση. Ο δείκτης CWSI φαίνεται να αποτελεί ένα σπουδαίο εργαλείο για την ανίχνευση της υδατικής κατάστασης των καλλιεργειών υπό κάλυψη.

Η αναγκαιότητα της ορθής ρύθμισης του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου και της διαχείρισης της άρδευσης, σε συνδυασμό με την εξέλιξη της τεχνολογίας, οδήγησε στην δημιουργία συστημάτων βελτιστοποίησης ελέγχου του κλίματος και της άρδευσης. Το σύστημα παρακολούθησης φυτού αποτελεί έναν ολοκληρωμένο σύστημα, που σε σύγκριση με άλλα διαθέτει τα παρακάτω 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.

- Πληροφορεί τον χρήστη σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. 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 των πληροφοριών.

➤ 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 χρήση συστημάτων αυτόματου ελέγχου στο χώρο του θερμοκηπίου δίνει την δυνατότητα αύξησης της παραγωγής, βελτίωσης της ποιότητας, εξοικονόμησης ύδατος και μείωση του κόστους παραγωγής. Στην παρούσα μελέτη επιχειρείται η δυνατότητα εκτίμησης της υδατικής κατάστασης φυτών τομάτας σε υδροπονικό καθεστώς ανάπτυξης, βάση δεικτών διαμέτρου βλαστού σε σχέση με το CWSI και σε σχέση με κλιματικούς παράγοντες.

3. Υλικά και Μέθοδοι

3.1. Τόπος και εποχή διεξαγωγής του πειράματος

Η πειραματική διαδικασία, έλαβε χώρα στα θερμοκήπια του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Εικόνα 3.1.), στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου, που βρίσκεται στο Βελεστίνο (γεωγραφικό πλάτος 39° 22', γεωγραφικό μήκος 22° 44' και υψόμετρο 85 μέτρα).

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε δύο διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Η πρώτη φάση του πειράματος διεκπεραιώθηκε κατά την διάρκεια του μήνα Απριλίου του 2011 σε ανεπτυγμένα φυτά τομάτας (*Lycopersicon esculentum*, cv Belladonna). Η δεύτερη φάση του πειράματος ολοκληρώθηκε κατά την διάρκεια του Νοεμβρίου του 2011, σε νεαρά φυτά τομάτας (*Lycopersicon esculentum*, cv Formula). Τα φυτά και στις δύο περιπτώσεις αναπτύχθηκαν σε υπόστρωμα πετροβάμβακα της εταιρίας Grodan και αναπτύχθηκαν στο ίδιο θερμοκήπιο.



Εικόνα 3.1. Οι θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις στο αγρόκτημα του Παν/μίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο.

3.2. Χαρακτηριστικά πειραματικού θερμοκηπίου-Βασικά λειτουργικά συστήματα

Ο τύπος του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε είναι τροποποιημένο τοξωτό, με παράθυρα πλαϊνά και οροφής. Ο σκελετός του είναι κατασκευασμένος από γαλβανισμένο χάλυβα και είναι καλυμμένο από πλαστικό φύλλο πολυαιθυλενίου. Η επιφάνεια του εδάφους είναι 160m^2 (καλυμμένη με αδιαφανές πλαστικό άσπρου χρώματος (20m x 80 m). Ο προσανατολισμός του θερμοκηπίου είναι βορειοανατολικός, με απόκλιση του άξονα από τον Βορρά 36° ανατολικά. Το ύψος του κορυφιά είναι 4,1 m και το ύψος του ορθοστάτη 2,4 m. Το πειραματικό θερμοκήπιο, απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2. Εξωτερική άποψη του πειραματικού θερμοκηπίου.

3.2.1. Αερισμός

Ο βασικός εξοπλισμός για τον αερισμό του θερμοκηπίου ήταν τα πλαϊνά παράθυρα και ένα παράθυρο οροφής. Συγκεκριμένα, τα πλευρικά παράθυρα με μέγιστη επιφάνεια ανοίγματος 27m^2 , βρίσκονται κατά μήκος των δύο μεγάλων πλευρών με διαστάσεις 0,9m x 15m και σε απόσταση 0,6 m από το έδαφος. Το παράθυρο οροφής (Εικόνα 3.2.) έχει επιφάνεια ανοίγματος 18m^2 . Τα παράθυρα λειτουργούν αυτόματα, μέσω ενός συστήματος ελέγχου που δίνει εντολή να ανοίξουν όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους $20\text{-}22^\circ\text{C}$.

3.2.2. Θέρμανση

Με σκοπό την διατήρηση της θερμοκρασίας στους 15-17° C κατά τη διάρκεια της ημέρας και 13° C κατά τη διάρκεια της νύχτας, το θερμοκήπιο διαθέτει σύστημα θέρμανσης που αποτελείται από έναν καυστήρα πετρελαίου 50kW, πλαστικούς σωλήνες κυκλοφορίας νερού και ένα αερόθερμο. Οι πλαστικοί σωλήνες διατομής 25 mm βρίσκονται πάνω από το έδαφος, ενώ το αερόθερμο βρίσκεται 2,6 m πάνω από το έδαφος.

3.2.3. Υδροπονικό σύστημα

Το υδροπονικό σύστημα που διαθέτει το θερμοκήπιο αποτελείται από τις δεξαμενές άρδευσης που βρίσκονται στη νότια πλευρά του θερμοκηπίου, τις δεξαμενές απορροής που βρίσκονται στην βόρεια πλευρά του, ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλονται τα μεταλλικά κανάλια στα οποία είναι τοποθετημένοι οι σάκοι πετροβάμβακα.

Το υδροπονικό σύστημα που εφαρμόστηκε δεν ήταν ίδιο για όλα τα κανάλια φυτών. Στην πρώτη φάση του πειράματος μελετήθηκαν δύο διαφορετικές μεταχειρίσεις. Η μία αφορούσε σε *ανοιχτό υδροπονικό σύστημα*, όπου δεν εφαρμόζεται ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος και η άλλη σε *κλειστό υδροπονικό σύστημα*, στο οποίο γινόταν ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος, ενώ ταυτόχρονα γινόταν προσθήκη νερού και θρεπτικού διαλύματος τόσου, όσου είχε απορροφηθεί από τα φυτά.

Σε αντίθεση με την πρώτη φάση, στην δεύτερη φάση του πειράματος μελετήθηκαν πάλι δύο διαφορετικές μεταχειρίσεις που αφορούσαν σε *ημίκλειστα υδροπονικά συστήματα*. Στο ένα ημίκλειστο σύστημα, η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος γινόταν όταν η συγκέντρωση Na^+ , έφτανε τα 12,5mmol/L, ενώ στο δεύτερο ημίκλειστο σύστημα η ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος γινόταν όταν η συγκέντρωση Na^+ είχε φτάσει τα 25mmol/L.

3.3. Μετρήσεις και όργανα που χρησιμοποιήθηκαν

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκε το σύστημα παρακολούθησης φυτού (Phytomonitoring™) της εταιρίας Phyttech™. Το σύστημα αυτό αποτελείται από τους αισθητήρες, που είναι τα όργανα που έρχονται σε επαφή με το φυτό ή το περιβάλλον αυτού με σκοπό την μέτρηση κάποιας παραμέτρου, έναν αναμεταδότη δεδομένων AC, ένα μόντεμ για την επικοινωνία με τον αναμεταδότη και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο είχε εγκατασταθεί το λογισμικό πρόγραμμα Phytalk PC Software. Η επικοινωνία των αισθητήρων με το σύστημα είναι ασύρματη και τα δεδομένα μεταφέρονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η δειγματοληψία των δεδομένων γινόταν ανά 10 λεπτά. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν διακρίνονται σε δύο κατηγορίες και παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1. Τύποι αισθητήρων, σύμφωνα με το μετρούμενο μέγεθος

Αισθητήρες Περιβάλλοντος	Αισθητήρες φυτού
Ηλιακή Ακτινοβολία	Διάμετρος βλαστού
Σχετική Υγρασία Αέρα	Θερμοκρασία φύλλου
Θερμοκρασία Αέρα	Ροη χυμού
	Πάχος καρπού

3.3.1. Αισθητήρας μέτρησης Ηλιακής Ακτινοβολίας

Για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την καλλιέργεια χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας RS-TIR-4R. Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε κεντρικό σημείο του θερμοκηπίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3. Τέτοιου είδους αισθητήρες γνωστοί και ως πυρανόμετρα είναι αισθητήρες μέτρησης θερμότητας, φτιαγμένοι από δύο θερμοστοιχεία τα οποία παρουσιάζουν διαφορά θερμοκρασίας.



Εικόνα 3.3. Αισθητήρας μέτρησης Ηλιακής Ακτινοβολίας

3.3.2. Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας και Σχετικής Υγρασίας Αέρα

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας στο περιβάλλον του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας RS-ATH-5FR +AD-9 (230V to 24VAC, 0.6 A) Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε κεντρικό σημείο του θερμοκηπίου, προστατευόμενος από προστατευτικό κάλυμμα όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4. Ο αισθητήρας θερμοκρασίας είναι ένας αισθητήρας επαφής που αποτελείται από ένα θερμοζεύγος, που μετράει διαφορά δυναμικού, η οποία εμφανίζεται στα δύο ελεύθερα άκρα του.

Ο αισθητήρας μέτρησης της Σχετικής Υγρασίας, είναι ένα ψυχρόμετρο, που αποτελείται από δύο θερμομέτρα, το ένα εκ' των οποίων είναι διαρκώς υγρό, η εξάτμιση του νερού πάνω από τον αισθητήρα προκαλεί την απορρόφηση ενέργειας και την μείωση της θερμοκρασίας του. Το ποσοστό της Σχετικής Υγρασίας του αέρα μειώνεται, όσο αυξάνεται η διαφορά θερμοκρασίας των δύο θερμομέτρων.



Εικόνα 3.4. Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας και Σχετικής υγρασίας αέρα μέσα στο προστατευτικό κάλυμμα.

3.3.3. Αισθητήρας μέτρησης διαμέτρου βλαστού

Για τη μέτρηση της διαμέτρου βλαστού χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας SD-5M. Η λειτουργία αυτού του αισθητήρα βασίζεται στην αύξηση του φυτού και στην υδατική περιεκτικότητα του που επηρεάζεται από τις κλιματικές συνθήκες. Δύο τέτοιοι αισθητήρες τοποθετήθηκαν σε δύο φυτά που αναπτύσσονταν σε διαφορετικό υδροπονικό καθεστώς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5.



Εικόνα 3.5. Αισθητήρας μέτρησης διαμέτρου βλαστού.

Για την βαθμονόμηση του αισθητήρα μέτρησης βλαστού χρησιμοποιήθηκε ειδικό όργανο (Εικόνα 3.6.), σύμφωνα με τις ενδείξεις του οποίου γνωρίζαμε αν ο αισθητήρας έχει τοποθετηθεί σωστά στο φυτό, πραγματοποιώντας το RF – test.



Εικόνα 3.6. Ειδικό όργανο για το καλιμπράρισμα του αισθητήρα μέτρησης διαμέτρου βλαστού.

3.3.4. Αισθητήρας μέτρησης ροής χυμού

Για τη μέτρηση της ροής χυμού χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας SF-5M. Ο αισθητήρας τοποθετήθηκε στο φυτό όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7. και κατόπιν τυλίχθηκε με αλουμινόχαρτο, καθώς απαιτεί προστασία από την ηλιακή ακτινοβολία. Ο αισθητήρας στη πραγματικότητα μετράει την διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ δύο σημείων.



Εικόνα 3.7. Αισθητήρας μέτρησης ροής χυμού

3.3.5. Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας φύλλου

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας φύλλου χρησιμοποιήθηκε αισθητήρας LT-2M. Στην Εικόνα 3.8. παρουσιάζεται ο αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας του φύλλου, όπως τοποθετήθηκε σε φυτό τομάτας στο πειραματικό θερμοκήπιο. Ο αισθητήρας αυτός είναι ένα clip που συγκρατείται στο φύλλο του φυτού και μετράει την θερμοκρασία του, όταν αυτή φτάσει την θερμοκρασία του φύλλου.



Εικόνα 3.8. Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας φύλλου.

3.3.6. Αισθητήρας μέτρησης διαμέτρου καρπού

Για τη μέτρηση της διαμέτρου καρπού χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.9.. Η χρήση αυτού του αισθητήρα βασίζεται στην αύξηση του καρπού και κυρίως στην περιεκτικότητά του σε νερό. Σε περίπτωση υδατικού στρες, έλλειψης νερού ή ανορθόδοξης άρδευσης, η αύξηση του καρπού επιβραδύνεται.



Εικόνα 3.9. Αισθητήρας μέτρησης διαμέτρου καρπού.

3.4. Υπολογισμοί δεικτών και παραμέτρων

3.4.1. Υπολογισμός ελλείμματος κορεσμού του αέρα (VPD)

Το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (Vapor Pressure Deficit) είναι η διαφορά μεταξύ του ποσού υγρασίας στον αέρα και του ποσού υγρασίας που ο αέρας μπορεί να συγκρατήσει στον κορεσμό του. Ουσιαστικά, γνωρίζοντας το VPD μπορούμε να εκτιμήσουμε το ποσό συμπύκνωσης μέσα στο θερμοκήπιο, τις ανάγκες άρδευσης της καλλιέργειας και ακόμα να εκτιμήσουμε την πιθανότητα απειλής ασθενειών (μύκητες). Ο έλεγχος αυτού του δείκτη είναι απαραίτητος γιατί αν ο αέρας υπερκορεστεί τότε υδρατμοί θα κατακαθίσουν σε διάφορες επιφάνειες του θερμοκηπίου.

Ο υπολογισμός του VPD (Jupp, 2003) γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω αριθμητική εξίσωση (Σχέση 3.1.):

$$VPD = VP_{sat} - VP_{air} \quad (3.1.)$$

όπου, VP_{sat} είναι η μερική πίεση ατμών, δηλαδή το ποσό των υδρατμών που βρίσκεται στον αέρα και υπολογίζεται από την Σχέση 3.1.1..

$$VP_{sat} = 0,611 \times EXP \left[\frac{17,27 T}{T + 237} \right] \left(\frac{RH}{100} \right) \quad (3.1.1.)$$

VP_{air} είναι η πίεση ατμών στον κορεσμό, δηλαδή όταν ο αέρας συγκεντρώσει το μέγιστο ποσό νερού και υπολογίζεται από την Σχέση 3.1.2..

$$VP_{air} = 0.611 \times EXP \left[17,27 \frac{T}{T + 273} \right] \quad (3.1.2.)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (VPD) εκφράζεται με μια σχέση που συνδέει δύο βασικές ψυχομετρικές ιδιότητες του αέρα, την Θερμοκρασία και τη Σχετική Υγρασία.

Στη παρούσα μελέτη υπολογίστηκε το VPD, βάση των μετρούμενων τιμών Θερμοκρασίας και Σχετικής Υγρασίας, σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, οι υπολογισμοί έγιναν σε φύλλο Excel.

3.4.2. Υπολογισμός του δείκτη υδατικής καταπόνησης (CWSI)

Για τον υπολογισμό του δείκτη υδατικής καταπόνησης (CWSI) των φυτών στη παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η Σχέση 3.2., όπως αυτή περιγράφεται από τους Katsoulas et al.,(2000) και Jackson et al. (1981).

$$CWSI = \frac{T_c - T_m}{T_M - T_m} \quad (3.2.)$$

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:

$$T_M = T_a + \frac{R_n}{g_a \rho C_p} \quad (3.2.1)$$

$$T_m = T_a + \frac{\left(\frac{1}{g_a} + \frac{1}{g_M}\right) \cdot \frac{R_n}{\rho C_p} - \frac{D_{leaf-air}}{\gamma}}{1 + \frac{\Delta}{\gamma} + \frac{g_a}{g_M}} \quad (3.2.2.)$$

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

3.4.3. Υπολογισμός της διαπνοής των φυτών

Η διαπνοή των φυτών αποτελεί μία πολύ σημαντική παράμετρο της υδατικής κατάστασης των φυτών και είναι σημαντικό να προβλέπεται με σκοπό την ορθή διαχείριση της άρδευσης. Σε αυτή την εργασία εκτιμήθηκε η διαπνοή των φυτών τομάτας στο πρώτο μέρος του πειράματος, όπου η καλλιέργεια αναπτυσσόταν υπό καθεστώς κλειστού και ανοιχτού υδροπονικού συστήματος. Η σχέση (Σχέση 3.3.) που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάστηκε από τους Katsoulas et al. το 1999.

$$TR = AG_{up} + B \cdot VPD \quad (3.3.)$$

Στη Σχέση 3.3., το A εκφράζεται από τη Σχέση 3.3.1. (Baille et al.,1994b) και το B, από τη Σχέση 3.3.2..

$$A = \alpha \cdot F_1 \cdot (LAI) = \alpha \cdot [1 - \exp \cdot (-k \cdot LAI)] \quad (3.3.1.)$$

Όπου, $k=0.64$

$$B = \beta \cdot F_2 \cdot (LAI) = \beta \cdot LAI \quad (3.3.2.)$$

Η τιμή του A και του B εκτιμήθηκαν σύμφωνα με τις αντίστοιχες τιμές μετρούμενης διαπνοής.

3.4.4. Υπολογισμός των δεικτών μεταβολής διαμέτρου βλαστού

Χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις της καθημερινής εξέλιξης της διαμέτρου του βλαστού των φυτών οι Fernandez και Cuevas το 2010 μέσω των αντίστοιχων αισθητήρων, πραγματοποίησαν την εξαγωγή μιας ομάδας δεικτών, όπως αυτοί παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.

Οι δείκτες που αναγράφονται στο γράφημα (Σχήμα 3.1.) επεξηγούνται παρακάτω και ταυτόχρονα επιδεικνύεται ο τρόπος που υπολογίστηκαν.

- 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}**)

$$SGR_{DOY} = DG \text{ για } N \text{ ημέρες}$$

- Αθροιστική ανάπτυξη (CG)

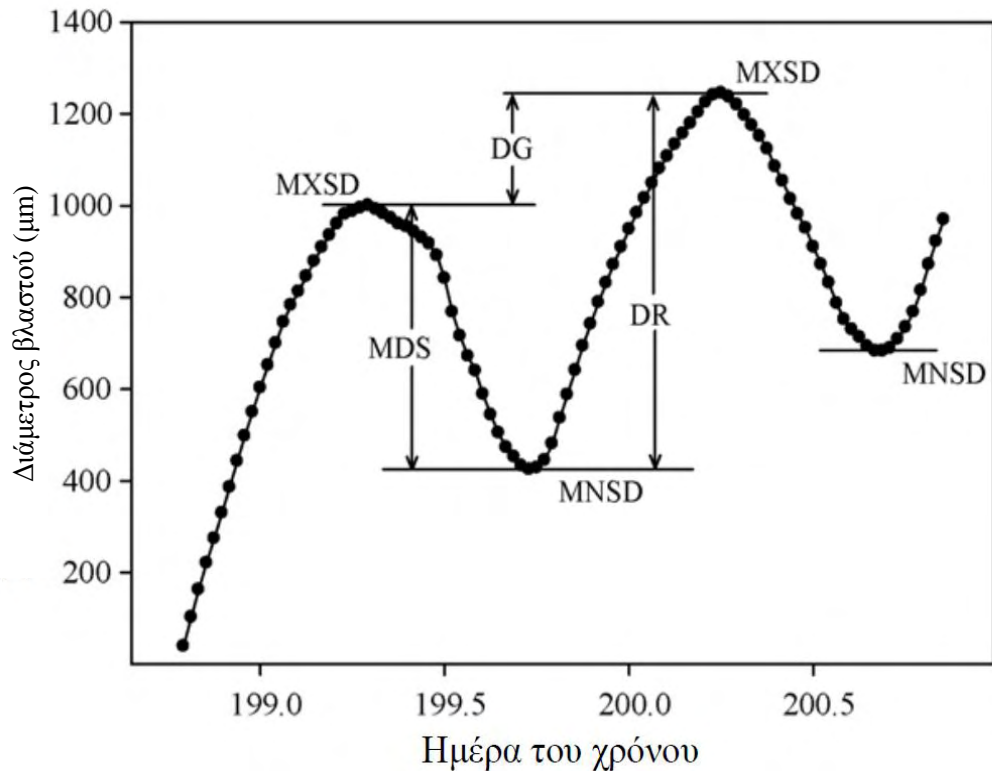
$$CG = \sum_{DOY-N}^{DOY} CG, \text{ για } N \text{ ημέρες}$$

- Μέση ημερήσια ανάπτυξη βλαστού (**ADG_{DOY}**)

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

όπου, DOY = ημέρα του χρόνου

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι 5 πρώτοι δείκτες.



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’

3.5. Επεξεργασία τιμών

Οι μετρήσεις από τους αισθητήρες μεταφέρθηκαν αυτόματα σε κατάλληλο λογισμικό στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το λογισμικό αυτό που αποτελεί κομμάτι του συστήματος έδινε τη δυνατότητα της εξαγωγής των μετρούμενων μεγεθών μέσω του Access. Στη συνέχεια οι μετρήσεις μεταφέρθηκαν σε υπολογιστικά φύλλα Excel όπου έγινε οι επεξεργασίες τους. Στο Excel επίσης υπολογίστηκαν όλοι οι δείκτες και κατασκευάστηκαν οι γραφικές παραστάσεις.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έδωσαν οι αισθητήρες. Προτού γίνει εκτενής αναφορά των συσχετίσεων μεταξύ των εκτιμώμενων παραγόντων είναι απαραίτητο να γίνει παρουσίαση των βασικών κλιματικών συνθηκών που επικρατούσαν στο πειραματικό θερμοκηπίου.

Στους παρακάτω Πίνακες αναγράφονται οι βασικές κλιματικές συνθήκες έτσι όπως καταγράφηκαν από τους αντίστοιχους αισθητήρες. Οι τιμές που αναγράφονται αφορούν το μέσο όρο των μετρούμενων μεγεθών κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Στον Πίνακα 4.1. παρουσιάζονται οι τιμές που μετρήθηκαν στο πρώτο μέρος της πειραματικής διαδικασίας κατά τον μήνα Απρίλιο του 2011, όπου τα φυτά αναπτύσσονταν σε ανοιχτό και κλειστό υδροπονικό σύστημα. Στον Πίνακα 4.2. παρουσιάζεται το κλίμα του πειραματικού θερμοκηπίου κατά τον μήνα Νοέμβριο του ίδιου έτους, όπου τα φυτά αναπτύσσονταν στους δύο τύπους ημίκλειστων υδροπονικών συστημάτων (12,5mmol/L Na και 25mmol/L Na).

Πίνακας 4.1. Μέσες τιμές κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια του Απριλίου 2011

Πενταήμερο	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)	Θερμοκρασία (°C)	Σχετική Υγρασία (%)
1 ^ο	155	21	58
2 ^ο	182	19	51
3 ^ο	60	18	68
4 ^ο	193	19	49
5 ^ο	95	19	64

Πίνακας 4.2. Μέσες τιμές κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια του Νοεμβρίου 2011

Τετραήμερο	Ηλιακή Ακτινοβολία (W/m ²)	Θερμοκρασία (°C)	Σχετική Υγρασία (%)
1 ^ο	65	14	75
2 ^ο	21	15	82
3 ^ο	60	16	71
4 ^ο	51	17	78

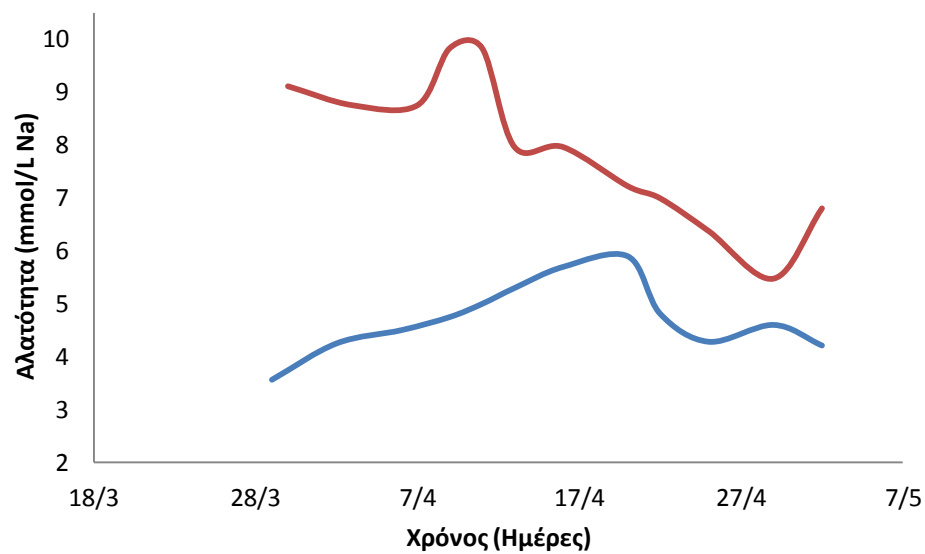
4.1. Μεταβολή της διαμέτρου βλαστού φυτών τομάτας

Στην παρούσα μελέτη, η διάμετρος βλαστού, αποτελεί βασική μεταβλητή για την εξέταση της ανάπτυξης των καλλιεργούμενων φυτών. Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται αφορούν στα μέσα Απριλίου του 2011, όπου η καλλιέργεια βρίσκεται ήδη σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης καθώς και μετρήσεις από νεαρά φυτά τομάτας, που λήφθηκαν τον Νοέμβριο του 2011.

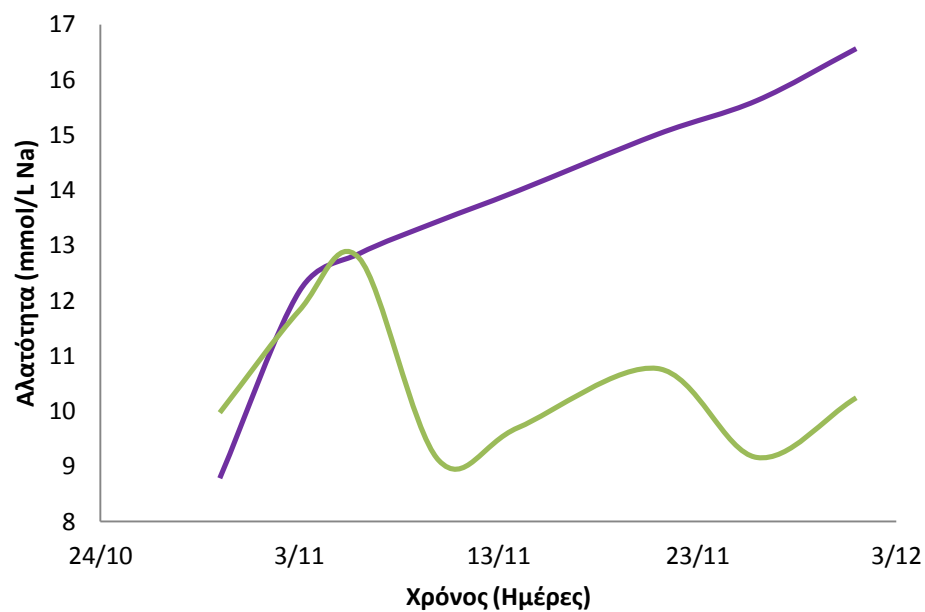
Το πρώτο μέρος του πειράματος αφορά σε φυτά τομάτα που αναπτύχθηκαν σε κλειστό και ανοιχτό υδροπονικό σύστημα. Για την καλύτερη κατανόηση, παρατίθεται διάγραμμα με την μεταβολή της αλατότητας στο υπόστρωμα της καλλιέργειας στο ανοιχτό και κλειστό υδροπονικό σύστημα (Σχήμα 4.1.). Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.2. παρουσιάζεται η μεταβολή της αλατότητας στο υπόστρωμα των φυτών που αναπτύχθηκαν στους δύο τύπους ημίκλειστων συστημάτων.

Στο Σχήμα 4.3. (Α), παρουσιάζεται η πορεία ανάπτυξης των φυτών σε ανοιχτό (α) και κλειστό (β) υδροπονικό σύστημα. Όπως φαίνεται, το φυτό τομάτας που καλλιεργείται σε ανοιχτό υδροπονικό σύστημα αναπτύσσεται φυσιολογικά με το πέρασμα των ημερών. Αντίθετα, η διάμετρος του βλαστού του φυτού που βρίσκεται στην γραμμή του κλειστού υδροπονικού κυκλώματος, παραμένει σχεδόν σταθερή. Η κατάσταση αυτή, πιθανότατα οφείλεται σε ωσμωτικές δυνάμεις μεταξύ ρίζας και υποστρώματος, λόγω της αύξησης της αλατότητας στο υπόστρωμα της καλλιέργειας του κλειστού υδροπονικού συστήματος.

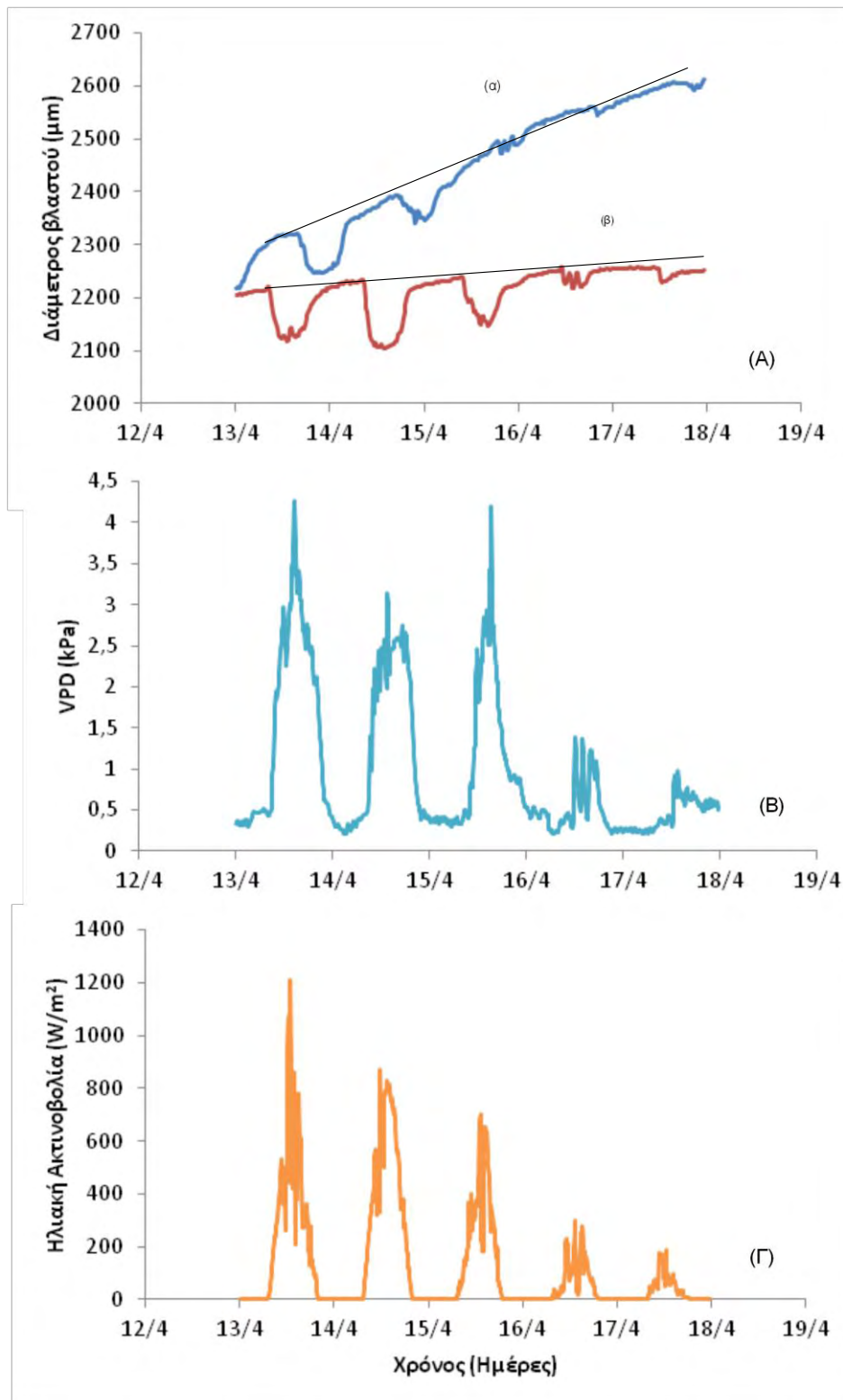
Ταυτόχρονα στο Σχήμα 4.3. παρουσιάζονται τα κλιματικά δεδομένα (Έλλειμμα κορεσμού του αέρα (Β) και Ηλιακή ακτινοβολία (Γ) για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η μεταβολή της διαμέτρου βλαστού των φυτών φαίνεται να επηρεάζεται από τις κλιματικές συνθήκες, καθώς σε συνθήκες χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας, όπου το έλλειμμα κορεσμού στην ατμόσφαιρα, είναι χαμηλό, ο βλαστός των φυτών αναπτύσσεται με ταχύτερους ρυθμούς, όσον αφορά το φυτό που καλλιεργείται σε συνθήκες ανοιχτού υδροπονικού συστήματος και δεν παρουσιάζει σημάδια υδατικής καταπόνησης. Αντίθετα, το φυτό που αναπτύσσεται στο κλειστό υδροπονικό σύστημα δεν παρουσιάζει αύξηση του ρυθμού ανάπτυξης του βλαστού, εξαιτίας του ωσμωτικού δυναμικού, που δεν επιτρέπει την πρόσληψη νερού από το φυτό. Μία ποσότητα του νερού που συγκρατεί το φυτό κατά τη διάρκεια της νύχτας,



Σχήμα 4.1. Μεταβολή της συγκέντρωσης αλάτων στο υπόστρωμα του κλειστού (κόκκινη γραμμή) και του ανοιχτού (μπλε γραμμή) υδροπονικού συστήματος (Απρίλιος 2011).



Σχήμα 4.2. Μεταβολή της συγκέντρωσης αλάτων στο υπόστρωμα των δύο ημίκλειστων υδροπονικών συστημάτων (Νοέμβριος 2011).



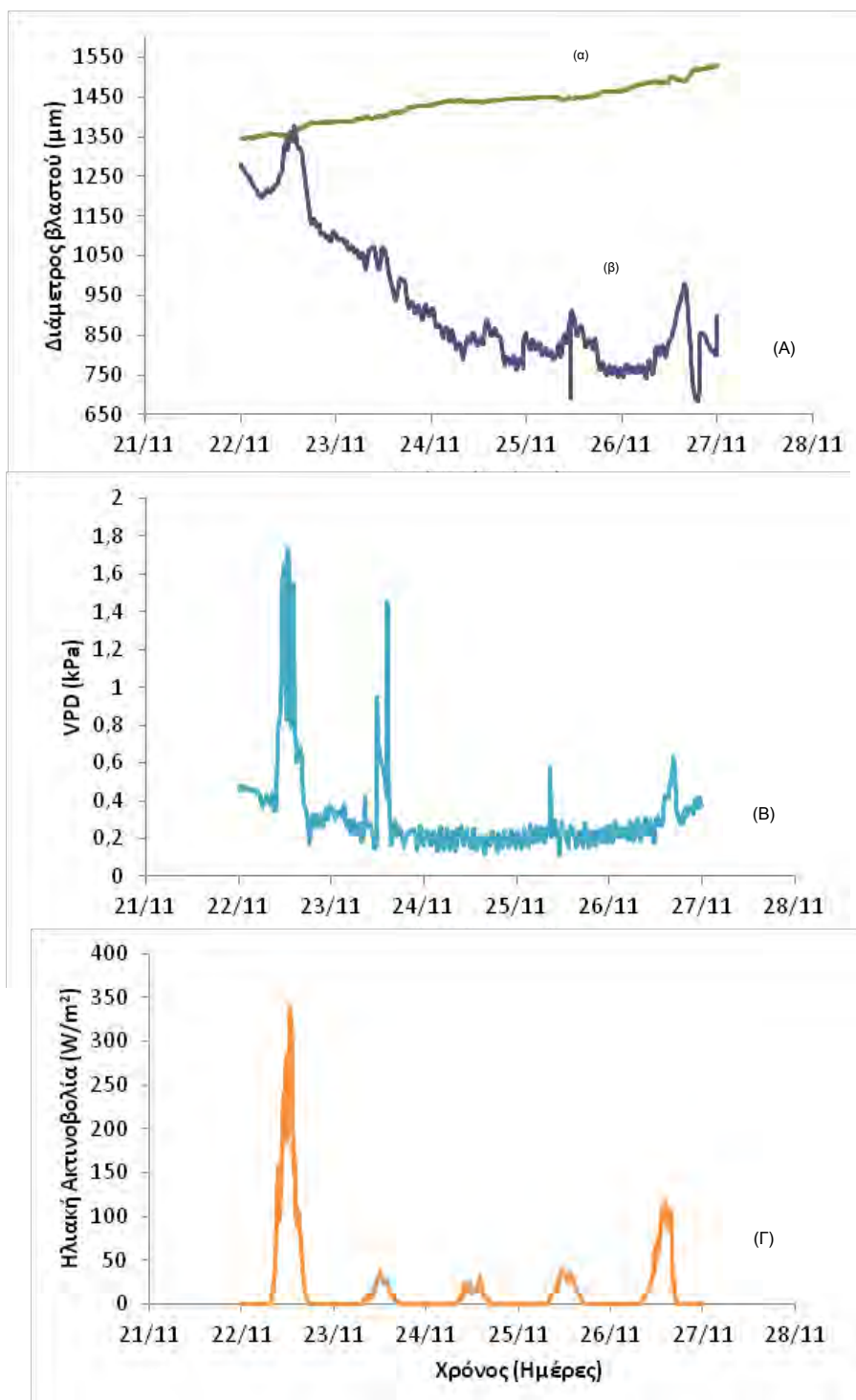
Σχήμα 4.3. Γραφική απεικόνιση της πορείας ανάπτυξης διαμέτρου βλαστού σε ανοιχτό (α) και κλειστό (β) υδροπονικό σύστημα (Α), της ηλιακής ακτινοβολίας (Β) και του ελλείμματος κορεσμού (Γ) σε διάστημα πέντε ημερών.

αποβάλλεται από τα διάφορα μέρη του από την στιγμή που αρχίζει να διαπνέει, δηλαδή από τις πρώτες πρωινές ώρες (Hinnckley and Bruckerhoff, 1975). Αυτό επιδρά στην μεταβολή της διαμέτρου όλων των οργάνων που συγκρατούν νερό (π.χ. βλαστός, καρπός κ.α.) (Ueda and Shibata, 2001;Sevanto et al., 2002;Čermák et al., 2007).

Ομοίως στο Σχήμα 4.4. απεικονίζεται η μεταβολή ανάπτυξης βλαστού νεαρών φυτών τομάτας (Α) σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα με συγκέντρωση 12,5 mmol/L Na (α) και 25 mmol/L Na(β). Ταυτόχρονα, στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται οι κλιματικές συνθήκες εντός του θερμοκηπίου για τις αντίστοιχες ημέρες. Συγκεκριμένα, το έλλειμμα κορεσμού του αέρα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4. (Β) ενώ η Ηλιακή ακτινοβολία απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4. (Γ).

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4. η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας και του ελλείμματος κορεσμού της ατμόσφαιρας φαίνεται ότι επηρεάζει αρνητικά την μεταβολή της διαμέτρου βλαστού, κάτι που εμφανίζεται περισσότερο στο φυτό που καλλιεργείται στο ημίκλειστο σύστημα με συγκέντρωση 25 mmol/L Na. Συγκριτικά, η μεταβολή της διαμέτρου βλαστού των δύο φυτών διαφέρει. Η πιθανότερη εξήγηση είναι ότι τα φυτά βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και η υψηλότερη συγκέντρωση αλάτων ίσως επηρεάζει αρνητικά την μεταβολή της διαμέτρου του βλαστού στην περίπτωση του φυτού β, ενώ ταυτόχρονα το φυτό που αναπτύσσεται σε χαμηλότερη συγκέντρωση αλάτων (12,5 mmol/L Na) έχει πολύ αργή ανάπτυξη. Γεγονός είναι πάντως, πως οι περισσότερες μελέτες που αφορούν στην μεταβολή διαμέτρου βλαστού φυτών εξετάζονται και με βάση το στάδιο ανάπτυξης του φυτού.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να παρατηρήσουμε σύμφωνα με τις μελέτες που έχουν γίνει και τα αποτελέσματα τις παρούσας εργασίας, ότι το έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας (VPD) στο θερμοκήπιο επιδρά σημαντικά στον ρυθμό αύξησης του βλαστού των φυτών. Από την άλλη μεριά, το VPD, δεν αποτελεί τον μοναδικό περιοριστικό παράγοντα, καθώς η ομαλή αύξηση του βλαστού των φυτών φαίνεται να επηρεάζεται εξίσου από τα επίπεδα αλατότητας του υποστρώματος καθώς και από το στάδιο ανάπτυξης των φυτών.

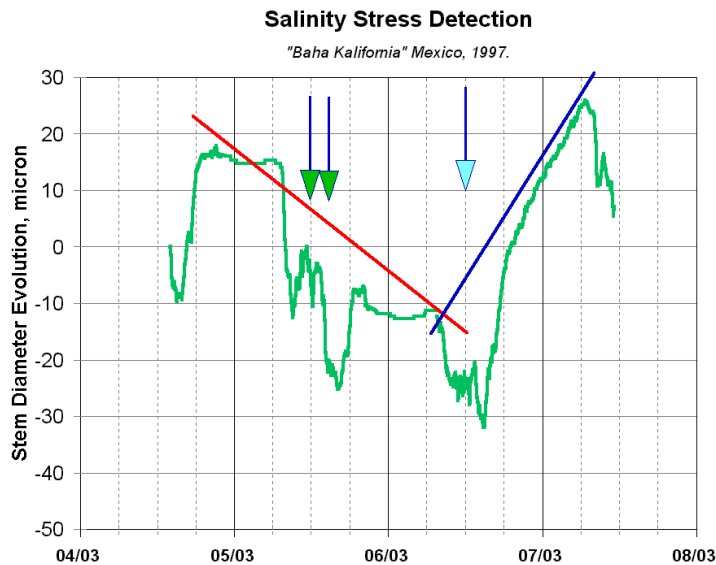


Σχήμα 4.4. Σχηματική απεικόνιση της μεταβολής της διαμέτρου του βλαστού φυτών τομάτας σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα συγκέντρωσης 12,5 mmol/L Na (α) και 25 mmol/L Na (β) (A). Παρουσίαση του ελλείμματος κορεσμού (B) και της Ηλιακής Ακτινοβολίας (Γ).

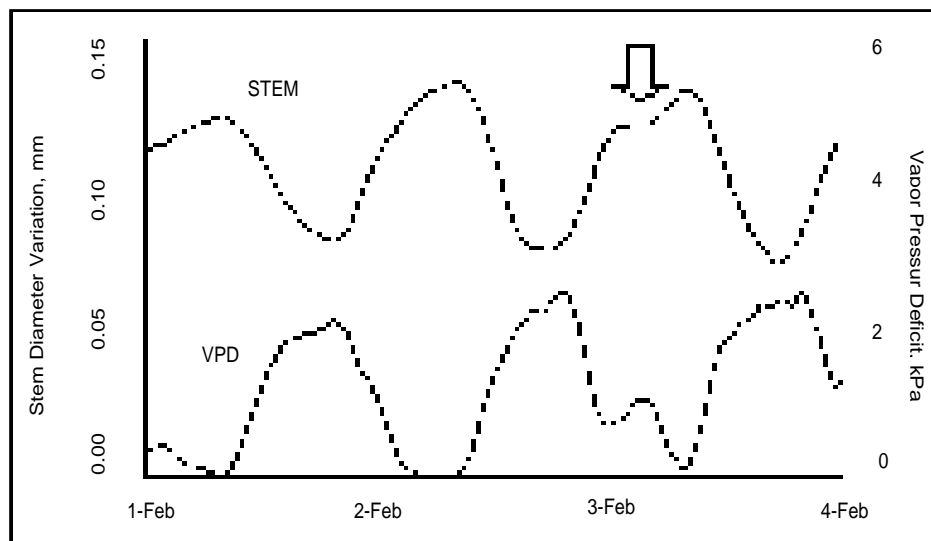
Συγκρίνοντας το γράφημα της μεταβολής της αλατότητας (Σχήμα 4.1.) με το γράφημα της μεταβολής της διαμέτρου του βλαστού (Σχήμα 4.3. (Α)), μπορούμε να παρατηρήσουμε, ότι μεταξύ της 13^{ης} και 18^{ης} Απριλίου υπάρχει μια σχετική πτώση της συγκέντρωσης αλάτων στο υπόστρωμα τόσο του κλειστού όσο και του ανοιχτού υδροπονικού συστήματος. Πιθανότατα, αυτός είναι και ο λόγος της μείωσης της ελάχιστης συρρίκνωσης του βλαστού και στις δύο περιπτώσεις. Επιπλέον, κατά την ίδια χρονική περίοδο, η συγκέντρωση αλάτων στο υπόστρωμα του κλειστού υδροπονικού συστήματος είναι σαφέστατα υψηλότερη από αυτή στο ανοιχτό. Ίσως, αυτό να εξηγεί και την ελάχιστη ανάπτυξη του βλαστού του φυτού που καλλιεργείται στο κλειστό υδροπονικό σύστημα.

Παρατηρώντας το γράφημα της μεταβολής της αλατότητας (Σχήμα 4.2.) στα ημίκλειστα υδροπονικά συστήματα συγκέντρωσης 12,5 και 25 mmol/L Na, μπορούμε να πούμε ότι η συγκέντρωση της αλατότητας στο δεύτερο αυξάνεται γρήγορα και είναι σαφώς μεγαλύτερη από την συγκέντρωση αλάτων στο υπόστρωμα του πρώτου υδροπονικού συστήματος. Η αυξημένη συγκέντρωση αλάτων στο ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα των 25mmol/L Na ίσως προκαλεί αυτές τις απότομες διακυμάνσεις της μεταβολής του βλαστού που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4.(Α)(α). Στο Σχήμα 4.5. απεικονίζεται η εξέλιξη της διαμέτρου του βλαστού φυτών τομάτας σε καθεστώς υδατικής καταπόνησης, λόγω αυξημένων επιπέδων αλατότητας. Η επιπλέον άρδευση (πράσινα βέλη), δεν είχε θετική επίδραση στην αύξηση του βλαστού. Μόνο με προσθήκη μεγάλης ποσότητας νερού (γαλάζιο βέλος) εμφανίστηκαν θετικά αποτελέσματα (Ton et Koryt, 1998).

Κατά την διάρκεια της νύχτας όπου το έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας είναι υψηλό, ο αέρας έχει μεγαλύτερη ικανότητα συγκράτησης υδρατμών σε σχέση με την ημέρα, οπότε ο ρυθμός αύξησης του βλαστού μειώνεται, κάποια ενδεχόμενη ξήρανση της ατμόσφαιρας είναι ικανή να επιφέρει ανασχεση της ανάπτυξης της διαμέτρου του βλαστού (Σχήμα 4.6.). Το ίδιο αποτέλεσμα βρήκαν και οι Koryt et al. (2001) σε καλλιέργεια τριανταφυλλιάς, όπου η αύξηση του ελλείμματος κορεσμού της ατμόσφαιρας είχε σαν αποτέλεσμα την μείωση του ρυθμού ανάπτυξης του βλαστού των φυτών. Την άμεση επίδραση που είχε η περιορισμένη ηλιακή ακτινοβολία και η χαμηλή εξατμιστική ανάγκη στη συρρίκνωση και ανάκαμψη της διαμέτρου βλαστού των φυτών παρουσίασαν οι Zhang et al. (2006) για καλλιέργεια βαμβακιού.



Σχήμα 4.5. Γραφική απεικόνιση της πορείας ανάπτυξης διαμέτρου βλαστού σε φυτά τομάτας με πολλά σημάδια υδατικής καταπόνησης λόγω αυξημένης αλατότητας.



Σχήμα 4.6. Γραφική απεικόνιση της πορείας ανάπτυξης διαμέτρου βλαστού σε φυτά τομάτας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα. Η ανάσχεση της αύξησης του βλαστού κατά την διάρκεια της νύχτας οφείλεται στην μείωση του ελλείμματος του κορεσμού του αέρα (Ton et Kopyt, 2003).

4.1.1. Δείκτες μεταβολής διαμέτρου βλαστού (SDV indicators)

Οι δείκτες μεταβολής διαμέτρου βλαστού έχουν χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές, με σκοπό την εκτίμηση της υδατικής καταπόνησης των φυτών καθώς πλεονεκτούν σε σχέση με άλλους χρησιμοποιούμενους δείκτες όπως το υδατικό δυναμικό.

Στην παρούσα μελέτη, για την ανίχνευση της υδατικής κατάστασης των φυτών τομάτας, εκτιμώντας την επίδραση των κλιματικών παραγόντων στην ανάπτυξη του φυτού υπολογίσθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες μεταβολής διαμέτρου βλαστού, όπως αυτοί αναφέρονται στο παραπάνω Κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3).

Αναλυτικά, οι δείκτες μεταβολής διαμέτρου βλαστού για τα φυτά τομάτας που καλλιεργήθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα την πρώτη καλλιεργητική περίοδο, παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3. Αντιστοίχως, στον Πίνακα 4.4. παρουσιάζονται οι τιμές των δεικτών που υπολογίσθηκαν για το φυτό που αναπτυσσόταν στο ανοιχτό υδροπονικό σύστημα. Στον Πίνακα 4.5. εμφανίζονται οι τιμές για τους δείκτες μεταβολής διαμέτρου βλαστού, όπως αυτοί εκτιμήθηκαν για το φυτό που καλλιεργήθηκε σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα, με συγκέντρωση 12,5 mmol/L Na κατά την δεύτερη καλλιεργητική περίοδο. Τέλος, στον Πίνακα 4.1.1.4 παρουσιάζονται οι τιμές των αντίστοιχων δεικτών για το φυτό που αναπτύχθηκε σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα με συγκέντρωση 25 mmol/L Na.

Πίνακας 4.3. Δείκτες μεταβολής διαμέτρου βλαστού σε φυτά τομάτας, σε καλλιέργεια κλειστού υδροπονικού συστήματος.

Ημερομηνία	MXSD	MNSD	MDS	DG	DR
13/04	2222	2118	104	12	116
14/04	2234	2105	129	5	134
15/04	2239	2146	93	19	112
16/04	2258	2218	40	0	40
17/04	2258	2229	29	-3	26
18/04	2255	2177	78	-16	62
19/04	2239	2027	212		

Πίνακας 4.4. Δείκτες μεταβολής διαμέτρου βλαστού σε φυτό τομάτας, σε καλλιέργεια ανοιχτού υδροπονικού συστήματος

Ημερομηνία	MXSD	MNSD	MDS	DG	DR
13/04	2298	2217	81	65	146
14/04	2363	2246	117	72	189
15/04	2435	2341	94	102	196
16/04	2537	2438	99	54	153
17/04	2591	2538	53	46	99
18/04	2637	2591	46	24	70
19/04	2661	2585	76		

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακα 4.3. και 4.4. μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι, ο ρυθμός αύξησης της διαμέτρου του βλαστού των φυτών που καλλιεργήθηκαν στο κλειστό υδροπονικό σύστημα είχαν ήταν ελάχιστος έως και ανύπαρκτος. Την 4^η μέρα (16/04) η μέγιστη τιμή του βλαστού (MXSD) μετρήθηκε 2258 mm ενώ την επόμενη (17/04) ο βλαστός δεν παρουσιάζει καμία αύξηση. Αντίθετα τα φυτά που καλλιεργήθηκαν στο ανοιχτό υδροπονικό σύστημα, παρουσιάζουν σταθερή ανάπτυξη, καθώς η μέγιστη τιμή της διαμέτρου του βλαστού αυξάνεται με το πέρασμα των ημερών από 2298 mm την πρώτη μέρα (13/04), η μέγιστη τιμή της διαμέτρου του βλαστού, φτάνει την έβδομη ημέρα (19/04) στα 2661.

Επίσης, μια ακόμα παρατήρηση που υποδηλώνει ότι η διάμετρος του βλαστού των φυτών που καλλιεργήθηκαν στο κλειστό υδροπονικό σύστημα δεν ακολουθούσε ομαλή πορεία αύξησης, είναι η αρνητικές τιμές (17 και 18/04) της ημερήσιας ανάπτυξης της διαμέτρου του βλαστού (DG) κάτι το οποίο δεν φαίνεται να συμβαίνει στα φυτά που καλλιεργήθηκαν στο ανοιχτό υδροπονικό σύστημα.

Πίνακας 4.5. Δείκτες μεταβολής διαμέτρου βλαστού σε φυτό τομάτας, σε καλλιέργεια ημίκλειστου υδροπονικού συστήματος συγκέντρωσης 12,5 mmol/L Na.

Ημερομηνία	MXSD	MNSD	MDS	DR	DG
22/11	2789	2744	45	87	42
23/11	2831	2787	44	63	19
24/11	2850	2829	21	38	17
25/11	2867	2841	26	90	64
26/11	2931	2865	66	112	46
27/11	2977	2931	46	130	84
28/11	3061	2977	84		

Πίνακας 4.6. Δείκτες μεταβολής διαμέτρου βλαστού σε φυτό τομάτας, σε καλλιέργεια ημίκλειστου υδροπονικού συστήματος συγκέντρωσης 25 mmol/L Na.

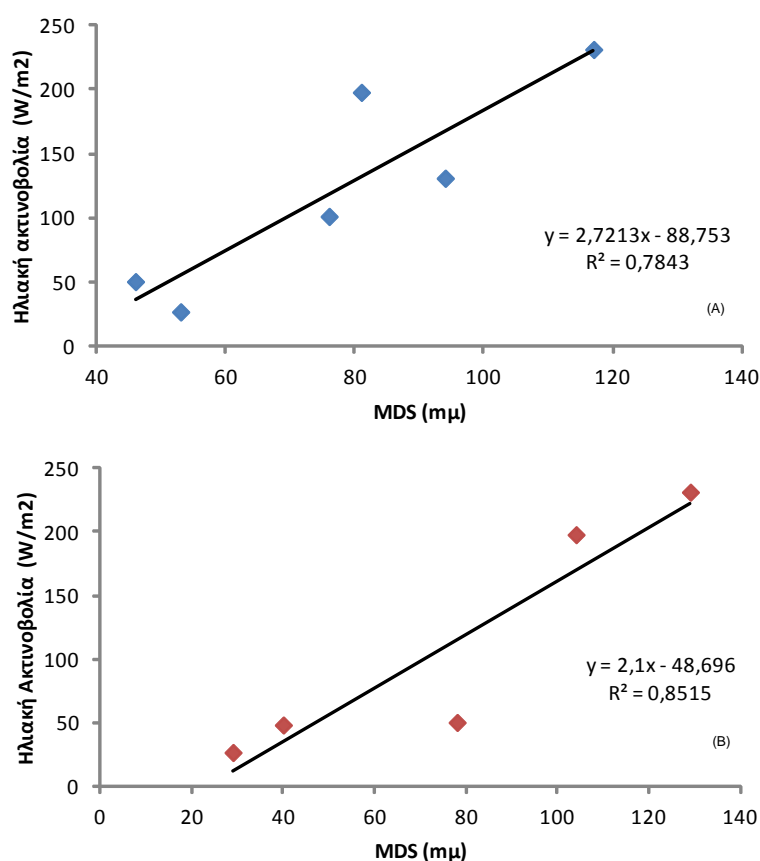
Ημερομηνία	MXSD	MNSD	MDS	DR	DG
22/11	1376	1085	291	16	-275
23/11	1101	888	213	28	-185
24/11	916	764	152	148	-4
25/11	912	690	222	290	68
26/11	980	684	296	477	181
27/11	1161	752	409	395	-14
28/11	1147	670	477		

Σύμφωνα με τα στοιχεία που παρατηρούμε στον Πίνακα 4.5. και στον Πίνακα 4.6., η ημερήσια αύξηση της διαμέτρου του βλαστού (DG) στο ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα συγκέντρωσης 25mmol/L Na, εμφανίζεται αρνητική για τις περισσότερες μέρες, σε αντίθεση με αυτή του ημίκλειστου υδροπονικού συστήματος συγκέντρωσης 12,5 mmol/L Na που είναι πάντα θετική. Μία ακόμα παρατήρηση είναι ότι η διαφορά της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της διαμέτρου του βλαστού (MDS) είναι πολύ μεγαλύτερη στα φυτά που καλλιεργήθηκαν στο ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα με την μεγαλύτερη συγκέντρωση αλάτων (Πίνακας 4.6.) σε σχέση με αυτά που αναπτύχθηκαν στο ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα με συγκέντρωση 12,5 mmol/L Na.

Οι δείκτες που παρουσιάστηκαν μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για την ανάπτυξη των καλλιεργούμενων φυτών και συγκεκριμένα για τον βαθμό υδατικής καταπόνησης που υφίστανται τα φυτά κατά την διάρκεια της ανάπτυξης τους. Στην πρώτη περίπτωση κατά την σύγκριση των δεικτών υπάρχουν σημαντικές ενδείξεις, ότι τα φυτά που καλλιεργούνται στο κλειστό υδροπονικό σύστημα καταπονούνται υδατικά λόγω της συρρίκνωσης του βλαστού, σε σχέση με αυτά που καλλιεργούνται στο ανοιχτό υδροπονικό σύστημα. Στην δεύτερη περίπτωση η συρρίκνωση του βλαστού εμφανίζεται στα φυτά που καλλιεργούνται στο ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα με την μεγαλύτερη συγκέντρωση αλάτων. Στις περισσότερες μελέτες, ο πιο κοινά χρησιμοποιούμενος δείκτης είναι ο MDS (δείκτης μέγιστης ημερήσιας συρρίκνωσης βλαστού).

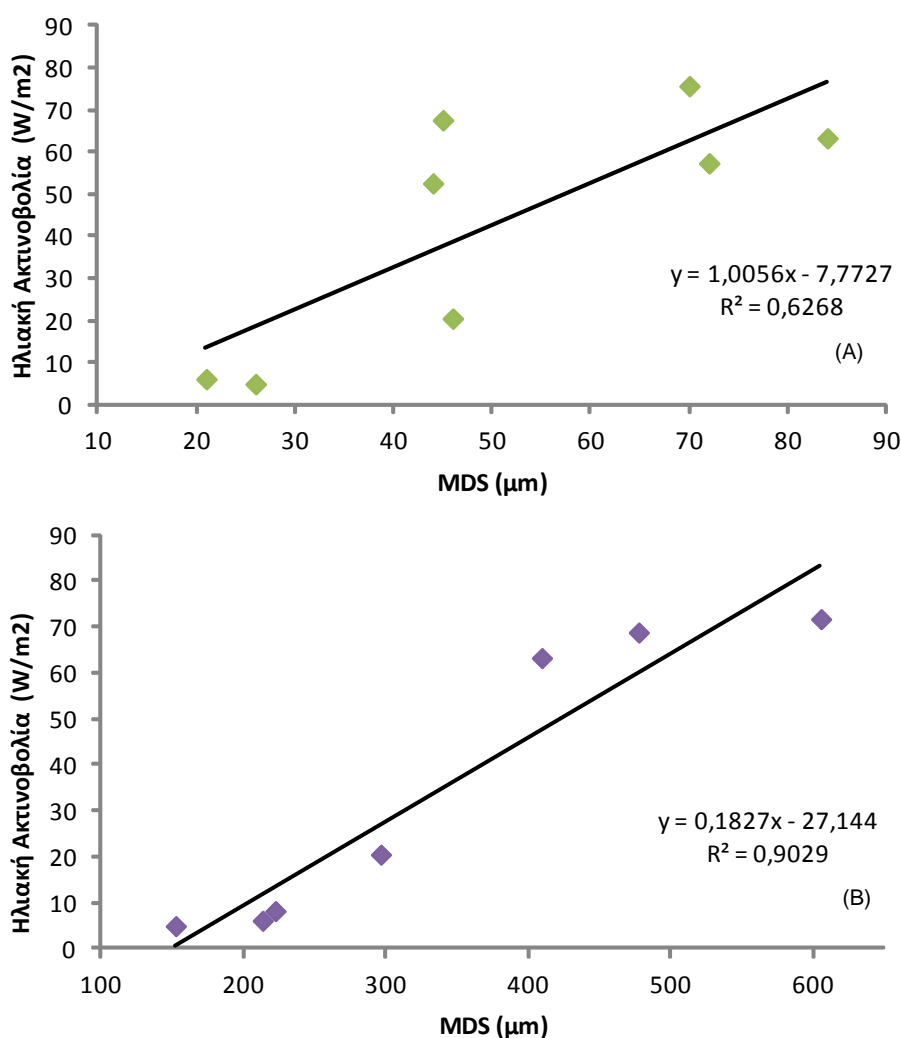
4.1.2. Συσχέτιση ηλιακής ακτινοβολίας και MDS.

Στο Σχήμα 4.7. παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ ηλιακής ακτινοβολίας και μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού και για τις δύο πειραματικές συνθήκες. Η συσχέτιση εμφανίζεται γραμμική με $R^2 = 0,78$ για το φυτό που καλλιεργείται στο ανοιχτό υδροπονικό σύστημα και με $R^2 = 0,85$ για το φυτό που καλλιεργείται στο κλειστό υδροπονικό σύστημα. Επομένως η αύξηση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας προκαλεί μείωση του δείκτη μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού. Παρόμοια αποτελέσματα βρήκαν οι Gallardo et al. (2006a) συσχετίζοντας την ηλιακή ακτινοβολία και το MDS. Συγκεκριμένα, παρατήρησαν θετική γραμμική συσχέτιση με $R^2=0,48$ σε καλλιέργεια πιπεριάς και θετική γραμμική συσχέτιση με $R^2 = 0,64$ σε καλλιέργεια πεπονιού. Ανάλογες έρευνες έχουν διεξαχθεί και για οπωροφόρα δέντρα (εσπεριδοειδή) δίνοντας παραπλήσια αποτελέσματα (Ortuño et al, 2006b και Velez et al.,2007).



Σχήμα 4.7. Συσχέτιση ηλιακής ακτινοβολίας και μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού (MDS) φυτών τομάτας σε ανοιχτό (A) και κλειστό (B) υδροπονικό σύστημα.

Ταυτόχρονα, παρουσιάζεται συσχέτιση της ηλιακής ακτινοβολίας και της μέγιστης ημερήσιας συρρίκνωσης βλαστού στα φυτά που καλλιεργήθηκαν στα δύο ημίκλειστα συστήματα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.8. Όπως φαίνεται η συσχέτιση είναι πολύ ισχυρή ($R^2=0.9$) στο φυτό που καλλιεργήθηκε στο ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα με την υψηλότερη συγκέντρωση αλάτων (Σχήμα 4.8.(B)), όπως συμβαίνει και στην περίπτωση του ανοιχτού και του κλειστού υδροπονικού συστήματος. Μέση συσχέτιση επίσης μεταξύ της Ηλιακής Ακτινοβολίας και της μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8. (A) και αφορά στα φυτά που καλλιεργήθηκαν στο ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα με την χαμηλότερη συγκέντρωση αλάτων.



Σχήμα 4.8. Συσχέτιση ηλιακής ακτινοβολίας και μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού (MDS) φυτών τομάτας καλλιεργούμενα σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα 12,5 mmol/L Na(A) και σε ημίκλειστο 25 mmol/L Na.

Τα αποτελέσματα της συσχέτισης της Ηλιακής Ακτινοβολίας με το MDS είναι αναμενόμενα. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω το MDS είναι ο δείκτης που παρουσιάζει την ημερήσια διαφορά της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής που έχει η διάμετρος του βλαστού. Την μέγιστη διάμετρο, ο βλαστός την έχει τις νυχτερινές ώρες όπου η Ηλιακή Ακτινοβολία είναι μηδενική και το έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας χαμηλό. Αντίθετα τις μεσημβρινές ώρες όπου η Ηλιακή Ακτινοβολία είναι υψηλή, το έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας αυξάνεται και η διάμετρος του βλαστού παίρνει την χαμηλότερη τιμή της. Επομένως, όταν αυξάνεται η Ηλιακή ακτινοβολία ο βλαστός συρρικνώνεται και η διαφορά των δυο τιμών (MXSD – MNSD) αυξάνει

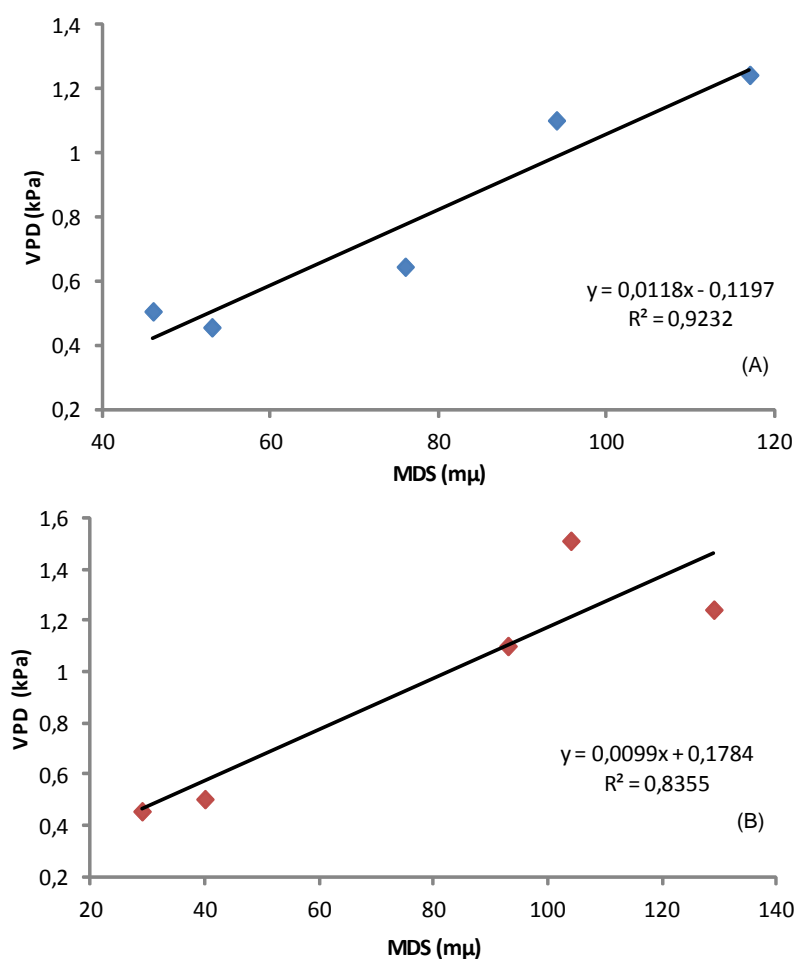
4.1.3. Συσχέτιση VPD και MDS

Ένας ακόμα παράγοντας που φαίνεται να επηρεάζει την ανάπτυξη του βλαστού των φυτών τομάτας, είναι το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (VPD). Η εκτίμηση του VPD έγινε την Σχέση 3.1., όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3. Στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 4.9.) περιγράφεται η γραμμική συσχέτιση μεταξύ της τιμής, της μέγιστης ημερήσιας συρρίκνωσης βλαστού (MDS) για τα φυτά που καλλιεργήθηκαν σε κλειστό και ανοιχτό υδροπονικό σύστημα της μέσης τιμής του ελλείμματος κορεσμού του αέρα (VPD) ανά ημέρα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9. η τιμή του VPD επηρεάζει την τιμή της μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού, καθώς όσο αυξάνεται το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, ο βλαστός συρρικνώνεται περισσότερο. Κατά την διάρκεια της ημέρας το έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας είναι υψηλό, αυτό σημαίνει ότι ο αέρας έχει μεγαλύτερη δυνατότητα συγκράτησης υδρατμών, επομένως ο βλαστός συρρικνώνεται καθώς το VPD αυξάνει. Κατά την διάρκεια της νύχτας όπου το VPD μειώνεται η διάμετρος του βλαστού μεγαλώνει. Η συσχέτιση των δύο παραμέτρων είναι πολύ ισχυρή και στην περίπτωση που το φυτό καλλιεργείται στο ανοιχτό υδροπονικό σύστημα ($R^2 = 0,9$) (Σχήμα 4.9. (A)), και στην περίπτωση του φυτού που καλλιεργείται σε κλειστό υδροπονικό σύστημα, όπου ο βαθμός συσχέτισης (R^2) βρέθηκε περίπου 0,85 (Σχήμα 4.9. (B)).

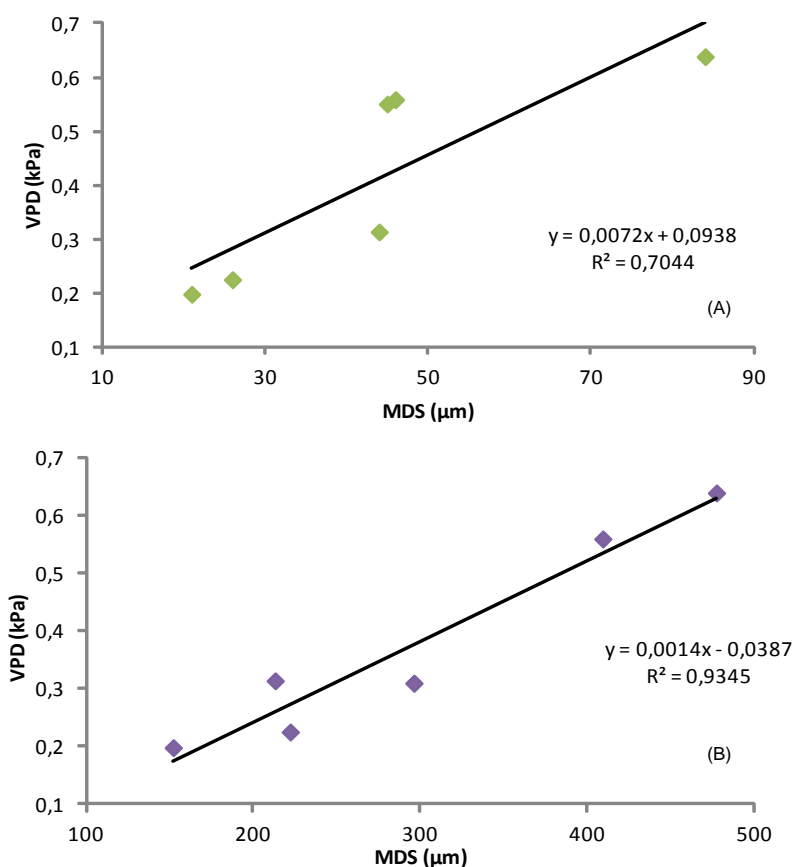
Παρόμοια αποτελέσματα παρουσίασαν οι Gallardo et al. (2006a) επιχειρώντας να παρατηρήσουν την μεταβολή του βλαστού φυτών πιπεριάς και πεπονιού σε συνθήκες υδατικής καταπόνησης. Συγκεκριμένα και στα δύο καλλιεργούμενα είδη βρήκαν θετική γραμμική συσχέτιση με R^2 0,44 και 0,5 αντιστοίχως.

Ανάλογες μελέτες έχουν γίνει για δενδρώδεις καλλιέργειες, η συσχέτιση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα και του MDS παρουσιαζόταν από ασθενής, με $R^2 = 0,3$ έως σχεδόν ισχυρή, με $R^2 = 0.72$, ανάλογα με την καλλιέργεια και την περίοδο ανάπτυξης της (Goldhamer and Fereres, 2001; Fereres and Goldhamer, 2003; Intrigliolo and Castel, 2006b; Ortuño et al., 2006b; Velez et al., 2007; Conejero et al., 2007a).



Σχήμα 4.9. Παρουσίαση συσχέτισης MDS και μέσου όρου VPD σε φυτά τομάτας που καλλιεργούνται σε ανοιχτό υδροπονικό σύστημα (A) και σε κλειστό (B).

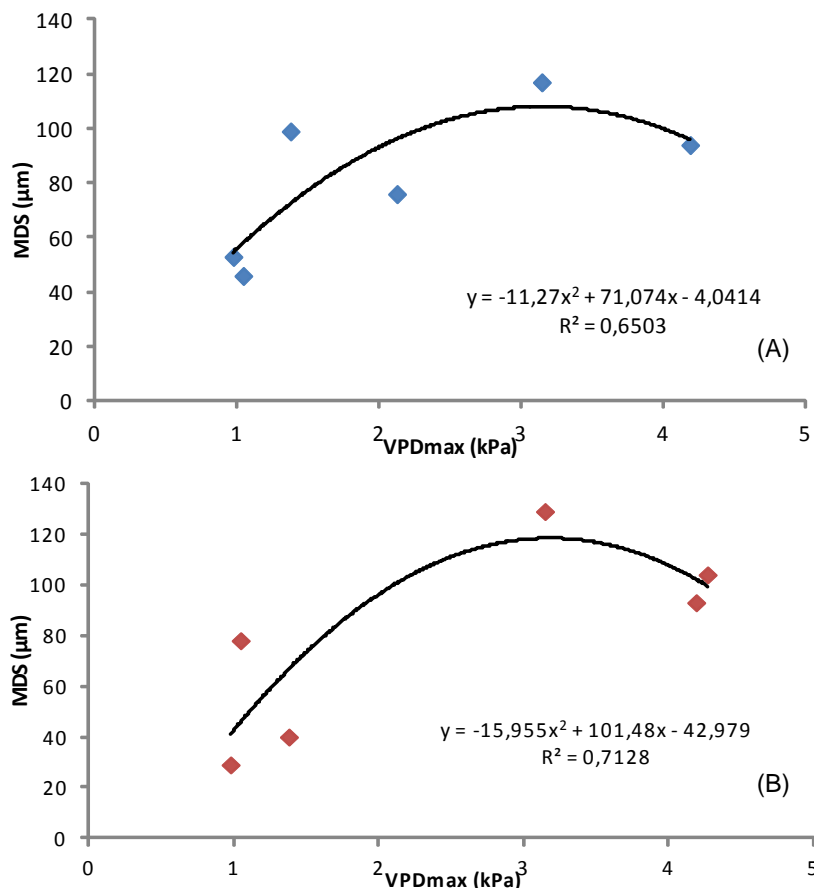
Ομοίως, στο Σχήμα 4.10. παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τα φυτά που καλλιεργήθηκαν στα δύο ημίκλειστα συστήματα στο δεύτερο μέρος της πειραματικής διαδικασίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, υπάρχει σημαντική συσχέτιση στην περίπτωση του φυτού (A) που καλλιεργείται στο ημίκλειστο σύστημα με την μικρότερη ($R^2 = 0,7$) συγκέντρωση αλάτων (12,5 mmol/L Na), ενώ πολύ σημαντική συσχέτιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10.(B) μεταξύ VPD και MDS των φυτών που καλλιεργούνται στο ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα με συγκέντρωση αλάτων 25 mmol/L Na, όπου σε αυτή την περίπτωση το R^2 βρέθηκε ίσο με 0,9.



Σχήμα 4.10. Παρουσίαση συσχέτισης MDS και μέσου όρου VPD σε φυτά τομάτας που καλλιεργούνται σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα 12,5 mmol/L Na (A) και σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα 25 mmol/L Na (B).

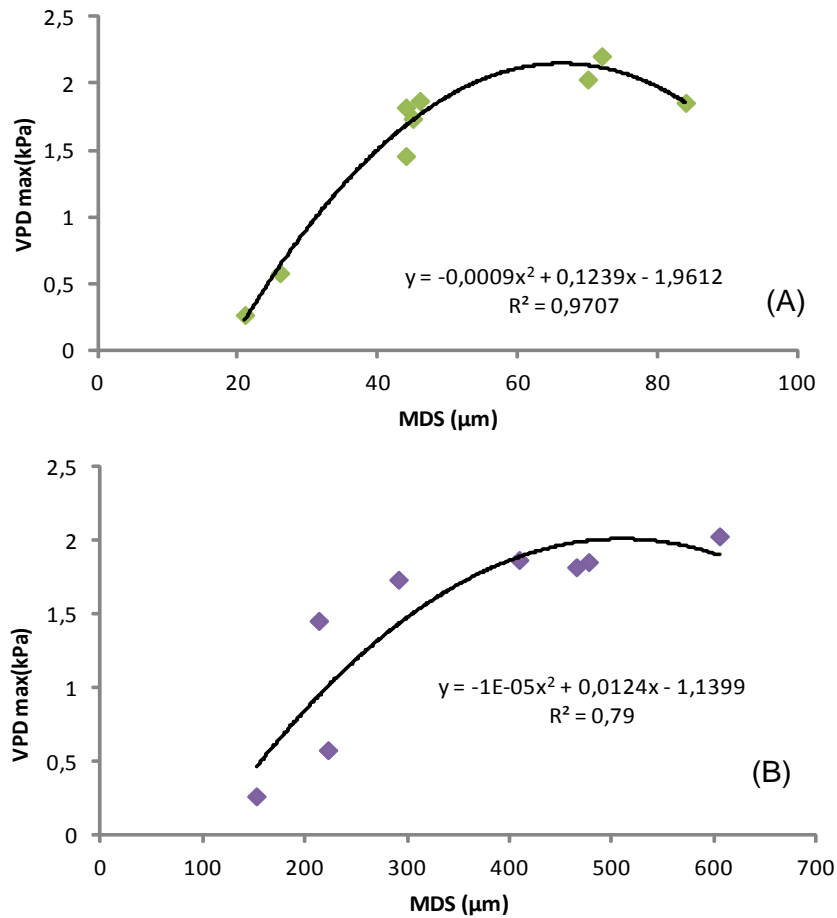
Σύμφωνα με τους Gallardo et al.(2006b) στην έρευνα τους περί ανίχνευσης της υδατικής καταπόνησης φυτών τομάτας η συσχέτιση μεταξύ της μέγιστης τιμής ανά ημέρα ελλείμματος κορεσμού και της μέγιστης συρρίκνωσης (MDS) του βλαστού ανά ημέρα, παρουσιάστηκε θετική, με $R^2 = 0,52$. Ταυτόχρονα σε ανάλογη έρευνα τους (2006a) σε καλλιέργεια πιπεριάς και πεπονιού, το R^2 βρέθηκε ίσο με 0,63 και 0,57 αντιστοίχως. Πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ την μέγιστης ημερήσιας τιμής ελλείμματος κορεσμού και της τιμής της μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού παρουσιάστηκε από τους Moreno et al. το 2006 για ελαιόδεντρα. Η συσχέτιση ήταν θετικώς γραμμική με $R^2 = 0.82$.

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζεται η ανάλογη συσχέτιση, χρησιμοποιώντας την μέγιστη τιμή ελλείμματος κορεσμού ανά ημέρα, όπως αυτή εκτιμήθηκε για κάθε πειραματική ημέρα. Στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 4.11.) παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ των δύο παραγόντων (MDS και VPD_{max}) με σκοπό την ανίχνευση της επίδρασης του ελλείμματος κορεσμού του αέρα, στην μεταβολή της διαμέτρου του βλαστού των φυτών τομάτας σε ανοιχτό και κλειστό υδροπονικό σύστημα. Τα αποτελέσματα των τιμών φαίνεται πως έρχονται σε αντίθεση με αυτά των προαναφερθέντων μελετητών, που είχαν παρουσίαση την συσχέτιση ως γραμμική. Οι τιμές παρουσιάζουν πολύ καλή συσχέτιση και στις δύο περιπτώσεις, καθώς το R^2 βρίσκεται περίπου στο 0,7 αλλά φαίνεται πως η σχέση μεταξύ του MDS και του VPD_{max} αποτελεί μια πολυωνυμική συνάρτηση.



Σχήμα 4.11. Παρουσίαση συσχέτισης MDS και μέγιστης ημερήσιας τιμής VPD σε φυτά τομάτας που καλλιεργούνται σε ανοιχτό υδροπονικό σύστημα (A) και σε κλειστό (B).

Ανάλογα με την παραπάνω συσχέτιση, εκτιμήθηκε και η μέγιστη τιμή VPD ανά ημέρα για το χρονικό διάστημα που εκτελούνταν το πείραμα στα ημίκλειστα υδροπονικά συστήματα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.12. και είναι παρόμοια με τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο παραπάνω Σχήμα (Σχήμα 4.11.). Συγκεκριμένα, η συσχέτιση της μέγιστης τιμής ελλείμματος κορεσμού (VPD_{max}) με την τιμή της μέγιστης ημερήσιας συρρίκνωσης διαμέτρου βλαστού σε φυτά τομάτας που καλλιεργούνταν στους δύο τύπους ημίκλειστου υδροπονικού συστήματος, κατά την δεύτερη καλλιεργητική περίοδο βρέθηκε ότι είναι πολυωνυμική, με $R^2 = 0,97$ για την καλλιέργεια που αναπτυσσόταν στο ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα με τη χαμηλότερη συγκέντρωση αλάτων.



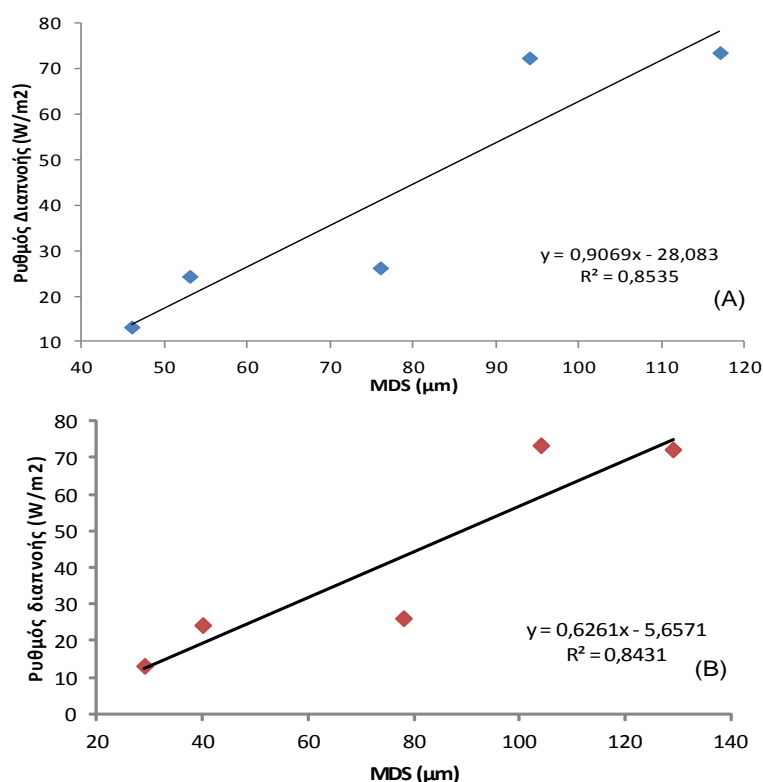
Σχήμα 4.12. Απεικόνιση συσχέτισης MDS και μέγιστης ημερήσιας τιμής VPD σε φυτά τομάτας που καλλιεργούνται σε ανοιχτό υδροπονικό σύστημα (A) και σε κλειστό (B).

Οι Gallardo et al. (2006a), εκτιμώντας την συσχέτιση μεταξύ MDS και VPDmax σε καλλιέργεια πεπονιού βρήκαν θετική γραμμική συσχέτιση με $R^2 = 0.57$. Αντίστοιχα, ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο παραγόντων βρέθηκε σε ελαιόδεντρα από τους Moreno et al. το 2006 με τιμή διασποράς 0,82.

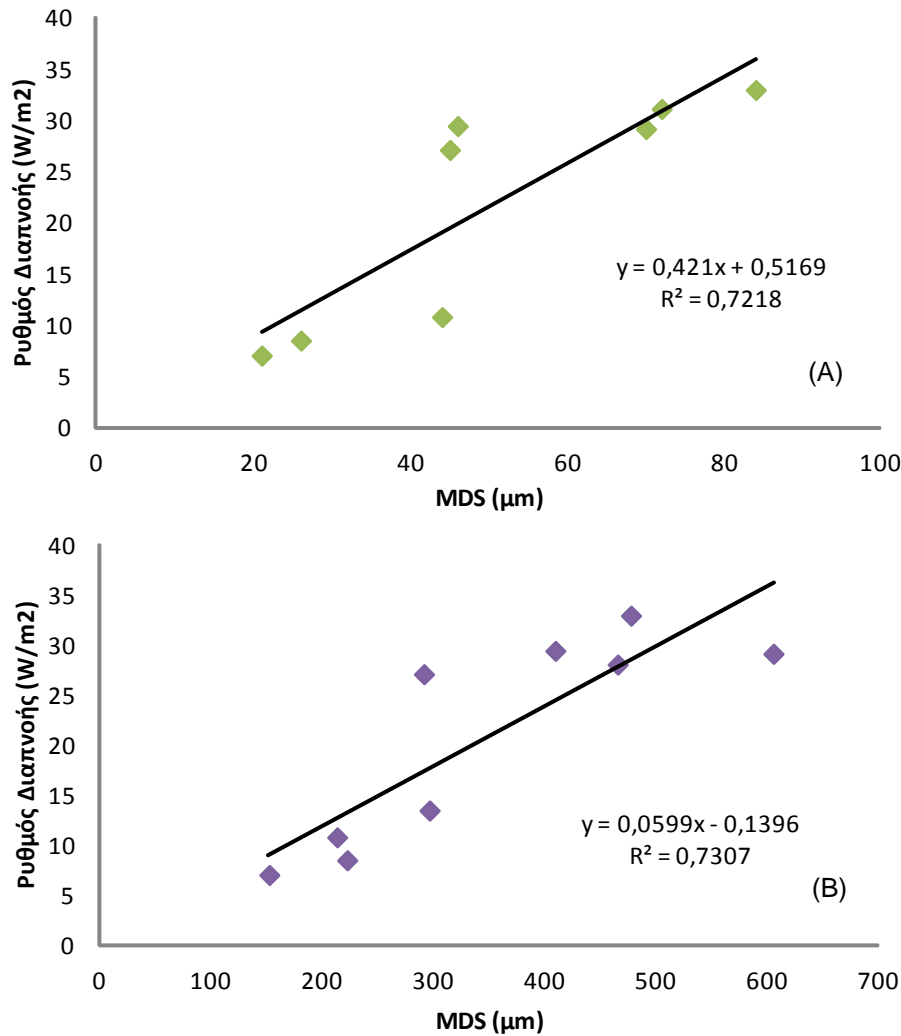
4.1.4. Συσχέτιση διαπνοής και MDS

Η διαπνοή εκτιμήθηκε από την Σχέση 3.3. που περιγράφεται στο κεφάλαιο 3. Η συσχέτιση μεταξύ διαπνοής των φυτών και του δείκτη μέγιστης ημερήσιας συρρίκνωσης βλαστού απεικονίζεται στο Σχήμα 4.13.. Όπως φαίνεται στο γράφημα υπάρχει θετική γραμμική συσχέτιση μεταξύ της διαπνοής και της τιμής του δείκτη MDS, πράγμα που υποδηλώνει, πως όσο αυξάνεται ο ρυθμός διαπνοής, αυξάνεται και η μέγιστη συρρίκνωση του βλαστού. Ο βαθμός συσχέτισης και στις δύο περιπτώσεις (κλειστό και ανοιχτό υδροπονικό σύστημα) εμφανίζεται ισχυρός με R^2 περίπου 0,85. Τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα, καθώς είναι γνωστό ότι τα φυτά όταν διαπνέουν αποβάλλουν νερό, και ανάλογα με αυτά που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 4.7., όπου εξετάζεται η σχέση μεταξύ ηλιακής ακτινοβολίας και MDS.

Ανάλογα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.14. που αφορούν στις μετρήσεις στα δύο ημίκλειστα υδροπονικά συστήματα κατά τη διάρκεια της δεύτερης πειραματικής διαδικασίας.



Σχήμα 4.13. Συσχέτιση ρυθμού διαπνοής και μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού (MDS) φυτών τομάτας σε ανοιχτό (A) και κλειστό (B) υδροπονικό σύστημα.

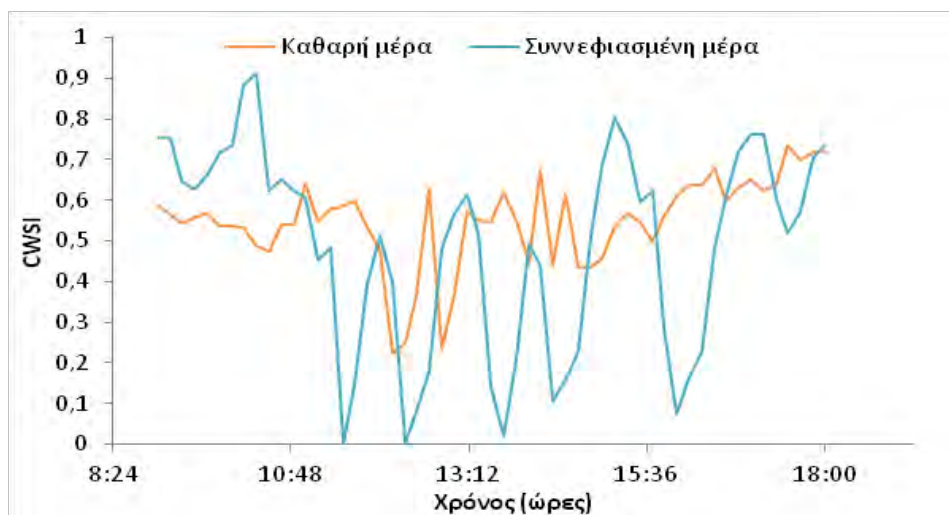


Σχήμα 4.14. Συσχέτιση ρυθμού διαπνοής και μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού (MDS) φυτών τομάτας σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα (12,5 mmol/L Na) (A) και σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα (25 mmol/L Na)(B).

4.1.5. Ο CWSI για καθαρή και συννεφιασμένη μέρα.

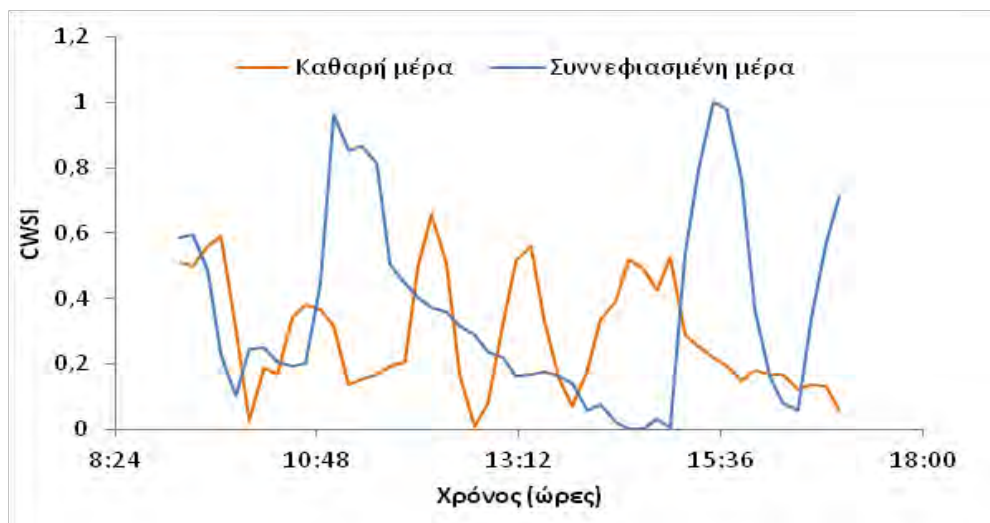
Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης CWSI, υπολογίστηκε σύμφωνα με την Σχέση 3.2. (Κεφάλαιο 3) για όλες τις πειραματικές ημέρες μεταξύ 9:00 το πρωί και 18:00 το απόγευμα, όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι έντονη και ο δείκτης φαίνεται να λειτουργεί σωστά. Η πορεία εξέλιξης του δείκτη υδατικής καταπόνησης για μία καθαρή ημέρα (13/4) και μία συννεφιασμένη ημέρα (18/4) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.15. για την πρώτη πειραματική περίοδο, όπου τα φυτά τομάτας καλλιεργούνται σε

ανοιχτό και κλειστό υδροπονικό σύστημα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα, τις μεσημεριανές ώρες ο δείκτης παίρνει την μικρότερη τιμή, ενώ αυξημένη τιμή έχει τις ώρες όπου η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι έντονη. Επιπλέον, την συννεφιασμένη μέρα, όπου και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα είναι μικρότερο σε σχέση με το έλλειμμα κορεσμού της καθαρής ημέρας (Σχήμα 4.3.) ο δείκτης παίρνει την ελάχιστη τιμή (0).



Σχήμα 4.15. Πορεία δείκτη υδατικής καταπόνησης (CWSI) για καθαρή (13/4) και συννεφιασμένη μέρα (18/4) κατά την διάρκεια της πρώτης καλλιεργητικής περιόδου (ανοιχτό-κλειστό υδροπονικό σύστημα).

Παράλληλα, στο σχήμα 4.16. παρουσιάζεται η πορεία του δείκτη για μία καθαρή και μία συννεφιασμένη μέρα κατά την διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου, όπου τα φυτά τομάτας καλλιεργούνται στα δύο ημίκλειστα συστήματα.



Σχήμα 4.16. Πορεία δείκτη υδατικής καταπόνησης (CWSI) για καθαρή (22/10) και συννεφιασμένη μέρα (23/10) κατά την διάρκεια της δεύτερης καλλιεργητικής περιόδου (ημίκλειστα υδροπονικά συστήματα).

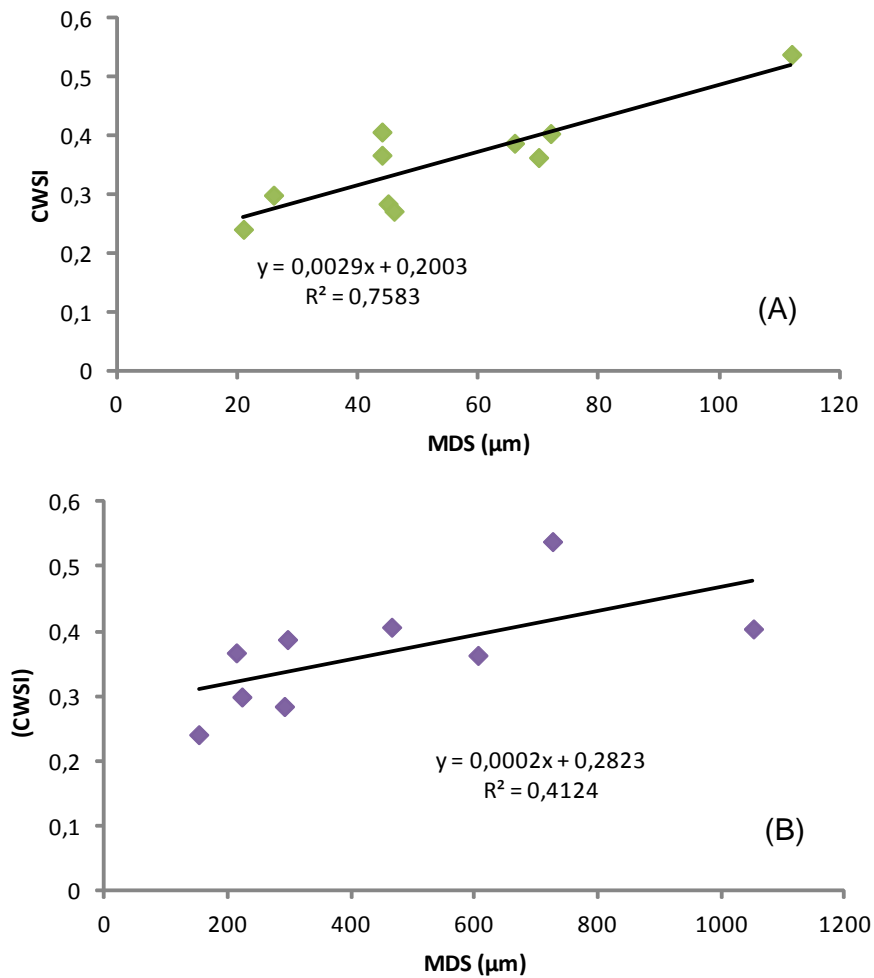
Οι Baille et al. το 2001, μελετώντας την επίδραση του ασπίσματος του θερμοκηπίου στην ανάπτυξη φυτών τριανταφυλλιάς, δηλαδή επεμβαίνοντας στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο, έδειξαν ότι ο CWSI έπαιρνε τιμές μικρότερες από 0,5 (μέση έως μηδενική υδατική καταπόνηση) εννέα μέρες μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου, ενώ πριν το άσπρισμα είχαν υπολογισθεί τιμές μεγαλύτερες από 0,5 (ελαφριά έως μέγιστη υδατική καταπόνηση) για τον δείκτη υδατικής καταπόνησης. Οι Chamont et al. (1995), αναφέρουν ότι σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια αγγουριού ο CWSI για συνθήκες ελλείμματος κορεσμού υδρατμών $VPD \leq 2.2$ kPa ή $VPD \leq 3.5$ kPa ήταν σχεδόν ίσος ή ελαφρώς 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. Αν και πολλές μελέτες έχουν διεξαχθεί για την ανίχνευση της υδατικής καταπόνησης των φυτών χρησιμοποιώντας τον CWSI, ο δείκτης παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία ακόμα και σε πολύ μικρές αλλαγές στο περιβάλλον του θερμοκηπίου, εκεί οφείλονται και οι διακυμάνσεις του δείκτη κατά την διάρκεια της ημέρας.

4.1.5.1. Συσχέτιση του CWSI και της μεταβολής διαμέτρου του βλαστού

Όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 4.3. (A), το φυτό που καλλιεργείται στο ανοιχτό (α) υδροπονικό σύστημα, δεν εμφανίζει σημάδια υδατικής καταπόνησης, σε αντίθεση με το φυτό που καλλιεργείται στο κλειστό (β) υδροπονικό σύστημα. Όπως προαναφέρθηκε ο CWSI αποτελεί ένα δύσχρηστο εργαλείο για την ανίχνευση της υδατικής καταπόνησης των φυτών. Στην παρούσα υποενότητα γίνεται προσπάθεια συσχέτισης του δείκτη με τον δείκτη μέγιστης συρρίκνωσης βλαστού (MDS).

Μεταξύ του δείκτη υδατικής καταπόνησης (CWSI) και του MDS δεν βρέθηκε συσχέτιση στα φυτά που αναπτύσσονταν στο ανοιχτό υδροπονικό σύστημα και αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι η διάμετρος του βλαστού των φυτών αναπτύσσεται σταθερά με το περασμά των ημερών χωρίς να παρουσιάζει σημάδια υδατικής καταπόνησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. (A) (α). Αντίστοιχα, συσχέτιση δεν βρέθηκε μεταξύ του δείκτη υδατικής καταπόνησης και του MDS στα φυτά που αναπτύχθηκαν στο κλειστό υδροπονικό σύστημα και αυτό ίσως οφείλεται στο ότι η διάμετρος του βλαστού παραμένει σχεδόν σταθερή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (Σχήμα 4.3.(A)(α)).

Σε αντίθεση με τα παραπάνω αποτελέσματα, η συσχέτιση μεταξύ του CWSI και η εκτιμώμενη τιμή του MDS για τα νεαρά φυτά τομάτας που καλλιεργήθηκαν στους δύο τύπους ημίκλειστων συστημάτων, παρουσιάζεται θετική. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17. (A), υπάρχει συσχέτιση μεταξύ του δείκτη υδατικής καταπόνησης και της μέγιστης συρρίκνωσης του βλαστού φυτών τομάτας που καλλιεργήθηκαν σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα με συγκέντρωση αλάτων 12,5 mmol/L Na. Ασθενής συσχέτιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.17. (B) μεταξύ των ίδιων παραμέτρων σε νεαρά φυτά τομάτας που καλλιεργήθηκαν σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα με συγκέντρωση αλάτων 25 mmol/L Na.

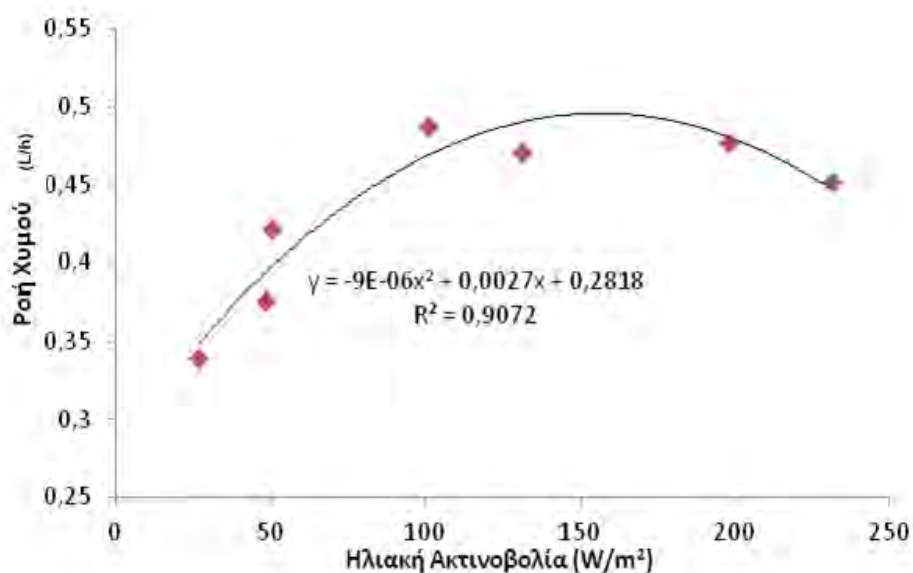


Σχήμα 4.17. Γραφική απεικόνιση συσχέτισης CWSI και MDS φυτών τομάτας που καλλιεργήθηκαν σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα 12,5 mmol/L Na (A) και φυτών τομάτας που καλλιεργήθηκαν σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα 25 mmol/L Na (B).

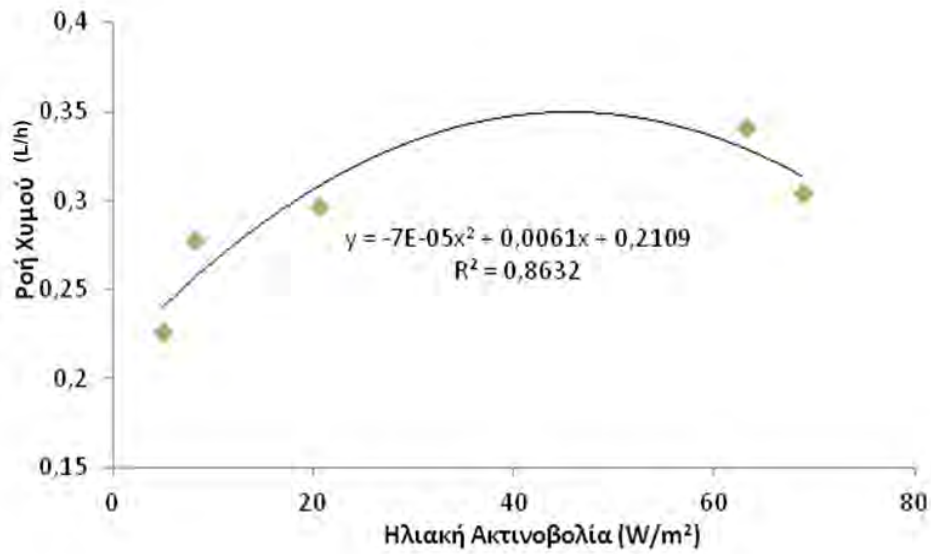
4.2. Ροή χυμού: Παράμετρος υδατικής κατάστασης φυτών

Ένας ακόμα δείκτης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της υδατικής κατάστασης καλλιεργούμενων φυτών είναι ο SF (Sap Flow- Ροή χυμού). Ο δείκτης έχει χρησιμοποιηθεί πειραματικά για τον προσδιορισμό ορθής άρδευσης σε δενδρώδης κυρίως καλλιέργειες αλλά και σε αμπελώνες (Fernandez et al., 2008a).

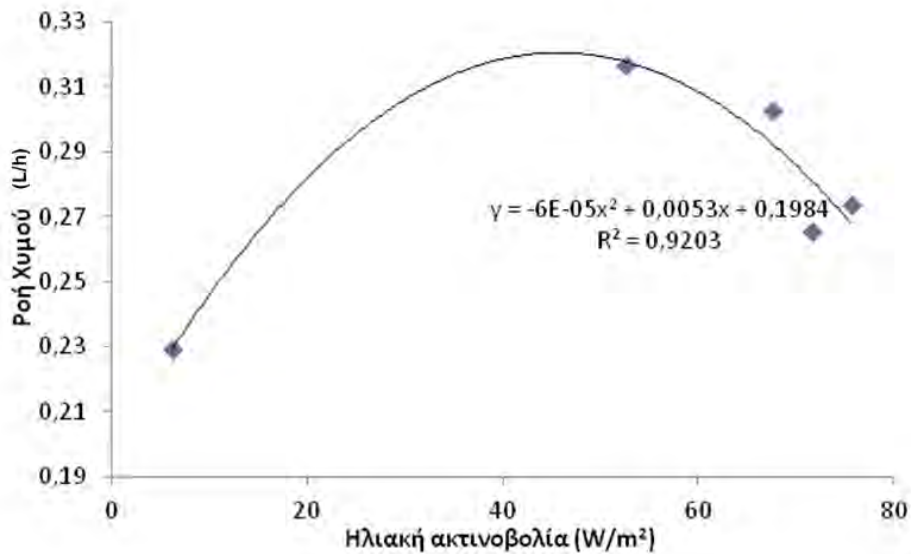
Στο Σχήμα 4.18. παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ ηλιακής ακτινοβολίας και ροής χυμού κατά την πρώτη καλλιεργητική περίοδο του πειράματος στο φυτό που αναπτυσσόταν στο κλειστό υδροπονικό σύστημα. Ομοίως παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ των δύο παραγόντων για την δεύτερη καλλιεργητική περίοδο στο Σχήμα 4.19 και 4.20 σε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας ημίκλειστου συστήματος με συγκέντρωση αλάτων 12,5 και 25 mmol/L Na, αντιστοίχως. Όπως φαίνεται στα γραφήματα η σχέση μεταξύ ροής χυμού και ηλιακής ακτινοβολίας αποτελεί μια πολυωνυμική συνάρτηση με συντελεστή συσχέτισης από 0,86 έως 0,92. Η μείωση της ροής χυμού στο φυτό σε συνθήκες υψηλής Ηλιακής Ακτινοβολίας, πιθανότατα να οφείλεται σε φυσιολογικές δυσλειτουργίες των φυτών.



Σχήμα 4.18. Σχέση μεταξύ Ηλιακής Ακτινοβολίας και Ροής χυμού σε καλλιέργεια τομάτας σε κλειστό υδροπονικό σύστημα.



Σχήμα 4.19. Σχέση μεταξύ Ηλιακής Ακτινοβολίας και Ροής χυμού σε καλλιέργεια τομάτας σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα (12,5 mmol/L Na).



Σχήμα 4.20. Σχέση μεταξύ Ηλιακής Ακτινοβολίας και Ροής χυμού σε καλλιέργεια τομάτας σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα (25 mmol/L Na).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αύξηση του πληθυσμού παγκοσμίως, δημιούργησε υψηλές απαιτήσεις παραγωγής αγροτικών προϊόντων. Τα κηπευτικά αποτελούν μια γκάμα προϊόντων με υψηλή ζήτηση από το ευρύ καταναλωτικό κοινό. Η αύξηση της παραγωγής τους καθώς και η βελτίωση της ποιότητάς τους, έχει γίνει αντικείμενο μελέτης από πολλούς ερευνητές.

Το θερμοκήπιο αποτελεί μια οριοθετημένη κατασκευή που δίνει την δυνατότητα ελέγχου των παραμέτρων ανάπτυξης των προϊόντων αυτών. Η μεταπήδηση της γεωργίας στην βιομηχανία ώθησε τους επιστήμονες στην δημιουργία μοντέλων και συστημάτων που ελέγχουν το κλίμα του θερμοκηπίου και δίνουν την δυνατότητα διαχείρισης της άρδευσης.

Η ορθολογική άρδευση φαίνεται να αποτελεί σπουδαίο παράγοντα στην ανάπτυξη και παραγωγικότητα των φυτών. Η δυνατότητα εκτίμησης της υδατικής καταπόνησης των καλλιεργούμενων φυτών, ανοίγει νέους ορίζοντες στην διαχείριση της άρδευσης και επιτρέπει τόσο της εξοικονόμηση του νερού όσο και την δυνατότητα λήψης σωστής απόφασης για τον χειρισμό της άρδευσης.

Η εξαγωγή δεικτών υδατικής καταπόνησης βοήθησε πολύ στην εκτίμηση της υδατικής κατάστασης των φυτών και συνεπώς των αρδευτικών αναγκών τους. Η χρησιμοποίηση τους βέβαια απαιτεί χρήση τεχνολογικών μέσων καθώς και γνώσεις της φυσιολογίας των φυτών. Ο δείκτης CWSI έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς μελετητές για την πρόβλεψη της υδατικής κατάστασης διαφόρων φυτών, με σκοπό τον σχεδιασμό της άρδευσης. Το μειονέκτημα αυτού του δείκτη είναι ότι παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία στις διάφορες αλλαγές καθώς και ότι το μοντέλο που το περιγράφει είναι αρκετά πολύπλοκο.

Ένα σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιείται στα θερμοκήπια είναι το Phytomonitoring (Σύστημα Παρακολούθησης Φυτών). Το Phytomonitoring δίνει την δυνατότητα ελέγχου της επίδρασης των πολλαπλών συνθηκών, που επικρατούν στο θερμοκήπιο, στα ίδια τα φυτά, καθώς χρησιμοποιεί αισθητήρια όργανα μέτρησης της θερμοκρασίας του φύλλου, της διαμέτρου του βλαστού, της ροής χυμού στο φυτό και του μεγέθους του καρπού. Παρέχει επίσης την δυνατότητα της έγκαιρης ανίχνευσης των διαταραχών που υφίστανται τα φυτά.

Οι Fernandez και Cuevas (2010) εξήγαγαν δείκτες μεταβολής διαμέτρου του βλαστού, οι οποίοι σχετίζονται με την υδατική καταπόνηση των φυτών. Ο δείκτης MDS έχει προταθεί από πολλούς μελετητές για το σχεδιασμό της άρδευσης μιας καλλιέργειας. Η συσχέτιση του δείκτη με το VPD σε όλες τις μελέτες περιγραφόταν από μία θετική γραμμική συνάρτηση με μέτρια συσχέτιση, ενώ καλύτερη ήταν η συσχέτιση μεταξύ MDS και υδατικού δυναμικού στα φύλλα σε αντίστοιχες μελέτες.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε το σύστημα παρακολούθησης φυτών με σκοπό την σύγκριση της ανάπτυξης των φυτών σε τέσσερα διαφορετικά υδροπονικά συστήματα και 2 στάδια ανάπτυξης. Επίσης για την εκτίμηση της υδατικής καταπόνησης των φυτών συσχετίστηκαν δείκτες μεταβολής βλαστού (SDV- Stem Diameter Variation) με τον δείκτη υδατικής καταπόνησης CWSI. Τα συμπεράσματα από την μελέτη είναι τα εξής:

- Το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, η ηλιακή ακτινοβολία, το στάδιο ανάπτυξης των φυτών και η αλατότητα του υποστρώματος επιδρούν στον ρυθμό αύξησης του βλαστού των φυτών, άρα και στη ανάπτυξη του ίδιου του φυτού.
- Η ημερήσια ανάπτυξη των φυτών τομάτας που καλλιεργήθηκαν σε καθεστώς κλειστού υδροπονικού συστήματος βρέθηκε αρνητική σε σχέση με αυτή που παρατηρήθηκε στα φυτά που αναπτύχθηκαν σε ανοιχτό υδροπονικό σύστημα. Αρνητική ημερήσια ανάπτυξη παρουσιάστηκε και στο φυτό που καλλιεργήθηκε σε ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα 25mmol/LNa σε σχέση με αυτό που καλλιεργήθηκε στο ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα συγκέντρωσης αλάτων 12,5 mmol/L.
- Τα φυτά που αναπτύχθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα και αυτά που αναπτύχθηκαν στο ημίκλειστο υδροπονικό σύστημα με την υψηλότερη αλατότητα παρουσίασαν μεγαλύτερη τιμή μέγιστης συρρίκνωση βλαστού.
- Η ηλιακή ακτινοβολία, το έλλειμμα κορεσμού του αέρα και ο ρυθμός διαπνοής φαίνεται πως επιδρούν στην μέγιστη συρρίκνωση του βλαστού. Κατά την διάρκεια της ημέρας όπου τα φυτά διαπνέουν εντονότερα, η ηλιακή ακτινοβολία και το έλλειμμα κορεσμού της ατμόσφαιρας είναι υψηλά ο βλαστός συρρικνώνεται. Η αύξηση της διαμέτρου του βλαστού συμβαίνει κατά την διάρκεια της νύχτας όπου η ηλιακή ακτινοβολία είναι μηδενική και ο αέρας κορεσμένος.

- Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης CWSI παρουσιάζει μια ένδειξη ότι συσχετίζεται θετικά με τον δείκτη μέγιστης συρίκνωσης βλαστού (MDS) στα φυτά που αναπτύχθηκαν υπό καθεστώς ημίκλειστου υδροπονικού συστήματος.
- Η ροή χυμού στο φυτό φαίνεται να συσχετίζεται πολυωνυμικά με την ηλιακή ακτινοβολία.

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.

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης παρουσιάζουν σημαντικές πληροφορίες για την δυνατότητα του σχεδιασμού της άρδευσης στα θερμοκήπια σύμφωνα με την υδατική κατάσταση του ίδιου του φυτού, παρόλα αυτά είναι απαραίτητο να διεξαχθεί επιπλέον έρευνα.

Ξενογλώσση Βιβλιογραφία

- Acock, B., 1986. Methods of measuring leaf temperature. *Acta Hort.*, 7:74-80
- Alderfasi, A.A., Nielsen, D.C., 2001. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation wheat. *Agric. Water Manager.* 47:69-75
- Baille, M., Baille, A., Laury, J.C., 1994. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Sci. Hortic.*, 59: 217-232.90
- Baille, A., Kittas, C., Katsoulas, N., 2001. Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107:293-306
- Baldocchi, D., 2005. <http://nature.berkeley.edu/biometlab/espm129/pdf/Lecture26espm129.pdf>.
- Challa, H. and Bakker, J.C., 1995. Synthesis. In: J.C. bakker, G.P.A. Bot, H. Challa and N.J. Van de Braak (Eds), *Greenhouse climate control: an integrated approach*. Wageningen Pers. Wageningen:97-100
- 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
- Cockshull, K.E., Graves, C.J., Cave, R.J., 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, 67:11-24
- 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

- Fernández, J.E., and Cuevas, M.V., 2010, Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 135-151
- 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
- Gardner, B.R., Nielsen, D.C., Shock, C.C., 1992. Infrared thermometry and the crop water stress index.II. Sampling procedures and interpretation. *J. Prod. Agric.* 5:466-475
- Grange, R. I., Hand, D.W., 1978. A review of effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. *Horticulture Science*, 62: 125-134
- Hanan, J. J. Holley, W.D. Goldmerry, K.L., 1978. *Greenhouse Management*. Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- Hand, D.W., Slack, G., 1988. What price summer CO₂ enrichment? *The Grower*, 109:27-31
- Hand, D.W., Soffe, R.W., 1971. Light-modulated temperature control and the response of greenhouse tomatoes to different CO₂ regimes. *J. Hort. Science*, 46:381-396
- Hanger, B., 1993. *Hydroponics: The World, Australian, and South Pacific Islands Scene*. In: *Commercial Hydroponics in Australasia, A Guide for Growers* Pro-Set Pty Ltd, Hobart
- Hiler, E.A., Clark, N., 1971. Stress day index to characterize effects of water stress on crop yields. *Trans. ASAE* 14: 757-761
- Hiler, E.A., Howell, T.A., 1983. Irrigation option to avoid critical stress: an overview. In : Taylo, M., et al. (Eds.), *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*, pp. 479-498
- 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
- Howell, T.A., Musick, J.T., Tolk, J.A., 1986. Canopy temperature of irrigated winter wheat. *Trans. ASAE* 29: 1692-1699

- Idso, S.B., 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.* 27:59-70
- Idso, S.B., Reginato, R.J., and Jackson, R.D., 1977. An equation for potential evaporation from soil, water and crop surfaces adaptable to use by remote sensing. *Geophys. Res. Lett.* 4:187-188
- Idso, S.B., Jackson, R.D., and Reginato, R.J., 1978. Extending the “degree day” concept of phenological development to include water stress effects. *Ecology.* 59:431-433
- 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
- Idso, S.B., Clawson, K.L., and Anderson, M.G., 1986. Foliage temperature: effects of environmental factors with implications for plant water stress assessment and the CO₂ / climate connection. *Water Resour. Res.* 22:1702-1716
- Jackson, R.D., 1982. Canopy temperature and crop water stress, *Adv. Irrig.* 1:43-85
- Jackson, R. D., and Pinter, P. J. Jr., 1981. Detection of water stress in wheat by measurement of reflected solar and emitted thermal IR radiation,. In *Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Institut National de la Recherche Agronomique, Versailles, France, pp. 399-406
- 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., 1977a. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13: 651–656
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., and Ehlerl, W.L., 1977b. Crop temperature reveals stress. *Crop Soils.* 29:10-13

- Jackson, R. D., Hatfield, J. L., Reginato, R. J., Idso, S.B. and Pinter, P.J.Jr. 1983. Estimation of daily evapotranspiration from one time- of- day measurements. *Agric. Water Manage.* 7:351-362
- Jackson, R.D., Moran, M.S., Gay, L.W., and Raymond, L.H., 1987. Evaluating evaporation from field crops using airborne radiometry and ground-based meteorological data, *Irrig. Sci.* 8:81-90
- Jensen, M.H., 1999. Hydroponics Worldwide In: Proceedings International Symposium on Growing Media and Hydroponics, Ontario, Canada 19-26 May 1997, Ed. AP Papadopoulos. *Acta Hort.* 481: 719-729
- Joillet, o. and Bailey, B.J., 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouse: measurement and models comparison. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58:43-62
- Jones, H.G., 1992. *Plants and microclimate.* Cambridge University Press, Cambridge.
- 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
- Jupp, D.L.B., 2003. Calculating and converting between common water vapour measures in meteorological data and their use in support of earth observation validation. CSIRO earth Observation Centre Technical Report, 2003/01
- 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
- Katerji, N., van Horn, J.W., Hamdy, A., and Mastrorilli, M., 2003. Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification method. *Agric. Water Manager.* 62(2003): 37-66

- Katsoulas, N., Baille, A. , Kittas, C., 2000. Effect of misting on transpiration and conductance of greenhouse rose canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106 (2001):233-247
- Katsoulas, N., Kittas, C., Baille, A., 1999. Estimating transpiration rate and canopy resistance of a rose crop in a fan –ventilated greenhouse. *Acta Horticulturae*,548:303-309(Proceedingw of the I.S.H.S. International Symposium on Growing Media and Hydroponics, Kassandra, Macedonia, Greece, August 31- September 6, 1999)
- Katsoulas, N., Kittas., 2011. Greenhouse crop transpiration modeling. In (Gerosa, G., Ed.): *Evapotranspiration-from measurements to agricultural and environmental applications*, ISBN :978-953-307-512-9, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/greenhouse-crop-transpiration-modelling>.
- Kirkham, M. B., 2005. *Principles of soil and plant water relations*. Elsevier Academic Press. Pp.437-434, 443
- Kittas C., Katsoulas n., Baille A., 1999. Transpiration and canopy resistance of greenhouse soilless roses: Measurement and modeling. *Acta Hort.* 507:61-88
- Kopyt, M., Ton, Y., Ben-Ner, Z. and Bachrach, A., 2001. A trial of phytomonitoring technique for roses. *Acta Hort.* , 547:205-212
- Langton, F.A., Hamer, P.J., 2001. The ‘speaking plant’. *Grower*, 22 Feb. 2001:18-19
- Leonardi, C., Guichard, S., Bertin, N., 2000. High vapour pressure deficit influences growth,transpiration and quality of tomato fruits. *Scientia Horticulturae*, 84:285-296
- Levanon, D., Morto, B., Marchaim, U., 1986. Organic materials degradation for CO₂ enrichment of greenhouse crops. In *Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouse crops*. Vol. I. H.Z. Enoch and B.A. Kimball, eds. CRC Press, Boca Raton, FL
- Ludwig, L. J., Withers, A.C.,1984. Photosynthetic responses to CO₂ in relation to leaf developmentin tomato.*Adv. in photosynthetic Res.* 4:217-220
- McCree, K.J., 1972. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. *Agric, Meteorol.*, 10: 443-453

- 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
- 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
- Nederhoff, E.M., 1994. Effects of CO₂ concentrations on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops. Ph.D. Dissertation. Wageningen. pp. 213
- Nederhoff, E.M., 1996. The A to Z guide for using CO₂ . J. of Horticulture and Food Research Institute of New Zeland.
- Nelson, P.V., 1991. Greenhouse operation and management. Practice Holl.
- Nielsen, D.C., 1990. Scheduling irrigations for soybeans with the crop water stress index (CWSI). Field Crop Res. 23:103-116
- Nielsen, D.C., Gardner, B.R., 1987. Scheduling irrigations for corn with the crop water stress index(CWSI). Apple Agric. Res. 2:295-300
- Nilsen, S., Hovland, K., Dons, C. and Sletten, S.P., 1983. Effect of CO₂ enrichment on photosynthesis, growth and yield of tomato. Scientia Horticulturae, 200:1-14
- Papadakis, G., Vox, G., Fenilloley, P., Stoffers, A., 2000. Radiometric and Thermal Properties of, and Testing methods for Greenhouse Covering Materials. Journal of Agricultural Engineering Research. 77(1): 7-8
- Roh, M.Y. Nam, Y.I. Cho, I.H. Yu, G.L. 2007. Environmental Control in Greenhouse Based on Phytomonitoring-Leaf Temperature as a Factor Controlling Greenhouse Environments. Acta Hort. 761:71-76
- 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
- Ton, Y. Phytomonitoring System. IV International congress on new agricultural technologies. Mexico, 1997: 89-95
- Ton, Y. and Kopyt, M., 1998. Phytomonitoring Technique for Greenhouses. User's Reference Guide. PhyTech Ltd. Israel.

- Ton, Y. and Kopyt, M., 2000. Phytomonitoring technology for greenhouse vegetable. PhyTech Ltd. Israel
- Ton, Y. and Kopyt, M., 2003a. Phytomonitoring Information and Decision-Support System for crop growing. Ed, Zhao Chunjiang, pp. 39-43
- Ton, Y. and Kopyt, M., 2003b. Phytomonitoring: A bridge from sensors to information technology for greenhouse control. Acta Hort. 614:639-644
- Ton, Y. and Kopyt, M., 2003c. Phytomonitoring in irrigation scheduling of Horticulture Crops. California, USA.-
- Ton , Y., Nilov. N., Kopyt, M., 2001. Phytomonitoring: the New Information Technology for Improving Crop Production. Acta Hort. 562:257-260
- Udink ten Cate A.J., Bot, C.P.A., Van Dixtorn J.J., 1978. Computer control of greenhouse climates. Acta Hort. 87:265-272
- Van Bavel, C.H.M., Ehrler, W.L., 1968. Water Loss from a Sorghum Field and Stomatal Control. Agronomy Journal, 60: 84-86
- Van Berkel, N., 1984. Injuries effects of high CO₂ concentration on cumcumber, tomato, chrysanthemum and gerbera. Acta Hort., 162: 101-112
- Van Pee, M., Berckmans, D., 1998. Speaking plant approach based on mathematical identification for environment control purposes. Acta Hort., 412:129-136
- Vogelezang, J., de Hoog, J., Marissen N., 2000. Effects of diurnal temperature strageties on carbohydrate content and flower quality of greenhouse roses. Acta Hort. 515 : 111-118
- Walker, K., G., Hatfield, l., J., 1979. Test of Stress-degree-day Concept Using Multiple Planting Dates of Red kidney Beans. Agronomy Journal, 71:967-971
- Yang, X., Short, T.H., Robert, D.F. and Bauerle, W. L., 1990. Transpiration, leaf temperature and Stomatal resistance of cumcumber crop. Agriculture and Forest Meteorology, 50: 197-209

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αναστασίου, Α., Φερεντίνος, Κ., 1999. Διαχείριση και Αυτόματος έλεγχος θερμοκηπίου. Γεωργία – Κτηνοτροφία 9: 76-83
- Γραφιαδέλλης, Ν., 1987. Σύγχρονα Θερμοκήπια, Β΄ Έκδοση. Εκδόσεις Γαρταγάνη. Θεσσαλονίκη σελ. 328
- Διαμαντόπουλος, Χ., 2011. Στο κόστος παραγωγής και στην έλλειψη τεχνογνωσίας επικεντρώνονται τα προβλήματα των παραγωγών θερμοκηπιακών προϊόντων. Γεωργία-Κτηνοτροφία 10: 6-8
- Καρατάγλης, Σ., 1999. Φυσιολογία φυτών. Art of Text. Θεσσαλονίκη
- Μαυρογιαννόπουλος, Γ. Ν., 2005. Θερμοκήπια. Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης
- Ντόγρας, Κ., 2001. Καλλιέργεια Λαχανικών στο θερμοκήπιο, Μέρος Α΄. Τμήμα Εκδόσεων, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο. Θεσσαλονίκη
- Οικονόμου, Σ.Α., 1992. Μαθήματα εμπορικής ανθοκομείας. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ. σελ.81
- Σιώμος Α.Σ., 2002. Καλλιέργεια λαχανικών στο θερμοκήπιο. Μέρος Β΄. Τμήμα Εκδόσεων, Πανεπιστημιακό Τυπογραφείο. Θεσσαλονίκη. Α.Π.Θ.
- Χουδάλης Π., 2011. Αυτοματισμοί θερμοκηπίων. Συστήματα αυτόματου ελέγχου κλίματος με παράλληλο έλεγχο άρδευσης –υδρολίπανσης. Γεωργία – Κτηνοτροφία 10:46-47