

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ, ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ «ΓΕΩΡΓΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ



**«Επίδραση της σκίασης και της αλατότητας στις ανταλλαγές ενέργειας και
μάζας υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριού».**

ΚΙΤΤΑ ΕΥΑΓΓΕΛΙΝΗ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

**Κατσούλας Νικόλαος
Γέμτος Θεοφάνης
Σάββας Δημήτριος**

**Λέκτορας
Καθηγητής
Επίκουρος Καθηγητής**

**Επιβλέπων
Μέλος
Μέλος**

ΒΟΛΟΣ 2009

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Από τα πιο σημαντικά προβλήματα των θερμοκηπίων της Μεσογειακής λεκάνης είναι η διαχείριση του κλίματος κατά την παρατεταμένη θερμή περίοδο του έτους. Η υψηλή θερμοκρασία και το μεγάλο έλλειμμα κορεσμού είναι συνήθεις συνθήκες στα θερμοκήπια της χώρας μας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω, κυρίως, των υψηλών τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας του εξωτερικού περιβάλλοντος. Οι κλιματικές αυτές συνθήκες προκαλούν μείωση της παραγωγής και υποβάθμιση της ποιότητας των θερμοκηπιακών προϊόντων. Το πιο απλό σύστημα για την αντιμετώπιση των θερμοκρασιακών υπερθερμάνσεων στο εσωτερικό των θερμοκηπίων είναι η εξωτερική σκίαση των θερμοκηπίων με άσπρισμα οροφής ή δίκτυ σκίασης στο κέλυφος της κατασκευής. Ταυτόχρονα, η έλλειψη αρδευτικού νερού καλής ποιότητας οδηγούν τους παραγωγούς να χρησιμοποιούν υπόγεια νερά αυξημένης αλατότητας που προκαλούν προβλήματα στην αύξηση και ανάπτυξη των θερμοκηπιακών καλλιεργειών ιδιαίτερα των ευαίσθητων όπως η αγγουριά. Έτσι, σκοπός της εργασίας ήταν η διερεύνηση της επίδρασης και της σκίασης και της αλατότητας στο μικροκλίμα, στο ενεργειακό ισοζύγιο, στη διαπνοή και στη φωτοσύνθεση υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς.

Έγιναν πειράματα στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο σε τρία θερμοκήπια με υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς, ένα χωρίς σκίαση (μάρτυρας), ένα σκεπασμένο με δίκτυ σκίασης 35% και ένα με δίκτυ σκίασης 50%. Σε κάθε θερμοκήπιο, επίσης, εφαρμόστηκαν δύο επίπεδα αλατότητας (κανονικό- $EC=2.3 \text{ ds m}^{-1}$ και εναλατωμένο θρεπτικό διάλυμα- $EC=6.3 \text{ ds m}^{-1}$). Έγιναν μετρήσεις των μικροκλιματικών παραμέτρων και μετρήσεις φωτοσύνθεσης. Οι κλιματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια δύο καλλιεργητικών περιόδων από τον Απρίλιο έως τον Ιούνιο και από το Σεπτέμβριο έως το Νοέμβριο του 2008. Οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης έγιναν κατά τη φθινοπωρινή περίοδο..

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι η σκίαση δεν επηρέασε σημαντικά τη θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου αλλά βελτίωσε τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας με αποτέλεσμα η διαπνοή να μην επηρεασθεί αρνητικά από τη σκίαση. Η ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου έδειξε, πάντως, πως ακόμη και η σκίαση 50% δεν επαρκεί για τον κλιματισμό του θερμοκηπίου στις συνθήκες καλοκαιριού στη Θεσσαλία αλλά απαιτείται συμπληρωματικό σύστημα δροσισμού για να βγει η καλλιέργεια από τις συνθήκες καταπόνησης (stress) και να λειτουργήσει φυσιολογικά.

Οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης έδειξαν πως η σκίαση μειώνει το ρυθμό φωτοσύνθεσης του φύλλου και τη διαπνοή. Μετρήσεις με τεχνητό φωτισμό έδειξαν πως καμία παράμετρος της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας του φύλλου δεν επηρεάζεται στατιστικώς σημαντικά από τη σκίαση κάτι που δείχνει πως τα φυτά δεν προσαρμόζονται στις συνθήκες σκίασης.

Τέλος η αλατότητα του θρεπτικού διαλύματος και η αλληλεπίδραση σκίαση* αλατότητα δεν φαίνεται να επηρεάζουν στατιστικώς σημαντικά τη φωτοσύνθεση και τη διαπνοή των φύλλων της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέλω να ευχαριστήσω το Λέκτορα του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών κο Κατσούλα Νικόλαο για την ανάθεση αυτού του θέματος, την ουσιαστική συμπαράστασή του, το ενδιαφέρον του, τις χρήσιμες υποδείξεις του, και τη γενικότερη ευγενική του συμπεριφορά καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Θερμές ευχαριστίες θέλω να απευθύνω στον Καθηγητή και Διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών κο Γέμτο Θεοφάνη για τις διορθώσεις-υποδείξεις του ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής και για τη συμπαράστασή του και την εν γένει συμπεριφορά του όλα τα χρόνια των σπουδών μου στο Τμήμα Φυτικής Παραγωγής και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή Λαχανοκομίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών κο Σάββα Δημήτριο για την συμμετοχή του στο σχεδιασμό του πειράματος, τη συμπαράστασή του κατά το διάστημα της εκπόνησης της μεταπτυχιακής διατριβής μου και τις διορθώσεις-υποδείξεις του ως μέλος της εξεταστικής επιτροπής.

Ευχαριστίες εκφράζω ακόμα στον εργαστηριακό συνεργάτη Κούτσικο Δημήτρη και στη μεταπτυχιακή φοιτήτρια Ελευθερία Καποδίστρια για την πολύτιμη συνεργασία και βοήθεια που μου προσέφεραν στο πειραματικό μέρος αυτής της διατριβής.

Τέλος, θερμά ευχαριστώ την οικογένεια μου και τους γονείς μου για την υποστήριξη και την υπομονή τους τόσο κατά την υλοποίηση της παρούσας διατριβής τους όσο και σε κάθε μου προσπάθεια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	Σελίδα
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 Ο ΚΛΑΔΟΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ	8
1.2. ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΑ ΛΑΧΑΝΙΚΑ ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ	10
1.3. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΛΑΔΟΥ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	12
1.4. ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	14
2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ	16
2.1. ΤΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	16
2.1.1 . Το ενεργειακό ισοζύγιο	16
2.1.2. Το ισοζύγιο υδρατμών	18
2.2. ΕΞΑΤΜΙΣΤΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ	20
2.2.1. Διαπνοή καλλιέργειας σε θερμοκήπιο	20
2.2.2. Υπολογισμός διαπνοής και παραμέτρων υδατικής κατάστασης φυτών	21
2.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ	23
2.3.1. Γενικά χαρακτηριστικά συστημάτων ψύξης	23
2.3.2. Αερισμός	25
2.3.3. Υγρή παρειά ή υγρό τοίχωμα	26
2.3.4. Τεχνητή ομίχλη	26
2.3.5. Σκίαση	29
2.3.5.1. Ηλιακή ακτινοβολία	30
2.3.5.2. Χρήση Διχτύων Σκίασης	32
2.3.5.3. Τεχνολογία Διχτύων Σκίασης	33
3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	38
3.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	38
3.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΕΣ ΜΑΖΑΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ	42
3.3. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΕΣ ΜΑΖΑΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ	45

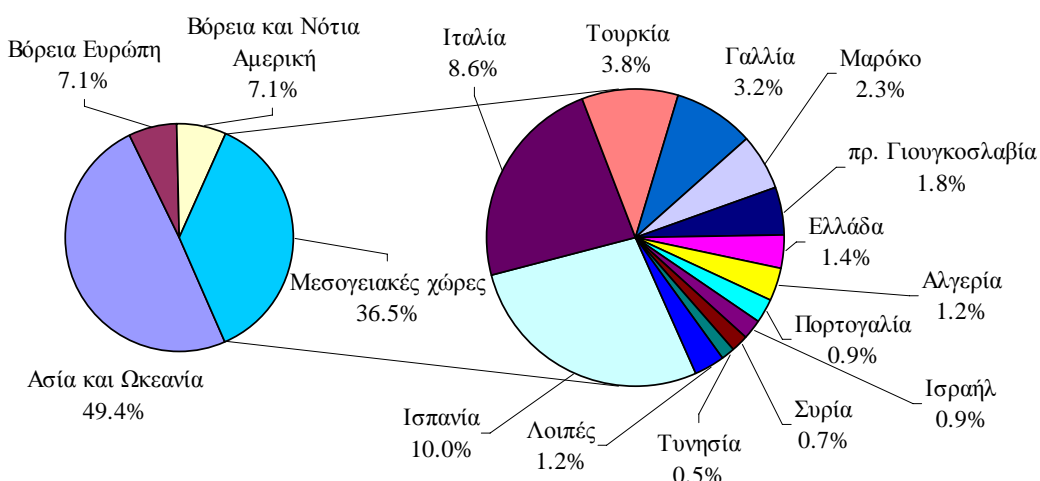
3.4.	ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	45
4.	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	47
4.1.	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	47
4.2.	ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ	47
4.3.	ΑΕΡΙΣΜΟΣ	48
4.4	ΘΕΡΜΑΝΣΗ	48
4.5.	Η ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ	48
4.6.	ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΦΡΟΝΤΙΔΕΣ	49
4.7.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ	50
4.8.	ΠΑΡΟΧΗ ΘΡΕΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ	51
4.9.	ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	52
4.9.1.	Μικροκλίματος	52
4.9.2.	Διαπνοής	53
4.9.3.	Φωτοσύνθεσης	54
4.9.3.1.	Περιγραφή του συστήματος μέτρησης φωτοσύνθεσης	54
4.9.3.2.	Διεξαγωγή μετρήσεων	65
4.10.	ΣΥΛΛΟΓΗ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	66
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	67
5.1.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	68
5.1.1.	Στη διαπερατότητα του θερμοκηπίου	68
5.1.2.	Στη θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου	72
5.1.3.	Στο έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου	75
5.1.4.	Επίδραση της σκίασης στη διαπνοή της καλλιέργειας	77
5.1.5.	Επίδραση της σκίασης στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας	79
5.2.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	83
5.3.	ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΦΘΙΝΟΠΩΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ	89
5.4.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΦΥΛΛΟΥ	94
5.4.1.	Μετρήσεις σε συνθήκες φυσικού φωτισμού	95
5.4.1.1	Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη	95

	φωτοσύνθεση	
5.4.1.2.	Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη διαπνοή του φύλλου	101
5.4.1.3.	Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη στοματική αγωγιμότητα του φύλλου	104
5.4.2.	Μετρήσεις σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού	109
5.4.2.1	Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη φωτοσύνθεση	110
5.4.2.2.	Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη διαπνοή του φύλλου	112
5.4.2.3.	Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη στοματική αγωγιμότητα του φύλλου	113
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	116
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ο ΚΛΑΔΟΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Οι απαιτήσεις της αγοράς για παραγωγή φρέσκων λαχανικών και ανθέων καθόλη τη διάρκεια του έτους οδήγησαν σε ανάπτυξη των καλλιεργειών υπό κάλυψη, κυρίως μετά τη δεκαετία του 60. Τα θερμοκήπια, που παρέχουν τη δυνατότητα καλλιέργειας υπό κάλυψη, έχουν αναπτυχθεί και βελτιωθεί σημαντικά εδώ και αρκετό καιρό. Ειδικά τα τελευταία χρόνια, οι προσπάθειες για περαιτέρω βελτίωση οδήγησαν στην χρήση νέων υλικών κάλυψης, νέων μεθόδων κλιματισμού καθώς και στη χρήση της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών στο χώρο των θερμοκηπίων. Αποτέλεσμα των παραπάνω ήταν η κατασκευή θερμοκηπίων με χαρακτηριστικά που μπορούν να ανταποκριθούν στις ιδιαίτερες απαιτήσεις της κάθε περιοχής και καλλιέργειας. Σε μερικές χώρες, όπως η Ολλανδία και η Ιαπωνία, η παραγωγή θερμοκηπιακών προϊόντων παίζει σημαντικό ρόλο στην οικονομία της χώρας ενώ σε άλλες χώρες, όπως η Ελλάδα, η παραγωγή θερμοκηπιακών ειδών αυξάνεται με σχετικά γρήγορους ρυθμούς. Η καλυμμένη έκταση με θερμοκήπια σε παγκόσμια κλίμακα ανέρχεται στα 2 800 000 στρέμματα (εκτός της Κίνας η οποία έχει περίπου 6 000 000 στρέμματα καλυμμένα με απλές κατασκευές και για τα οποία δεν υπάρχουν επαρκή στατιστικά στοιχεία) εκ των οποίων το 50%, περίπου, βρίσκεται στην Ασία (Σχήμα 1.1). Οι Μεσογειακές χώρες κατέχουν το 36.5% της παγκόσμιας καλυμμένης έκτασης.



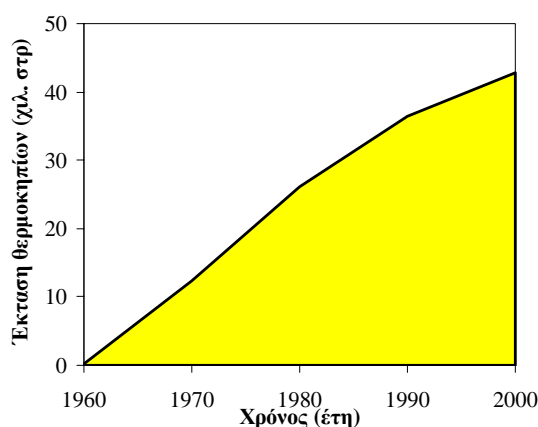
Σχήμα 1.1. Καλυμμένη έκταση με θερμοκήπια σε παγκόσμια κλίμακα (Συνολική έκταση 2 800 000 στρέμματα εκτός της Κίνας, Πηγή: ICAP).

Στην Ελλάδα, η οποία καλύπτει το 1.4% της παγκόσμιας έκτασης σε θερμοκήπια, η αύξηση των θερμοκηπιακών εκτάσεων ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακή την εικοσαετία 1960-1980 (Σχήμα 2.α). Κατά τη δεκαετία του '80 η αύξηση συνεχίσθηκε αλλά με χαμηλότερους ρυθμούς, ενώ κατά την τελευταία δεκαετία οι ρυθμοί ήταν ακόμη χαμηλότεροι. Εν τούτοις, σε απόλυτα μεγέθη, οι θερμοκηπιακές εκτάσεις στην Ελλάδα δεν έχουν γνωρίσει την ανάπτυξη εκείνη που θα δικαιολογούσαν οι ευνοϊκοί παράγοντες που επικρατούν στη χώρα μας για τις καλλιέργειες αυτές. Έτσι, η χώρα μας υστερεί σημαντικά στον τομέα αυτό έναντι άλλων χωρών με παρόμοιες κλιματολογικές συνθήκες, όπως είναι η Ισπανία και η Ιταλία.

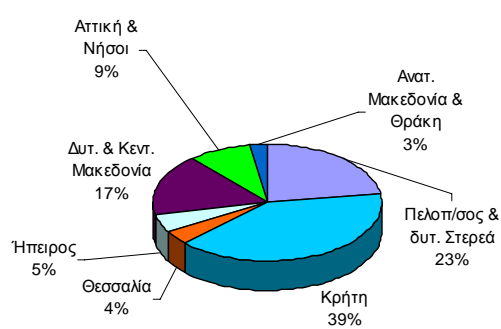
Στην Ελλάδα, η Κρήτη κατέχει το μεγαλύτερο τμήμα της έκτασης των θερμοκηπίων με ποσοστό περίπου 39% (Σχήμα 1. 2.β).

Τα θερμοκήπια με λαχανοκομικές καλλιέργειες αντιπροσωπεύουν ποσοστό μεγαλύτερο του 90% της συνολικής έκτασης των θερμοκηπίων , ενώ αντίστοιχα τα θερμοκήπια με ανθοκομικά είδη περιορίζονται σε ποσοστό μικρότερο του 10% (Σχήμα 1.3).

Από τις λαχανοκομικές καλλιέργειες θερμοκηπίου, τις μεγαλύτερες εκτάσεις καλύπτουν η τομάτα και το αγγούρι καταλαμβάνοντας μερίδιο της τάξης του 80%, ενώ από τις ανθοκομικές, τα δρεπτά άνθη (τριαντάφυλλα, γαρύφαλλα, χρυσάνθεμα κλπ) καλύπτουν συνολικά ποσοστό 65.5% του αντίστοιχου συνόλου.



(α)

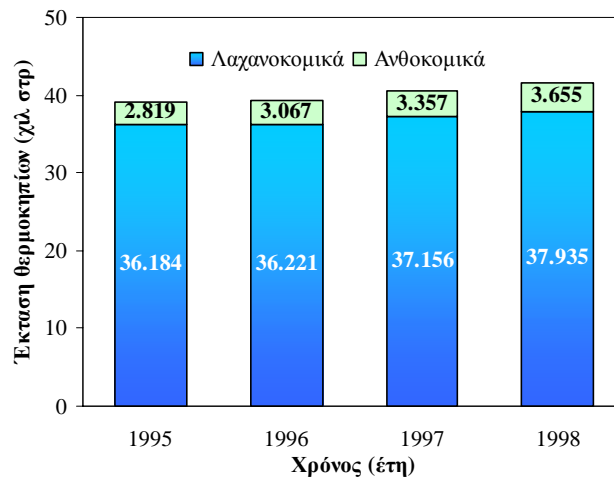


(β)

Σχήμα1. 2. (α) Έκταση θερμοκηπιακών εκτάσεων στην Ελλάδα από το 1960 έως το 2000 (Πηγή: Υπουργείο Γεωργίας). (β) Γεωγραφική κατανομή των θερμοκηπιακών

εκτάσεων στην Ελλάδα σε ποσοστό της συνολικής έκτασης (Πηγή: Υπουργείο Γεωργίας).

Από τα παραπάνω στοιχεία , φαίνεται καθαρά ότι παρά την πρόοδο που σημειώθηκε στον τομέα των καλλιεργειών υπό κάλυψη, η χώρα μας έχει σημαντικά περιθώρια για περαιτέρω ανάπτυξη.

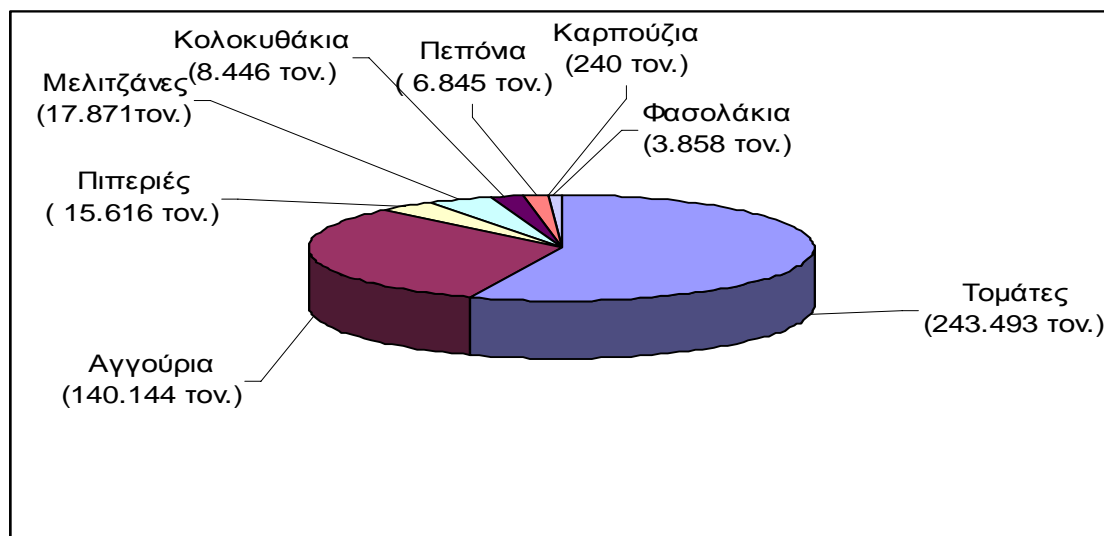


Σχήμα 1.3. Εκτάσεις που καλλιεργούνται με λαχανοκομικές και ανθοκομικές καλλιέργειες στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1995-1998 (Πηγή: Υπουργείο Γεωργίας).

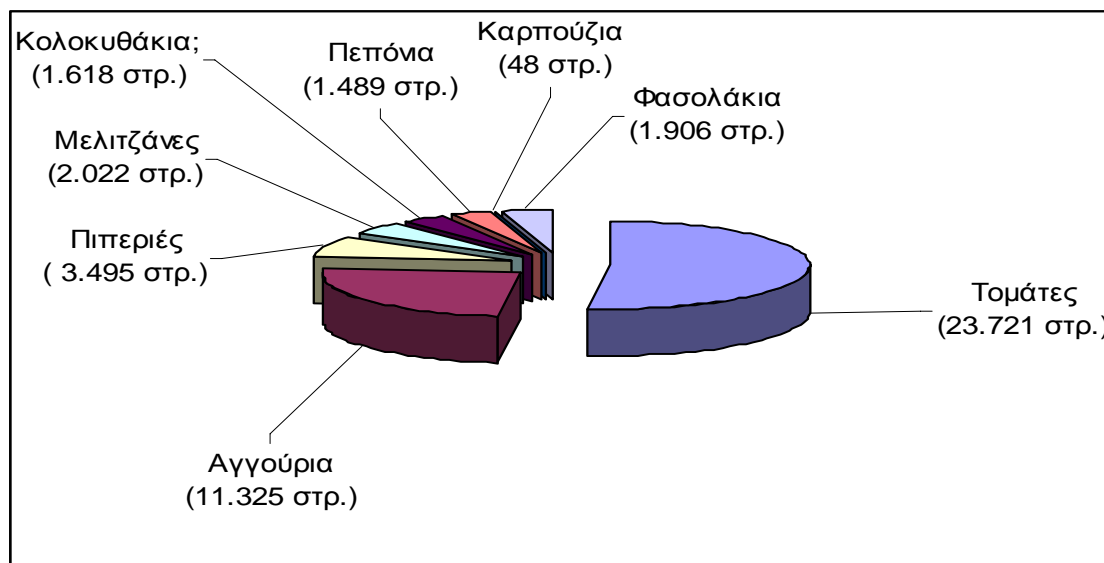
Όπως προκύπτει από τα στοιχεία που παρατέθηκαν οι λαχανοκομικές καλλιέργειες υπερέχουν συντριπτικά έναντι των ανθοκομικών καλλιεργειών και για το λόγο αυτό παραθέτουμε ορισμένα στοιχεία που αφορούν την καλλιέργεια λαχανικών σε θερμοκήπια στη χώρα μας.

1.2. ΚΑΛΛΙΕΡΓΟΥΜΕΝΑ ΛΑΧΑΝΙΚΑ ΣΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Ένας σημαντικός αριθμός λαχανικών θερμής εποχής, (με εξαίρεση το μαρούλι) καλλιεργείται στα θερμοκήπια για παραγωγή προϊόντων εκτός εποχής τους χειμερινούς μήνες. Τα πλέον σημαντικά λαχανικά είναι η τομάτα και το αγγούρι, τα οποία καταλαμβάνουν το 75 % της συνολικής έκτασης θερμοκηπίων (τομάτες το 50% και αγγούρι 25%). Οι εκτάσεις σε στρέμματα που καταλαμβάνουν τα διάφορα είδη λαχανικών που καλλιεργούνται στα θερμοκήπια ως κύρια και δευτερεύοντα καλλιέργεια και η παραγωγή σε τόνους κατά το 1997-98 δίνονται στις εικόνες 1.4 και 1.5 (Ολύμπιος 2001).



Εικόνα 1.4. Παραγωγή λαχανικών στα θερμοκήπια σε τόνους στην Ελλάδα την καλλιεργητική περίοδο 1997-98



Εικόνα 1.5. Συνολική έκταση κηπευτικών σε στρέμματα που καλλιεργήθηκαν σε θερμοκήπια κατά την καλλιεργητική περίοδο 1997-98 στην Ελλάδα

Επομένως, το αγγούρι είναι ένα από τα κύρια και πιο δημοφιλή λαχανικά που καλλιεργούνται στα θερμοκήπια. Η αγγουριά σήμερα καλλιεργείται σε όλες τις ηπείρους. Περισσότερο από τα 3/4 (77,3%) της παγκόσμιας παραγωγής παράγεται στην Ασία και το 1/7 περίπου στην Ευρώπη. Οι χώρες της Ε.Ε. παράγουν το 5,87% και η Ελλάδα το 0,7% της παγκόσμιας παραγωγής. Στην Ελλάδα η αγγουριά καλλιεργείται σε σημαντικές

εκτάσεις. Το 1997 καλλιεργήθηκαν συνολικά (υπαίθρια, θερμοκήπια, τούνελ) 19.260 στρ. και παρήχθησαν 161.220 τον. Σε υψηλά θερμοκήπια καλλιεργήθηκαν 11.470 στρ. και η παραγωγή τους ήταν 144.340 τον. Η καλλιέργεια της αγγουριάς σε υψηλά, πλαστικά κυρίως, θερμοκήπια συναντάται στην Κρήτη (Τυμπάκι, Ιεράπετρα) και Πελοπόννησο (Μεσσηνία, Ηλεία, Λακωνία). Μικρότερες ποσότητες παράγονται και σε άλλα διαμερίσματα της χώρας (περιοχή Θεσσαλονίκης, νησιά κ.λπ.) (Ολύμπιος 2001).

Σε υπαίθρια καλλιέργεια, οι αποδόσεις και η ποιότητα είναι μικρές εξαιτίας της επίδρασης των χαμηλών θερμοκρασιών κατά τη χειμερινή περίοδο, που επηρεάζουν την ανάπτυξή τους. Έτσι, τα θερμοκήπια αποτελούν τη καλύτερη λύση για παραγωγή καλής ποιότητας και ποσότητας προϊόντων (Mahagan and Singh, 2006).

Οι αποδόσεις όμως καθώς και η ποιότητα επηρεάζονται επίσης εκτός από τις δυσμενείς κλιματικές και εδαφικές συνθήκες και από το περιορισμένης διαθεσιμότητας και κακής ποιότητας νερό, που πολλές φορές επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη και παραγωγικότητα των καλλιεργούμενων φυτών.

1.3. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΚΛΑΔΟΥ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η επέκταση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών στην Ελλάδα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ανταγωνισμό με τις υπαίθριες, πρώιμες και όψιμες καλλιέργειες λαχανοκομικών και ανθοκομικών ειδών και τις εισαγωγές αντίστοιχων προϊόντων.

Είναι γεγονός ότι οι ήπιες κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στη χώρας μας από τον Απρίλιο έως και τον Οκτώβριο, επιτρέπουν την παραγωγή κηπευτικών προϊόντων στην ύπαιθρο, τα οποία ανταγωνίζονται τα αντίστοιχα θερμοκηπιακά προϊόντα κατά την ίδια περίοδο.

Σε ό,τι αφορά τις εισαγωγές, τα Ελληνικά θερμοκηπιακά προϊόντα υστερούν, κυρίως διότι παράγονται εποχιακά και δεν είναι τόσο καλής ποιότητας όσο τα εισαγόμενα, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εξασφαλίσουν εύκολη και ικανοποιητική διάθεση. Η εποχιακή παραγωγή και η κακή ποιότητα των Ελληνικών θερμοκηπιακών προϊόντων οφείλεται κυρίως:

- στην αδυναμία ικανοποιητικής ρύθμισης του μικροκλίματος στο θερμοκήπιο από το Μάιο έως το Σεπτέμβριο και
- στο υψηλό κόστος θέρμανσης και κατασκευής των θερμαινόμενων θερμοκηπίων.

Η μη ικανοποιητική ρύθμιση του μικροκλίματος κατά τη θερμή περίοδο, είναι πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα θερμοκήπια σε όλες τις περιοχές της Ελλάδας, ενώ το υψηλό κόστος για τη θέρμανση και κατασκευή των θερμοκηπίων είναι

πρόβλημα που αντιμετωπίζουν, κυρίως, όλες οι άλλες περιοχές εκτός από την Κρήτη (Kittas, 1995).

Η ποιότητα των θερμοκηπιακών κατασκευών και ο εξοπλισμός τους παίζουν σημαντικό ρόλο για την εξασφάλιση της δυνατότητας για ικανοποιητική ρύθμιση του κλίματος. Τα περισσότερα από τα Ελληνικά θερμοκήπια είναι ξύλινες κατασκευές χωρικού τύπου με κάλυψη από πλαστικό, χωρίς τα απαραίτητα συστήματα θέρμανσης, αερισμού και δροσισμού. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι τα μισά περίπου από τα θερμοκήπια της χώρας μας είναι ξύλινα με κάλυψη από πλαστικό, 45% περίπου είναι μεταλλικά με κάλυψη από πλαστικό και μόνο 5% είναι γυάλινα (Κίττας, 2000). Έτσι, ο ανεπαρκής κλιματισμός των θερμοκηπίων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και η έλλειψη θέρμανσης κατά τη διάρκεια του χειμώνα περιορίζουν τις δυνατότητες συνεχούς παραγωγής θερμοκηπιακών προϊόντων ποιότητας.

Κατά συνέπεια, παρά τις ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες της χώρας μας, το κλίμα που δημιουργείται, τελικά, μέσα στα θερμοκήπια απέχει κατά πολύ από το επιθυμητό και δεν είναι ικανοποιητικό για την ανάπτυξη των καλλιεργειών για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα του έτους.

Το πρόβλημα των χαμηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια του χειμώνα είναι οικονομικό και μπορεί να λυθεί με τη θέρμανση του θερμοκηπίου (Baille, 2001). Αντίθετα, η υψηλή θερμοκρασία και τα μεγάλα φορτία ακτινοβολίας που εμφανίζονται αργά την άνοιξη μέχρι νωρίς το φθινόπωρο οδηγούν σε υπερθερμάνσεις στο εσωτερικό των θερμοκηπίων και προκαλούν υδατική και θερμική καταπόνηση στις καλλιέργειες υπό κάλυψη (Κατσούλας, 2002).

Έτσι, το σημαντικότερο πρόβλημα των θερμοκηπίων στην Ελλάδα είναι ο έλεγχος των υψηλών θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού που οφείλεται κυρίως στα υψηλά επίπεδα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Ένα μεγάλο τμήμα της ενέργειας από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία χρησιμοποιείται για τη διαπνοή των φυτών, ενώ το υπόλοιπο για την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου. Όταν τα επίπεδα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ υψηλά, η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου αυξάνεται σε υψηλά επίπεδα. Οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες αποφεύγονται με τον εξαερισμό και την σκίαση.

Ο απλούστερος και πιο φτηνός τρόπος να αντιμετωπισθούν κατά την θερινή περίοδο, οι υψηλές τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και οι αυξημένες θερμοκρασίες του αέρα είναι η σκίαση, που περιορίζει τη διαπερατότητα του διαφανούς καλύμματος, και όταν συνδυάζεται με φυσικό αερισμό του θερμοκηπίου μπορεί να

οδηγήσει σε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Γενικά, η σκίαση μπορεί να συμβάλει στη γενική μείωση της θερμοκρασίας εδάφους και αέρα των θερμοκηπίων επειδή μειώνει την ποσότητα της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας εντός του χώρου του (Σουλιώτης και συνεργάτες 2001). Η μελέτη, όμως, της επίδρασης της σκίασης στις παραμέτρους που σχετίζονται με το θερμοκηπιακό μικροκλίμα (θερμοκρασία, υγρασία, ενεργειακό ισοζύγιο, διαπνοή, φωτοσύνθεση) παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον γιατί μπορεί να συμβάλει στην σωστή επιλογή του συστήματος σκίασης και στην ορθολογική του χρήση. Έχουν εφαρμοστεί διάφοροι μέθοδοι σκίασης για τη μείωση της προσπίπτουσας εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, μερικοί είναι απλοί (άσπρισμα, εξωτερικά δίχτυα στο κάλυμμα) ενώ άλλοι που χρειάζονται ιδιαίτερους μηχανισμούς (εσωτερικές κουρτίνες, εξωτερική τοποθέτηση δικτύων για αντιχαλαζική προστασία). Ένα άλλο πολύ μεγάλο πρόβλημα των θερμοκηπίων είναι πως σε πολλές περιοχές ιδιαίτερα της Μεσογειακής λεκάνης με θερμοκηπιακές καλλιέργειες, δεν υπάρχει διαθέσιμο νερό καλής ποιότητας και ως εκ τούτου η αυξημένη ζήτηση σε νερό για άρδευση οδηγεί τους παραγωγούς να χρησιμοποιούν υπόγεια νερά υψηλής αλατότητας που προκαλούν προοδευτική αύξηση της συγκέντρωσης Na και Cl στην περιοχή του ριζοστρώματος προκαλώντας ζημιά στην ανάπτυξη και παραγωγή της καλλιέργειας (Flowers, 1999; Sonneveld, 2000). Ιδιαίτερη, μάλιστα, ευαισθησία στην υψηλή αλατότητα στην περιοχή του ριζοστρώματος παρουσιάζει η αγγουριά (Ολύμπιος, 2001). Αν και έχουν γίνει αρκετές εργασίες σχετικά με την επίδραση της αυξημένης αλατότητας στην ανάπτυξη και την παραγωγή της καλλιέργειας σε θερμοκήπιο δεν υπάρχουν πληροφορίες για την επίδραση της στη φωτοσύνθεση και τη στοματική αγωγιμότητα, δηλαδή τη διαπνοή, ιδιαίτερα μάλιστα όταν το θερμοκήπιο είναι εξοπλισμένο με σύστημα σκίασης.

1.4. ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Από τη σύντομη εισαγωγή που προηγήθηκε, φαίνεται ότι μέχρι σήμερα έχουν γίνει εργασίες σχετικά με την επίδραση της σκίασης ή της αυξημένης αλατότητας στην καλλιέργεια στο θερμοκήπιο. Ελάχιστες, όμως, πληροφορίες υπάρχουν για την επίδραση της σκίασης στο μικροκλίμα και στις ανταλλαγές ενέργειας και μάζας καθώς και για την επίδραση της αυξημένης αλατότητας στην φωτοσύνθεση και τη διαπνοή της καλλιέργειας. Επί πλέον δεν είναι γνωστό αν τα προβλήματα που προκαλούνται από την αυξημένη αλατότητα επηρεάζονται όταν η καλλιέργεια γίνεται υπό συνθήκες σκίασης και ποια είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των δύο παραγόντων (σκίαση, αλατότητα).

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η διερεύνηση σε μία θερμοκηπιακή καλλιέργεια:

- Της επίδρασης της σκίασης στο μικροκλίμα, τη διαπνοή και φωτοσύνθεση.
- Της επίδρασης της αυξημένης αλατότητας στη φωτοσύνθεση και τη διαπνοή της καλλιέργειας.
- Της αλληλεπίδρασης της σκίασης και της αλατότητας στις ανταλλαγές μάζας (διαπνοή, φωτοσύνθεση).

Ως καλλιέργεια επιλέχθηκε η αγγουριά λόγω της μεγάλης σημασίας για τη χώρα μας και της ιδιαίτερης ευαισθησίας που παρουσιάζει η συγκεκριμένη καλλιέργεια στην υψηλή αλατότητα. Ως σύστημα καλλιέργειας επιλέχθηκε η υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς για να απομονωθεί, κυρίως, ο παράγοντας έδαφος που αποτελεί παράγοντα σημαντική παραλλακτικότητας σε πειράματα αγρού, πέραν του γεγονότος πως οι υδροπονικές καλλιέργειες αποτελούν, σήμερα, τον κανόνα για τις καλλιέργειες σε θερμοκήπια για τη Βόρεια Ευρώπη και επεκτείνονται συνεχώς στις περιοχές της Μεσογειακής λεκάνης, της Κεντρικής Αμερικής, της Αυστραλίας και της Ασίας.

Πιο συγκεκριμένα, στη παρούσα εργασία θα μελετηθεί αν οι αλληλεπιδράσεις δυο διαφορετικών επιπέδων αλατότητας (κανονική και υψηλή) και τριών επιπέδων σκίασης στο μικροκλίμα και στις ανταλλαγές ενέργειας και μάζας σε υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς.

Στη συνέχεια της μεταπτυχιακής διατριβής γίνεται σύντομη παρουσίαση των φαινομένων μεταφοράς σε θερμοκήπιο (ενεργειακό ισοζύγιο, ισοζύγιο υδρατμών, διαπνοή, φωτοσύνθεση) και των συστημάτων ψύξης των θερμοκηπίων με έμφαση στη σκίαση (Κεφάλαιο 2), γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των επιδράσεων της σκίασης και της αλατότητας στα φαινόμενα μεταφοράς στο θερμοκήπιο και η αλληλεπίδραση τους στα φαινόμενα αυτά (Κεφάλαιο 3), παρουσιάζονται τα υλικά και περιγράφονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα (κεφάλαιο 4) και ακολουθεί η παρουσίαση και συζήτηση των αποτελεσμάτων (κεφάλαιο 5). Στο τέλος της εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της έρευνας αυτής και οι προοπτικές μελέτης του θέματος (κεφάλαιο 6) και η βιβλιογραφία (κεφάλαιο 7)..

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

2.1. ΤΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

2.1.1. Το ενεργειακό ισοζύγιο

Το θερμοκήπιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ηλιακός συλλέκτης. Η μόνη διαφορά στην προσομοίωση του με τις εξισώσεις των ηλιακών συλλεκτών είναι η παρουσία μιας διαπνέουσας επιφάνειας, η οποία τροποποιεί τα φαινόμενα μεταφοράς λανθάνουσας θερμότητας. Χρησιμοποιώντας αυτή την αναλογία με τον ηλιακό συλλέκτη μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η καθαρή ακτινοβολία (R_n) του θερμοκηπίου αποτελείται από δύο συνιστώσες (Εικόνα 2.1):

- Την αισθητή θερμότητα, H_s που χρησιμεύει για την θέρμανση του αέρα του θερμοκηπίου (και αντιπροσωπεύει το κύριο μέρος της «χρήσιμης» ενέργειας η οποία μπορεί να εξαχθεί από ένα ηλιακό συλλέκτη).
- Τη λανθάνουσα θερμότητα, λE , η οποία αντιπροσωπεύει τον ρυθμό εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας.

Ο λόγος της αισθητής προς τη λανθάνουσα θερμότητα λέγεται λόγος του Bowen, $\beta = H_s/\lambda E$ και εξαρτάται από την ένταση των φαινομένων εξατμισοδιαπνοής (Landsberg et al., 1979).

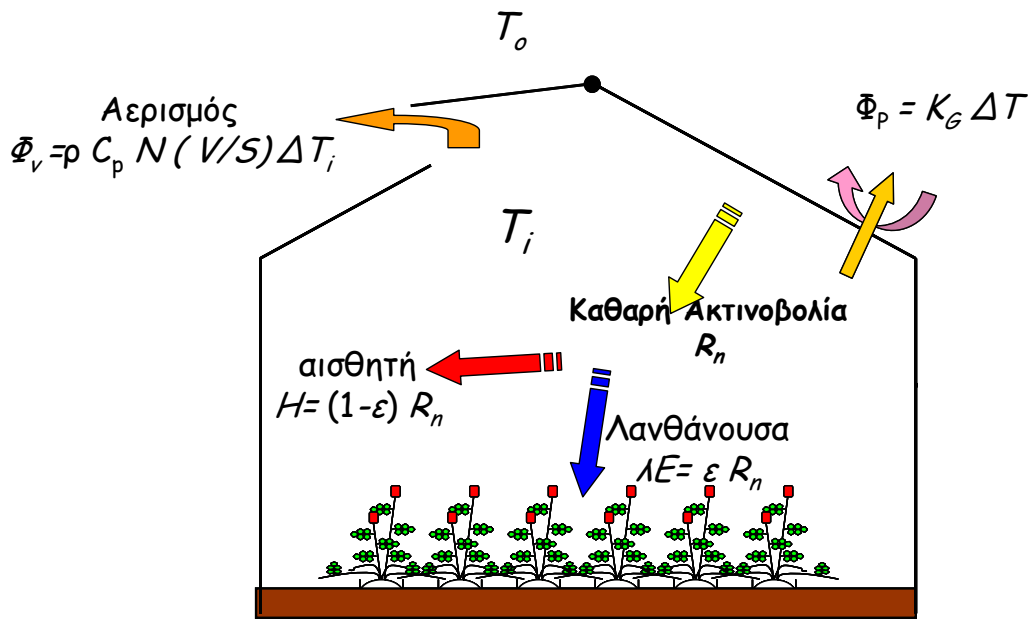
Αν θεωρήσουμε πως η καθαρή ακτινοβολία (R_n) κατανέμεται σε αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα έχουμε τις παρακάτω απλοποιημένες σχέσεις:

$$H_s = (1-\varepsilon) R_n \quad (2.1)$$

$$\lambda E = \varepsilon R_n \quad (2.2)$$

όπου ε ο λόγος της λανθάνουσας θερμότητας προς καθαρή ακτινοβολία (το ηλιακό κέρδος).

Η εξίσωση (2.2) αποτελεί μια προσεγγιστική εκτίμηση του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής η ολοκληρωμένη έκφραση του οποίου είναι περισσότερο σύνθετη.



Εικόνα 2.1. Απλοποιημένο ενεργειακό ισοζύγιο σε ένα μη θερμαινόμενο θερμοκήπιο (τα σύμβολα εξηγούνται στο κείμενο)

Η αισθητή θερμότητα του θερμοκηπίου κατανέμεται σε δύο μορφές απωλειών:

- 1) τις απώλειες με μεταφορά και ακτινοβολία από τα τοιχώματα του θερμοκηπίου, (Φ_p), που μπορεί να εκφραστούν ως ακολούθως:

$$\Phi_p = K_G (T_i - T_o) = K_G \Delta T \quad (2.3)$$

όπου K_G είναι ο συνολικός συντελεστής απωλειών ($\text{Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου (T_i), και της εξωτερικής θερμοκρασίας, (T_o).

- 2) οι απώλειες λόγω διαφυγών που οφείλονται στη μη καλή στεγανότητα και στον αερισμό του θερμοκηπίου, Φ_v

$$\Phi_v = K_v \Delta T \quad (2.4)$$

όπου K_v ($\text{Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω διαφυγών-αερισμού, ο οποίος μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του ρυθμού ανανέωσης του αέρα, $N(\text{s}^{-1})$:

$$K_v = \rho C_p N (V/S) \quad (2.5)$$

όπου: ρ = πυκνότητα του αέρα (kg m^{-3}), C_p = η ειδική θερμότητα του αέρα ($\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) και V/S = ο λόγος του όγκου του θερμοκηπίου (V) προς την επιφάνεια του εδάφους (S).

Έτσι, από την εξίσωση (1) παίρνουμε:

$$(1-\epsilon) R_n = K_G \Delta T + \rho C_p N (V/S) \Delta T \quad (2.6).$$

Από την σχέση (2.6) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου, είναι σε σταθερές συνθήκες ($dT/dt = 0$) :

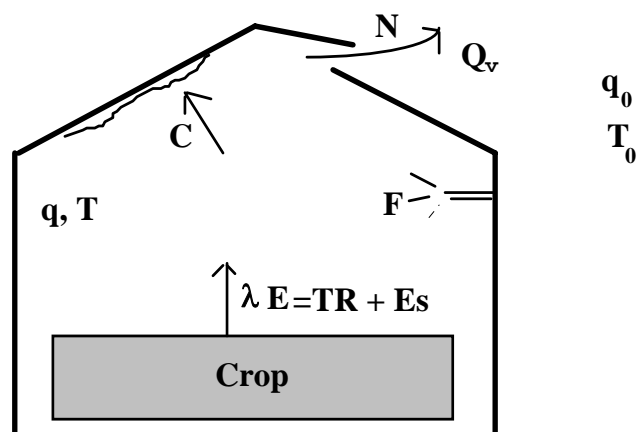
$$T_i = T_0 + \frac{(1-\varepsilon)R_n}{K_G + \rho C_p N \left(\frac{V}{S} \right)} \quad (2.7)$$

Από την εξίσωση (2.7) βλέπουμε ότι για να μειώσουμε την θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου μπορούμε να επεμβούμε με τους ακόλουθους τρόπους:

- Μειώνοντας την καθαρή ακτινοβολία R_n (κουρτίνες σκίασης, άσπρισμα ...).
- Αυξάνοντας το συντελεστή ε δηλαδή το μέρος του R_n , που εξατμίζει, με διοχέτευση υδρατμών στο θερμοκήπιο (ψεκασμός, τεχνητή ομίχλη...).
- Αυξάνοντας το K_G (ψεκασμός νερού στην οροφή).
- Αυξάνοντας το ποσοστό ανανεώσεως του αέρα N .
- Ψύχοντας τον εξωτερικό αέρα T_0 πριν τον διοχετεύσουμε στο θερμοκήπιο (σύστημα δροσισμού με βρεγμένη παρειά, Cooling - system).
- Αυξάνοντας τον όγκο V του θερμοκηπίου.

2.1.2. Το ισοζύγιο υδρατμών

Με τρόπο ανάλογο όπως και για αισθητή θερμότητα, μπορούμε να διατυπώσουμε το ισοζύγιο της υγρασίας του θερμοκηπίου.



Εικόνα 2.2. Το ισοζύγιο υδρατμών του θερμοκηπίου (τα σύμβολα εξηγούνται στο κείμενο)

Η γενική μορφή του ισοζυγίου υδατμών του θερμοκηπίου μπορεί να γραφεί ως ακολούθως (Εικόνα 2.2):

$$\frac{V}{S} \frac{dq}{dt} = TR + E_s + F - Q_v - C \quad (2.8)$$

όπου:

dq/dt = ο ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής υγρασίας ($\text{kg}_{\text{νερού}} \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$);

q_i =συγκέντρωση υδατμών στον αέρα του θερμοκηπίου ($\text{kg}_{\text{νερού}} \text{m}^{-3}$)

V, S = όγκος θερμοκηπίου (m^3) και η επιφάνεια εδάφους του θερμοκηπίου (m^2) αντίστοιχα

TR = διαπνοή της καλλιέργειας ($\text{kg}_{\text{νερού}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

E_s = εξάτμιση από το έδαφος ($\text{kg}_{\text{νερού}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

F = ποσότητα νερού που συμπληρώνεται στο θερμοκήπιο από συστήματα ψύξης με εξάτμιση, όπως υδρονέφωση ή σύστημα βρεγμένης παρειάς (Cooling pad), ($\text{kg}_{\text{νερού}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Q_v = απώλειες υγρασίας λόγω μη καλής στεγανότητας και αερισμού ($\text{kg}_{\text{νερού}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

C = ρυθμός συμπύκνωσης στο έδαφος ή στην καλλιέργεια ($\text{kg}_{\text{νερού}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Κατά την διάρκεια της ημέρας το ισοζύγιο υγρασίας εξαρτάται κυρίως από την εξατμισοδιαπνοή, $E = TR + E_s$, και από τις απώλειες λόγω αερισμού, Q_v . Κατά την διάρκεια της ημέρας η συμπύκνωση είναι σπάνια (ωστόσο δεν μπορεί να αγνοηθεί κατά την διάρκεια της νύχτας). Η εξάτμιση του εδάφους είναι αμελητέα εάν εφαρμόζεται τοπική άρδευση σε σύστημα υδοπονίας ή εάν το έδαφος ή το υπόστρωμα καλύπτονται από λευκό ανακλαστικό κάλυμμα. Τότε, για την πλειοψηφία των περιπτώσεων (χωρίς συμπλήρωμα νερού από ένα σύστημα υδρονέφωσης), οι όροι E_s , F και C μπορεί να αγνοηθούν και θα έχουμε:

$$\frac{V}{S} \frac{dq}{dt} = TR - Q_v \quad (2.9)$$

Για σταθερές συνθήκες ($dq/dt=0$), ισχύει κατά συνέπεια:

$$TR \approx Q_v \quad (2.10)$$

Σε πρώτη προσέγγιση, λοιπόν, μπορεί να θεωρηθεί ότι η διαπνοή TR ισούται με τις απώλειες λόγω αερισμού Q_v . Εάν υπάρχουν διαθέσιμες σχέσεις εκτίμησης του ποσοστού ανανέωσης του αέρα N , είναι δυνατός ο υπολογισμός του ρυθμού διαπνοής

της καλλιέργειας υπολογίζοντας τον ρυθμό ανταλλαγής του αέρα του θερμοκηπίου (Bakker, 1986).

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2.2) και εκφράζοντας την ποσότητα Q_v ως ακολούθως:

$$Q_v = N(V/S)(q_i - q_0) \quad (2.11)$$

όπου q_0 είναι η εξωτερική υγρασία, λαμβάνουμε τη σχέση:

$$q_i = q_0 + \frac{aR_n/\square}{N(V/S)} \quad (2.12)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (12) η υγρασία του θερμοκηπίου μπορεί να τροποποιηθεί ενεργώντας στους ακόλουθους παράγοντες:

- Αυξάνοντας το συντελεστή ε , δηλαδή αυξάνοντας τον ρυθμό εξατμισοδιαπνοής, αυξάνοντας έτσι την υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου.
- Μειώνοντας το R_n , χρησιμοποιώντας κουρτίνες σκίασης ελατώνοντας έτσι την διαπνοή της καλλιέργειας..
- Αυξάνοντας το N , δηλαδή τον ρυθμό ανανέωσης του αέρα, μειώνοντας έτσι την υγρασία.

Πάντως η εξίσωση (12) δίνει μια υπεραπλουστευμένη έκφραση των εξατμιστικών φαινομένων σ' ένα θερμοκήπιο, γιατί θεωρεί ότι η εξατμισοδιαπνοή είναι ανάλογη μόνο της ακτινοβολίας. Στην πραγματικότητα η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από την υγρασία πιο πολύπλοκα και υπάρχουν διάφορες αλληλεπιδράσεις μεταξύ της εξατμισοδιαπνοής και του ρυθμού διαπνοής οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη για μια αντικειμενική πρόβλεψη της υγρασίας του θερμοκηπίου.

2.2. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΕΞΑΤΜΙΣΗΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

2.2.1. Διαπνοή καλλιέργειας σε θερμοκήπιο

Ο ρυθμός διαπνοής εξαρτάται από την καθαρή ακτινοβολία η οποία απορροφάται από την φυλλική επιφάνεια, R_n , καθώς και από το έλλειμμα κορεσμού, $D = e_s(T) - e$, όπου $e_s(T)$, η πίεση υδρατμών στο κορεσμό στη θερμοκρασία T (PaK^{-1}) και e η πίεση υδρατμών του αέρα (PaK^{-1}). Η διαπνοή, TR , γενικά εκφράζεται με την εξίσωση των Penman-Monteith, (Monteith, 1973), θεωρώντας όλη την καλλιέργεια την σαν ένα «μεγάλο φύλλο»:

$$\lambda TR = \frac{\delta R_n}{\delta + \gamma^*} + \rho C_p \frac{g_a D}{\delta + \gamma^*} \quad (2.13)$$

όπου:

R_n = καθαρή ακτινοβολία στο επίπεδο της καλλιέργειας, (W m^{-2}).

λ = λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού, (J kg^{-1}).

$\gamma^* = \gamma (1 + g_a/g_s)$, όπου γ η θερμοδυναμική ψυχρομετρική σταθερά (PaK^{-1}), g_a και g_s (m s^{-1}) αντίστοιχα είναι η αεροδυναμική και στοματική αγωγιμότητες της καλλιέργειας στη ροή των ατμών.

δ = είναι η κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδρατμών σε θερμοκρασία T , (PaK^{-1}).

Η στοματική αγωγιμότητα, g_s , εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Η Stanghellini (Stanghellini, 1987), βρήκε ότι η TR εξαρτάται από την ακτινοβολία και το έλλειμμα κορεσμού και έξεφρασαν την στοματική αγωγιμότητα g_s ως ακολούθως :

$$g_s = g_{s\max} f_1(R_n) f_2(D) \quad (2.14)$$

Από τις εξισώσεις (13), (14), μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει μία σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ της υγρασίας του αέρα της διαπνοής και της καλλιέργειας. Εάν το έλλειμμα κορεσμού D αυξάνεται, τότε η διαπνοή TR αυξάνεται αλλά η στοματική αγωγιμότητα g_s , ελαττώνεται αντιδρώντας έτσι στην αύξηση της διαπνοής. Πάντως επειδή ο περιοριστικός παράγοντας για την διαπνοή στα θερμοκήπια είναι η αεροδυναμική αγωγιμότητα ($g_a \ll g_s$) η ελάττωση της τιμής g_s δεν έχει σημαντική επίδραση στην τιμή της συνολικής αγωγιμότητας και στο ρυθμό της διαπνοής, (Hsiao, 1990), μέχρι η καλλιέργεια να υποστεί ένα δυνατό stress οφειλόμενο στην υψηλή τιμή του ελλείμματος κορεσμού. Μόνο στην τελευταία περίπτωση η στοματική ρύθμιση είναι αρκετά σημαντική ώστε να επιδρά καθοριστικά στο ρυθμό διαπνοής της καλλιέργειας υπό κάλυψη.

2.2.2. Υπολογισμός διαπνοής και παραμέτρων υδατικής κατάστασης φυτών

Ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας απορροφάται, ανακλάται και διαχέεται μέσα στην ατμόσφαιρα λόγω της ύπαρξης όζοντος, υδρατμών και σκόνης. Η ολική ακτινοβολία που τελικά φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους μπορεί να μετρηθεί (με πυρανόμετρα) αλλά τέτοια δεδομένα διατίθενται σε μικρό μόνο αριθμό μετεωρολογικών σταθμών.

Ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στην επιφάνεια της γης ανακλάται πίσω στην ατμόσφαιρα κατά ένα ποσοστό (albedo). Το ποσοστό αυτό καθορίζεται από το συνδυασμό ιδιοτήτων της εξατμιζουσας επιφάνειας (επιφάνεια νερού, ξηρό έδαφος, υγρό έδαφος, βλάστηση, κλπ), και την κλίση του ήλιου. Ενδεικτικές τιμές του albedo για επιφάνεια νερού και καλλιέργειας με πλήρη κάλυψη εδάφους αναφέρονται οι 0,05 και 0,25 αντίστοιχα.

Η ατμόσφαιρα και η επιφάνεια της γης έχοντας θερμοκρασίες μεγαλύτερες του απόλυτου μηδενός εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Το μέγεθος της ακτινοβολίας αυτής είναι ανάλογο της θερμοκρασίας. Επειδή η θερμοκρασία της επιφάνειας της γης είναι μεγαλύτερη από αυτήν της ατμόσφαιρας, εκπέμπεται από την γη προς την ατμόσφαιρα ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Η εκπομπή αυτή μπορεί να υπολογιστεί με βάση τη θερμοκρασία του αέρα, την υγρασία και τον βαθμό νέφωσης.

Τελικά με βάση τους συλλογισμούς αυτούς η καθαρή προσπίπτουσα ακτινοβολία ισούται με:

$$R_N = R_i * (1 - r_a) - R_B \quad (2.15)$$

όπου:

R_N :Η καθαρή ολική ακτινοβολία (ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας που καλύπτουν τα φυτά και χρόνου)

R_i :Η προσπίπτουσα ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος

r_a :Ο συντελεστής ανάκλασης - albedo (χωρίς διαστάσεις)

R_B :Είναι η καθαρή εκπεμπόμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος

Η καθαρή αυτή ακτινοβολία (R_N) θερμαίνει το νερό που με τη σειρά του εκπέμπει θερμότητα στον αέρα που το περιβάλλει και εξατμίζει ένα μέρος του νερού, έτσι ώστε ισχύει:

$$R_N = H_c + \lambda E_c \quad (.16)$$

όπου:

H_c :Είναι η ανταλλαγή αισθητής θερμότητας μεταξύ καλλιέργειας και αέρα (W/m^2)

Από την τελευταία σχέση εάν γνωρίζουμε τις τιμές των R_N (μέτρηση με πυρραδιόμετρο) και λE_c (μέτρηση με λυσίμετρο) μπορούμε να υπολογίσουμε την H_c .

Η ανταλλαγή θερμότητας προς την ατμόσφαιρα μιας επιφάνειας είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας, σύμφωνα με τη σχέση (θεωρούμε το H_c θετικό όταν $T_c - T_i = \delta T$ είναι θετικό, δηλαδή ισχύει $T_c > T_i$):

$$H_c = g_a \rho C_p (T_c - T_i) \quad (2.17)$$

όπου:

T_c :Η θερμοκρασία φύλλου (μετράται με ειδικά θερμοζεύγη) και

T_i : Η θερμοκρασία του αέρα

Από τη σχέση αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε τον αεροδυναμικό συντελεστή διάχυσης της θερμότητας g_a αφού έχουμε υπολογίσει το H_c και γνωρίζουμε το δT .

Ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής (αν θεωρήσουμε ότι η εξάτμιση είναι αμελητέα) είναι ανάλογος του ελλείμματος κορεσμού καλλιέργειας – αέρα, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\lambda E_c = (\rho C_p / \gamma) g_t D_c \quad (2.18)$$

όπου:

D_c : Το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών αέρα - καλλιέργειας

Από τη σχέση αυτή μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή διάχυσης υδρατμών της καλλιέργειας g_t .

Εάν γνωρίζουμε τα g_a και g_t μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό συντελεστή στοματικής αγωγιμότητας για την καλλιέργεια (g_c) από τη σχέση:

$$\frac{1}{g_c} = \frac{1}{g_t} + \frac{1}{g_a} \quad \text{ή} \quad g_c = \frac{g_a g_t}{g_a + g_t} \quad (2.19)$$

Ο συντελεστής αυτός αντιπροσωπεύει την αγωγιμότητα ενός μεγάλου αριθμού φύλλων και αναφέρεται ως αγωγιμότητα της φυλλικής επιφάνειας

2.3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ ΤΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

2.3.1. Γενικά χαρακτηριστικά συστημάτων ψύξης

Στο εσωτερικό των θερμοκηπίων το καλοκαίρι η θερμοκρασία βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου και του φαινομένου του κλειστού χώρου. Ένας από τους αποτελεσματικότερους τρόπους ψύξης του θερμοκηπίου είναι ο δροσισμός με εξάτμιση. Τα συστήματα δροσισμού με εξάτμιση βασίζονται στη μετατροπή της αισθητής θερμότητας σε λανθάνουσα είτε μέσω της απευθείας παροχής νερού στην ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου (σύστημα τεχνητής ομίχλης, σύστημα μικροψεκαστήρων) είτε μέσω της ψύξης του αέρα με διέλευση μέσα από υγρή παρειά (συστήματα δυναμικού αερισμού και υγρής παρειάς). Η μείωση της θερμοκρασίας που προκαλούν τα συστήματα δροσισμού συνοδεύεται με αύξηση της υγρασίας ενώ μεταβολή των δύο αυτών παραγόντων του μικροκλίματος του θερμοκηπίου έχει επίδραση και στις υδατικές ανάγκες των φυτών.

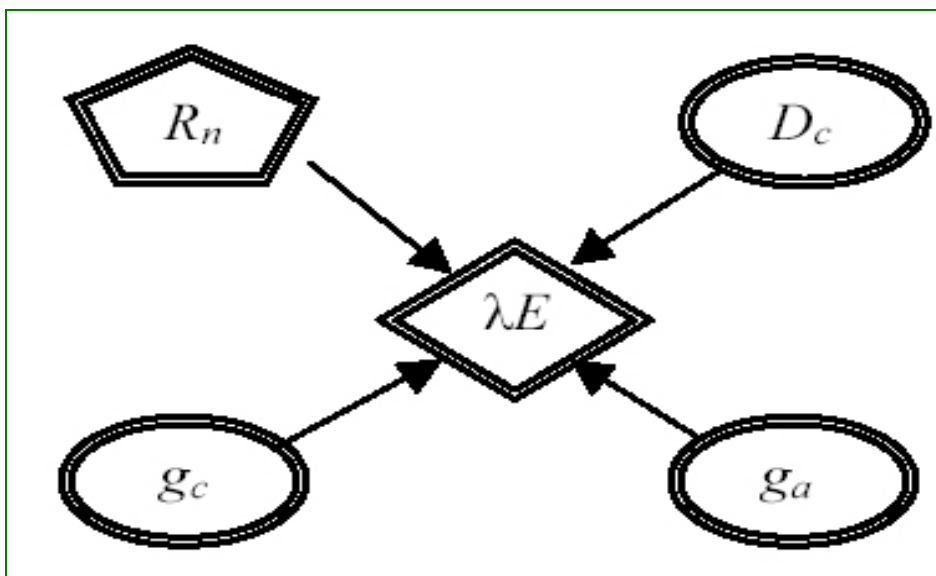
Είναι γνωστό ότι η συγκέντρωση του νερού στα φυτά θα πρέπει να διατηρείται μέσα σε ένα στενό εύρος έτσι ώστε να παρέχει τις προϋποθέσεις για βέλτιστη ανάπτυξη.

Η συγκέντρωση του νερού στα φυτά εξαρτάται από δύο κυρίους παράγοντες:

- + τη διαθεσιμότητα του νερού στο υπόστρωμα,
- + την απορρόφησή του από τις ρίζες και
- + την εξάτμιση του νερού από τα φύλλα, δηλαδή τη διαπνοή.

Η διαπνοή επηρεάζεται από (Εικόνα 2.3):

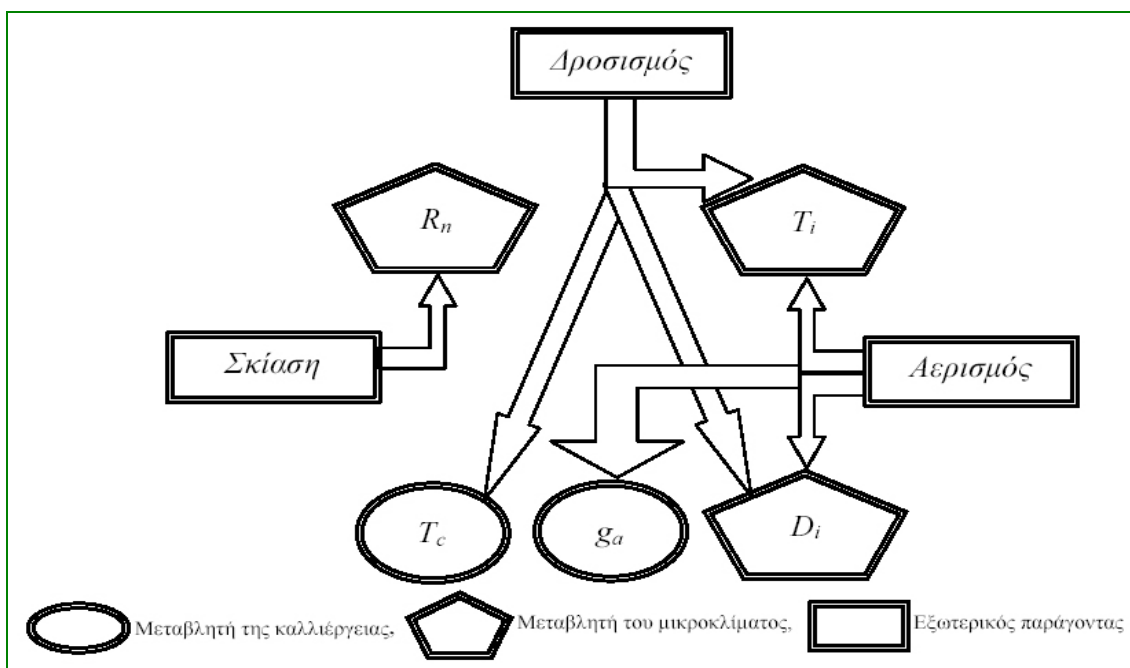
- + Την ακτινοβολία,
- + Τη διαφορά μεταξύ της πίεσης υδρατμών του αέρα και της πίεσης υδρατμών στον κορεσμό στη θερμοκρασία του φύλλου (έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα),
- + Την αγωγιμότητα στη μεταφορά των υδρατμών από το εσωτερικό του φύλλου στην επιφάνειά του (στοματική αγωγιμότητα) και
- + Την αγωγιμότητα στη μεταφορά των υδρατμών από την επιφάνεια του φύλλου στον αέρα (αεροδυναμική αγωγιμότητα).



Εικόνα 2.3. Διαπνοή λE και μεταβλητές που την επηρεάζουν. R_n = καθαρή ακτινοβολία, D_c = έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα, g_c = στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, g_a = αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας (Κατσούλας 2002).

Για μικρά χρονικά διαστήματα, όταν το έλλειμμα κορεσμού του αέρα αυξάνεται (ανταποκρινόμενο στη μείωση της σχετικής υγρασίας), τα στόματα αρχίζουν σταδιακά να κλείνουν προκειμένου να μειωθεί η υδατική καταπόνηση. Η αρνητική επίδραση είναι σημαντικά μεγαλύτερη για τιμές του ελλείμματος κορεσμού του αέρα μεγαλύτερες από 1 kPa. Αν τα φυτά φθάσουν σε μεγαλύτερα επίπεδα υδατικής καταπόνησης, οι ρίζες δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν το υπέργειο μέρος των φυτών με αρκετό νερό, τα φυτά χάνουν την ακαμψία και τη σπαργή τους και μη αναστρέψιμες βλάβες μπορεί να

προκληθούν στα φύλλα. Υπό συνθήκες υδατικής καταπόνησης, το περισσότερο νερό κατευθύνεται προς τα φύλλα και η ανάπτυξη των καρπών μειώνεται. Επιπρόσθετα, βλάβες μπορεί να προκληθούν με απευθείας 'κάψιμο' των φύλλων. Στην περίπτωση αυτή, η διαπνοή, μέσα από τη διαδικασία της ψύξης με εξάτμιση, είναι αυτή που παίζει σημαντικό ρόλο στη μείωση της υψηλής θερμοκρασίας της καλλιέργειας και θα πρέπει να γίνονται οι κατάλληλες ενέργειες προκειμένου να διατηρείται στο μέγιστο ρυθμό. Στο θερμοκήπιο υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της διαπνοής των καλλιεργειών και της ρύθμισής της στα επιθυμητά επίπεδα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται κυρίως η σκίαση, ο αερισμός και ο δροσισμός, συστήματα με τα οποία ρυθμίζεται άμεσα η ακτινοβολία R_n , η θερμοκρασία T_i και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα D_i (διαφορά της πραγματικής πίεσης ατμών του αέρα με την πίεση ατμών του αέρα στον κορεσμό), παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα (R_n) ή έμμεσα (T_i , D_i) τη διαπνοή των καλλιεργειών (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4. Επίδραση των συστημάτων ελέγχου στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια. D_i = έλλειμμα κορεσμού του αέρα, T_i = θερμοκρασία αέρα, R_n = καθαρή ακτινοβολία, g_a = αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας T_c = θερμοκρασία της καλλιέργειας (Κατσούλας 2002).

2.3.2. Αερισμός

Σε χώρες με θερμό καλοκαίρι ο αποτελεσματικός αερισμός των θερμοκηπίων είναι προϋπόθεση για τον έλεγχο του μικροκλίματος εντός του θερμοκηπίου. Ο ανεπαρκής

αερισμός ή / και ο ανεπαρκής χειρισμός του οδηγούν σε ακατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Συνέπεια αυτών των συνθηκών είναι ότι το κλίμα που επικρατεί τελικά στο θερμοκήπιο απέχει κατά πολύ από το επιθυμητό για την ανάπτυξη των φυτών κατά το μεγαλύτερο μέρος της θερμής περιόδου του έτους.

Η κυριότερη και πιο φθηνή μέθοδος αερισμού που χρησιμοποιείται στα θερμοκήπια, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερθέρμανση τους, είναι ο φυσικός αερισμός ο οποίος προκαλείται από τη διαφορά πίεσης στα ανοίγματα αερισμού. Οι διαφορές αυτές μπορεί να οφείλονται στην αλληλεπίδραση του ανέμου με το θερμοκήπιο (wind effect) ή στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα του θερμοκηπίου η οποία προκαλείται από τη διαφορά θερμοκρασίας (temperature effect).

Εκτός από το φυσικό, ενίοτε χρησιμοποιείται και ο δυναμικός αερισμός ο οποίος γίνεται είτε με ανεμιστήρες που οδηγούν τον αέρα προς το εσωτερικό του θερμοκηπίου και τον αναγκάζουν να βγει από το αντίθετο άκρο (υπερπίεση) είτε με ανεμιστήρες που απορροφούν τον αέρα από το εσωτερικό του θερμοκηπίου (υποπίεση). Το κυριότερο μειονέκτημα του δυναμικού αερισμού, όταν συγκρίνεται με το φυσικό αερισμό, είναι το υψηλό κόστος λειτουργίας και οι διαβαθμίσεις της θερμοκρασίας και υγρασίας κατά μήκος της πορείας του αέρα από την είσοδο προς την έξοδό του από το θερμοκήπιο. Το πλεονέκτημα του δυναμικού αερισμού είναι ότι μπορεί να συνδυαστεί με συστήματα υγρής παρειάς (wet wall ή wet pad).

2.3.3. Υγρή παρειά ή υγρό τοίχωμα

Στις θερμές περιοχές ο δυναμικός αερισμός συνδυάζεται συνήθως με την υγρή παρειά προκειμένου να μειωθεί αποτελεσματικά η θερμοκρασία και να αυξηθεί η υγρασία. Οι ανεμιστήρες τοποθετούνται απέναντι από την πλευρά του θερμοκηπίου με την υγρή παρειά και απορροφούν τον αέρα από το εσωτερικό του θερμοκηπίου, αναγκάζοντας τον εξωτερικό αέρα να εισέλθει στο θερμοκήπιο μέσα από την υγρή παρειά. Η υγρή παρειά λειτουργεί σαν ένας μεγάλος ψύκτης με την αποτελεσματικότητά της να εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ξηρού και του υγρού θερμομέτρου. Έτσι, η αποτελεσματικότητα του συστήματος αυξάνεται σε περιοχές με ξηρό και θερμό κλίμα.

2.3.4. Τεχνητή ομίχλη

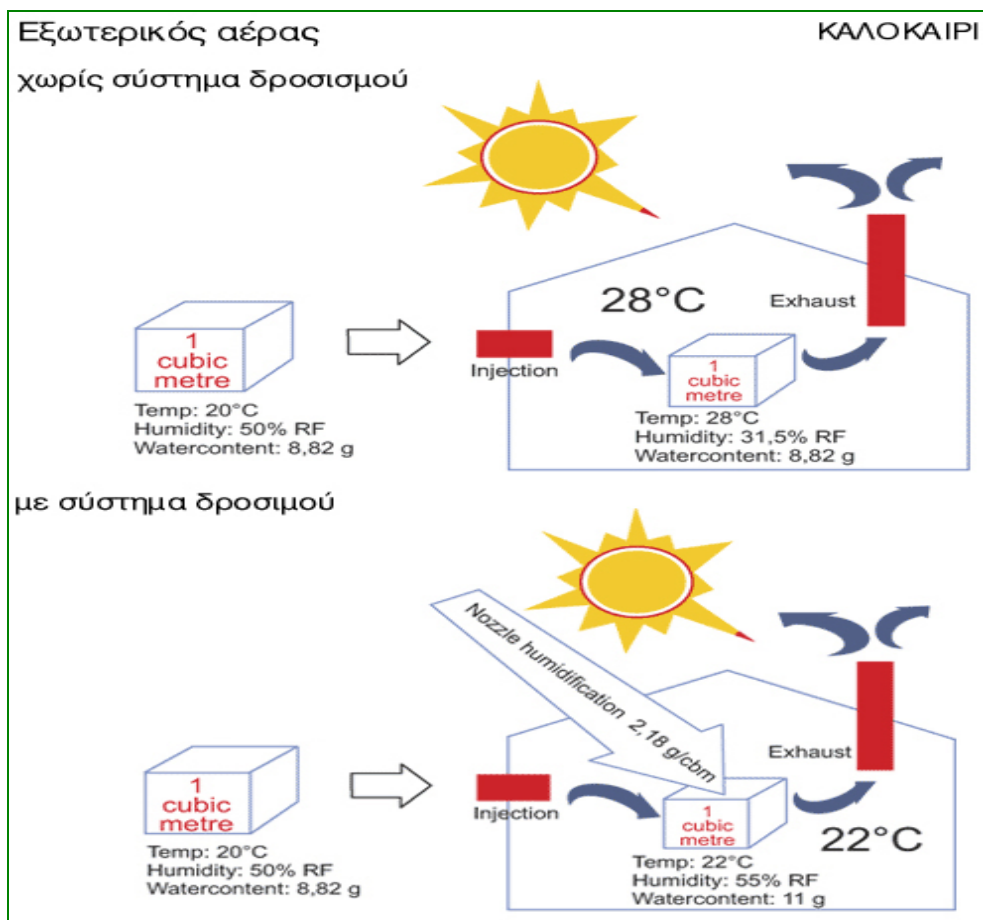
Με τη χρήση του συστήματος τεχνητής ομίχλης επιτυγχάνεται μετατροπή της αισθητής θερμότητας σε λανθάνουσα, με εξάτμιση νερού που ψεκάζεται στον αέρα του θερμοκηπίου. Για την εξάτμιση (μετάβαση από την υγρή στην αέρια κατάσταση) τα μόρια του νερού απαιτούν ενέργεια (0,68 kW ανά λίτρο νερού) η οποία αφαιρείται από

τον αέρα. Έτσι η θερμοκρασία του αέρα ελαττώνεται ενώ παράλληλα η σχετική υγρασία του αέρα αυξάνει (Εικόνα 2.5).

Το σύστημα εφαρμόζεται συνήθως σε θερμοκήπια εξοπλισμένα με σύστημα φυσικού αερισμού. Το νερό ψεκάζεται στον αέρα, επάνω από τα φυτά, με υψηλές πιέσεις και με εκτοξευτήρες συνήθως μικρής παροχής. Ο αριθμός και η πυκνότητα των εκτοξευτήρων, προσδιορίζονται από την πίεση και την παροχή του εκτοξευτήρα και από το μέγεθος του θερμοκηπίου. Τα συστήματα ψύξης με τεχνητή ομίχλη χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στα συστήματα:

- A. υψηλής ($\approx 6 \text{ MPa} \approx 60 \text{ bar}$) και
- B. χαμηλής πίεσης ($\approx 0.5 \text{ MPa} \approx 5 \text{ bar}$).

Τα τελευταία στην πραγματικότητα βρέχουν την καλλιέργεια και η εξάτμιση του νερού λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια των φύλλων, κάνοντας έτσι την τιμή της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής να είναι περίπου ίση με αυτή της μέγιστης εξατμισοδιαπνοής.



Εικόνα 2.5. Αρχή λειτουργίας συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη.

Τα συστήματα δροσισμού υψηλής πίεσης (Εικόνα 2.5) παρέχουν εξαιρετικά λεπτά σταγονίδια νερού (π.χ. διαμέτρου 50 μ) επιτρέποντας έτσι τη δημιουργία ομίχλης η οποία τείνει να παραμένει στον αέρα. Η ψύξη με εξάτμιση λαμβάνει χώρα πάνω από τα φυτά, ενώ ένα μικρό ποσοστό της εξάτμισης γίνεται πάνω στα φύλλα.

Τα κυριότερα μέρη από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα τεχνητής ομίχλης είναι:

- η αντλία παροχής του νερού στο σύστημα,
- ένα δίκτυο σωληνώσεων για τη διανομή του νερού στο θερμοκήπιο,
- τα ακροφύσια τα οποία ανάλογα με την πίεση λειτουργίας του συστήματος παρέχουν το νερό στο θερμοκήπιο υπό μορφή σταγόνων μικρής ή πολύ μικρής διαμέτρου και
- ένα ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου της λειτουργίας του συστήματος με κριτήριο συνήθως τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία στο θερμοκήπιο.

Αξίζει να αναφερθεί στο σημείο αυτό τότε ένα τέτοιο σύστημα χαρακτηρίζεται ως mist και τότε ως fog (παρόλο που στα ελληνικά οι δύο αυτοί όροι αποδίδονται ομίχλη). Η διαφορά βρίσκεται στο μέγεθος της σταγόνας που παράγεται:

- ✚ Οι σταγόνες ενός συστήματος mist έχουν μέγεθος της τάξης των 10 μ m, το οποίο είναι αρκετό ώστε να διατηρούνται ως σταγόνες για λίγα δευτερόλεπτα με αποτέλεσμα να υγραίνουν τις επιφάνειες στις οποίες επικάθονται,
- ✚ Οι σταγόνες ενός συστήματος fog έχουν μικρό μέγεθος, της τάξης των 40+ μ m -που τις κάνει σχεδόν αόρατες (Εικόνα 2.6), με αποτέλεσμα να παραμένουν στον αέρα για αρκετά λεπτά κατά τη διάρκεια των οποίων εξατμίζονται. Έτσι ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα fog δεν υγραίνει το φύλλωμα.



Εικόνα 2.6. Σύστημα τεχνητής ομίχλης.

Στα πλεονεκτήματα του συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη ως προς τα άλλα συστήματα που βασίζονται στην εξάτμιση, περιλαμβάνονται:

- ✚ Η εξάτμιση του νερού -αντίθετα από τα συστήματα υγρής παρειάς- πραγματοποιείται σε όλο τον όγκο του αέρα του θερμοκηπίου και έτσι επιτρέπουν τη δημιουργία περισσότερο ομοιογενών συνθηκών και
- ✚ Δεν απαιτούν δυναμικό αερισμό όπως τα συστήματα υγρής παρειάς.

Στα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνεται:

- ✚ Έχουν υψηλό κόστος εγκατάστασης,
- ✚ Απαιτούν καλής ποιότητας νερό, νερό που περιέχει άλατα προκαλεί βλάβες στον εξοπλισμό του θερμοκηπίου και στα φύλλα των φυτών,
- ✚ Όταν χρησιμοποιούνται συσκευές χαμηλής πίεσης, μέρος της εξάτμισης γίνεται στα φύλλα και στο έδαφος κάτι που οδηγεί σε προβλήματα λόγω των υγραποιήσεων και
- ✚ Εάν δεν συνδυάζονται με σωστή διαχείριση του συστήματος φυσικού αερισμού δεν είναι αποτελεσματικά.

Η αποτελεσματικότητα E_{ff} (%) του συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη δίνεται από τη σχέση:

$$Eff = \frac{T_o - T_i}{T_o - T_{o,w}} \times 100\% \quad (2.20)$$

όπου:

T_o : Η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα (°C),

T_i : Η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου (°C) και

$T_{o,w}$: Η θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου έξω από το θερμοκήπιο (°C).

Η απόδοση του συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη παίρνει συνήθως τιμές από 40% έως 70%. Η επίδραση του συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη στο θερμοκήπιο είναι άμεση, όσον αφορά το μικροκλίμα του θερμοκηπίου (θερμοκρασία και έλλειμμα κορεσμού του αέρα) και έμμεση στην καλλιέργεια (θερμοκρασία, στοματική και αεροδυναμική αγωγιμότητα, διαπνοή κλπ).

2.3.5. Σκίαση

Η σκίαση αναφέρεται συνήθως ως η έσχατη λύση για τον έλεγχο του κλίματος του θερμοκηπίου, λόγω της επίδρασής της στην παραγωγή εξαιτίας της μείωσης της διαπερατότητας του θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία. Η σκίαση των θερμοκηπίων μπορεί να γίνει είτε με άσπρισμα του καλύμματός τους, είτε με κουρτίνες σκίασης τοποθετημένες στο εσωτερικό ή εξωτερικά του θερμοκηπίου. Το μειονέκτημα των κουρτινών σκίασης είναι ότι όταν τοποθετούνται εσωτερικά μειώνουν τον αερισμό και

για αυτό συνιστάται οι κουρτίνες σκίασης να τοποθετούνται εξωτερικά ή η σκίαση να γίνεται με άσπρισμα της οροφής του θερμοκηπίου.

2.3.5.1. Ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ακτινοβολία παρέχει στα φυτά την απαραίτητη ενέργεια για την διαδικασία της φωτοσύνθεσης και είναι αυτή η οποία θερμαίνει τα φυτά, εξατμίζει το νερό μεταξύ της βλάστησης και επιπλέον θερμαίνει τον αέρα του περιβάλλοντος στ' οποίο αναπτύσσονται. Αυτή η διαδικασία καθορίζει το μικροκλίμα στο χώρο μεταξύ των φυτών της καλλιέργειας.

Ανάλογα με το εύρος φάσματος η ακτινοβολία χωρίζεται σε:

- **Ολική Ακτινοβολία ($200 - 10^5 \text{ nm}$)**
- **Μικρού Μήκους Κύματος Ακτινοβολία ($200 - 3000 \text{ nm}$)**

Το 98% περίπου της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρού μήκους κύματος. Η προσπίπτουσα στη επιφάνεια της γης ηλιακή ακτινοβολία μεταβάλλεται ανάλογα με την περιοχή, εποχή του έτους, την ώρα της ημέρας και το ανάγλυφο της περιοχής. Η ακτινοβολία αυτή χωρίζεται σε:

✓ Άμεση: Μεταδίδεται σε ευθεία γραμμή με κατεύθυνση από τον ήλιο προς την γη και σε ακτίνες παράλληλες. Αποτελεί το 62% περίπου της συνολικής ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας.

✓ Διαχεόμενη (διάχυτη ή έμμεση): Περιλαμβάνει την ανακλώμενη ακτινοβολία από τα σύννεφα, τα αιωρούμενα σωματίδια του αέρα, τα μόρια της ατμόσφαιρας και άλλες επιφάνειες. Φτάνει στην επιφάνεια της γης από διάφορες κατευθύνσεις. Αποτελεί το 38% περίπου της συνολικής ημερήσιας ηλιακής ακτινοβολίας.

Μετρήσεις μικρού μήκους ακτινοβολίας γίνονται με πυρανόμετρα-ηλιόμετρα. Η μονάδα μέτρησης είναι W m^{-2} . Μετρώντας την ενέργεια ανά δευτερόλεπτο και αθροίζοντάς την βρίσκουμε την ακτινοβολούμενη ενέργεια για μια περίοδο χρόνου π.χ. μια ημέρα, σε Joule m^{-2} . Ανάλογα με το μήκος κύματος η μικρού μήκους ακτινοβολία διακρίνεται στα εξής μέρη

i. Υπεριώδης ακτινοβολία ($190 - 380 \text{ nm}$) (9% της ολικής)

ii. iΟρατό φως ($400 - 700 \text{ nm}$) (41% της ολικής)

Είναι η περιοχή της ακτινοβολίας που γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Διάφορα μήκη κύματος αυτής της ακτινοβολίας αντιστοιχούν στο μπλε, στο πράσινο, στο κίτρινο και στο κόκκινο (Πίνακας 2.1.).

Πίνακας 2.1. Μήκος κύματος και χρώμα της ίριδας.

Χρώμα Φωτός	Μήκος κύματος (nm)
Ιώδες	400 - 450
Μπλε	450 - 500
Πράσινο	500 - 550
Κίτρινο	550 - 600
Πορτοκαλί	600 - 650
Κόκκινο	650 - 650

iii. Κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία (700 – 3000 nm) (50% της ολικής)

Αυτό το τμήμα του ηλιακού φάσματος συμμετέχει σημαντικά στη θέρμανση των φυτών. Επίσης είναι πολύ σημαντικό για την επιμήκυνση των βλαστών και για τη μορφογένεση. Η απορροφούμενη χρωστική στην περιοχή του κόκκινου είναι το φυτόχρωμα και το κρυπτόχρωμα. Το τελευταίο επηρεάζεται και από την ακτινοβολία στην περιοχή του μπλε. Από εδώ και στο εξής σε οποιαδήποτε αναφορά στη Κοντινή Υπέρυθρη Ακτινοβολία θα χρησιμοποιείται, χάριν συντομίας, η διεθνής συντομογραφία *NIR* (Near Infrared Radiation).

- **Μεγάλου Μήκους Κύματος Ακτινοβολία – Μακρινή Υπέρυθρη Ακτινοβολία (3000 - 10⁵ nm)**

Μόνο 2% της ηλιακής ακτινοβολίας είναι στο μήκος κύματος της περιοχής αυτής. Όμως, κάθε επιφάνεια πάνω στη γη που έχει τη συνήθη θερμοκρασία εκπέμπει μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία. Για το λόγο αυτό είναι η επικρατούσα ακτινοβολία κατά τη διάρκεια της νύκτας.

2.3.5.2. Χρήση Διχτύων Σκίασης

Τα πολύ υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να είναι περιοριστικά της φωτοσύνθεσης άρα και της αύξησης και ανάπτυξης των φυτών και κατ' επέκταση και της παραγωγής αλλά και της ποιότητας αυτής. Έτσι, η κάλυψη της καλλιέργειας είτε υπαίθριας είτε θερμοκηπίου με ειδικά δίχτυα σκίασης χρησιμοποιείται για την ελάττωση του φορτίου της υπερβολικής

ακτινοβολίας που προσπίπτει σ' αυτήν. Η μείωση αυτή της διερχόμενης διαμέσου των διχτύων ακτινοβολίας οδηγεί σε αναλογική μείωση της *PAR* ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό *μπορεί*, να έχει αρνητική επίδραση στην φωτοσύνθεση των φυτών εάν είναι πολύ μεγάλη η μείωση της ακτινοβολίας. Υπολογίστηκε ότι σε μία ηλιόλουστη καλοκαιρινή ημέρα, όπου η μέγιστη τιμή της ενέργειας της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας φτάνει τα 900 W m^{-2} το μεσημέρι, «κόβοντας» τα 200 W m^{-2} επέρχεται μείωση της *PAR* κατά 9% και της υπολογισμένης ημερήσιας φωτοσύνθεσης του φυτού κατά 3,5%. Ωστόσο, άλλοι παράγοντες όπως η προσαρμοστικότητα των φυτών και η αυξημένη υγρασία κάτω από την κάλυψη, μπορούν να επιδράσουν θετικά στη επίδοση του φυτού και να κυριαρχήσουν επί της όποιας αρνητικής επίδρασης στη φωτοσύνθεση (Bakker et al., 1995).

Ο ήλιος είναι η κύρια πηγή θερμικής ενέργειας για τις καλλιέργειες. Όμως, κατά τους καλοκαιρινούς μήνες μπορεί ν' ανέλθει σε επιζήμια για τις καλλιέργειες επίπεδα, ιδιαίτερα στο εσωτερικό των θερμοκηπίων. Χρησιμοποιώντας τα δίχτυα σκίασης μπορεί να επιτευχθεί και μείωση της υπερβολικής θερμοκρασίας της καλλιέργειας, η οποία ευνοεί τη φωτοσυνθετική λειτουργία. Η μειωμένη θερμοκρασία φύλλων της καλλιέργειας φέρνει το *ρυθμό καθαρής αφομοίωσης (NAR)* των φύλλων πιο κοντά στο άριστο εύρος θερμοκρασιών και μειώνει το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών *καλλιέργειας-αέρα* οδηγώντας σε αύξηση της στοματικής αγωγιμότητας των φύλλων τουλάχιστον κατά τις μεσημβρινές ώρες (Raveh et al., 2003).

2.3.5.3. Τεχνολογία Διχτύων Σκίασης

Η τεχνολογία προσφέρει μεγάλη ποικιλία διχτύων σκίασης με διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά και οπτικές ιδιότητες. Εκτός βέβαια από την προστασία των φυτών του θερμοκηπίου ή και των υπαίθριων καλλιεργειών από την υπερβολικά υψηλής έντασης ακτινοβολία, με την χρήση ειδικών διχτύων είναι δυνατόν να ελεγχθούν φυσιολογικές δραστηριότητες, όπως η «*κυριαρχία κορυφής*», η επιμήκυνση και η φωτομορφογένεση.

Τα δίχτυα σκίασης μπορεί να κατασκευαστούν από μονόκλωνα-μονόινα νήματα πολυαιθυλενίου (PE) ή πολυπροπυλενίου (PP). Τα νήματα είναι διαφόρων χρωμάτων όπως μαύρο, πράσινο, λευκό, κόκκινο, μπλε και κίτρινο

(Εικόνα 2.7). Αυτά πλέκονται μεταξύ τους, αφήνοντας ποικίλο αριθμό οπών ανά m^2 . Τα δίχτυα μπορεί να είναι μονόχρωμα ή δίχρωμα, ανάλογα με τα νήματα που χρησιμοποιούνται. Ο πιο συνήθης συνδυασμός νημάτων είναι πράσινου και μαύρου χρώματος. Το ποσοστό που μπλοκάρουν τον ήλιο και η επίδρασή τους στο φάσμα του φωτός που επιτρέπουν να περάσει μέσω αυτών εξαρτάται από την πυκνότητα των οπών και το χρώμα των νημάτων.



Εικόνα 2.7. Δείγματα δικτύων σκίασης διαφόρων χρωμάτων

Τα δίχτυα πολυπροπυλενίου (PP) είναι πιο ανθεκτικά σε μηχανικές και χημικές καταπονήσεις και πιο σταθερά όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους (μέγεθος οπών). Είναι όμως πιο δύσκολα στην εγκατάστασή τους εξαιτίας της μικρότερης ευλυγισίας τους. Αντίθετα τα δίχτυα πολυαιθυλενίου (PE) παρουσιάζουν ευκολία στον χειρισμό κατά την ανάρτησή τους και ως εκ τούτου προτιμώνται ως δίχτυα σκίασης θερμοκηπίων. Η επίκτητη αντοχή τους στη UV ακτινοβολία τα κάνει ανθεκτικά κατά την έκθεσή τους στην ηλιακή ακτινοβολία. Είναι πιο οικονομικά από τα δίχτυα πολυπροπυλενίου, αλλά λιγότερο ανθεκτικά. Τα δίχτυα είναι ανακυκλώσιμα.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δικτύων είναι:

- ✓ % ποσοστό σκίασης (ονομαστικό %).
- ✓ Υλικό κατασκευής.
- ✓ Χρώμα.
- ✓ Βάρος ($g\ m^{-2}$).
- ✓ Διαστάσεις οπών (mm x mm).
- ✓ Αντοχή στην UV ακτινοβολία (έτη).
- ✓ Διαστάσεις εμπορικής διάθεσης (Μήκος x Πλάτος) (m x m).

Οπτικές ιδιότητες των δικτύων:

- ✓ Περαιτότητα (%).

- ✓ Απορροφητικότητα (%).
- ✓ Ανακλαστικότητα (%).

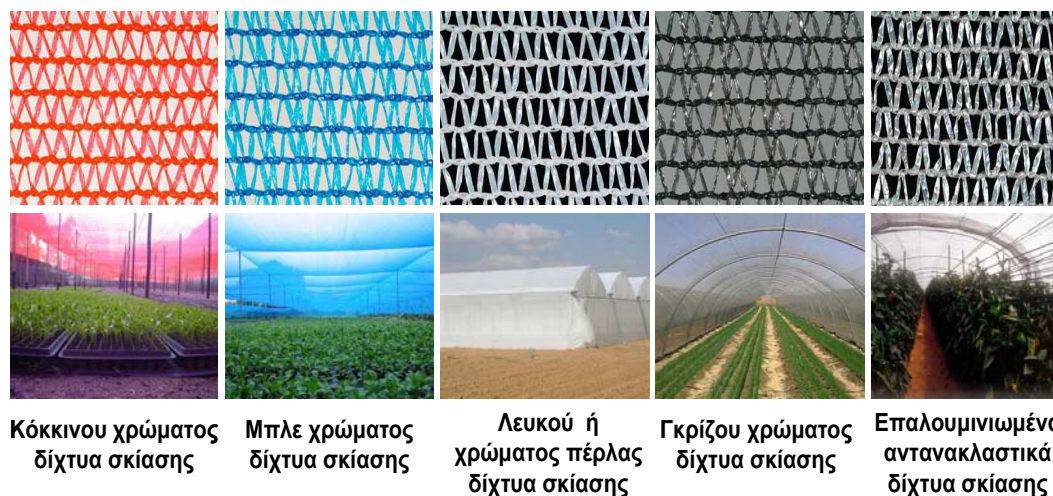
Οι οπτικές τους ιδιότητες μετριοούνται με την χρήση φασματοφωτομέτρου ή φασματοραδιομέτρου (Kittas et al., 1999).

Οι οπτικές αυτές ιδιότητες των φύλλων οδήγησαν στην κατασκευή διχτύων διαφόρων χρωμάτων. Η χλωροφύλλη απορροφάει την ηλιακή ακτινοβολία στην περιοχή του μπλε, του πορτοκαλί και του κόκκινου. Η ακτινοβολία στην περιοχή του πράσινου και του κίτρινου ακτινοβολείται ή ανακλάται από την επιφάνεια των φύλλων. Χρησιμοποιώντας άσπρα, κόκκινα, μπλε, πράσινα ή μαύρα δίχτυα μπορεί να επηρεαστεί ή όχι το φυτόχρωμα και το κρυπτόχρωμα των φυτών με άμεσες συνέπειες στην ανάπτυξή τους. Στα θερμοκήπια χρησιμοποιούνται κυρίως τα δίχτυα χρώματος μαύρου, πράσινου ή άσπρου. Είναι, όμως, δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και άλλα χρωματιστά δίχτυα για ειδικές εφαρμογές σε καλλιέργειες θερμοκηπίου ή ως υλικά κάλυψης στην περίπτωση των διχτυοκηπίων. Για το λόγο αυτό θεωρούμε χρήσιμο να αναφέρουμε την εξειδικευμένη δράση των χρωματιστών διχτύων κυρίως στην φωτοσύνθεση και την αρχιτεκτονική των φυτών (φωτομορφογένεση).

Τα χρωματιστά δίχτυα μπορούν να τροποποιήσουν το λόγο του ερυθρού (600-700nm) προς το μακρινό ερυθρό (700-800nm) (*R:FR*). Αύξηση του λόγου αυτού προάγει την έκπτυξη πλαγίων βλαστών, ενώ μειώνει το ρυθμό επιμήκυνσης αυτών. Μείωση του λόγου μειώνει τη φυλλική επιφάνεια και την τάση δημιουργίας πλάγιας βλάστησης, ενώ αυξάνει την «*κυριαρχία κορυφής*» και το ρυθμό επιμήκυνσης των βλαστών (Smith, 1982). Επίσης, μπορούν να τροποποιήσουν το λόγο της μπλε (350-500nm) : ερυθρή (600-700nm) (*B:R*) και της μπλε (350-500nm) : μακρινή ερυθρή (700-800nm) ακτινοβολία (*B:FR*), επηρεάζοντας έτσι τη *μορφογενετικά ενεργή ακτινοβολία (MAR)*.

Τα κόκκινα δίχτυα (Εικόνα 2.8) αλλάζουν το φάσμα του φωτός που μεταδίδεται στα υπό κάλυψη φυτά ελαττώνοντας την ακτινοβολία στο φάσμα του μπλε, του κίτρινου και του πράσινου και αυξάνοντάς την στο φάσμα του ερυθρού και του υπέρυθρου. Επειδή κάτω από συνθήκες κόκκινου φωτός επιταχύνεται η αύξηση και η ανάπτυξη των φυτών, η φυλλική επιφάνεια αυτών αυξάνεται, οι βλαστοί τους είναι μεγαλύτερου μήκους και διαμέτρου και ο όγκος του

φυλλώματος είναι μεγαλύτερος σε σχέση με φυτά που αναπτύσσονται κάτω από λευκό φως.



Εικόνα 2.8.. Δείγματα δικτυών σκίασης διαφόρων τύπων (επάνω σειρά φωτογραφιών) και εφαρμογές χρήσης αυτών (κάτω σειρά φωτογραφιών)

Τα μπλε χρώματος δίχτυα αλλάζουν το φάσμα του φωτός που μεταδίδεται στα υπό κάλυψη φυτά, αυξάνοντας την ακτινοβολία στο φάσμα του μπλε και ελαττώνοντάς την στο φάσμα του ερυθρού και του υπέρυθρου. Επειδή κάτω από συνθήκες μπλε φωτός επιβραδύνεται η αύξηση και η ανάπτυξη των φυτών, αυτά αποκτούν πιο συμπαγή ανάπτυξη και το φύλλωμά τους είναι σκούρου πράσινου χρώματος. Σε φυτά που παράγουν άνθη, το μπλε φως καθυστερεί την άνθηση, με αποτέλεσμα ο καλλιεργητής να προγραμματίζει το χρόνο άνθησης ανάλογα με τις εποχιακές απαιτήσεις της αγοράς. Είναι πολύ χρήσιμα για καλλιεργητές γλαστρικών φυτών, οι οποίοι επιθυμούν να μειώσουν τον όγκο του μεταφερόμενου προϊόντος (Εικόνα 2.8).

Τα δίχτυα χρώματος πέρλας έχουν τη ιδιότητα να διαχέουν την άμεση ακτινοβολία, προσφέροντας πάνω από 80% διάχυτη ακτινοβολία στην υποκείμενη καλλιέργεια (Εικόνα 4). Έτσι προσφέρεται περισσότερη ενέργεια για την φωτοσύνθεση σε φυτικά μέρη που δεν φωτίζονταν από την άμεση ακτινοβολία, όπως τα χαμηλότερα φύλλα της φυλλικής επιφάνειας. Ως εκ τούτου αυξάνεται η αποτελεσματικότητα της φωτοσύνθεσης, οδηγώντας σε μεγαλύτερη αύξηση και ανάπτυξη και ως εκ τούτου σε βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος. Η διάχυτη ακτινοβολία προάγει την ανάπτυξη δευτερευόντων βλαστών σε πολλά φυτικά είδη και είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη για φυλλώδη προϊόντα. Τα γκρίζα δίχτυα χρησιμοποιούνται κυρίως σε υπαίθριες καλλιέργειες οπωροκηπευτικών, αλλά και για στη σκίαση θερμοκηπίων

(Εικόνα 2.8). Εκτός από τα «απλά» δίχτυα πολυαιθυλενίου και πολυπροπυλενίου, η τεχνολογία έχει προχωρήσει στην κατασκευή επαλουμινιωμένων διχτύων PE. Τα δίχτυα αυτά διαχέουν μεγάλο ποσοστό (70%) της άμεσης ακτινοβολίας αυξάνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της φωτοσύνθεσης. Τα δίχτυα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και εξωτερικά για την κάλυψη θερμοκηπίων αλλά και διχτυοκηπίων (Εικόνα 2.8). Επειδή αντανακλούν την ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνειά τους, μπορούν και να χρησιμοποιηθούν και για εξοικονόμηση ενέργειας σε θερμοκήπια και διχτυοκήπια. Για τον ίδιο λόγο χρησιμοποιούνται και για αντιπαγετική προστασία θερινών λαχανικών κατά τη διάρκεια του χειμώνα σε θερμότερα κλίματα απ' αυτό της Ελλάδας (Teitel et al., 1996). Είναι και αυτά ανακυκλώσιμα και ανθεκτικά στην UV ακτινοβολία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

3.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Η υψηλή θερμοκρασία και το μεγάλο έλλειμμα κορεσμού χαρακτηρίζουν το θερμοκηπιακό μικροκλίμα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού σε αρκετές περιοχές ιδιαίτερα της Μεσογειακής λεκάνης αν δε ληφθούν μέτρα ελέγχου των συνθηκών αυτών. Ως αποτέλεσμα, κάτω από τέτοιες συνθήκες η παραγωγή και η ποιότητα των θερμοκηπιακών προϊόντων υποβαθμίζονται.

Η επίδραση των δυσμενών κλιματικών συνθηκών κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού στις ανταλλαγές αερίων του φύλλου σχετίζεται με την απόκριση των φυσιολογικών ροών της καλλιέργειας (διαπνοή ή καθαρή αφομοίωση CO_2) και της στοματικής αγωγιμότητας στα περιβαλλοντικά ερεθίσματα. Η απόκριση αυτή μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το φυτικό είδος, την ποικιλία και το στάδιο ανάπτυξης των φυτών. Στα μεσογειακά κλίματα, η ηλιακή ακτινοβολία μέσα στο θερμοκήπιο ($20\text{-}22 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) είναι συνήθως γύρω στο μεσημέρι αρκετά υψηλή για να προκαλέσει πυκνότητα φωτοσυνθετικής ροής φωτονίων (PPDF) της τάξης των $1350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, που μπορεί να προκαλέσει σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές της θερμοκρασίας μια προσωρινή μείωση της φωτοσύνθεσης (Medina *et al.* 2002). Από την άλλη πλευρά, στο εσωτερικό του θερμοκηπίου λόγω του χαμηλού ρυθμού αερισμού συνεπεία της απουσίας ταχύτητας αέρα, εγκαθίσταται συχνά ένα ημι-περιορισμένο περιβάλλον, που οδηγεί σε χαμηλές τιμές της αεροδυναμικής αγωγιμότητας στο οριακό στρώμα του φύλλου, η οποία παίζει βασικό ρόλο στον έλεγχο των φυσιολογικών ροών απομονώνοντας, έτσι, περισσότερο ή λιγότερο τα φυτά από το εξωτερικό περιβάλλον (Aubinet *et al.* 1989; Collatz *et al.* 1991). Δίχτυα σκίασης τοποθετημένα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου συμβάλλουν επίσης στη μείωση της ταχύτητας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, μειώνοντας έτσι το πάχος του οριακού στρώματος του φύλλου και περιορίζοντας τη διαθεσιμότητα της συγκέντρωσης CO_2 στον αέρα κοντά στη φυλλική επιφάνεια. Δεν είναι ξεκάθαρο αν τα δίχτυα σκίασης πρέπει να χρησιμοποιούνται καθόλη τη διάρκεια του καλλιεργητικού κύκλου ή μόνο κατά τη διάρκεια των πιο ευαίσθητων σταδίων όταν οι καλλιέργειες έχουν μικρή φυλλική επιφάνεια και

ο ρυθμός διαπνοής τους δεν μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην ψύξη του θερμοκηπίου.

Η απόκριση των φυτών στην ένταση και στην ποιότητα του φωτός είναι σημαντική στην παραγωγή του θερμοκηπίου που χρησιμοποιεί δίχτυα σκίασης ή άσπρισμα της στέγης για μείωση του φορτίου ακτινοβολίας στο εσωτερικό του. Μεγάλη μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας αναμένεται να μειώσει το ρυθμό διαπνοής των φύλλων αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία της καλλιέργειας (Jackson *et al.* 1981). Η χρήση διχτύων ως γεωργική πρακτική έχει γίνει αποδεκτή προοδευτικά από τους παραγωγούς και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον κατά τη τελευταία δεκαετία, όπως φαίνεται από την συνεχώς αυξανόμενη έκταση υπαίθριων καλλιεργειών που καλλιεργούνται σε διχτυοκήπια (Raveh *et al.* 2003; Cohen *et al.* 2005), ενώ το άσπρισμα της οροφής αποτελεί συνήθη πρακτική στη Μεσογειακή λεκάνη, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους.

Παρά την ευρεία εφαρμογή της μεθόδου του ασπρίσματος της οροφής για την ανακούφιση του θερμοκηπίου από τα μεγάλα φορτία ακτινοβολίας, η βιβλιογραφία που σχετίζεται με την επίδραση της εφαρμογής της τεχνικής αυτής στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια είναι ελάχιστη.

Οι περισσότερες εργασίες που αφορούν την επίδραση της σκίασης στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου σχετίζονται με τη χρήση εξωτερικών ή εσωτερικών σκιάστρων στο θερμοκήπιο και ασχολούνται κυρίως με τις τροποποιήσεις που προκαλούνται στη θερμοκρασία του αέρα και την ακτινοβολία που εισέρχεται στο θερμοκήπιο (Nisen and Coutisse 1981, Smith *et al.* 1984, Willits *et al.* 1989, Boulard *et al.* 1991, Ne Smith *et al.* 1992, Francescangeli *et al.* 1994, Miguel *et al.* 1994, Montero and Antón 1994). Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα μετρήσεων της θερμοκρασίας σε θερμοκήπια με εξωτερικές ή εσωτερικές κουρτίνες σκίασης (Montero and Antón 1994).

Όσον αφορά την τεχνική σκίασης με άσπρισμα της οροφής, οι Baille *et al.* (1980) και στη συνέχεια οι Abreu and Meneses (2000) και οι Baille *et al.* (2001), ανέφεραν ότι το άσπρισμα της οροφής του θερμοκηπίου, κατά την καλοκαιρινή περίοδο, προκάλεσε μείωση της διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία κατά 40%-50% και επέτρεψε στη θερμοκρασία του αέρα του

θερμοκηπίου να διατηρηθεί κοντά στο επίπεδο της εξωτερικής θερμοκρασίας. Παράλληλα, οι Baille *et al.* (2001) τονίζουν τη σημαντική μείωση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου μετά την εφαρμογή της σκίασης στο θερμοκήπιο. Σε άλλη έρευνα, οι Kittas *et al.* (1999) παρατήρησαν ότι, όταν εφαρμόστηκε άσπρισμα της οροφής σε γυάλινο θερμοκήπιο, αυξήθηκε ελαφρά το ποσοστό της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας και μειώθηκε το ποσοστό της υπέρυθρης ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχονταν στο θερμοκήπιο, αναφέροντας ότι το χαρακτηριστικό αυτό του ασπρίσματος μπορεί να αποτελέσει ένα πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής έναντι των άλλων τεχνικών σκίασης, ειδικά στις θερμές χώρες με υψηλά φορτία ακτινοβολίας κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Το άσπρισμα της οροφής μετατρέπει ένα μεγάλο τμήμα της εισερχόμενης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε διάχυτη (Baille *et al.* 2001). Η αύξηση του λόγου της διάχυτης προς την άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου αναφέρεται πως αυξάνει την ακτινοβολία που απορροφάται από την καλλιέργεια (Hand *et al.* 1993), τη στοματική αγωγιμότητα και την καθαρή αφομοίωση CO₂ (Lloyd *et al.* 1995), ενισχύοντας έτσι την άποψη πως η παραγωγικότητα της καλλιέργειας αυξάνεται σε συνθήκες σκίασης (Healey *et al.*, 1998). Το στοιχείο αυτό που χαρακτηρίζει την τεχνική σκίασης με άσπρισμα της οροφής μπορεί να θεωρηθεί πως αποτελεί πλεονέκτημα έναντι των διχτύων ιδιαίτερα σε θερμές περιοχές με υψηλά φορτία ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του ασπρίσματος είναι ότι δεν επηρεάζει τον αερισμό, ενώ η σκίαση με δίχτυα εσωτερικά επηρεάζει αρνητικά την αποτελεσματικότητα του αερισμού με ανοίγματα οροφής. Παρόλα αυτά, ο Fernandez-Rodriguez *et al.* (2000) αναφέρουν πως η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία ήταν πιο ομοιόμορφα κατανεμημένη στο θερμοκήπιο, όταν αυτό ήταν σκιασμένο με δίχτυ σκίασης παρά όταν ήταν ασπρισμένο.

Πίνακας 3.1. Μέσες μέγιστες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα σε θερμοκήπιο (α) χωρίς σκίαση, (β) με δίχτυα σκίασης τοποθετημένα εξωτερικά και (γ) με δίχτυα σκίασης τοποθετημένα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Θερμοκρασία εξωτερικού αέρα =33°C.

Θερμοκήπιο	Θερμοκρασία αέρα
χωρίς σκίαση	46.6°C
με εξωτερική μαύρη κουρτίνα με 45% διαπερατότητα	40.8°C
με εσωτερική μαύρη κουρτίνα με 45% διαπερατότητα	50.5°C

(Στοιχεία από Montero and Antón 1994).

Οι Baille *et al.* 2001 έδειξαν πως η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό θερμοκηπίου εξοπλισμένου με σύστημα σκίασης δε συνοδεύεται πάντα με αντίστοιχη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα σε συνθήκες χαμηλών ρυθμών αερισμού.

Όπως στην περίπτωση της μελέτης της επίδρασης της σκίασης στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, έτσι και στην περίπτωση της μελέτης της επίδρασης της σκίασης στην καλλιέργεια και ιδιαίτερα στις φυσιολογικές ροές της (διαπνοή, φωτοσύνθεση), οι περισσότερες εργασίες αφορούν τη μελέτη των δικτύων σκίασης και ελάχιστα είναι γνωστά για την επίδραση του ασπρίσματος. Γενικά, οι περισσότεροι ερευνητές (Smith *et al.* 1984, Cockshull *et al.* 1992, el Gizawy *et al.* 1993) αναφέρουν ότι η σκίαση κατά τη διάρκεια των περιόδων με υψηλά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας προκαλεί αύξηση και βελτίωση της παραγωγής και αύξηση της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας.

Η σκίαση επιδρά άμεσα στη θερμοκρασία και τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση της διαθέσιμης ενέργειας στο θερμοκήπιο και την καλλιέργεια. Ο Κατσούλας (2002) αναφέρει ότι η μείωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο προκάλεσε μείωση του ελλείμματος κορεσμού καλλιέργειας-αέρα. Παράλληλα σημειώνει ότι κατά την περίοδο χωρίς σκίαση, το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα κυμαινόταν

σε υψηλά επίπεδα ενώ η σκίαση του θερμοκηπίου οδήγησε την καλλιέργεια εκτός συνθηκών υδατικής και θερμικής καταπόνησης. Ο Κατσούλας (2002) αναφέρει, επίσης, ότι η σκίαση του θερμοκηπίου οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας της καλλιέργειας και σε σημαντική αύξηση της στοματικής αγωγιμότητας και του ρυθμού διαπνοής της καλλιέργειας, αποδεικνύοντας, έτσι, την ευνοϊκή επίδραση της σκίασης του θερμοκηπίου τόσο στο μικροκλίμα όσο και στη συμπεριφορά της καλλιέργειας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού σε περιοχή με θερμό κλίμα (Ελλάδα).

Παρόλα αυτά, άλλοι ερευνητές (Boulard *et al.* 1991, Abreu and Meneses, 2000, Dayan *et al.* 2000, Fernandez-Rodriguez *et al.* 2000) αναφέρουν ότι η σκίαση του θερμοκηπίου προκαλεί μείωση της θερμοκρασίας και της διαπνοής της καλλιέργειας.

Το αν, πάντως, και κατά πόσον η προσαρμογή των φυτών στις επικρατούσες συνθήκες φωτός θα βοηθήσει την καλλιέργεια να εξισορροπήσει τη μείωση των φυσιολογικών ροών που αναμένεται σε συνθήκες σκίασης (Raveh *et al.* 2003) θα εξαρτηθεί από την εξειδικευμένη συμπεριφορά των διάφορων φυτικών ειδών που καλλιεργούνται υπό κάλυψη (Stanhill and Cohen 2001; Barradas *et al.* 2005).

Το μεγάλο εύρος της συμπεριφοράς των διάφορων καλλιεργειών στην τεχνητή σκίαση, που αναφέρεται στη βιβλιογραφία μπορεί να αποδοθεί σε:

1. Διαφορές στις φυσικές ιδιότητες των διχτύων και στο διαφορετικό ποσοστό σκίασης.
2. Στη συμπεριφορά των φυτικών ειδών που μπορεί να διαφέρουν στην ικανότητα να συσσωρεύουν ξηρά ουσία και να την κατανέμουν στα όργανα του φυτού.
3. Διαφορές στο στάδιο ανάπτυξης του φυτού (Cohen *et al.* 2005) και
4. Στην πυκνότητα φύτευσης της καλλιέργειας (Papadopoulos and Pararajasingham 1997).

3.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΕΣ ΜΑΖΑΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Η διερεύνηση της επίδρασης της αλατότητας στις ανταλλαγές μάζας στο θερμοκήπιο παρουσιάζει ενδιαφέρον αφού η άρδευση των καλλιεργειών σε

θερμοκήπια με νερά που έχουν αυξημένη αλατότητα γίνεται όλο και πιο συχνή. Σε αυτό συμβάλλουν είτε η μείωση διαθεσιμότητας νερού καλής ποιότητας τόσο στη Βόρεια Ευρώπη (Sonneveld, 2000), όσο και στη Μεσογειακή λεκάνη (Lykoskoufis *et al.* 2005) καθώς και η χρησιμοποίηση νερών αυξημένης αλατότητας για παραγωγή υψηλής ποιότητας λαχανικών (Schwartz *et al.* 2002) . Η αναμενόμενη επιδείνωση της ποιότητας του αρδευτικού νερού λόγω της κλιματικής αλλαγής σε συνδυασμό με την επίσης αναμενόμενη επέκταση των καλλιεργειών υπό κάλυψη καθιστούν αναγκαία τη μελέτη της επίδρασης των νερών με αλατότητα στη καλλιέργεια κηπευτικών υπό κάλυψη.

Υπάρχουν αρκετές μελέτες για την επίδραση της αλατότητας στην αύξηση, ανάπτυξη και παραγωγή διάφορων καλλιεργειών υπό κάλυψη αλλά πολύ λίγες πληροφορίες υπάρχουν για την επίδραση της αλατότητας στις ανταλλαγές μάζας.

Η αυξημένη αλατότητα οδηγεί σε μείωση της ανάπτυξης και παραγωγής σε καλλιέργειες θερμοκηπίου (Flowers, 2000; Sonneveld, 2000), κυρίως λόγω κλεισίματος των στοματίων κάτι που έχει ως συνέπεια τη μείωση της διαπνοής και φωτοσύνθεσης (Yeo *et al.* 1985; Pasternak 1987). Πολλά είδη φυτών αντιδρούν στα αυξημένα επίπεδα αλατότητας στο νερό άρδευσης με μείωση της παραγωγής ανεξάρτητα από την αιτία προέλευσης της αλατότητας (Adams, 1991; Savvas and Lorenz, 2000). Αυτό οφείλεται στη μείωση του διαθέσιμου νερού λόγω μειωμένου οσμωτικού δυναμικού στο περιβάλλον της ρίζας (Pastrenak 1987; Sonneveld, 2000).

Ορισμένοι συγγραφείς αναφέρουν πως η αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), που αποτελεί δείκτη της αλατότητας του αρδευτικού νερού, μπορεί να μειώσει τη φωτοσύνθεση και έτσι την ανάπτυξη της καλλιέργειας (Schwartz, 2002), αλλά τα αποτελέσματα μετρήσεων φωτοσύνθεσης που αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι αντιφατικά. Πολλές εργασίες που έγιναν για τη συμπεριφορά της πιπεριάς, που θεωρείται γενικά φυτό ευαίσθητο στην αλατότητα σύμφωνα με τους Maas and Hoffman (1977) και τους Navvaro *et al.* (2002), σε αυξημένη αλατότητα του νερού άρδευσης έδειξαν πως η καθαρή φωτοσύνθεση μειώνεται σε συνθήκες αυξημένης αλατότητας (Chartzoulakis

and Klapaki, 2000; Navarro *et al.*, 2002; de Pascale *et al.*, 2003), όπως μειώνεται και η στοματική αγωγιμότητα, άρα και η διαπνοή της καλλιέργειας (de Pascale, 2003). Οι Lycoskoufis *et al.* (2004) έδειξαν πως σε καλλιέργεια πιπεριάς σε κλειστό υδροπονικό σύστημα μειώνεται η καθαρή φωτοσύνθεση και η περιεκτικότητα των φύλλων σε χλωροφύλλη περισσότερο όταν όλη η ρίζα ήταν εκτεθειμένη σε αυξημένη αλατότητα παρά όταν ήταν εκτεθειμένη η μισή, ενώ ο ρυθμός διαπνοής και η στοματική αγωγιμότητα μειώθηκαν το ίδιο ανεξάρτητα από το μέρος της ρίζας που ήταν εκτεθειμένο σε αλατότητα. Μετρήσεις σε μελιτζάνα και αγγούρι έδειξαν μεγάλη μείωση του ρυθμού φωτοσύνθεσης σε αυξημένες περιεκτικότητες NaCl με EC μεγαλύτερο των 20 dS.m⁻¹ (Chartzoulakis, 1994; Chen *et al.*, 1999). Οι Awang and Atherton (1994) βρήκαν μόνον μικρή μείωση της φωτοσύνθεσης των φύλλων σε καλλιέργεια φράουλας. Αντίθετα οι van den Sanden and Veen (1992) βρήκαν μία μικρή αλλά στατιστικά σημαντική αύξηση στην καθαρή φωτοσύνθεση φύλλων αγγουριάς με αύξηση της αλατότητας σε επίπεδα EC άνω των 8 dS.m⁻¹. Ο Esmailiyef (1986) και ο Taleisnik (1987) αναφέρουν πως φύλλα τομάτας αποκρίθηκαν με μεγαλύτερη καθαρή φωτοσύνθεση σε αυξημένη αλατότητα του θρεπτικού διαλύματος με EC άνω των 18 dS.m⁻¹ ιδιαίτερα με εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας με CO₂. Εν τούτοις αποτελέσματα από διαφορετικές μελέτες είναι δύσκολο να συγκριθούν λόγω αλληλεπιδράσεων και άλλων παραγόντων όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η περιεκτικότητα σε CO₂, η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος και η ποικιλία (Esmailiyef, 1986; Taleisnik, 1987; Xu *et al.* 1995).

Οι Xu *et al.* (1995) υπολογίζοντας τις καμπύλες φωτοσύνθεσης φύλλων τομάτας βρήκαν μέγιστο ρυθμό 22,5 φωτοσύνθεσης μmol.m⁻².s⁻¹ για EC θρεπτικού διαλύματος 4.0 dS.m⁻¹ και 19,5 μmol.m⁻².s⁻¹ για 2.5 dS.m⁻¹.

Πέραν των αλληλεπιδράσεων μεταξύ περιβαλλοντικών και καλλιεργητικών παραγόντων και η τεχνική μέτρησης (ολόκληρο φυτό, φύλλα ή μέρη φύλλου) μπορεί να επηρεάζει την ερμηνεία των μετρήσεων φωτοσύνθεσης (Van Iersel and Bugbee, 2000). Έτσι π.χ. μια μείωση στη φωτοσύνθεση των φύλλων δεν προκαλεί απαραίτητα μείωση της φωτοσύνθεσης του φυτού αν τα φυτά παράγουν μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια. Οι Schwartz *et al.* 2002), έδειξαν πως αύξηση της αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος σε καλλιέργεια

τομάτας δε μείωσε τη φωτοσύνθεση των φύλλων αλλά μείωσε τη φωτοσύνθεση του φυτού λόγω μείωσης της φυλλικής επιφάνειας.

3.3. ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΚΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΕΣ ΜΑΖΑΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Έχουν γίνει διάφορες εργασίες που αφορούν την αλληλεπίδραση κινητής σκίασης και διαφορετικών επιπέδων αλατότητας στην παραγωγή και ποιότητα θερμοκηπιακών καλλιεργειών (Lorenzo et al., 2003; Lorenzo et al., 2006 Yahya and Atherton (1995). Όλες οι εργασίες δείχνουν πως η αυξημένη αλατότητα μειώνει τα θετικά αποτελέσματα της σκίασης. Η βιβλιογραφία για την αλληλεπίδραση της σκίασης και της αλατότητας στη διαπνοή και φωτοσύνθεση καλλιεργειών σε θερμοκήπια είναι ελάχιστη.

Οι Schwartz et al. (2002) μελετώντας την επίδραση δύο επιπέδων φωτός και δύο επιπέδων αλατότητας στη συμπεριφορά καλλιέργειας τομάτας δε βρήκαν αλληλεπίδραση της σκίασης και της αλατότητας στη φωτοσύνθεση της καλλιέργειας. Οι Laura López-Hoffman et al. (2006) μελετώντας την αλληλεπίδραση της αλατότητας και των επιπέδων φωτός σε καλλιέργεια mangroves βρήκαν πως η μείωση της καθαρής φωτοσύνθεσης και της στοματικής αγωγιμότητας σε συνθήκες σκίασης είναι πιο έκδηλη σε συνθήκες υψηλής αλατότητας παρά χαμηλής.

3.4. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη σύντομη ανασκόπηση που προηγήθηκε σχετικά με την επίδραση της σκίασης και της αλατότητας στο μικροκλίμα και στη διαπνοή και φωτοσύνθεση καλλιεργειών σε θερμοκήπια διαπιστώνονται τα παρακάτω:

- Όσον αφορά τη σκίαση η βιβλιογραφία περιορίζεται ουσιαστικά στη μελέτη των χαρακτηριστικών του κλίματος. Οι εργασίες για την επίδραση της σκίασης στη διαπνοή είναι ελάχιστες ενώ δεν υπάρχει παντελής έλλειψη εργασιών για την επίδραση της σκίασης στη φωτοσύνθεση.
- Όσον αφορά την επίδραση της αλατότητας στη διαπνοή και φωτοσύνθεση καλλιεργειών σε θερμοκήπια υπάρχουν αρκετές εργασίες κυρίως για λαχανοκομικές καλλιέργειες τα αποτελέσματα

όμως που αφορούν τη φωτοσύνθεση είναι αντιφατικά κυρίως λόγω διαφορετικών συνθηκών διεξαγωγής του πειράματος, διαφορετικών φυτικών ειδών και ποικιλιών και διαφορετικών τεχνικών μέτρησης της φωτοσύνθεσης.

- Τέλος, είναι σχεδόν ανύπαρκτη η βιβλιογραφία που αφορά τη μελέτη της αλληλεπίδρασης σκίασης και αλατότητας στη φυσιολογική συμπεριφορά καλλιεργειών υπό κάλυψη.

Έτσι, τεκμηριώνεται το ενδιαφέρον και η σκοπιμότητα της παρούσας εργασίας στην οποία θα διερευνηθεί η επίδραση της σκίασης και της αλατότητας ξεχωριστά και συνδυασμένα στο μικροκλίμα, στο ενεργειακό ισοζύγιο, στη διαπνοή και στη φωτοσύνθεση μίας υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς, καλλιέργειας που είναι ευαίσθητη στην αλατότητα και έχει ταυτόχρονα μεγάλο οικονομικό ενδιαφέρον για τη χώρα μας.

Στη συνέχεια αναφέρονται τα υλικά και μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, η συζήτηση και τα συμπεράσματα της έρευνας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

4.1. ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε τρία θερμοκήπια του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο αγρόκτημα του Βελεστίνου. Το αγρόκτημα βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος $39^{\circ} 44'$ και γεωγραφικό μήκος $22^{\circ} 79'$, το υψόμετρο της περιοχής είναι 85 m, και απέχει 17 km από το Βόλο.

4.2. ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Τα θερμοκήπια στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είχαν σκελετό από γαλβανισμένο χάλυβα και κάλυψη από πλαστικό φύλλο πολυαιθυλενίου. Τα θερμοκήπια είχαν προσανατολισμό Βορρά- Νότο με απόκλιση του άξονά τους από το Βορρά περίπου 36° ανατολικά. Ήταν τύπου «τροποποιημένα τοξωτά» με καλυμμένη επιφάνεια εδάφους 160 m^2 ($20 \text{ m} \times 8 \text{ m}$) το καθένα, με μέγιστο ύψος 4,1 m στον κορφιά και 2,4 m ύψος ορθοστάτη. Το έδαφος εντός του θερμοκηπίου ήταν πλήρως καλυμμένο με ασπρόμαυρο πλαστικό διπλής όψης. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζονται τα θερμοκήπια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση του πειράματος.



Εικόνα 4.1. Τα πειραματικά θερμοκήπια

4.3. ΑΕΡΙΣΜΟΣ

Τα θερμοκήπια διέθεταν πλαϊνά ανοίγματα κατά μήκος των δύο μεγάλων πλευρών με διαστάσεις των ανοιγμάτων 0,9 m x 15 m, με τη βοήθεια των οποίων γινόταν ο αερισμός. Τα παράθυρα για τον αερισμό ελέγχονταν αυτόματα μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα παράθυρα ξεκινούσαν να ανοίγουν όταν η θερμοκρασία εντός του θερμοκηπίου ξεπερνούσε τους 23 °C, ενώ όταν η θερμοκρασία έφτανε τους 28 °C τα παράθυρα είχαν το μέγιστο άνοιγμα τους.

4.4 ΘΕΡΜΑΝΣΗ

Τα θερμοκήπια ήταν εξοπλισμένα με σύστημα θέρμανσης αποτελούμενο από αερόθερμα και επιδαπέδιους πλαστικούς σωλήνες θέρμανσης, με τη θερμοκρασία του αέρα να διατηρείται στους 16°C κατά τη διάρκεια της νύχτας και τους 19°C κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά τη διάρκεια

4.5. Η ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ

Έγιναν δύο καλλιέργειες αγγουριού (*Cucumis sativus*), ποικιλία Stamina μία εαρινή και μία φθινοπωρινή. Η εαρινή καλλιέργεια αποτέλεσε τη βασική καλλιέργεια για το πείραμα και η φθινοπωρινή έγινε κυρίως για να γίνουν οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης που για τεχνικούς λόγους (βλάβη της συσκευής μέτρησης LCrp+) δεν κατέστη δυνατόν να πραγματοποιηθούν κατά την εαρινή περίοδο. Η εαρινή καλλιέργεια μεταφτεύτηκε τον Απρίλιο του 2008 και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μέχρι τέλη Ιουνίου του 2008. Η φθινοπωρινή καλλιέργεια μεταφτεύτηκε τα τέλη Αυγούστου του 2008 και ολοκληρώθηκε περί τα τέλη Νοεμβρίου 2008. Σημειώνεται πως η καλλιεργηθείσα ποικιλία Stamina είναι μεγαλόκαρπη και παρθενοκαρπική.

Η καλλιέργεια γινόταν σε υδροπονικό σύστημα για να επιτευχθεί ομοιομορφία συνθηκών στη ρίζα, κάτι που δεν επιτυγχάνεται στο έδαφος και για την αποφυγή ασθενειών του εδάφους. Το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν περλίτης σε σάκους μήκους 1 m. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 136 σάκοι υποστρώματος σε κάθε θερμοκήπιο. Οι σάκοι με το υπόστρωμα βρισκόταν σε ύψος 40 Stamina cm από το έδαφος. Η πυκνότητα φύτευσης ήταν 2,4 φυτά/m². Η καλλιέργεια εγκαταστάθηκε σε 4 διπλές σειρές

με αποστάσεις φύτευσης 0,4 m επί της γραμμής και 0,75 m μεταξύ των γραμμών της διπλής σειράς. Το πλάτος του διαδρόμου ήταν 1 m. Στην εικόνα 4.2 φαίνεται μια άποψη της καλλιέργειας αγγουριού στην αρχή της καλλιεργητικής περιόδου.



Εικόνα 4.2. Άποψη της καλλιέργειας αγγουριού.

Το θρεπτικό διάλυμα παρέχονταν στο φυτό με τη βοήθεια σταλακτήρων με παροχή 1 L h^{-1} . Η άρδευση των φυτών ελέγχονταν αυτόματα με τη βοήθεια Ηλεκτρονικού Υπολογιστή. Το κλάδεμα και η διαμόρφωση της καλλιέργειας γινόταν σύμφωνα με την τεχνική που ακολουθείται από τους περισσότερους παραγωγούς στη χώρα μας (σύστημα τύπου «Ομπρέλα» για αγγούρι και μονοστέλεχο φυτό τομάτας).

4.6. ΚΑΛΛΙΕΡΓΗΤΙΚΕΣ ΦΡΟΝΤΙΔΕΣ

Έγινε υποστύλωση των φυτών σε οριζόντια σύρματα τα οποία τεντώθηκαν πάνω από τα κανάλια με τα φυτά (1 σύρμα πάνω από κάθε κανάλι).

Όσον αφορά το κλάδεμα αρχικά αφέθηκε να αναπτυχθεί μόνο το κεντρικό στέλεχος, ενώ όλοι οι πλάγιοι βλαστοί αφαιρέθηκαν. Μόλις ο κεντρικός βλαστός έφθασε και ξεπέρασε το οριζόντιο σύρμα (ύψος από τη βάση του φυτού 1,8 m), κορυφολογήθηκε στα 2-3 φύλλα πάνω από αυτό. Προηγουμένως όμως, είχαν αφεθεί να αναπτυχθούν οι 2 – 3 ανώτεροι πλάγιοι

βλαστοί, δηλαδή αυτοί που εκφύονταν από μασχάλες των αμέσως κάτω από το σημείο αποκοπής της κορυφής ευρισκομένων φύλλων. Οι πλάγιοι αυτοί βλαστοί, οι οποίοι καθώς μεγάλωναν κρέμονταν προς το έδαφος από διαφορετικές πλευρές ο καθένας προσδίδοντας στο φυτό μορφή ομπρέλας, αφήνονταν να αναπτυχθούν μέχρι ένα ύψος 30-50 cm περίπου πάνω από την επιφάνεια του εδάφους και στη συνέχεια κορυφολογούνταν. Πάνω στους πλάγιους βλαστούς όλα τα θηλυκά άνθη που σχηματίζονταν στα πρώτα 60 cm του κεντρικού στελέχους πάνω από το έδαφος αφαιρούνταν σχολαστικά. Πάνω από αυτό το ύψος και μέχρι το σημείο που κορυφολογείται ο βλαστός αφέθηκε ένας καρπός ανά κόμβο. Στους πλάγιους βλαστούς τέλος, αφήνονταν 1 καρπός ανά κόμβο.

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναφέρουμε ότι περίπου ένα μήνα μετά την εγκατάσταση της καλλιέργειας άρχισαν να παρατηρούνται κάποιες απώλειες πειραματικών φυτών εξαιτίας της προσβολής τους κυρίως από τετράνυχχο ο οποίος εξαπλώθηκε παρά τις επεμβάσεις που έγιναν για την καταπολέμηση του. Το πρόβλημα ήταν εντονότερο στο θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας και για το λόγο αυτό στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων παρατηρούνται προς το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου ελλιπείς μετρήσεις στο θερμοκήπιο αυτό.

4.7. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η διαφορετική σκίαση των θερμοκηπίων επιτεύχθηκε με κάλυψη τους με δίχτυα σκίασης με διαφορετικά επίπεδα διαπερατότητας. Παράλληλα, σε κάθε θερμοκήπιο εφαρμόστηκαν 2 επίπεδα αλατότητας-ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο θρεπτικό διάλυμα. Για την εαρινή καλλιέργεια η διαφοροποίηση του θρεπτικού διαλύματος όσον αφορά τα επίπεδα της αλατότητας έγινε στις 12 Μαΐου του 2008 και η σκίαση τοποθετήθηκε στις 27 Μαΐου του 2008. Όσον αφορά την φθινοπωρινή καλλιέργεια η σκίαση ήταν εξ αρχής τοποθετημένη και η διαφοροποίηση του θρεπτικού διαλύματος όσον αφορά τα επίπεδα αλατότητας έγινε στις 15 Σεπτεμβρίου 2008.

Το πείραμα ήταν διπαραγοντικό (σκίαση × αλατότητα) με 3 επίπεδα σκίασης και δύο επίπεδα αλατότητας.

Επίπεδα σκίασης:

1. 0 % (Σκίαση μόνο λόγω του σκελετού και του υλικού κάλυψης του θερμοκηπίου - Καμία πρόσθετη σκίαση. Διαπερατότητα θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία περίπου 75%)
2. 35 % (Σκίαση διχτύου 35%. Ολική διαπερατότητα θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία 50 %)
3. 50 % (Σκίαση διχτύου 50%. Ολική διαπερατότητα θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία 37,5 %)

Επίπεδα αλατότητας:

1. 2.3 dS m⁻¹: Κανονικό θρεπτικό διάλυμα (μη εναλατωμένο, τυπική σύνθεση για αγγούρι).
2. 6.3 dS m⁻¹: Εναλατωμένο θρεπτικό διάλυμα (προσθήκη 35 mmol l⁻¹ NaCl στο κανονικό θρεπτικό διάλυμα).

Σε κάθε θερμοκήπιο τα μισά κανάλια (4 από τα οχτώ), τυχαία επιλεγμένα, τροφοδοτούνταν με θρεπτικό διάλυμα χαμηλής αλατότητας (κανονικό θρεπτικό διάλυμα για αγγουριά) ενώ τα υπόλοιπα τροφοδοτούνταν με εναλατωμένο θρεπτικό διάλυμα (υψηλή συγκέντρωση NaCl). Τα δύο επίπεδα αλατότητας θρεπτικού διαλύματος ήταν τα ίδια σε όλα τα θερμοκήπια (ίδιες συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων και NaCl σε κάθε μεταχείριση αλατότητας). Κάτω από κάθε κανάλι τοποθετήθηκε ένα δοχείο 50 λίτρων (βαθμολογημένο) για την συλλογή και μέτρηση του όγκου της ημερήσιας απορροής.

4.8. ΠΑΡΟΧΗ ΘΡΕΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ

Η παροχή του διαλύματος στην καλλιέργεια γινόταν με σωλήνες Φ20, με ένα Φ20 κατά μήκος κάθε διπλής γραμμής, οι οποίοι έφεραν σταλάκτες στις θέσεις των φυτών (1 σταλάκτης ανά φυτό, παροχή 1 λίτρο την ώρα). Η παρασκευή και η τροφοδότηση του θρεπτικού διαλύματος στα φυτά πραγματοποιούνταν αυτόματα από κεντρική κεφαλή MACQU. Η άρδευση της καλλιέργειας γινόταν ταυτόχρονα σε όλα τα θερμοκήπια αλλά σε ξεχωριστούς χρόνους σε κάθε επίπεδο αλατότητας. Η ενεργοποίηση κύκλων άρδευσης

πραγματοποιούνταν αυτόματα με βάση τη διαπνοή των φυτών με μέτρηση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα. Συνεπώς, η ποσότητα του νερού που παρεχόταν καθημερινά ήταν διαφορετική σε κάθε θερμοκήπιο και ανάλογη της διαπνοής της καλλιέργειας.

Η σύνθεση του κανονικού θρεπτικού διαλύματος παρατίθεται στον Πίνακα 1. Το pH του θρεπτικού διαλύματος θα ανέρχονταν σε 5.6 και στις δύο μεταχειρίσεις αλατότητας.

Πίνακας 4.1. Σύνθεση βασικού θρεπτικού διαλύματος για αγγούρι.

Θρεπτικό στοιχείο	Θ. Δ. τροφοδοσίας (mmol l⁻¹)	Συγκεντρώσεις - στόχος στη ρίζα (mmol l⁻¹)
EC, dS/m	2.30	2.80
Ca	3.75	6.50
Mg	1.50	3.00
K	7.50	8.00
NH ₄	1.25	0.2
SO ₄	1.50	3.5
NO ₃	14.50	18.00
H ₂ PO ₄	1.25	0.90
Θρεπτικό στοιχείο	Θ. Δ. τροφοδοσίας (μmol l⁻¹)	Συγκεντρώσεις - στόχος στη ρίζα (μmol l⁻¹)
Fe	15.00	25.00
Mn	10.00	7.00
Zn	4.00	7.00
Cu	0.75	1.50
B	25.00	50.0
Mo	0.50	0.50

4.9. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

4.9.1. Μικροκλίματος

Οι κλιματικές μετρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια του πειράματος αφορούσαν κυρίως τους κλιματικούς παράγοντες μέσα και έξω από το θερμοκήπιο, τη διαπνοή και τη φωτοσύνθεση των φυτών.

Αναλυτικότερα έξω από τα θερμοκήπια καταγράφονταν:

- η θερμοκρασία και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα με αισθητήρες HOBO.
- η ηλιακή ακτινοβολία με πυρανόμετρο,
- η ταχύτητα του ανέμου με ανεμόμετρο κυπέλλων και διεύθυνση του ανέμου με ανεμοδείκτη.

Στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καταγράφονταν:

- Η θερμοκρασία και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα στο επίπεδο πάνω από τα φυτά.
- Η ηλιακή και καθαρή ακτινοβολία πάνω και κάτω από την καλλιέργεια με πυρανόμετρα και με ραδιόμετρα. Από τη διαφορά των δύο ραδιομέτρων, πάνω και κάτω από την καλλιέργεια θα υπολογίζεται η απορροφούμενη καθαρή ενέργεια από την καλλιέργεια.
- η θερμοκρασία φύλλων των φυτών με θερμοζεύγη χαλκού-κονσταντάνης 1 mm, τα οποία θα είναι κολλημένα στην κάτω επιφάνεια των φύλλων. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας της καλλιέργειας θα υπολογίζεται από τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας των φύλλων.
- η διαπνοή της καλλιέργειας με διάταξη λυσιμέτρου, τοποθετημένου στο κέντρο του κάθε θερμοκηπίου.

4.9.2. Διαπνοής

Ο ρυθμός διαπνοής μετριόταν κάθε 10 λεπτά με τη χρήση ενός λυσιμέτρου τύπου ζυγαριάς. Εγκαταστάθηκαν 2 λυσίμετρα , ένα στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% και ένα στο μάρτυρα. Τα λυσίμετρα ήταν τοποθετημένα σε μια κεντρική γραμμή του κάθε θερμοκηπίου. Το σύστημα αποτελείτο από μια ηλεκτρονική ζυγαριά (με εύρος μέτρησης 62,0 kg και διακριτικότητα 1 g) εξοπλισμένη με ένα δίσκο πάνω στον οποίο τοποθετούνταν 2 φυτά και με ένα ανεξάρτητο σύστημα τροφοδοσίας νερού και στράγγισης. Θεωρώντας ότι η απώλεια λόγω εξάτμισης από το υπόστρωμα περλίτη ήταν αμελητέα, η απώλεια βάρους που μετρούσε η ηλεκτρονική ζυγαριά θεωρήθηκε ίση με τη διαπνοή της καλλιέργειας. Στη συνέχεια ο ρυθμός διαπνοής LE_c (W/m^2 του εδάφους A_c ,που είναι καλυμμένο με καλλιέργεια) εκφράστηκε σε σχέση με

το A_c , όπου λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξατμισμού του νερού και E_c είναι ο ρυθμός διαπνοής. ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

4.9.3. Φωτοσύνθεση

4.9.3.1. Περιγραφή του συστήματος μέτρησης φωτοσύνθεσης

Για τις μετρήσεις φωτοσύνθεσης στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το σύστημα κλειστού τύπου LCpro+ της ADC (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3. Συσκευή μέτρησης φωτοσύνθεσης

i. Τα κύρια μέρη του συστήματος μέτρησης φωτοσύνθεσης

Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος μέτρησης της φωτοσύνθεσης είναι ο θάλαμος ανταλλαγής αερίων (gas exchange chamber), ο αναλυτής υπέρυθρης ακτινοβολίας (infrared gas analyzer), τα ροόμετρα, οι γραμμές αερίου, τα φίλτρα CO₂ και υδρατμών, οι μπαταρίες και ένα χειριστήριο με πληκτρολόγιο, ψηφιακή οθόνη και μνήμη.

Η αρχιτεκτονική του θαλάμου των φύλλων (Leaf chamber), η αεροδυναμική και οι ιδιότητες των δομικών υλικών επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Πρέπει να διασφαλίζεται ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας, της συγκέντρωσης CO₂, της υγρασίας και του φωτός. Ιδιαίτερα σε συστήματα κλειστού τύπου, η στεγανότητα του θαλάμου φύλλων και η χρήση υλικών με μικρή απορροφητικότητα νερού και CO₂ είναι εξαιρετικά σημαντική.

Τα σύγχρονα συστήματα μετρούν τη συγκέντρωση CO₂, με έναν αναλυτή υπέρυθρης ακτινοβολίας μη διασποράς (non-Dispersive InfraRed Gas Analyzer, IRGA). Η συσκευή περιλαμβάνει μια πηγή υπέρυθρης ακτινοβολίας που περνά μέσα από ένα θάλαμο με δείγμα αερίου και μετά εστιάζεται σε έναν ανιχνευτή. Η ενέργεια που λαμβάνεται από τον ανιχνευτή είναι η συνολική που μπήκε στο σύστημα μείον αυτή που απορροφήθηκε από το CO₂ του θαλάμου δειγματοληψίας. Ένα μεγάλο πρόβλημα στην αποδοτικότητα και αξιοπιστία του IRGA είναι η διάκριση μεταξύ CO₂ και υδρατμών, καθώς και τα δύο αέρια απορροφούν ενέργεια σε παρόμοια μήκη κύματος. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, το δείγμα του αερίου ξηραίνεται, πριν φθάσει τον IRGA., σε κάποια σταθερή περιεκτικότητα σε νερό.

Η ενσωμάτωση προηγμένων υπολογιστικών προγραμμάτων υπολογισμού επιτρέπει την άμεση πρόσβαση σε δεδομένα στον αγρό και τη δυνατότητα ανίχνευσης σφαλμάτων κατά τη μέτρηση.

ii. Περιγραφή του συστήματος LCpro+

Πρόκειται για φορητό σύστημα μέτρησης της Φωτοσύνθεσης, Διαπνοής και Στοματικής Αγωγιμότητας των φύλλων εξαιρετικά μικρών διαστάσεων

και βάρους του οίκου ADC Αγγλίας (Σχήμα 4.4) με πλήρες σύστημα ρύθμισης και ελέγχου του μικροκλίματος (ADC Instruction Manual, 2004).



Σχήμα 4.4. Συσκευή μέτρησης φωτοσύνθεσης PCpro+

iii. Υπολογισμοί Παραμέτρων Φωτοσύνθεσης

Ο ρυθμός φωτοσύνθεσης (A), ο ρυθμός διαπνοής (E), η στοματική αγωγιμότητα (g_s) και η συγκέντρωση CO_2 στην υποστοματία κοιλότητα (C_i) υπολογίζονται στο σύστημα PCpro+ ακολούθως:

- **Ρυθμός φωτοσύνθεσης(A)**

$$A = U_s \times \Delta C \quad (\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}) \quad (4.1)$$

όπου ΔC = η διαφορά στη συγκέντρωση CO_2 μέσα στο θάλαμο του φύλλου, διορθωμένη ως προς την αραιώση.

U_s = ροή μάζας αέρα ανά m^2 φυλλικής επιφάνειας, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Δηλαδή

$U_s = U / \text{φυλλική επιφάνεια}$

Όπου:

U = μοριακή ροή αέρα σε mol s^{-1}

και η προβολή της φυλλικής επιφάνειας του φύλλου σε m^2

- **Ρυθμός διαπνοής(E)**

$$E = U_s \times \Delta W \quad (\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$$

όπου

ΔW = διαφορική συγκέντρωση πίεσης υδρατμών, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, διορθωμένη ως προς την αραίωση.

U_s = ροή μάζας αέρα ανά m^2 φυλλικής επιφάνειας, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

- **Στοματική αντίσταση/αγωγιμότητα στην πίεση υδρατμών [r_s/g_s]**

1. Στοματική αντίσταση

$$r_s = \left\{ \frac{(w_{leaf} - w_{an})}{(U_s \times \Delta w)} \right\} - r_b \quad (\text{m}^2 \text{s mol}^{-1})$$

όπου

W_{leaf} = συγκέντρωση πίεσης υδρατμών στον κορεσμό στην επιφάνεια του φύλλου, mol mol^{-1}

$$W_{leaf} = es/p$$

Και

es = κορεσμένη πίεση υδρατμών στη θερμοκρασία της επιφάνειας του φύλλου, mbar

p = ατμοσφαιρική πίεση, mbar

ΔW = διαφορική πίεση υδρατμών μέσα στο θάλαμο του φύλλου, mol mol^{-1}

W_{an} = συγκέντρωση πίεσης υδρατμών έξω από το θάλαμο του φύλλου, mol mol^{-1}

r_b = αντίσταση της οριακής στοιβάδας στην πίεση υδρατμών, $\text{m}^2 \text{s mol}^{-1}$

U_s = ροή μάζας αέρα ανά m^2 φυλλικής επιφάνειας, $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

2. Στοματική αγωγιμότητα

$$g_s = \frac{1}{r_s} \quad (\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1})$$

- **Συγκέντρωση CO₂ στην υπό-στομάτια κοιλότητα [C_i]**

$$C_i = \frac{\left(\left(g_c - \frac{E}{2} \right) c_{an} \right) - A}{g_c + \frac{A}{2}} \quad (\mu\text{mol mol}^{-1})$$

Όπου:

$$g_c = \frac{1}{1.6r_s + 1.37r_b}$$

c_{an}=ροή CO₂ έξω από το θάλαμο του φύλλου, μmol mol⁻¹, διορθωμένη ως προς την αραίωση

E= ρυθμός διαπνοής, mol m⁻² s⁻¹

A= ρυθμός φωτοσύνθεσης ανταλλαγής CO₂ στο θάλαμο του φύλλου, μmol mol⁻¹

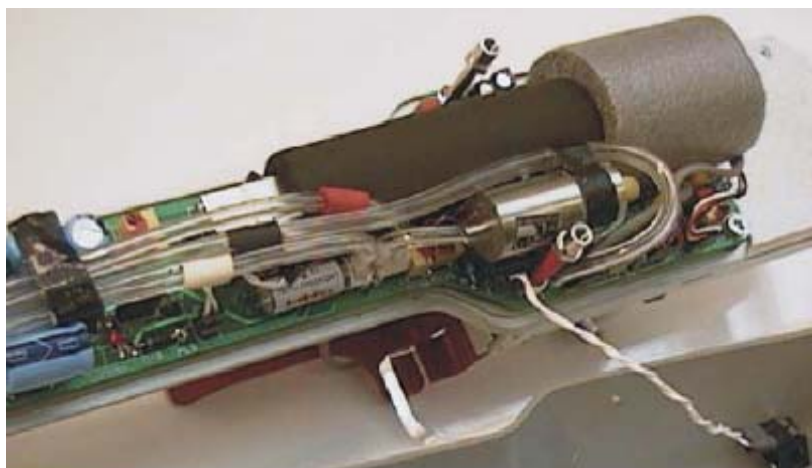
r_b= οριακό στρώμα αντίστασης στην πίεση υδρατμών, m² s⁻¹ mol⁻¹

r_s= στοματική αντίσταση στην πίεση υδρατμών, m² s⁻¹ mol⁻¹

iv. Εξοπλισμός

Το σύστημα PCpro θεωρείται ένα «έξυπνο» φορητό σύστημα μέτρησης φωτοσύνθεσης με αυτόματα προγραμματιζόμενο έλεγχο των CO₂, HO₂, Φωτοσυνθετικά Ενεργού Ακτινοβολίας (PAR) και Θερμοκρασίας

Το σύστημα μετρά το CO₂ με έναν μικροσκοπικό αναλυτή υπέρυθρης ακτινοβολίας IRGA (Infrared gas analyzer) ενσωματωμένο στο θάλαμο φύλλων. (Σχήμα 4.5) .



Σχήμα 4.5. Αναλυτής Υπέρυθρης Ακτινοβολίας IRGA του συστήματος LCpro+.

Το σύστημα διαθέτει ενσωματωμένο μηχανισμό ελέγχου και ρύθμισης της PAR, στην περιοχή $0-2000\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, με την χρήση διόδων LED (Σχήμα 4.6) στην περιοχή μπλε – κόκκινο. Το σύστημα (Σχήμα 4.7) είναι πολύ εύκολο να προγραμματιστεί ώστε να δημιουργεί αυτόματα καμπύλες απόκρισης σε συνάρτηση με τον φωτισμό.



Σχήμα 4.6 Δίοδοι χαμηλής εκπομπής (LED)



Σχήμα 4.7. Σύστημα ρύθμισης PAR

Το όργανο διαθέτει ενσωματωμένη φιάλη καθαρού CO₂ (Σχήμα 4.8), που σε συνδυασμό με τα χημικά κατακράτησης του CO₂, δίνουν στον χειριστή την δυνατότητα για ρύθμιση της συγκέντρωσης του CO₂, πάνω και κάτω από την συγκέντρωση της ατμόσφαιρας.



Σχήμα 4.8. Φιάλες καθαρού CO₂

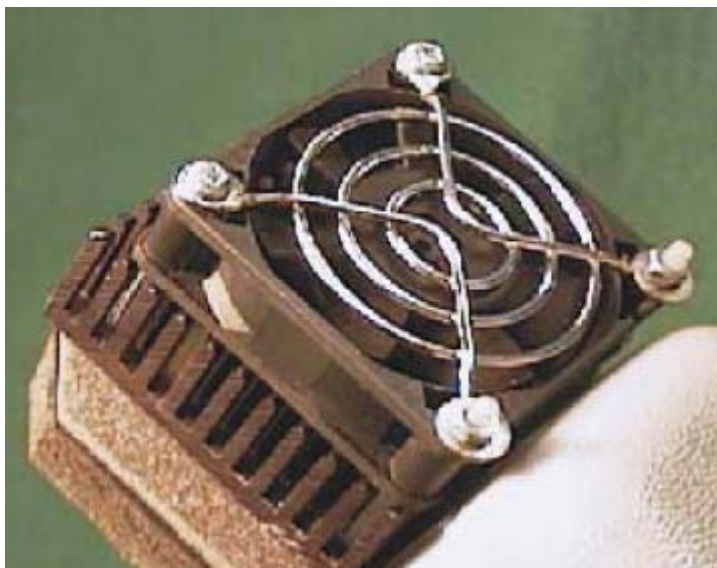
Για την μέτρηση του H₂O το όργανο χρησιμοποιεί δύο αισθητήρες laser υψηλής ταχύτητας, μέσα στον θάλαμο του φύλλου. Έτσι, μετρά το νερό με μέγιστη ακρίβεια

Το όργανο διαθέτει ενσωματωμένα φυσίγγια χημικών (Σχήμα 4.9) έτσι ώστε ο χειριστής να μπορεί να ρυθμίσει την συγκέντρωση του H₂O μέσα στον θάλαμο του φύλλου. Τα χημικά με την μεταβολή του χρώματος τους βοηθούν έτσι ώστε ο χρήστης να γνωρίζει πάντα τον υπολειπόμενο χρόνο ζωής τους.



Σχήμα 4.9. Φυσίγγια χημικών για ρύθμιση συγκέντρωσης του H_2O στον θάλαμο του φύλλου

Ο θάλαμος του οργάνου διαθέτει ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος του φύλλου με δυνατότητα ρύθμισης της $+/- 10^{\circ}C$ από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Το σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας βασίζεται στην θερμική μεταφορά του φαινομένου Peltier (Σχήμα 4.10) .



Σχήμα 4.10. Ελεγκτής θερμικής μεταφοράς Peltier

Είναι πλήρως φορητό και συνοδεύεται από ένα θάλαμο γενικής χρήσης (Σχήμα 4.11).



Σχήμα 4.11 Θάλαμος φύλλου γενικής χρήσης

Το σύστημα όμως μπορεί να δεχθεί διαφορών ειδών θαλάμους (Σχήμα 4.12). Όλοι οι θάλαμοι είναι **ανοικτού τύπου** (αυτός ο τύπος έχει καθιερωθεί πλέον ως ο βέλτιστος).





Σχήμα 4. 12. Διάφοροι τύποι Θαλάμου φύλλων

Στο πείραμα για τις μετρήσεις φωτοσύνθεσης φύλλων αγγουριάς χρησιμοποιήθηκε ο θάλαμος τύπου Broad.

Η συσκευή διαθέτει, επίσης, εσωτερική επαναφορτιζόμενη μπαταρία με εξαιρετικά μεγάλη ισχύ που επιτρέπει συνεχόμενη χρήση του οργάνου για 16 ώρες πριν χρειαστεί φόρτιση και έχει ευανάγνωστη ψηφιακή οθόνη άμεσης απεικόνισης των μετρούμενων μεγεθών (Σχήμα 4.13).

Τέλος, έχει σύστημα αποθήκευσης δεδομένων εξαιρετικά ευέλικτο. Έχει δυνατότητα αποθήκευσης απεριόριστου αριθμού δεδομένων με τη βοήθεια PC cards που προσαρμόζονται στο σύστημα. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ξεχωριστά αρχεία με το όνομα του χρήστη. Κάθε κάρτα εξωτερική έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης μέχρι και 4000 σειρές δεδομένων.



Σχήμα 4.13. Ψηφιακή οθόνη απεικόνισης μεγεθών

ν. Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Διαθέτει περιοχή μέτρησης της συγκέντρωσης του CO₂, **από 0-2000ppm**. Το γεγονός αυτό καθιστά το όργανο ικανό για μεγάλη ποικιλία εφαρμογών.

Περιοχή μέτρησης του H₂O **από 0 έως 75 mBar**.

Περιοχή μέτρησης της θερμοκρασίας των φύλλων : από 0 έως +50⁰C.

Περιοχή μέτρησης της θερμοκρασίας του αέρα : από 0 έως +50⁰C.

Διαθέτει αισθητήρα PAR ακτινοβολίας ενσωματωμένο στον θάλαμο του φυτού.

Διαθέτει μηχανισμό RAM CARD στον οποίο καταχωρούνται οι μετρήσεις.

Περιοχή μέτρησης και ρύθμισης της ροής του αέρα εντός του θαλάμου : 100-500 ml/min.

Ανάλυση μέτρησης του CO₂ : 1ppm.

Ανάλυση μέτρησης του H₂O : 0.1mBar.

Ανάλυση μέτρησης θερμοκρασίας φύλλου : 0.1⁰C.

Περιοχή μέτρησης της PAR 0-3000μmols m⁻² sec⁻¹.

Επαναληψιμότητα μέτρησης του CO₂ : 0.1%.

Επαναληψιμότητα μέτρησης του H₂O : 0.5%.

Το σύστημα αυτόματα εκτελεί διορθώσεις ώστε οι μετρήσεις των H₂O και CO₂ να είναι πλήρως σταθερές. Επίσης η μονάδα διαθέτει αυτόματη αντιστάθμιση των παραμέτρων που απαιτούνται από την τεχνική IRGA (Infra Red Gas Analyzer).

Η μέτρηση των παραμέτρων H_2O και CO_2 πραγματοποιείται στο ίδιο δείγμα αέρα.

Η μονάδα διαθέτει πόρτα RS-232 για μεταφορά των μετρήσεων σε υπολογιστή.

Διαστάσεις 24 X 12.5 X 14cm.

Βάρος 4.4 κιλά.

Το σύστημα έτοιμο προς λειτουργία περιλαμβάνει :

- Βασική μονάδα ελέγχου και προγραμματισμού.
- Επαναφορτιζόμενες μπαταρίες.
- Φορτιστή των μπαταριών.
- Κιτ βασικών ανταλλακτικών.
- Ένα θάλαμο δείγματος.
- Αισθητήρες.
- Εγχειρίδιο λειτουργίας.

4.9.3.2. Διεξαγωγή μετρήσεων

Οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης έγιναν κατά τη φθινοπωρινή περίοδο καλλιέργειας, τον Οκτώβριο και το Νοέμβριο του 2008. Για τις μετρήσεις φωτοσύνθεσης επελέγησαν για κάθε επίπεδο αλατότητας τυχαία 8 φυτά/μεταχείριση/θερμοκήπιο, δηλαδή 16 φυτά συνολικά από κάθε θερμοκήπιο. Οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης διεξάγονταν περίπου κάθε 10ήμερο, σε ένα τυχαίο υγιές, καλά αναπτυγμένο φύλλο που βρισκόταν στο μέσο περίπου του συνολικού ύψους του φυτού κάθε φορά. Γινόταν συνολικά 48 μετρήσεις φωτοσύνθεσης κάθε δεκαήμερο. Τις ημέρες με χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία οι μετρήσεις διεξάγονταν με σταθερή ακτινοβολία της συσκευής LCpro+ έντασης $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Κατά τη διάρκεια του πειράματος έγιναν συνολικά έξι (6) πλήρη σετ μετρήσεων, τέσσερα (4) σε συνθήκες ηλιοφάνειας και δύο (2) σε συνθήκες με συννεφιά.

4.10. ΣΥΛΛΟΓΗ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Όλες οι παραπάνω μετρήσεις (πλην των μετρήσεων φωτοσύνθεσης που διαθέτει δικό του σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης) συλλέγονταν σε ένα σύστημα συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων (data logger, τύπου DL3000, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Οι μετρήσεις λάμβαναν χώρα κάθε 30 s και 10 λεπτά και οι τιμές των μέσων όρων καταγράφονταν.

Η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων έγινε μέσω του MS Excel και του στατιστικού πακέτου SPSS. Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων στο στατιστικό πακέτο SPSS πραγματοποιήθηκε two-way Analysis of Variance (two –way ANOVA) για τις τρεις μεταχειρίσεις απ' όπου παρατηρήθηκε η επίδραση των παραγόντων «υλικό κάλυψης» και «αλατότητα» καθώς και οι αλληλεπίδρασή τους στις εκάστοτε μεταβλητές για πιθανότητα $P=0,05$. Επίσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση LSD και Duncan για να διαπιστωθεί ποιες από τις μεταχειρίσεις διέφεραν για πιθανότητα $P=0,05$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα που θα παρουσιασθούν στη συνέχεια αντιστοιχούν σε τρεις αντιπροσωπευτικές ημέρες της εαρινής περιόδου που δίνουν την εικόνα της επίδρασης της σκίασης το μικροκλίμα και στις ροές αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας στο θερμοκήπιο. Αντίστοιχα είναι τα αποτελέσματα και για την υπόλοιπη εαρινή περίοδο. Παρατίθενται επίσης ορισμένα σχετικά ενδεικτικά αποτελέσματα συμπληρωματικών κλιματικών μετρήσεων που έγιναν με την ευκαιρία των μετρήσεων φωτοσύνθεσης. Τα αποτελέσματα που αφορούν την ξεχωριστή και συνδυασμένη επίδραση (αλληλεπίδραση) της σκίασης και της αλατότητας στη φωτοσύνθεση και διαπνοή υδροπονικής καλλιέργειας αντιστοιχούν σε τέσσερις αντιπροσωπευτικές πλήρεις σειρές μετρήσεων που έγιναν κατά τη φθινοπωρινή περίοδο και επιλέχθηκαν για την πληρότητά τους από τη σειρά των ανά δεκαήμερο μετρήσεων φωτοσύνθεσης που έγιναν το φθινόπωρο από Σεπτέμβριο μέχρι Νοέμβριο 2008. Οι μέσες ημερήσιες τιμές των εξωτερικών κλιματικών παραμέτρων (από 8:00 έως 19:00 τοπική ώρα) για τις ημέρες της εαρινής περιόδου που επιλέχθηκαν για ανάλυση δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1. Μέσες τιμές των εξωτερικών κλιματικών παραμέτρων για τις τρεις επιλεγείσες ημέρες.

Ημερομηνία	$R_{s,out}$ (MJ m ⁻²)	T_{out} (°C)	RH_{out} (%)	D_{out} (kPa)	u (m s ⁻¹)
1/6/2008	24,48	25,3	43,6	1,988	1,948
2/6/2008	20,89	24,04	50,9	1,525	3,702
3/6/2008	18,07723	20,8	51,4	1,219	3,336

Όπου:

$R_{s,out}$ = ημερήσια ολική ηλιακή ακτινοβολία, MJ m⁻²

T_{out} = μέση ημερήσια θερμοκρασία εξωτερικού αέρα, °C

RH_{out} = μέση ημερήσια σχετική υγρασία εξωτερικού αέρα, %

D_{out} = μέσο ημερήσιο έλλειμμα κορεσμού του εξωτερικού αέρα, kPa

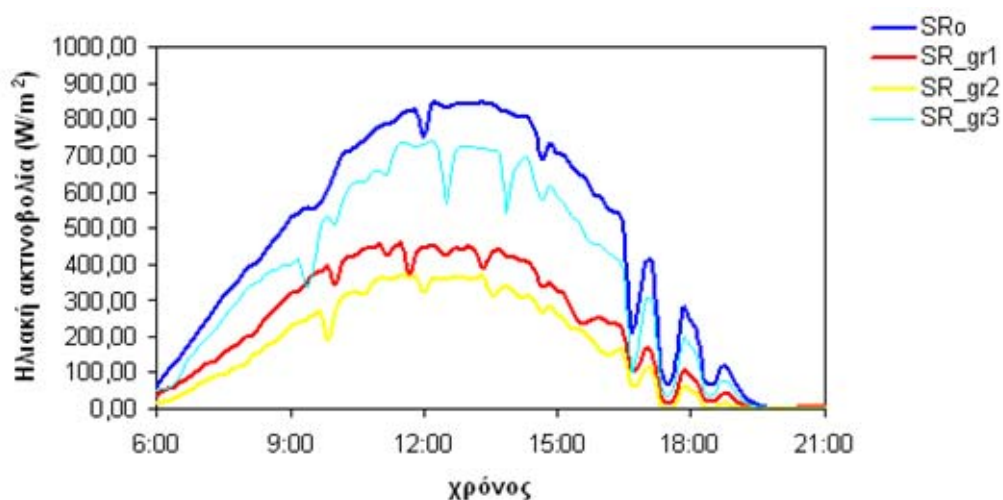
U = μέση ημερήσια ταχύτητα εξωτερικού αέρα, m s⁻¹

Από τον Πίνακα 5.1 φαίνεται πως οι εξωτερικές κλιματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των ημερών που επιλέχθηκαν για ανάλυση δεν ήταν ίδιες κάτι που δίνει την ευκαιρία να δούμε καλύτερα την επίδραση της σκίασης. Έτσι, από τις τιμές της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου φαίνεται πως την 1/6/2008 υπήρχε αρκετή ηλιοφάνεια ενώ υπήρχε σχετική συννεφιά στις 2/6/2008 και ακόμη περισσότερο ήταν ο ουρανός συννεφιασμένος την 3/6/2008. Επί πλέον ο καιρός την 3/6/2008 ήταν πιο ψυχρός και υγρός με σχετικά μέτρια ταχύτητα ανέμου από ότι την 1/6/2008 που ήταν μια μέρα θερμή και ξηρή με σχετικά χαμηλή ταχύτητα ανέμου.

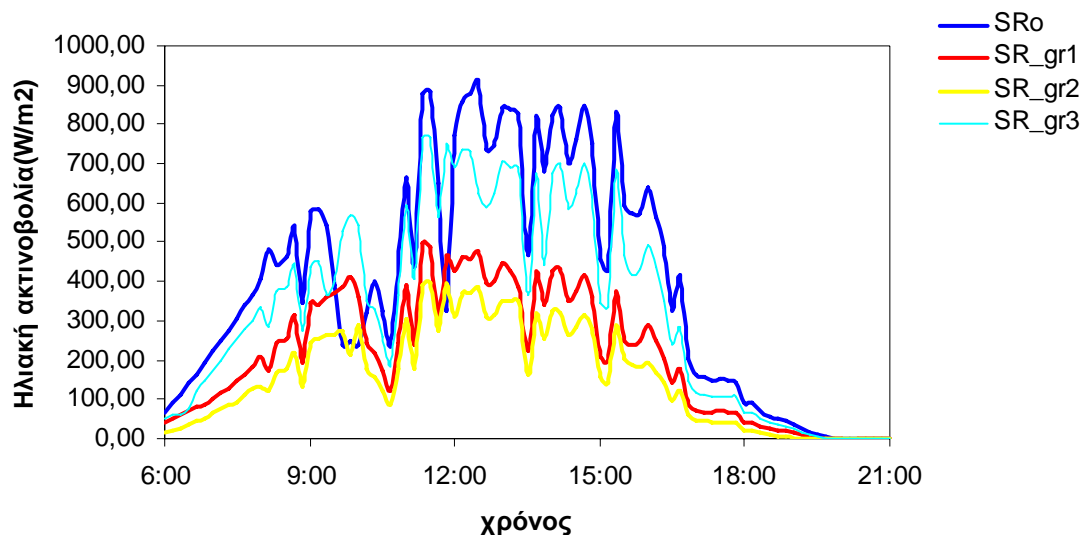
5.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΟ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΑΝΤΑΛΛΑΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

5.1.1. Διαπερατότητα του θερμοκηπίου στην ηλιακή ακτινοβολία

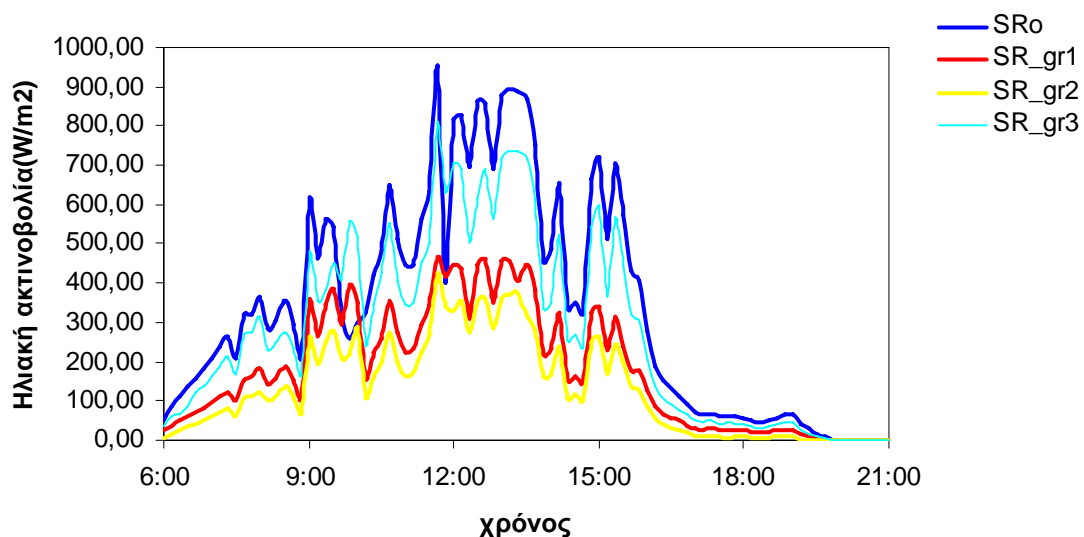
Στα παρακάτω Σχήματα 5.1, 5.2 και 5.3 φαίνεται η ημερήσια πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό και στο εσωτερικό των τριών θερμοκηπίων στις μέρες που επιλέχθηκαν για ανάλυση δηλαδή στις 1, 2 και 3 Ιουνίου 2008 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.1. Ημερήσια πορεία την 1^η/6/2008 της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό των θερμοκηπίων (SR_o) και της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο χωρίς σκίαση (μάρτυρας, gr_3), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (gr_1) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (gr_2).



Σχήμα 5.2. Ημερήσια πορεία την 2^η/6/2008 της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό των θερμοκηπίων (SR_o) και της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο χωρίς σκίαση (μάρτυρας, gr_3), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (gr_1) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (gr_2).



Σχήμα 5.3. Ημερήσια πορεία την 3^η/6/2008 της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό των θερμοκηπίων (SR_o) και της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο χωρίς σκίαση (μάρτυρας, gr_3), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (gr_1) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (gr_2).

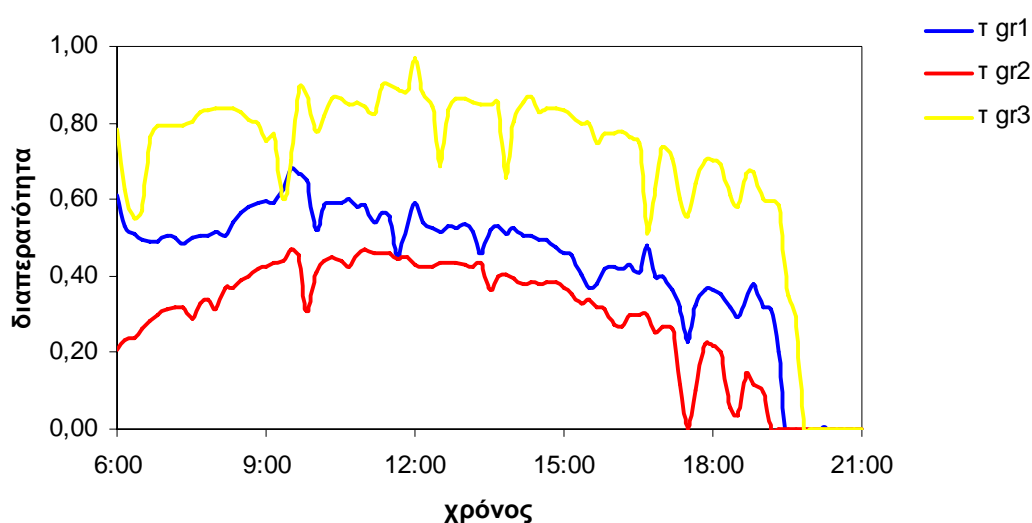
Από τα παραπάνω Σχήματα φαίνεται πως η μέγιστη εξωτερική ακτινοβολία είναι περίπου ίδια και τις τρεις ημέρες και φτάνει τα 900 W m^{-2} s περίπου το μεσημέρι. Την 1^η Ιουνίου όμως οι καμπύλες τόσο της προσπίπτουσας όσο και της εισερχόμενης στα τρία θερμοκήπια ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ πιο λείες ενώ στις 2 και 3 Ιουνίου οι αντίστοιχες καμπύλες παρουσιάζουν πολύ περισσότερες διακυμάνσεις. Αυτό, προφανώς, οφείλεται στο ότι τις μέρες

αυτές υπήρχε συννεφιά η οποία μάλιστα εντονότερη στις 3/6/2008 κάτι που εξηγεί τις τιμές της εξωτερικής ακτινοβολίας του Πίνακα 5.1 και τεκμηριώνει το σχετικό σχόλιο.

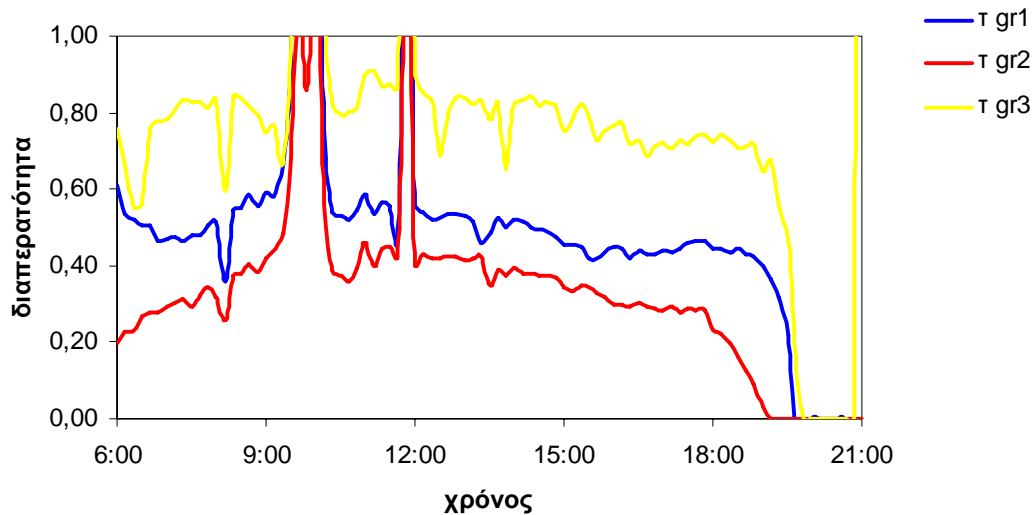
Επίσης από τα Σχήματα 5.2 και 5.3 φαίνεται πως στις 10:30 και στις 12:00 περίπου υπάρχει μια απότομη μεγάλη πτώση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε επίπεδα κάτω της ακτινοβολίας που εισέρχεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου- μάρτυρα. Προφανώς το παράδοξο αυτό φαινόμενο οφείλεται σε πρόσκαιρη σκίαση του αισθητήρα μέτρησης της εξωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας.

Τέλος οι μέσες ημερήσιες τιμές της έντασης της εξωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας είναι της 453 W m^{-2} , 387 W m^{-2} και 335 W m^{-2} .

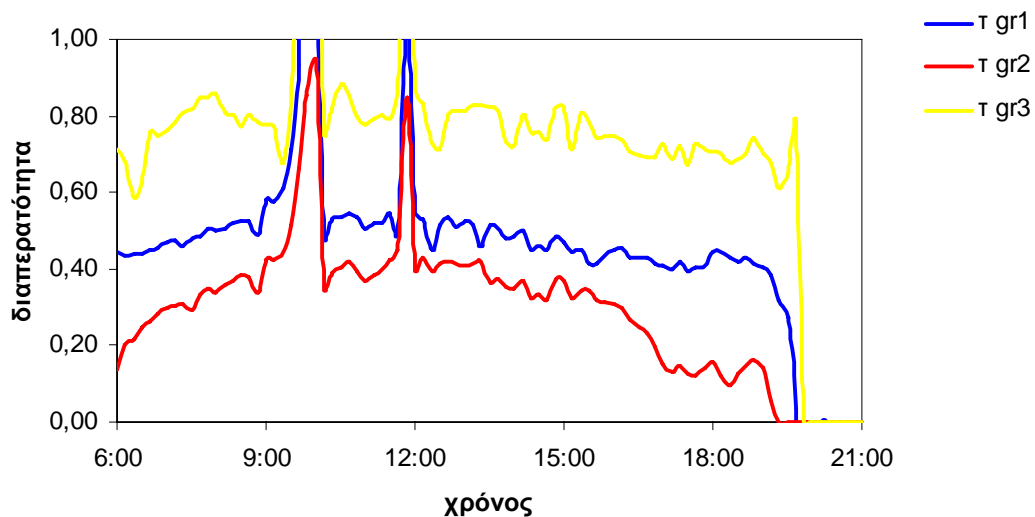
Στα παρακάτω σχήματα 5.4, 5.5 και 5.6 φαίνεται η πορεία του συντελεστή διαπερατότητας ($R_{s,in}/R_{s,out}$) του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας στις 1, 2 και 3 Ιουνίου 2008 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4. Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας του θερμοκηπίου συναρτήσει της ώρας της ημέρας στις 1/6/ 2008 στο μάρτυρα (**gr₃**), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**).



Σχήμα 5.5. Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας του θερμοκηπίου συναρτήσει της ώρας της ημέρας στις 2/6/ 2008 στο μάρτυρα (**gr₃**), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**).



Σχήμα 5.6. Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας του θερμοκηπίου συναρτήσει της ώρας της ημέρας την 1^η/6/ 2008 στο μάρτυρα (**gr₃**), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**).

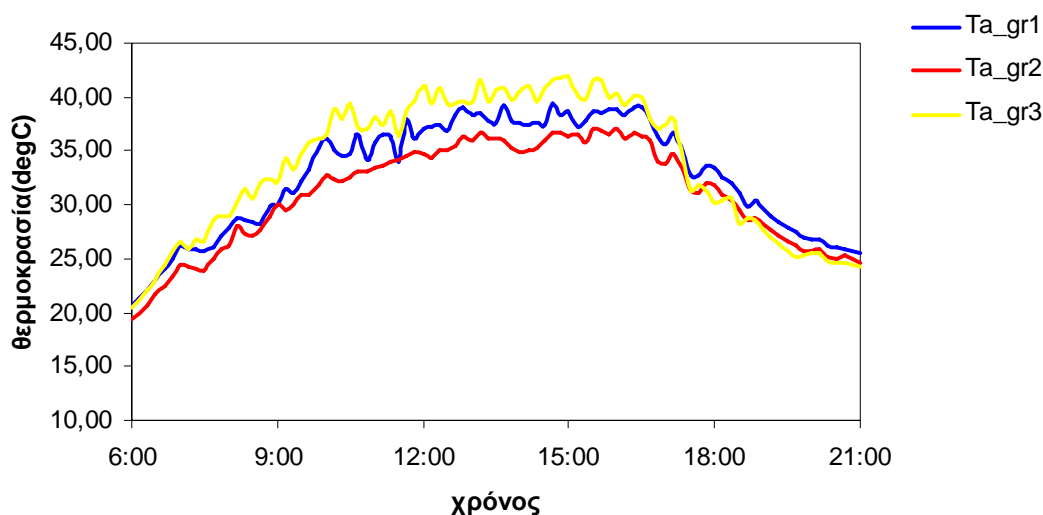
Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 5.4, 5.5 και 5.6 την 1/6/2008 οι καμπύλες της ημερήσιας πορείας του συντελεστή διαπερατότητας και για τα τρία θερμοκήπια είναι σχετικά λείες λόγω της ομαλής πορείας της προσπίπτουσας και της εισερχομένης στα θερμοκήπια ηλιακής ακτινοβολίας. Στις 2 και 3/6/2008 η συννεφιά και οι εξ' αυτής διακυμάνσεις της προσπίπτουσας και της εισερχομένης ηλιακής ακτινοβολίας στα τρία θερμοκήπια έχουν ως αποτέλεσμα οι καμπύλες του συντελεστή διαπερατότητας να παρουσιάζει

ανωμαλίες. Η σκίαση του αισθητήρα μέτρησης της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό των θερμοκηπίων γύρω στις 10:30 και το μεσημέρι οδηγεί σε μεγάλες τιμές του συντελεστή διαπερατότητας στα τρία θερμοκήπια που στο θερμοκήπιο μάρτυρας και στο θερμοκήπιο με τη μέτρια σκίαση ξεπερνούν τη μονάδα.

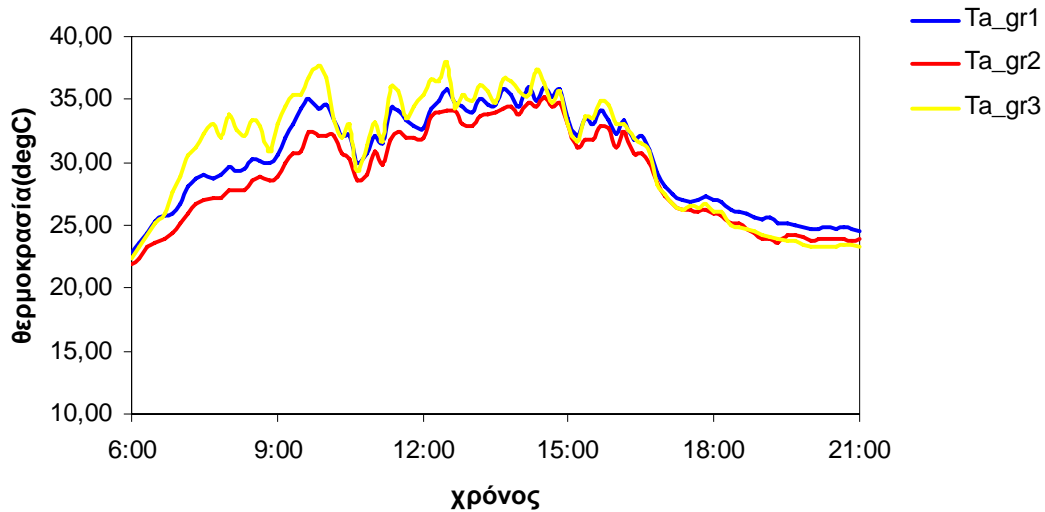
Τέλος φαίνεται πως η διαπερατότητα του θερμοκηπίου μάρτυρα έχει μια μέση τιμή της τάξης του 0,78, του θερμοκηπίου με τη μικρότερη σκίαση μια μέση τιμή γύρω στο 0,49 και του θερμοκηπίου με τη μεγαλύτερη σκίαση μια διαπερατότητα της τάξης του 0,34. Οι τιμές αυτές της διαπερατότητας είναι πολύ κοντά και ουσιαστικά συμπίπτουν με τις τιμές που δίνουν οι κατασκευαστές του υλικού κάλυψης και των δικτύων σκίασης για τη διαπερατότητα του θερμοκηπίου χωρίς και με δίκτυα σκίασης.

5.1.2. Θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου

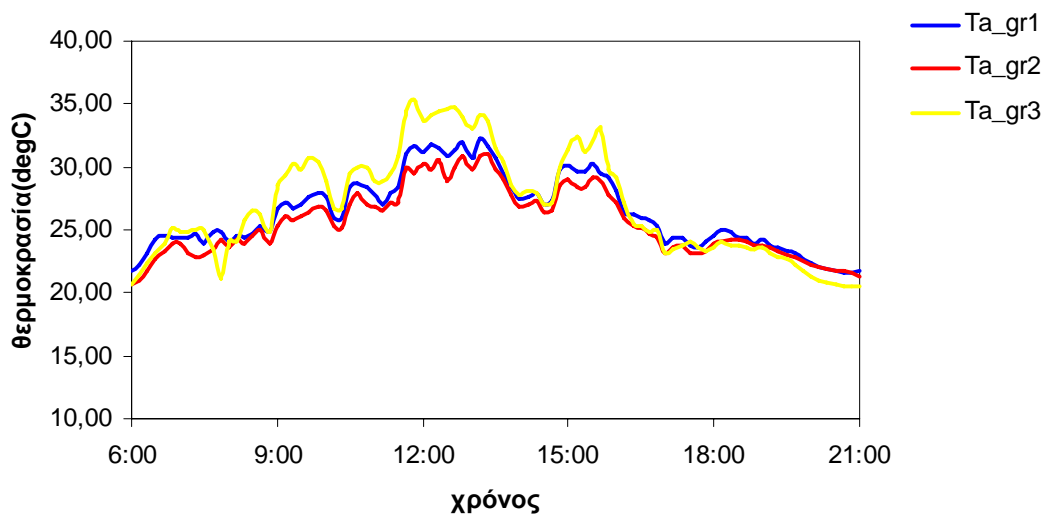
Στα παρακάτω Σχήματα 5.7., 5.8. και 5.9. φαίνεται η ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας για τις τρεις ημέρες που επιλέχθηκαν για ανάλυση.



Σχήμα 5.7. Ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας του αέρα στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**) την 1^η/6/ 2008.



Σχήμα 5.8. Ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας του αέρα στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**) την 2^η/6/ 2008.



Σχήμα 5.9. Ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας του αέρα στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**) την 3^η/6/ 2008.

Από τα παραπάνω διαπιστώνεται πως οι καμπύλες ημερήσιας πορείας της θερμοκρασίας είναι λείες κάτι που δείχνει πως δεν υπήρχαν έντονες διακυμάνσεις στη θερμοκρασία αντίστοιχες αυτών της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι, φαίνεται πως η θερμοκρασία του αέρα και των τριών θερμοκηπίων δεν αντιδρά στις πρόσκαιρες αλλαγές της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω συννεφιάς και παρουσιάζει αδράνεια. Αυτό φαίνεται κι από το ότι η μέγιστη θερμοκρασία του αέρα και στα τρία θερμοκήπια λαμβάνει χώρα γύρω στις 13:30 ενώ η

μέγιστη τιμή της ηλιακής ακτινοβολία γύρω στις 12:00 το μεσημέρι δηλαδή μια διαφορά φάσης της τάξης της 1.30 ώρας. Έτσι, η διαφορά φάσης της ηλιακής ακτινοβολίας με τη θερμοκρασία του αέρα (ηλιοθερμικό σύμπλεγμα) είναι μικρότερη υπό κάλυψη απ' ότι στον ελεύθερο αγρό κάτι συμφωνεί με αυτό που βρήκαν οι Kittas *et al.*(1987).

Από τα ίδια σχήματα φαίνεται πως η σκίαση δε μειώνει σημαντικά τη θερμοκρασία του αέρα. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των διαφόρων παραμέτρων του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπίων για τις τρεις μέρες.

Πίνακας 5.2. Μέσες τιμές των παραμέτρων του εξωτερικού κλίματος για τις τρεις επιλεγμένες ημέρες.

Ημερομηνία	R _s (W m ⁻²)			T (°C)			VPD (kPa)			λ E (W m ⁻²)		
Θερμοκήπιο	Μάρτυρ.	35%	50%	Μάρτυρ.	35%	50%	Μάρτυρ.	35%	50%	Μάρτυρ.	35%	50%
1/6/2008	367.4	232.3	173.1	33.6	32.7	30.9	3.80	3.03	2.85	46.7	29.1	
2/6/2008	327.3	209.4	154.6	30.76	30.2	29.0	2.53	2.24	2.13	39.7	34.3	
3/6/2008	276.6	176.1	130.6	26.9	26.3	25.5	1.85	1.65	1.63	35.7	29.1	

Από τον Πίνακα 5.2 φαίνεται πως σκίαση μειώνει πολύ λίγο τη θερμοκρασία του αέρα αφού την ημέρα χωρίς συννεφιά η μείωση αυτή δεν ξεπερνά τον 1 °C στο θερμοκήπιο με τη μέτρια σκίαση και τους 2.5 °C στο θερμοκήπιο με τη μεγάλη σκίαση. Οι μειώσεις αυτές πέφτουν στο μισό τις ημέρες με συννεφιά. Η μικρή επίδραση της σκίασης στη θερμοκρασία του αέρα μπορεί να αποδοθεί στο ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας την περίοδο των μετρήσεων τα παράθυρα αερισμού παρέμειναν συνεχώς τελείως ανοιχτά με αποτέλεσμα τα τρία θερμοκήπια να έχουν περίπου την ίδια παροχή αερισμού. Οι Kittas *et al.* (1987) έδειξαν πως η παροχή αερισμού δίνεται από τη σχέση:

$$N = \frac{0.31 \times SR_o}{T_i - T_o} \quad (5.1)$$

Από την εξίσωση 5.1 προκύπτει:

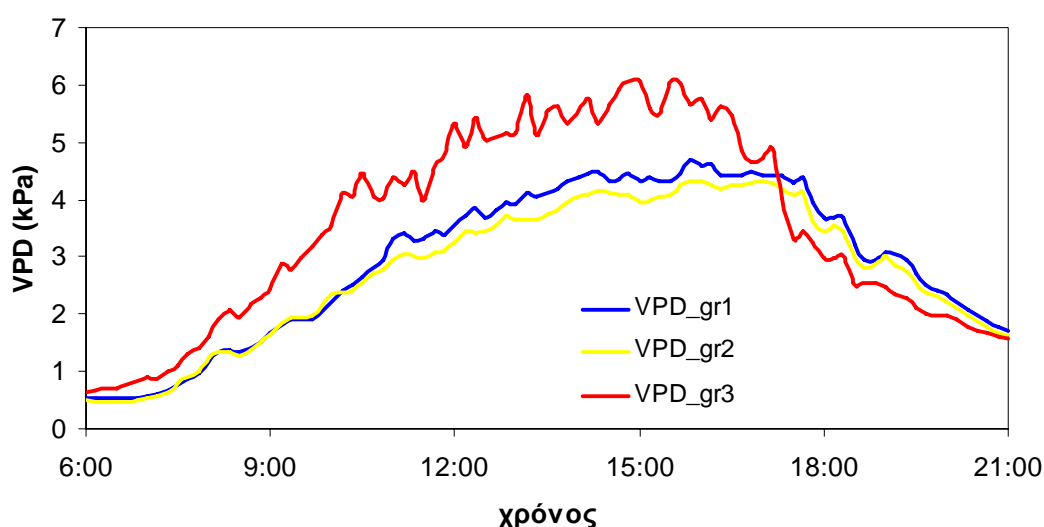
$$T_i = T_o - \frac{0.31 \times SR_o}{N} \quad (5.2)$$

Αν θεωρήσουμε πως τα θερμοκήπια είχαν τον ίδιο ρυθμό ανανέωσης του αέρα N της τάξης περίπου των 30 h⁻¹ (Kittas, 1995), παραπλήσια φυλλική επιφάνεια και ίδια εξωτερική θερμοκρασία τότε από τη σχέση 5.2 προκύπτει

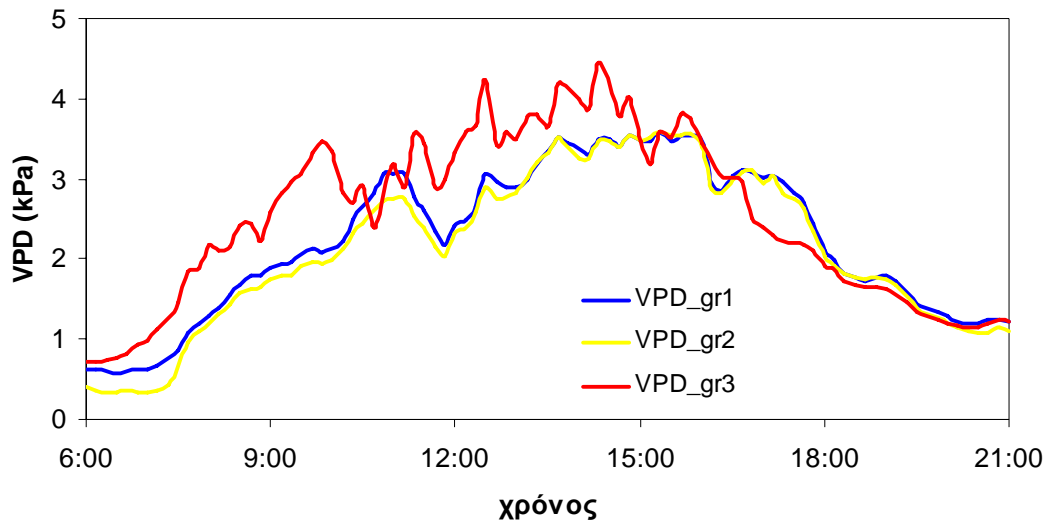
πως η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου αυξάνει κατά 1°C περίπου για κάθε 100 W m^{-2} εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Από τον Πίνακα 5.2 βλέπουμε πως η διαφορά στην εισερχόμενη μέση ημερήσια ένταση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας μεταξύ του μάρτυρα και του θερμοκηπίου με τη μεγάλη σκίαση ήταν της τάξης των 200 W m^{-2} και 150 W m^{-2} για την ημέρα χωρίς και αυτή με συννεφιά αντίστοιχα. Οι διαφορές αυτές σε συνδυασμό με τις μικρές διαφορές στη διαπνοή και τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας που φαίνονται στη συνέχεια στα Σχήματα 5.13 και 5.15 αντίστοιχα, δικαιολογούν τις παρατηρηθείσες διαφορές στη θερμοκρασία του αέρα στα τρία θερμοκήπια..

5.1.3. Έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου

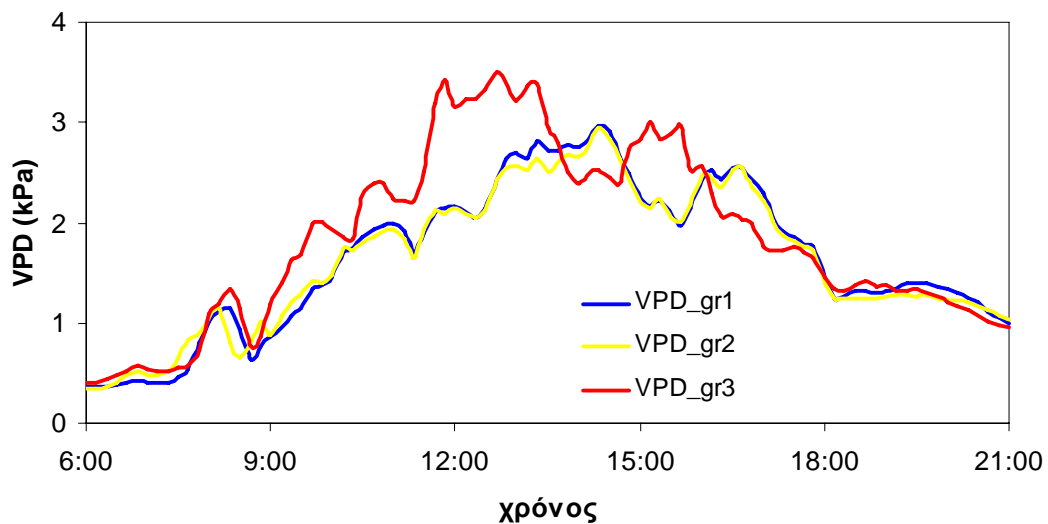
Στα παρακάτω Σχήματα 5.10, 5.11 και 5.12 παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού στο εσωτερικό των θερμοκηπίων τις μέρες που επιλέχθηκαν για ανάλυση.



Σχήμα 5.10 Ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**) την 1^η/6/ 2008.



Σχήμα 5.11. Ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**) την 2^η/6/ 2008.



Σχήμα 5.12. Ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**) την 3^η/6/ 2008.

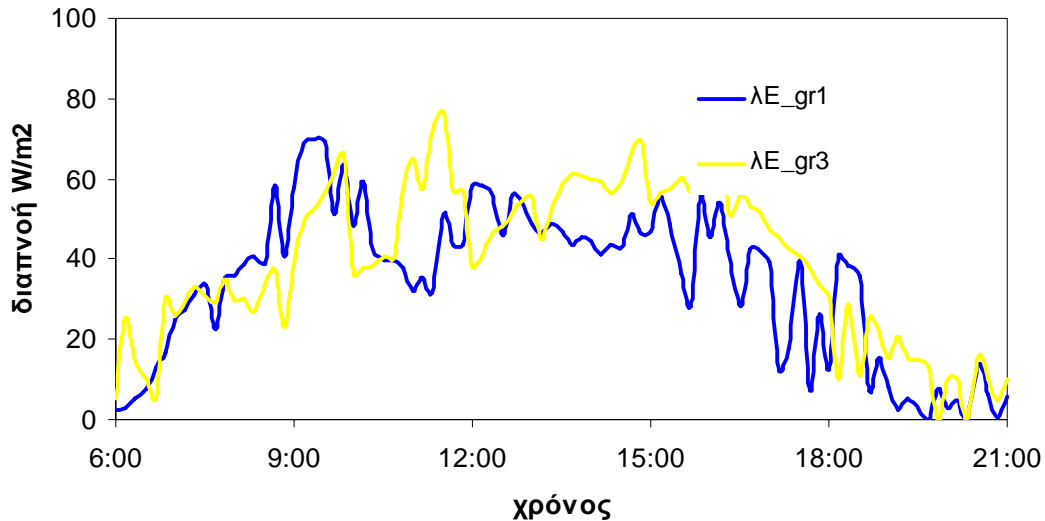
Η μέση τιμή του VPD είναι για την ημέρα χωρίς συννεφιά , όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 5.2, 3,80 kPa, 3.03 kPa και 2,85 kPa για το μάρτυρα, το θερμοκήπιο με τη μέτρια σκίαση και το θερμοκήπιο με τη μεγάλη σκίαση αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές μειώνονται τις ημέρες με συννεφιά. Η μέγιστη τιμή του ελλείμματος κορεσμού φτάνει όταν δεν υπάρχει συννεφιά τα 6 kPa στο μάρτυρα και τα 4.5 kPa και 4 kPa στα θερμοκήπια με 35% και 50% σκίαση

αντίστοιχα. Τις ημέρες με συννεφιά η μέγιστη τιμή του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο εσωτερικό των θερμοκηπίων μειώνεται και παίρνει τιμές από 4,5 kPa έως 3,5 kPa για το μάρτυρα και από 3,5 kPa μέχρι 4 kPa περίπου για τα σκιασμένα θερμοκήπια. Φαίνεται, επίσης πως ακόμη και την ημέρα με την έντονη συννεφιά (3.6.2008) από τις 11:00 το πρωί μέχρι τις 18:00 τα θερμοκήπια έχουν έλλειμμα κορεσμού του αέρα μεγαλύτερο από 2 kPa. Αυτό δείχνει πως κατά τη διάρκεια των ημερών που παρουσιάζονται τα φυτά εντός και των τριών θερμοκηπίων ήταν ακόμη και τις συννεφιασμένες ημέρες σε καταπόνηση (stress), αφού σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Katsoulas and Kittas 2008) η καλλιέργεια καταπονείται για τιμές VPD μεγαλύτερες από 1.5 kPa. Φυσικά οι τιμές του VPD γίνονται ιδιαίτερα μεγάλες γύρω στο μεσημέρι κάτι που δείχνει πως ουσιαστικά τα φυτά ήταν σχεδόν συνεχώς στρεσοσφισμένα και στα τρία θερμοκήπια. Τέλος, από τα παραπάνω Σχήματα παρατηρούμε πως η ημερήσια πορεία του VPD στα θερμοκήπια με σκίαση παρουσιάζει μια μικρή υστέρηση σε την αντίστοιχη πορεία του VPD στο μάρτυρα. Αυτό οφείλεται στις μικρότερες τιμές της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στα σκιασμένα θερμοκήπια που έχουν ως αποτέλεσμα την καθυστερημένη σε σχέση με το μάρτυρα θέρμανση του αέρα που οδηγεί σε καθυστέρηση της αύξησης του ελλείμματος κορεσμού κατά 1 περίπου ώρα.

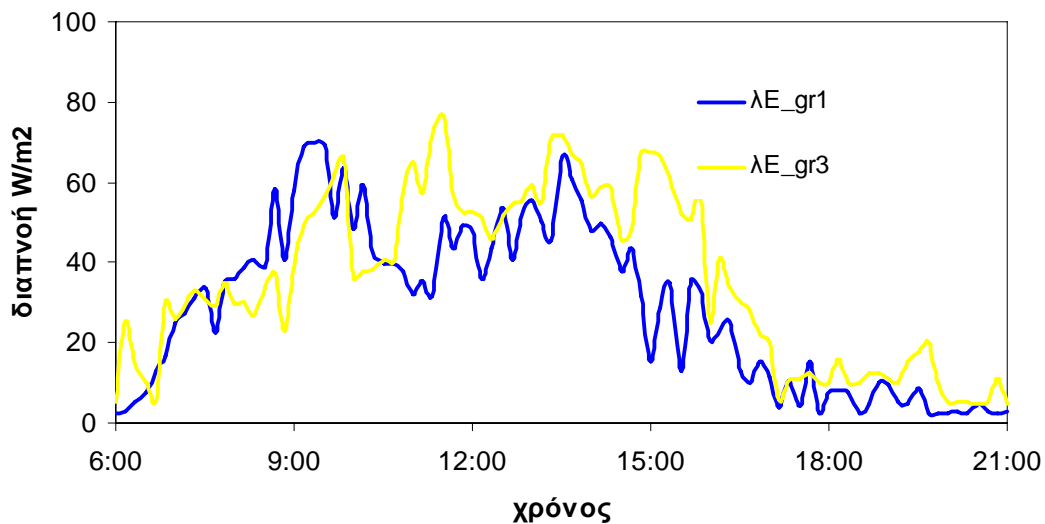
5.1.4. Επίδραση της σκίασης στη διαπνοή της καλλιέργειας

Τα αποτελέσματα που αφορούν τη διαπνοή και τη στοματική αγωγιμότητα προέρχονται από μετρήσεις σε δύο θερμοκήπια και πιο συγκεκριμένα από μετρήσεις στο θερμοκήπιο μάρτυρα και στο θερμοκήπιο με 35% σκίαση. Οι μετρήσεις έγιναν ταυτόχρονα με τις μετρήσεις καταγραφής των κλιματικών παραμέτρων.

Έτσι, στα παρακάτω Σχήματα 5.13 και 5.14 παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία της διαπνοής στα δύο θερμοκήπια στις 2 και 3.6.2008.



Σχήμα 5.13. Ημερήσια πορεία της διαπνοής της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) την 2^η/6/ 2008.



Σχήμα 5.14. Ημερήσια πορεία της διαπνοής της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) την 3^η/6/ 2008.

Από τα δύο παραπάνω Σχήματα φαίνεται πως οι τιμές της διαπνοής είναι μεγαλύτερες στο θερμοκήπιο μάρτυρας χωρίς, όμως, να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις τιμές της διαπνοής στα δύο θερμοκήπια. Η μέση τιμή της διαπνοής είναι στις 2.6.2008 της τάξης των 40 W m^{-2} και 35 W m^{-2} για το μάρτυρα και το θερμοκήπιο με 35% σκίαση. Οι τιμές αυτές είναι 35 W m^{-2} και 30 W m^{-2} για τα δύο θερμοκήπια στις 3.6.2008.

.Η διαφορά στις τιμές διαπνοής είναι της τάξης του 14% με 18 %. Οι διαφορές αυτές είναι πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες διαφορές της εισερχόμενης στο θερμοκήπιο μάρτυρας και στο θερμοκήπιο με 35% σκίαση που είναι της τάξης του 36%. Η προκύπτουσα, επομένως, διαφορά στις τιμές της διαπνοής είναι η μισή από την αντίστοιχη διαφορά στην εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στις τιμές της στοματικής αγωγιμότητας οι οποίες στο σκιασμένο θερμοκήπιο είναι πολύ κοντά στις τιμές του μάρτυρα. Υπάρχει μια εξισορροπητική επίδραση μεταξύ του μειωμένου ελλείμματος κορεσμού στο σκιασμένο θερμοκήπιο και της αντίστοιχης στοματικής αγωγιμότητας που επιτρέπει στο φυτό να διαπνέει σχεδόν το ίδιο με το μάρτυρα παρά τη σημαντική μείωση της εισερχόμενης ηλικακής ακτινοβολίας. Τον ίδιο τύπο ανάδρασης αναφέρουν οι Baille et al. (2001) σε καλλιέργεια τριανταφυλλιάς σε γυάλινο θερμοκήπιο όταν η οροφή του ασπρίσθηκε και οι Katsoulas et al. (2001) όταν χρησιμοποίησαν σύστημα δροσισμού με ομίχλη (mist system) που μείωσε το έλλειμμα δροσισμού του αέρα του θερμοκηπίου.

Τέλος, μια σημαντική επισήμανση είναι πως οι τιμές της διαπνοής είναι μικρές σχετικά με αντίστοιχες τιμές διαπνοής που μετρήθηκαν παλαιότερα από τους Baille et al. (2001) σε καλλιέργεια τριανταφυλλιάς σε θερμοκήπιο γυάλινο με άσπρισμα οροφής. Οι μικρές τιμές της διαπνοής τόσο στο θερμοκήπιο μάρτυρας όσο και στο θερμοκήπιο με σκίαση μπορεί να αποδοθούν στο ότι τα φυτά ήταν συνεχώς στρεσαρισμένα όπως προκύπτει από τις τιμές του ελλείμματος κορεσμού του αέρα σε όλα τα θερμοκήπια.

5.1.5. Επίδραση της σκίασης στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας

Η στοματική αγωγιμότητα g_c υπολογίζεται από τη σχέση 2.19 σύμφωνα με την οποία:

$$g_c = \frac{g_a g_t}{g_a + g_t} \quad (5.5)$$

όπου:

g_a = αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας (mm s^{-1})

g_t = ολική αγωγιμότητα της καλλιέργειας στη διάχυση υδρατμών (mm s^{-1}).

Η g_a μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$g_{a,l} = g_a / 2LAI$, άρα:

$$g_a = g_{a,l} \times 2LAI \quad (5.6)$$

όπου:

$g_{a,l}$ = η αεροδυναμική αγωγιμότητα του φύλλου (mm s^{-1}) και

LAI = δείκτης φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)

Για τον υπολογισμό της $g_{a,l}$ χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εμπειρική σχέση (Monteith, 1973):

$$g_{a,l} (\text{mm s}^{-1}) = 6.62 \left(\frac{V}{d} \right)^{0.5} \quad (5.7)$$

όπου V (m s^{-1}) είναι η μέση ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και d (m) είναι το χαρακτηριστικό μήκος ενός φύλλου αγγουριάς. Στη σχέση 5.6 η μέση ταχύτητα V υπολογίζεται από τη σχέση (Wang et al., 1999):

$$V = Q_{\text{vent}} / A_v \quad (5.8),$$

Όπου A_v είναι η κατακόρυφη τομή της επιφάνειας του θερμοκηπίου.

Για τον υπολογισμό της g_a χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές $LAI = 2.5$ και $d = 0,35 \text{ m}$

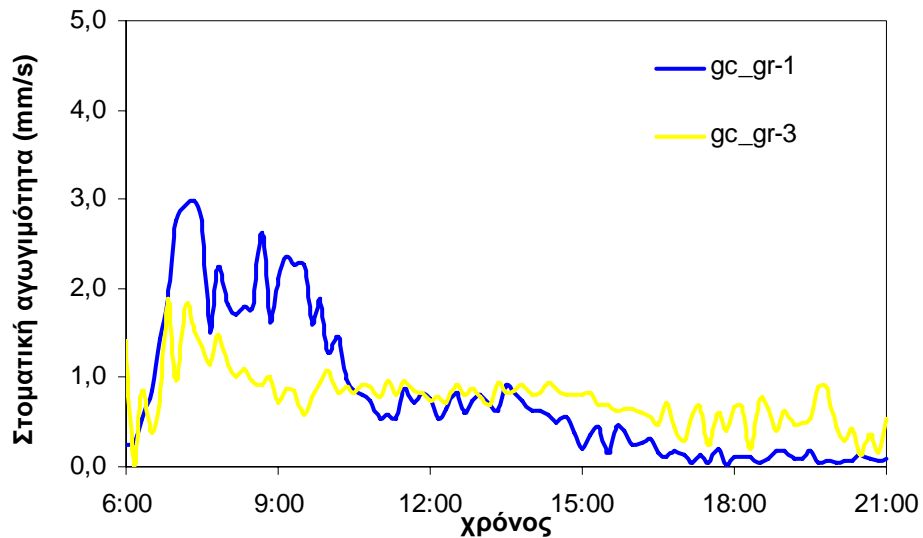
Η g_t υπολογίζεται από τη σχέση (2.18), σύμφωνα με την οποία

$$g_t = \lambda E_c / \{(\rho C_p / \gamma) \text{VPD}\} \quad (5.9)$$

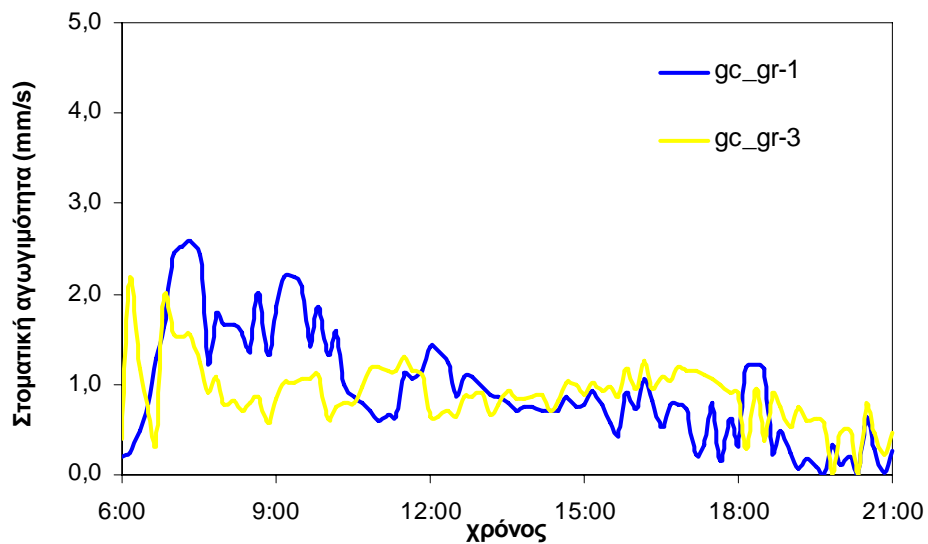
Σύμφωνα με τις σχέσεις (5.6) και (5.7) υπολογίσθηκε η μέση αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας η οποία είχε παραπλήσιες τιμές για όλες τις ημέρες και όλα τα θερμοκήπια λαμβάνοντας μια τιμή από 10 mm s^{-1} μέχρι 20 mm s^{-1} . Έτσι στη συνέχεια για τον υπολογισμό της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας σύμφωνα με τη σχέση (5.5) η τιμή της g_a θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 16 mm s^{-1} .

Με βάση τα παραπάνω υπολογίσθηκε η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_t για τα θερμοκήπια για τα οποία υπήρχαν μετρήσεις διαπνοής δηλαδή το θερμοκήπιο μάρτυρας και το θερμοκήπιο με 35% σκίαση.

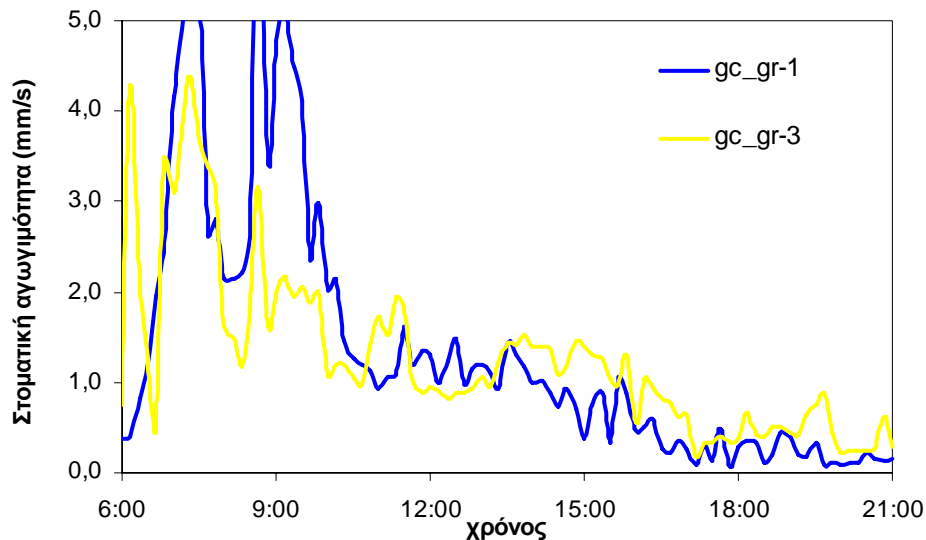
Η ημερήσια πορεία της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας φαίνεται στα παρακάτω Σχήματα 5.15, 5.16 και 5.17.



Σχήμα 5.15. Ημερήσια πορεία της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο μάρτυρας (gr_3) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (gr_1) την 1^η /6/ 2008.



Σχήμα 5.16. Ημερήσια πορεία της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο μάρτυρας (gr_3) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (gr_1) την 2^α/6/ 2008.



Σχήμα 5.17. Ημερήσια πορεία της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) την 3^η /6/ 2008.

Από τα παραπάνω Σχήματα φαίνεται πως κατά τη διάρκεια και των τριών ημερών που επιλέχθηκαν για ανάλυση οι τιμές της στοματικής αγωγιμότητας δε διαφέρουν πολύ μεταξύ των θερμοκηπίων χωρίς και με σκίαση και μάλιστα η στοματική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη στο θερμοκήπιο με σκίαση. Πράγματι, από τη στατιστική ανάλυση προέκυψε πως η μέση τιμή g_c ήταν και τις τρεις ημέρες μεγαλύτερη στο σκιασμένο θερμοκήπιο. Πιο συγκεκριμένα οι τιμές αυτές ήταν 0.77 mm s^{-1} και 0.79 mm s^{-1} την 1^η.06.08, 0.9 mm s^{-1} και 0.94 mm s^{-1} την 2^η.06.08 και 1.28 mm s^{-1} και 1.37 mm s^{-1} την 3^η.06.08 αντίστοιχα για το θερμοκήπιο μάρτυρας και για το θερμοκήπιο με σκίαση 35%. Διαπιστώνεται, έτσι, πως οι τιμές της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας είναι υψηλότερες τις ημέρες με συννεφιά σε σχέση με την ημέρα χωρίς συννεφιά. Φαίνεται, λοιπόν, πως η σκίαση βελτιώνει τη στοματική λειτουργία της καλλιέργειας. Αυτό εξηγεί και τη σχετικά αυξημένη διαπνοή σε συνθήκες σκίαση παρά τη σημαντική μείωση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Τα φυτά ακόμη και σε συνθήκες σκίασης έχουν τα στομάτια κλειστά και παρά το γεγονός πως το χαμηλότερο έλλειμμα κορεσμού επιτρέπει μεγαλύτερες τιμές της στοματικής αγωγιμότητας. Οι τιμές, όμως, της g_c είναι αρκετά χαμηλές περίπου σε σχέση με αντίστοιχες τιμές που είναι της τάξης των 2.5 mm s^{-1} για θερμοκήπιο χωρίς σκίαση και πολύ μεγαλύτερες, τουλάχιστον διπλάσιες, για θερμοκήπιο με άσπρισμα οροφής σε καλλιέργεια

τριανταφυλλιάς (Baille et al., 2001). Έτσι, ο συνδυασμός των μεγάλων τιμών της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας με τις εξαιρετικά μεγάλες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα του περιβάλλοντος κατά τη θερινή περίοδο στην περιοχή του πειράματος οδηγεί σε stress της καλλιέργειας το οποίο βελτιώνει η χρήση σκίασης με αύξηση των τιμών της στοματικής αγωγιμότητας, αλλά δεν το εξαλείφει με αποτέλεσμα να έχουμε μειωμένη διαπνοή.

Αντίστοιχες τιμές έχουμε και κατά την φθινοπωρινή περίοδο μετρήσεων

5.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΣΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Το ενεργειακό ισοζύγιο του θερμοκηπίου, σύμφωνα με τη σχέση (2.6) μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$$(1-\varepsilon) R_{n,i} = U (T_i - T_o) + \rho C_p N (V/S) (T_i - T_o)$$

Όπου:

ε = συντελεστής εξάτμισης

$R_{n,i}$ = η καθαρή ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, δηλαδή το εισερχόμενο θερμικό φορτίο, $W m^{-2}$

U = ολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του κελύφους του θερμοκηπίου, $W ^\circ C^{-1} m^{-2}$

T_i = θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου, $^\circ C$

T_o = θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα, $^\circ C$

ρ = πυκνότητα του αέρα, $kg m^{-3}$

C_p = ειδική θερμότητα του αέρα σε σταθερή πίεση, $J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$

N = ρυθμός ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου, s^{-1}

V = όγκος του θερμοκηπίου, m^3

S = επιφάνεια του εδάφους του θερμοκηπίου, m^2

Στην παραπάνω εξίσωση το γινόμενο NV αποτελεί την παροχή αερισμού του θερμοκηπίου Q_v . Έτσι, η παραπάνω σχέση γράφεται ως εξής:

$$(1-\varepsilon) R_{n,i} = U (T_i - T_o) + \rho C_p \frac{Q_v}{S} (T_i - T_o) \quad (5.1)$$

Όπου:

Q_v = παροχή αερισμού του θερμοκηπίου, $m^3 s^{-1}$

Στην εξίσωση που προτείνεται από την Αμερικανική Ένωση των Αγροτικών και Βιολογικών Μηχανικών (American Society of Agricultural and Biological Engineers, ASABE) για την έκφραση του ενεργειακού ισοζυγίου του θερμοκηπίου, και αποτελεί την βασική εξίσωση υπολογισμού της θέρμανσης και δροσίσμου των θερμοκηπίων, σύμφωνα με τα πρότυπα (standards) της ASABE, το εισερχόμενο θερμικό φορτίο λαμβάνεται συνήθως ίσο με την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία $R_{s,i}$, αφού, η εισερχόμενη καθαρή ακτινοβολία $R_{n,i}$ που αποτελεί καλύτερη εκτίμηση του θερμικού φορτίου που μπαίνει στο θερμοκήπιο, δεν είναι συνήθως διαθέσιμη (Katsoulas *et al.*, 2002).

Έτσι, σύμφωνα με την ASABE (ASABE, 2008), το ενεργειακό ισοζύγιο του θερμοκηπίου γράφεται στην ακόλουθη απλοποιημένη μορφή:

$$(1-\varepsilon) R_{s,i} = U (T_i - T_o) + \rho C_p \frac{Q_v}{S} (T_i - T_o) \quad (5.2)$$

Όπου:

$R_{s,i}$ = εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία, $W m^{-2}$

Η σχέση (5.2) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της επίδρασης της σκίασης στην ενεργειακή συμπεριφορά του θερμοκηπίου.

Ο συντελεστής ε είναι ένας «συντελεστής εξάτμισης» αντιπροσωπεύει το λόγο της λανθάνουσας θερμότητας που αποδίδεται από την καλλιέργεια και το έδαφος προς το θερμικό φορτίο που εισέρχεται στο θερμοκήπιο. Αν θεωρηθεί πως η εξάτμιση του εδάφους είναι αμελητέα, κάτι που είναι απόλυτα σωστό σε υδροπονικές καλλιέργειες (Κατσούλας, 2002) η λανθάνουσα θερμότητα ισούται με τη διαπνοή της καλλιέργειας λE . Αν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις της εισερχόμενης καθαρής ακτινοβολίας $R_{n,i}$ ο συντελεστής ε μπορεί να υπολογισθεί και από την σχέση:

$$\varepsilon = \frac{\lambda E}{R_{n,i}} \quad (5.3)$$

Από τη σχέση (5.3) φαίνεται πως πρακτικά ο συντελεστής ε εκφράζει το κομμάτι εκείνο του εισερχόμενου θερμικού φορτίου που δεν θερμαίνει τον αέρα αλλά καταναλώνεται για τη διαπνοή της καλλιέργειας.

Στη συνέχεια θα γίνει υπολογισμός του συντελεστή ε με δύο μεθόδους δηλαδή αφενός με τη χρήση της εξίσωσης του ενεργειακού ισοζυγίου (5.2) και αφετέρου με τη σχέση (5.3).

Από την εξίσωση (5.2) προκύπτει πως:

$$\varepsilon = 1 - \frac{U(T_i - T_o) + \rho c_p \left(\frac{Q_v}{S} \right)}{R_{s,i}} \quad (5.4)$$

Στη σχέση (5.4) η παροχή αερισμού του θερμοκηπίου υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (Kittas et al., 1996):

$$Q_v = \left\{ \frac{S_c}{2} C_d \sqrt{C_w} u \right\} \quad (5.5)$$

Όπου:

S_c = η επιφάνεια των ανοιγμάτων αερισμού του θερμοκηπίου, m^2

C_d = συντελεστής αποφόρτισης

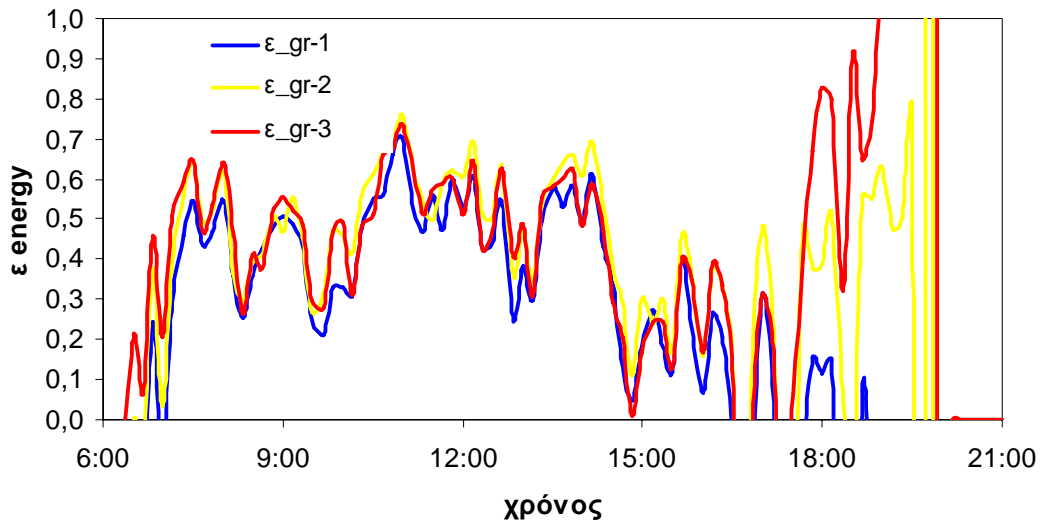
C_w = συντελεστής επίδρασης ανέμου

u = ταχύτητα εξωτερικού αέρα, $m s^{-1}$

Στη σχέση (5.5) ο συνδυασμένος συντελεστής $C_d \sqrt{C_w}$ ονομάζεται ολικός συντελεστής επίδρασης ανέμου (Kittas et al., 2002) και ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή αυτού στα πειραματικά μας θερμοκήπια έδωσε τιμή ίση με $C_d \sqrt{C_w} = 0.078 \pm 0.0057$ (Katsoulas et al., 2006).

Ο υπολογισμός των Q_v και ε έγινε με βάση τις σχέσεις (5.5) και (5.4) αντίστοιχα με τιμή για το συνδυασμένο συντελεστή $C_d \sqrt{C_w} = 0.078$, μια μέση τιμή του συντελεστή απωλειών $U = 8 W ^\circ C m^{-2}$ (Μαυρογιαννόπουλος, 2001), $\rho = 1.247 kg \cdot m^{-3}$, $c_p = 1012 J/(kg ^\circ C)$, $S_c = 27 m^2$, $S = 160 m^2$.

Στο παρακάτω Σχήμα 5.18 φαίνεται η ημερήσια πορεία του συντελεστή εξάτμισης ε υπολογισμένου σύμφωνα με τη σχέση (5.4) του ενεργειακού ισοζυγίου του θερμοκηπίου την 1^η.6.2008.



Σχήμα 5.18. Ημερήσια πορεία του συντελεστή εξάτμισης ε , υπολογισμένου με τη μέθοδο του ενεργειακού ισοζυγίου στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**) στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**) την 1^η /6/ 2008.

Φαίνεται πως οι τιμές του συντελεστή ε είναι πολύ κοντά και για τα τρία θερμοκήπια. Οι μέσοι όροι του ε είναι 0.45 για το θερμοκήπιο μάρτυρας, 0.43 για το θερμοκήπιο με σκίαση 35% και 0.43 για το θερμοκήπιο με σκίαση 50%. Και για τα τρία θερμοκήπια οι τιμές του ε για το διάστημα από τις 10:00 μέχρι τις 14:00 κυμαίνονται γύρω στο 0.4 με 0.5 με μέγιστη τιμή 0.7. Κατά τον Seginer (1997) ο συντελεστής ε παίρνει τιμές από 0 μέχρι 1 και η τιμή 1 αντιστοιχεί σε «πλούσια φυτοκάλυψη σε ερημικές συνθήκες». Οι Baille *et al.* (1994) έδωσαν τιμές μεταξύ 0.50-0.75 για υδροπονική καλλιέργεια τριανταφυλλιάς στο Νότο της Γαλλίας. Ανάλογες τιμές της τάξης των 0.6-0.7, βρήκαν για θερμοκηπιακή καλλιέργεια τομάτας οι Boulard *et al.* (1991) στην ίδια περιοχή.

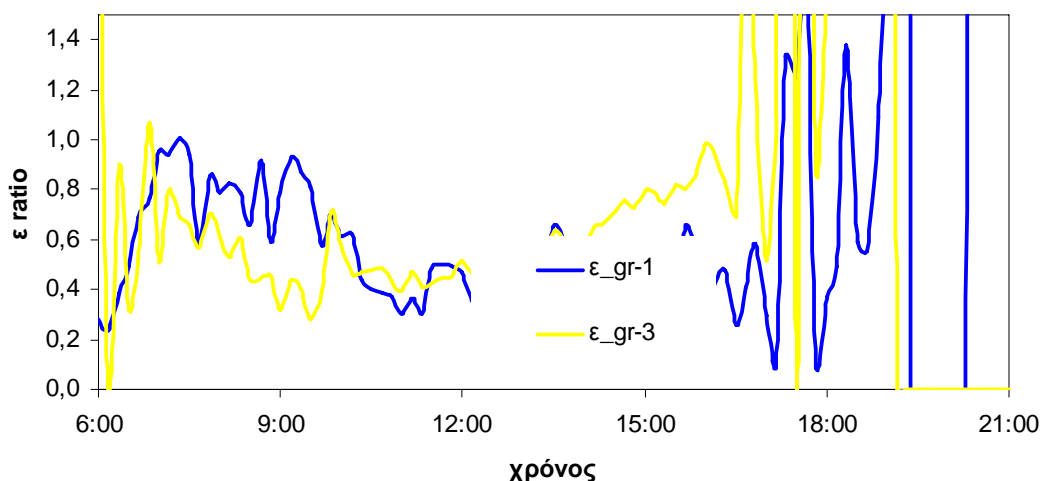
Γενικά, οι πολύ χαμηλές τιμές του συντελεστή ε αντιστοιχούν (Katsoulas *et al.*, 2002) σε πολύ υψηλό ηλιακό φορτίο του θερμοκηπίου ($R_{s,i} \approx 700 \text{ W m}^{-2}$) που δε μπορεί να ανακουφισθεί με τη διαπνοή της καλλιέργειας λόγω χαμηλής τιμής του δείκτη φυλλικής επιφάνειας ($LAI \leq 1$) και των συνθηκών καταπόνησης (stress) που προκαλούνται στο μικροκλίμα. Είναι καθαρά η περίπτωση όπου πρέπει να αποφεύγεται η καλλιέργεια στο θερμοκήπιο κατά το καλοκαίρι. Στην περίπτωση αυτή το θερμοκήπιο πρέπει να εξοπλισθεί με σύστημα δροσισμού (cooling pad ή fogging) το οποίο, όμως, πρέπει να σχεδιασθεί για μικρή τιμή του συντελεστή ε . Μεγάλες τιμές του ε (~ 1.15) αντιστοιχούν σε θερμοκήπιο

εξοπλισμένο με καλά σχεδιασμένο σύστημα ψύξης (σκίαση, δροσισμό) με πολύ πυκνή και καλά αναπτυγμένη φυλλική επιφάνεια και δείχνει καθαρά πως το σύστημα ψύξης επαρκεί. Στην περίπτωση δηλαδή αυτή φαίνεται πως η διαπνοή της καλλιέργειας είναι επαρκής για να εξουδετερώσει το εισερχόμενο θερμικό φορτίο και να διατηρήσει στο εσωτερικό του θερμοκηπίου τα κατάλληλα επίπεδα υγρασίας για βέλτιστη φυσιολογική συμπεριφορά της καλλιέργειας.

Οι τιμές που παρατηρούνται στο Σχήμα 5.18, και είναι κατά μ.ο. της τάξης του 0.5 και για τα τρία θερμοκήπια, δείχνουν πως παρά το γεγονός πως η καλλιέργεια έχει αρκετά ανεπτυγμένη φυλλική επιφάνεια ($LAI \sim 2.5$) η διαπνοή δεν επαρκεί να ανακουφίσει το εισερχόμενο θερμικό φορτίο. Έτσι, φαίνεται καθαρά πως για τις καλοκαιρινές συνθήκες της περιοχής Βελεστίνου η σκίαση (μέχρι και κατά 50%) ενός φυσικά αεριζόμενου θερμοκηπίου, δεν είναι αρκετή να οδηγήσει το μικροκλίμα του θερμοκηπίου εκτός stress αλλά είναι απαραίτητη η προσθήκη συστήματος δροσισμού με εξάτμιση προκειμένου να δημιουργήσει συνθήκες βιολογικής άνεσης για την καλλιέργεια.

Στο Σχήμα 5.19 φαίνεται η ημερήσια πορεία του συντελεστή ε υπολογισμένου σύμφωνα με τη σχέση (5.3) $\varepsilon = \frac{\lambda E}{R_{n,i}}$, για τα θερμοκήπια μάρτυρας και .με

σκίαση 35% για τα οποία υπήρχαν μετρήσεις της διαπνοής.



Σχήμα 5.19. Ημερήσια πορεία του συντελεστή εξάτμισης ε υπολογισμένου από το λόγο $\lambda E/R_{s,i}$ στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**), και στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) την 1^η/6/ 2008

Φαίνεται πως η πορεία του συντελεστή ε υπολογισμένου με τη μέθοδο αυτή είναι αντίστοιχη με τη πορεία του συντελεστή που υπολογίσθηκε με τη μέθοδο του ενεργειακού ισοζυγίου. Οι μέσες τιμές του ε είναι 0.49 για το θερμοκήπιο μάρτυρας και 0.53 για το θερμοκήπιο με σκίαση 35%.

Οι μικρές διαφορές που παρουσιάζονται στα αποτελέσματα υπολογισμού του συντελεστή εξάτμισης ε με τις δύο μεθόδους, οφείλονται, ενδεχόμενα, στους πολλούς συντελεστές που απαιτούνται για την εφαρμογή του ενεργειακού ισοζυγίου στη σχέση 5.5 σε σχέση με την μέθοδο του λόγου της διαπνοής προς την καθαρή ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου που χρησιμοποιεί απευθείας μετρήσεις και ως εκ τούτου μπορεί να θεωρηθεί πιο αξιόπιστη. Το γεγονός, όμως, πως και με τις δύο μεθόδους τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια δείχνει πως επειδή η μέθοδος (5.3) απαιτεί για την εφαρμογή της εξειδικευμένες μετρήσεις δύσκολα διαθέσιμες, η μέθοδος του ενεργειακού ισοζυγίου μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας των συστημάτων ψύξης στη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του οικοσυστήματος θερμοκήπιο.

Συμπερασματικά, λοιπόν, η ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου έδειξε πως ο συντελεστής εξάτμισης ε ακόμη και στα σκιασμένα θερμοκήπια δεν ξεπερνάει την τιμή 0.5, δείχνοντας έτσι πως η σκίαση ακόμη σε ποσοστό 50% δεν επαρκεί ως συμπληρωματικός εξοπλισμός του συστήματος φυσικού αερισμού για τον κλιματισμό του θερμοκηπίου στις συνθήκες που επικρατούν στον Θεσσαλικό κάμπο και χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και μεγάλες εξωτερικές θερμοκρασίες. Η σκίαση δε καταφέρνει να βγάλει την καλλιέργεια από τις συνθήκες καταπόνησης και επομένως ο βαθμός σύζευξης της καλλιέργειας με το εσωτερικό κλίμα είναι μεγάλος. Στη περίπτωση αυτή η συνιστώσα της ακτινοβολίας δεν είναι ο κύριος παράγοντας της διαπνοής της καλλιέργειας και γι' αυτό δεν επαρκεί η σκίαση. Ο κύριος όρος της διαπνοής στην περίπτωση του καλοκαιριού στη Θεσσαλία είναι ο αεροδυναμικός όρος. Ως εκ τούτου για να γίνει αποσύζευξη της καλλιέργειας από το εσωτερικό κλίμα και να ανακουφισθεί θα πρέπει το θερμοκήπιο του Θεσσαλικού κάμπου να είναι εξοπλισμένο κατά τη θερμή περίοδο με συστήματα που μειώνουν το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ώστε η καλλιέργεια να βρεθεί εκτός stress (Kittas et al., 2009). Τέτοια είναι τα

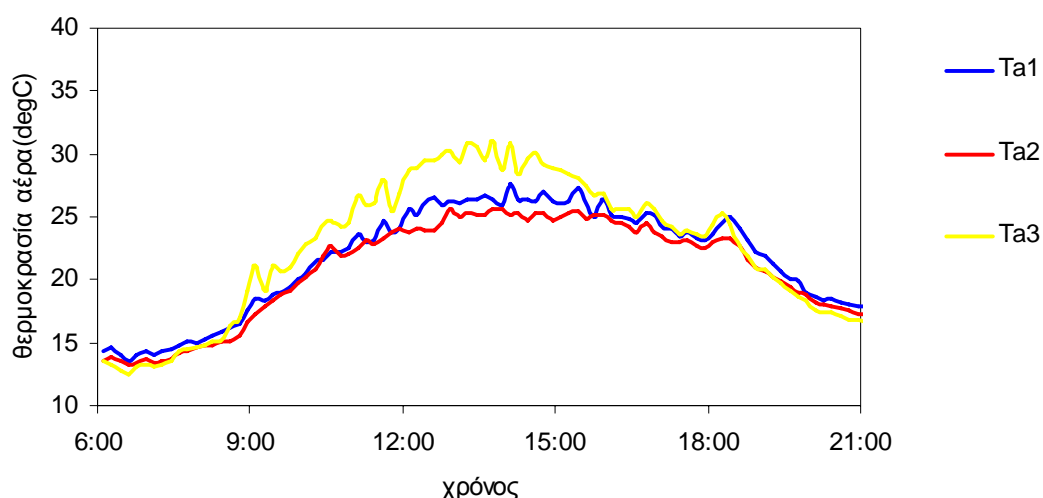
συστήματα δροσισμού με εξάτμιση, όπως το σύστημα fog και το σύστημα δυναμικού αερισμού και υγρής παρείας.

5.3. ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΙΚΡΟΚΛΙΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΦΘΙΝΟΠΩΡΙΝΗ ΠΕΡΙΟΔΟ

Η φθινοπωρινή καλλιέργεια αγγουριάς έγινε στα ίδια τρία θερμοκήπια με την ίδια σκίαση και τον ίδιο εξοπλισμό προκειμένου να γίνουν μετρήσεις φωτοσύνθεσης φύλλων αγγουριάς με τη συσκευή μέτρησης φωτοσύνθεσης, διαπνοής και στοματικής αγωγιμότητας φύλλου LCpro+ της ADC. Παράλληλα με τις μετρήσεις φωτοσύνθεσης τα αποτελέσματα των οποίων θα παρουσιασθούν στη συνέχεια έγιναν και ορισμένες συμπληρωματικές ενδεικτικές μετρήσεις μικροκλίματος αντίστοιχες αυτών που παρουσιάσθηκαν παραπάνω. Θα παρουσιασθούν ορισμένα χαρακτηριστικά αποτελέσματα της φθινοπωρινής περιόδου.

Στο παρακάτω Σχήμα 5.18 φαίνεται η ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μάρτυρα, αυτού με σκίαση 35% και του θερμοκηπίου με σκίαση 50%.

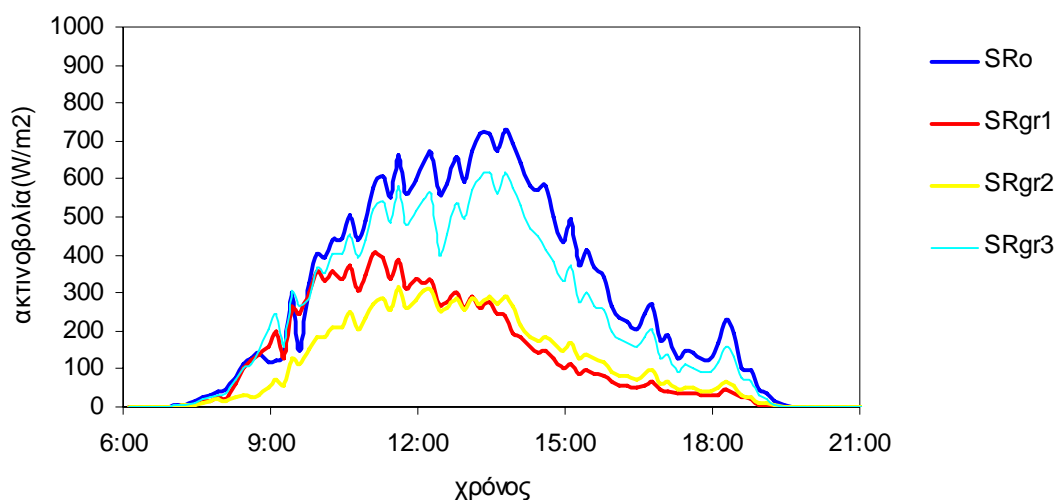
Φαίνεται πως οι θερμοκρασίες δε διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των τριών θερμοκηπίων. Η μέση θερμοκρασία είναι για το μάρτυρα 22.6 °C, για το θερμοκήπιο με σκίαση 35% 21,7 °C και για το θερμοκήπιο με σκίαση 50% 20.8 °C. Οι διαφορές αυτές δικαιολογούνται, όπως και για την εαρινή περίοδο, από τις διαφορές στις τιμές της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, όπως



Σχήμα 5.18. Ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας του αέρα στο θερμοκήπιο μάρτυρας κατά το φθινόπωρο, στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% την 19^η/9/ 2008.

φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.19 και σύμφωνα με το σκεπτικό που αναλύθηκε στην παράγραφο 5.1 για να εξηγηθούν οι μικρές διαφορές στη θερμοκρασία του αέρα στα τρία θερμοκήπια. Φαίνεται, επίσης, πως οι θερμοκρασίες στο εσωτερικό των θερμοκηπίων είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες της θερινής περιόδου κάτι που οφείλεται στις χαμηλότερες εξωτερικές θερμοκρασίες του φθινοπώρου και τις χαμηλότερες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

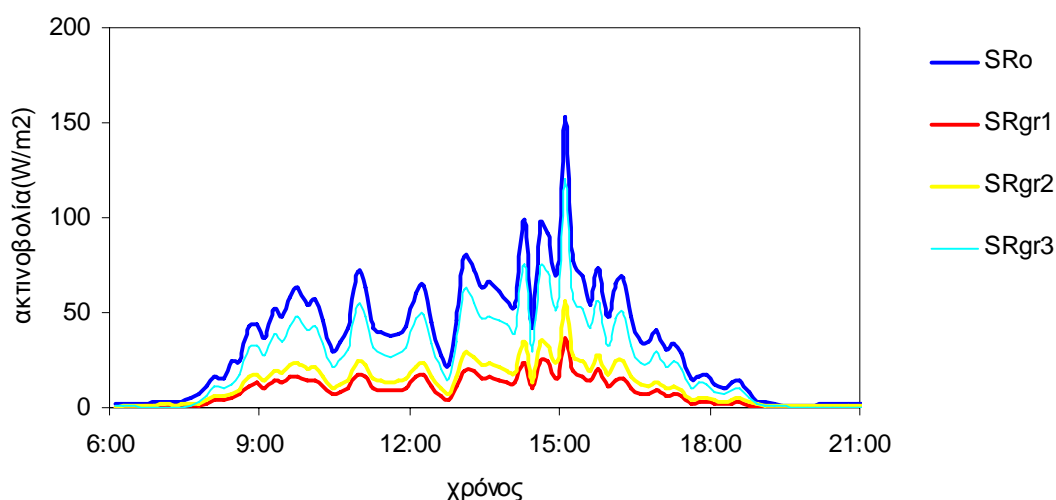
Στο Σχήμα 5.19 φαίνεται η ημερήσια πορεία την 19^η.9.2008 της προσπίπτουσας και της εισερχόμενης στα τρία θερμοκήπια ηλιακής ακτινοβολίας. Η μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 275 W m^{-2} , 231 W m^{-2} , 129 W m^{-2} και 111 W m^{-2} για το εξωτερικό περιβάλλον, το θερμοκήπιο μάρτυρας, το θερμοκήπιο 35% και το θερμοκήπιο 50% αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι σαφώς μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές της εαρινής περιόδου.



Σχήμα 5.19. Ημερήσια πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό των θερμοκηπίων, στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**), κατά το φθινόπωρο την 19^η/9/ 2008.

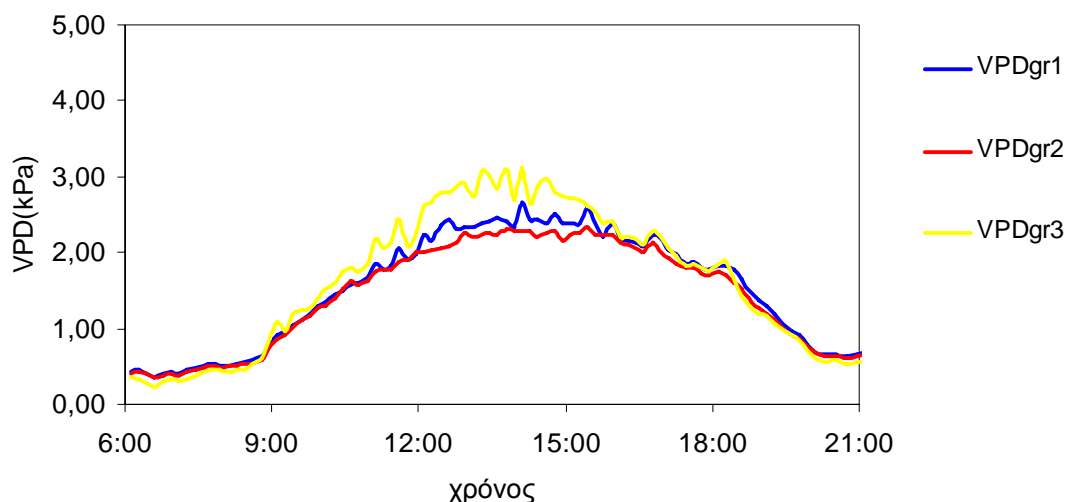
Φαίνεται, επίσης, πως στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία μειώνεται από το μεσημέρι και μετά στα επίπεδα του θερμοκηπίου με σκίαση 50%. Η μείωση αυτή μπορεί να εξηγηθεί από κακή

οριζοντίωση του αισθητήρα καταγραφής της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με σκίαση 35%. Αυτό μειώνει την προσπίπτουσα άμεση ακτινοβολία στον αισθητήρα με αποτέλεσμα τη μείωση της ολικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στον αισθητήρα. Όταν, όμως, υπάρχει συννεφιά και η εισερχόμενη στα θερμοκήπια ηλιακή ακτινοβολία είναι κυρίως διάχυτη, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% είναι καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας μεγαλύτερη από την αντίστοιχη που εισέρχεται στο θερμοκήπιο με σκίαση 50%, όπως φαίνεται και από το παρακάτω Σχήμα 2.20 που δείχνει την ημερήσια πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας έξω και μέσα στα θερμοκήπια στις 25. Σεπτεμβρίου 2008, μία φθινοπωρινή ημέρα με συννεφιά.



Σχήμα 5.20. Ημερήσια πορεία της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό των θερμοκηπίων, στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**), κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής ημέρας με συννεφιά, την 25^η/9/ 2008.

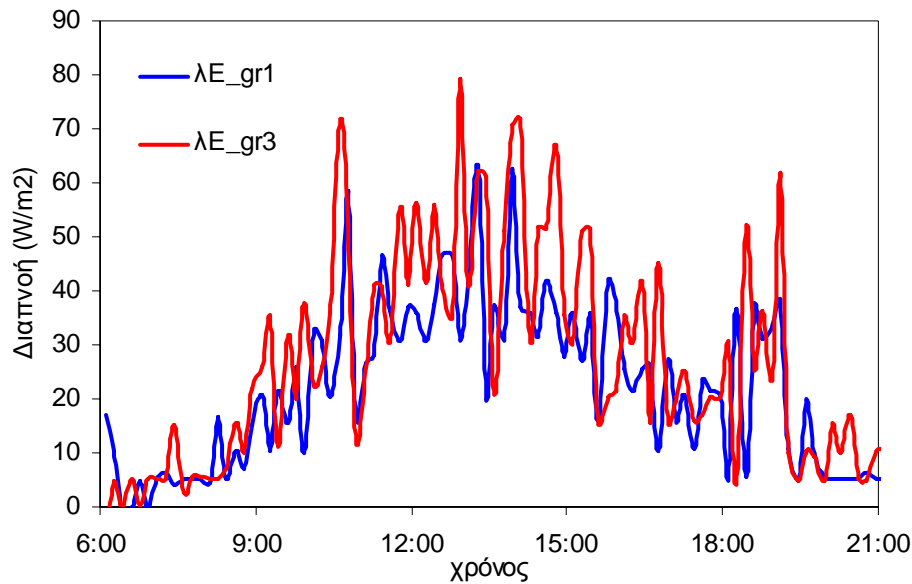
Στο παρακάτω Σχήμα 2.21 παρουσιάζεται η πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα VPD την 19^η.9.2008 στο εσωτερικό των τριών θερμοκηπίων.



Σχήμα 5.21. Ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**), στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 50% (**gr₂**), κατά το φθινόπωρο, την 19^η/9/ 2008.

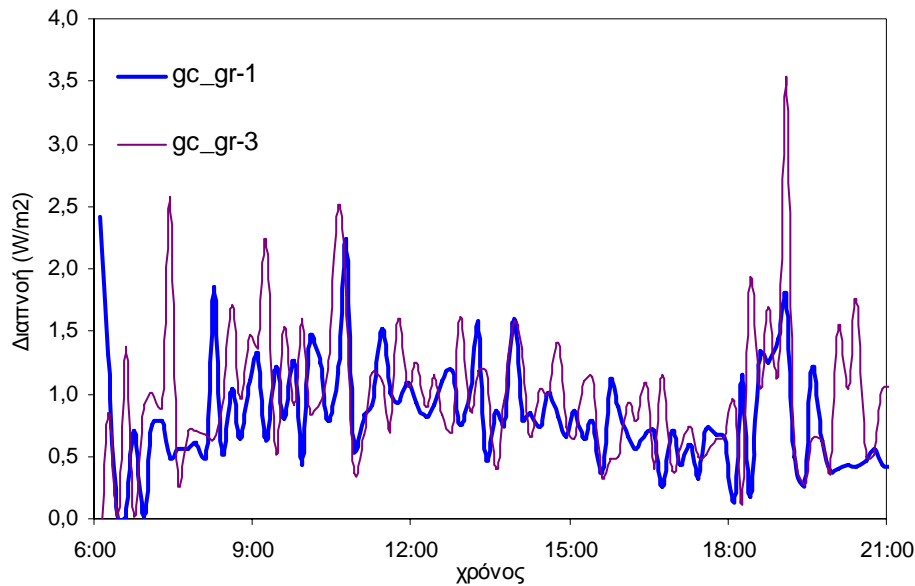
Από το παραπάνω Σχήμα 5.21 φαίνεται πως το έλλειμμα κορεσμού του αέρα παρουσιάζει ημερήσια πορεία ανάλογη με την αντίστοιχη πορεία στο εσωτερικό των θερμοκηπίων κατά το καλοκαίρι. Φυσικά, οι τιμές είναι σαφώς μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές του καλοκαιριού κάτι, όμως, αναμενόμενο λόγω των χαμηλότερων θερμοκρασιών του φθινοπώρου σε σχέση με το καλοκαίρι. Η μέγιστη τιμή του VPD είναι στο θερμοκήπιο μάρτυρας ήταν 3.11 kPa, στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% 2.70 kPa και στο θερμοκήπιο 50% 2.31 kPa. Φαίνεται, επομένως, πως η σκίαση βελτιώνει το έλλειμμα κορεσμού αλλά, όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.21 από τις 11:00 μέχρι τις 17:00 οι επικρατούσες συνθήκες VPD στο εσωτερικό και των τριών των θερμοκηπίων είναι συνθήκες stress αφού για το διάστημα αυτό το έλλειμμα κορεσμού είναι μεγαλύτερο των 2 kPa ((Katsoulas and Kittas 2008).

Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις τιμές της διαπνοής και της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας του θερμοκηπίου μάρτυρας και του θερμοκηπίου με σκίαση 35% που παρουσιάζονται για τη 19^η.9.2008 στα Σχήματα 5.22 και 5.23 αντίστοιχα.



Σχήμα 5.22. Ημερήσια πορεία της διαπνοής της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) το φθινόπωρο, την 19^η/9/ 2008.

. Έτσι, από το Σχήμα 5.22 φαίνεται πως οι τιμές της διαπνοής χαμηλές και στα δύο θερμοκήπια. Η μέγιστη τιμή είναι περίπου 70 W m^{-2} για την καλλιέργεια στο θερμοκήπιο μάρτυρας και γύρω στα 60 W m^{-2} για την καλλιέργεια στο θερμοκήπιο με σκίαση 35%. Οι μέσες τιμές της διαπνοής είναι 28 W m^{-2} και 23 W m^{-2} για το θερμοκήπιο μάρτυρας και με σκίαση 35% αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές του καλοκαιριού κάτι αναμενόμενο λόγω της μείωσης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στα δύο θερμοκήπια. Οι τιμές, πάντως, της διαπνοής είναι αρκετά κοντά διαφέροντας μόνο κατά 18% κατά μέσο όρο, ενώ οι αντίστοιχες διαφορές της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στα δύο θερμοκήπια είναι αρκετά μεγαλύτερες, της τάξης του 40%. Αυτό είχε παρατηρηθεί και κατά την περίοδο του καλοκαιριού και είχε αποδοθεί, σύμφωνα με αυτά που αναφέραμε στην παράγραφο 5.1 στο ότι η σκίαση ανακουφίζει την καλλιέργεια οδηγώντας την σε τιμές της στοματικής αγωγιμότητας παραπλήσιες και στα δύο θερμοκήπια.



Σχήμα 5.23. Ημερήσια πορεία της στοματικής αγωγιμότητας της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς στο θερμοκήπιο μάρτυρας (**gr₃**) και στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% (**gr₁**) το φθινόπωρο, την 19^η/9/ 2008.

Πράγματι, από το Σχήμα 5.23 φαίνεται πως οι τιμές της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας αν και μικρές είναι παραπλήσιες στα δύο θερμοκήπια εξηγώντας τις μικρές διαφορές στο ρυθμό διαπνοής στο εσωτερικό των δύο θερμοκηπίων.

5.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΣΚΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ ΣΤΗ ΦΩΤΟΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΦΥΛΛΟΥ

Οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης αφορούσαν μετρήσεις σε φύλλα από φυτά εκτεθειμένα αφενός σε συνθήκες διαφορετικής σκίασης και πιο συγκεκριμένα σε τρία (3) επίπεδα διαπερατότητας της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, και αφετέρου σε δύο (2) διαφορετικά επίπεδα αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος, ένα υψηλής και ένα χαμηλής. Έγιναν δύο σειρές μετρήσεων, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.9.3.2. Η πρώτη σειρά μετρήσεων έγινε με μετρήσεις των παραμέτρων της φωτοσύνθεσης σε συνθήκες φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των θερμοκηπίων. Η δεύτερη σειρά μετρήσεων φωτοσύνθεσης έγινε σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού, κατά τη διάρκεια ημερών με συννεφιά, με τη βοήθεια του ενσωματωμένου μηχανισμού ελέγχου και ρύθμισης της PAR με την χρήση διόδων LED, που διαθέτει η συσκευή μετρήσεων LCpro+ με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι

μετρήσεις. Η ένταση φωτισμού είχε ρυθμισθεί στο επίπεδο έντασης των 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ίδια και για το θερμοκήπιο μάρτυρας και για τα δύο σκιασμένα θερμοκήπια στην περιοχή PAR. Οι μετρήσεις με τεχνητό φωτισμό έγιναν με σκοπό να αξιολογηθεί αν οι καλλιέργειες που βρίσκονται σε διαφορετικές συνθήκες σκίασης (μάρτυρας, σκίαση 35% και σκίαση 50%) έχουν προσαρμοσθεί (εγκλιματισθεί) και αντιδρούν διαφορετικά ή όχι σε επίπεδο φύλλου στη φωτοσύνθεση και τις σχετικές παραμέτρους, διαπνοή, στοματική αγωγιμότητα.

Το φορητό σύστημα LCpro+ του οίκου ADC που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα μας για τις μετρήσεις του ρυθμού φωτοσύνθεσης του φύλλου κατά τη φθινοπωρινή καλλιεργητική περίοδο της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς, κατέγραφε, υπολόγιζε και αποθήκευε τα παρακάτω δεδομένα:

A= ρυθμός φωτοσύνθεσης φύλλου σε $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

E= ρυθμός διαπνοής φύλλου σε $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

g_s = στοματική αγωγιμότητα φύλλου σε $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

T_{leaf} = θερμοκρασία φύλλου σε $^{\circ}\text{C}$

e_{ref} = πίεση υδρατμών στο θάλαμο σε mbar.

Τα δεδομένα από τις μετρήσεις με το φορητό σύστημα φωτοσύνθεσης σε φύλλα της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς σύμφωνα με το πρωτόκολλο μετρήσεων που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.9.3.2 επεξεργάστηκαν στατιστικά με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου SPSS με σκοπό να διερευνηθούν σε φυσικές συνθήκες και σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού:

- i) Η επίδραση της σκίασης στη φωτοσύνθεση, διαπνοή και στοματική αγωγιμότητα.
- ii) Η επίδραση της αλατότητας στη φωτοσύνθεση, διαπνοή και στοματική αγωγιμότητα.
- iii) Η αλληλεπίδραση της σκίασης και αλατότητας στη φωτοσύνθεση, διαπνοή και στοματική αγωγιμότητα.

5.4.1. Μετρήσεις σε συνθήκες φυσικού φωτισμού

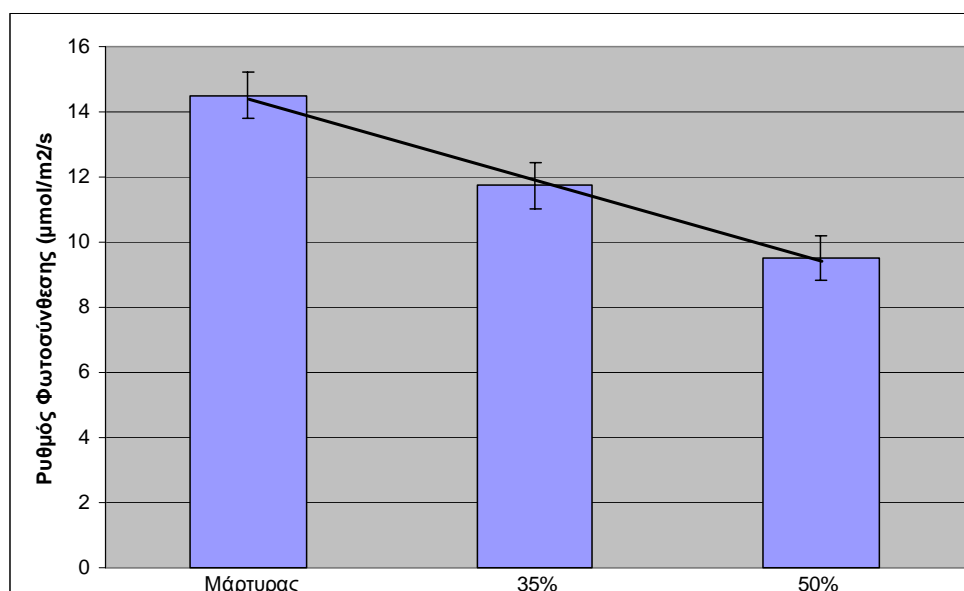
Η επεξεργασία των μετρήσεων που έγιναν κατά το διάστημα Σεπτεμβρίου-Νοεμβρίου 2008 σε φυσικές συνθήκες, έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα.

5.4.1.1 Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη φωτοσύνθεση

Στον παρακάτω Πίνακα 5.3 και στο Σχήμα 5.24 φαίνονται τα περιγραφικά στατιστικά του ρυθμού φωτοσύνθεσης A, για τα τρία θερμοκήπια.

Πίνακας 5.3. Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού φωτοσύνθεσης A στα θερμοκήπια μάρτυρας, με σκίαση 35% και με σκίαση 50% κατά τη περίοδο Σεπτέμβριος-Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο	Μέσος Όρος ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Απόκλ. ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Σφάλμα ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	
				Κάτω όριο ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Άνω όριο ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Μάρτυρας	14.50	3.76	0.704	13.091	15.899
Σκίαση 35%	11.7431	4.065	0.704	10.339	13.147
Σκίαση 50%	9.515	2.86961	0.704	8.111	10.919



Σχήμα 5.23. Μέσοι όροι ρυθμού φωτοσύνθεσης φύλλου στα θερμοκήπια μάρτυρας, με σκίαση 35% και με σκίαση 50%. Στο Σχήμα φαίνονται το τυπικό σφάλμα του μέσου όρου (κατακόρυφες ράβδοι) και η γραμμή τάσης για μετρήσεις του Φθινοπώρου 2008.

Από τον παραπάνω Πίνακα και το Σχήμα 5.24 φαίνεται πως η φωτοσύνθεση μειώνεται όσο αυξάνει η ένταση της σκίασης. Το μεγαλύτερο ρυθμό φωτοσύνθεσης παρουσιάζουν τα φύλλα του μάρτυρα και το μικρότερο του θερμοκηπίου με σκίαση 50%.

Στον Πίνακα 5.4 φαίνονται τα περιγραφικά στατιστικά του ρυθμού φωτοσύνθεσης για τις μεταχειρίσεις με υψηλή και χαμηλή αλατότητα.

Πίνακας 5.4. Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού φωτοσύνθεσης A σε φύλλα φυτών καλλιεργημένων σε συνθήκες θρεπτικού διαλύματος χαμηλής (2.3 dS m⁻¹) και υψηλής (6.3 dS m⁻¹) αλατότητας κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Αλατότητα	Μέσος Όρος ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Απόκλ. ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Σφάλμα ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	
				Κάτω όριο ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Άνω όριο ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Χαμηλή	11.872	4.07234	0.575	10.725	13.018
Υψηλή	11.964	4.18834	0.575	10.817	13.110

Από τα στοιχεία του Πίνακα 5.4 προκύπτει πως οι μέσοι όροι είναι παραπλήσιοι.

Τέλος, στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά της αλληλεπίδρασης Θερμοκήπιο* αλατότητα.

Πίνακας 5.5. Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού φωτοσύνθεσης A στα τρία θερμοκήπια για κάθε αλατότητα του θρεπτικού διαλύματος κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο	Αλατότητα	Μέσος Όρος ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Απόκλ. ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Σφάλμα ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Διάσ/μα . Εμπιστ/νης.	
					Κάτω όριο	Άνω όριο
Μάρτυρας	Χαμηλή	15.177	3.06724	0.996	13.191	17.162
	Υψηλή	13.812	4.37267	0.996	11.827	15.798
Σκίαση 35%	Χαμηλή	10.654	3.90751	0.996	8.668	12.639
	Υψηλή	12.832	4.07262	0.996	10.847	14.818
Σκίαση 50%	Χαμηλή	9.784	3.11051	0.996	7.798	11.769
	Υψηλή	9.246	2.70623	0.996	7.261	11.232

Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Διπαραγοντικής ανάλυσης παραλλακτικότητας (ANOVA) για τους παράγοντες θερμοκήπιο και αλατότητα και της αλληλεπίδρασής τους.

Πίνακας 5.6. Αποτελέσματα ανάλυσης παραλλακτικότητας της εξαρτημένης μεταβλητής ρυθμός φωτοσύνθεσης A, για τους παράγοντες θερμοκήπιο, αλατότητα και την αλληλεπίδρασή τους θερμοκήπιο*αλατότητα για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Πηγή Παραλλακτικότητας	Άθροισμα Τετραγώνων	Βαθμοί Ελευθερίας	Μέσο Τετράγωνο	F	Σημαντικότητα
Διορθωμένο Μοντέλο	368.373 ^a	5	73.675	5.713	0.000
Σταθερός Όρος	11078.210	1	11078.210	858.975	0.000
Θερμοκήπιο	323.543	2	161.771	12.543	0.000
Αλατότητα	0.165	1	0.165	0.013	0.910

Αλληλεπίδραση (Θερμοκήπιο* Αλατότητα)	44.665	2	22.333	1.732	0.184
Σφάλμα	928.584	72	12.897		
Σύνολο	12375.168	78			
Διορθωμένο Σύνολο	1296.958	77			

^a $R^2 = 0.284$ (Προσαρμοσμένο $R^2 = 0.234$)

Από τον παραπάνω Πίνακα 5.6 προκύπτει πως μόνον ο παράγοντας θερμοκήπιο ως πηγή παραλλακτικότητας είναι στατιστικά σημαντικός και επομένως οι μέσοι όροι του ρυθμού φωτοσύνθεσης διαφέρουν στατιστικώς μεταξύ των τριών θερμοκηπίων για επίπεδο σημαντικότητας 0.05.

Από τον ίδιο Πίνακα και την τελευταία στήλη του φαίνεται οι παράγοντες αλατότητα και αλληλεπίδραση θερμοκήπιο* αλατότητα δεν είναι σημαντικοί για το ρυθμό φωτοσύνθεσης της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς.

Εφόσον υπάρχουν διαφορές μεταξύ των τριών θερμοκηπίων, όσον αφορά τη φωτοσύνθεση, θα πρέπει να γίνουν περαιτέρω έλεγχοι (Post Hoc Tests) πολλαπλών συγκρίσεων μεταξύ των θερμοκηπίων για να δούμε σε ποια θερμοκήπια οι μέσοι όροι φωτοσύνθεσης διαφέρουν στατιστικά μεταξύ τους και να τους κατατάξουμε κατά φθίνουσα σειρά. Για το σκοπό αυτό έγιναν έλεγχοι: α) Ελάχιστης Σημαντικής Διαφοράς (LSD test) και β) Duncan μεταξύ των θερμοκηπίων μάρτυρας, με σκίαση 35% και με σκίαση 50% για την εξαρτημένη μεταβλητή Α.

Στον παρακάτω Πίνακα 5.7 φαίνονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των τριών θερμοκηπίων με την Ελάχιστη Σημαντική Διαφορά (ΕΣΔ).

Πίνακας 5.7. Αποτελέσματα πολλαπλής σύγκρισης του ρυθμού φωτοσύνθεσης στα θερμοκήπια μάρτυρας, με σκίαση 35% και με σκίαση 50% σύμφωνα με το κριτήριο Ε.Σ.Δ. (Ελάχιστης Σημαντικής Διαφοράς, LSD test) για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Ε.Σ.Δ.	Θερμοκήπιο (I)ν	Θερμοκήπιο (II)	Μέση Διαφορά (I-II)	Τυπικό Σφάλμα	Σημαντικότητα
	Μάρτυρας	Σκίαση 35%	2.7515	0.99603	0.007
		Σκίαση 50%	4.9796	0.99603	0.000
	Σκίαση 35%	Μάρτυρας	-2.7515	0.99603	0.007
		Σκίαση 50%	2.2281	0.99603	0.028
	Σκίαση 50%	Μάρτυρας	-4.9796	0.99603	0.000
		Σκίαση 35%	-2.2281	0.99603	0.028

Από τον παραπάνω Πίνακα φαίνεται πως τα τρία θερμοκήπια διαφέρουν, για επίπεδο σημαντικότητας 0.05, στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους με την καλλιέργεια στο θερμοκήπιο μάρτυρας να έχει το μεγαλύτερο ρυθμό φωτοσύνθεσης και την καλλιέργεια στο θερμοκήπιο με τη μεγαλύτερη σκίαση 50% να έχει τη μικρότερη φωτοσύνθεση.

Αυτό επιβεβαιώνεται και από τον έλεγχο με βάση το ακριβέστερο κριτήριο Duncan (Γαλανοπούλου, 2002) που βασίζεται στο Ελάχιστο Σημαντικό Εύρος (Duncan's Multiple Range Test). Το test αυτό ομαδοποιεί σε ομογενή υποσύνολα (subsets) τους μέσους όρους των διαφόρων επιπέδων (groups) που δε διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά. Τα αποτελέσματα του ελέγχου κατά Duncan φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 5.8 για επίπεδο σημαντικότητας 0.05.

Πίνακας 5.8. Αποτελέσματα πολλαπλής σύγκρισης του ρυθμού φωτοσύνθεσης στα θερμοκήπια μάρτυρας, με σκίαση 35% και με σκίαση 50% σύμφωνα με το κριτήριο Duncan για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο		Παρατηρήσεις	Υποσύνολο		
			1	2	3
Duncan	Σκίαση 50%	26	9.5150		
	Σκίαση 35%	26		11.7431	
	Μάρτυρας	26			14.4946
	Σημαντικότητα		1.000	1.000	1.000

Φαίνεται από τον Πίνακα αυτόν πως οι μέσοι όροι ρυθμού φωτοσύνθεσης διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά για τα τρία θερμοκήπια, αφού ο μ.ο. κάθε θερμοκηπίου εμφανίζεται σε διαφορετική στήλη (υποσύνολο) και επιβεβαιώνεται η κατάταξη που προέκυψε από την ανάλυση με το κριτήριο LSD (Πίνακας 5.7).

Οι τιμές του ρυθμού φωτοσύνθεσης στο θερμοκήπιο μάρτυρας είναι αντίστοιχες με τις τιμές που βρήκαν οι Mavrogianopoulos et al. (1999) για καλλιέργεια πεπονιού σε θερμοκήπιο στο Ηράκλειο Κρήτης και οι Lykoskoufis et al. (2005) για υδροπονική καλλιέργεια πιπεριάς σε θερμοκήπιο στην περιοχή της Αθήνας. Τα αποτελέσματα των ελέγχων για την επίδραση της σκίασης στο ρυθμό φωτοσύνθεσης έδειξαν πως η σκίαση επηρεάζει σχεδόν γραμμικά τη φωτοσύνθεση των φύλλων της καλλιέργειας αγγουριού (Σχήμα 5.23). Έτσι από $A = 14.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ στο θερμοκήπιο μάρτυρας έπεσε σε $A = 11.7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% και σε $A = 9.5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Φαίνεται πως η σκίαση 35% μειώνει το ρυθμό φωτοσύνθεσης κατά 20% και η σκίαση 50% τη μειώνει κατά 34%. Έτσι η σχέση ρυθμού φωτοσύνθεσης-σκίασης είναι σχεδόν γραμμική (Σχήμα 5.23) κάτι που επιτρέπει να συμπεράνουμε πως αύξηση της σκίασης κατά 10% οδηγεί σε μείωση του ρυθμού φωτοσύνθεσης κατά $0,80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Παραπλήσια αποτελέσματα βρήκαν και οι Schwartz et al. (2002) όταν έκαναν μετρήσεις φωτοσύνθεσης σε υδροπονική καλλιέργεια τομάτας σε θάλαμο ανάπτυξης στο Πανεπιστήμιο της Georgia των Η.Π.Α. και βρήκαν πως μείωση του επιπέδου ακτινοβολίας κατά 35% οδήγησε σε μείωση της φωτοσύνθεσης του φύλλου κατά $0,84 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Όσον αφορά την επίδραση της αλατότητας στη φωτοσύνθεση του φύλλου που σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάσθηκαν παραπάνω δεν είναι σημαντική, οι Mavrogiannopoulos et al, (1999) διαπίστωσαν μια πολύ αδύναμη συσχέτιση μεταξύ φωτοσύνθεσης και αλατότητας σε υδροπονική καλλιέργεια πεπονιού. Επίσης, οι Schwartz et al. (2002) διαπίστωσαν σε φυτά τομάτας που αναπτύχθηκαν σε κλειστό υδροπονικό σύστημα πως σε συνθήκες αλατότητας από 1.25 έως 8.75 dS m^{-1} η αυξημένη αλατότητα δεν επηρέασε το ρυθμό φωτοσύνθεσης του φύλλου. Μείωσε όμως την φωτοσύνθεση του φυτού κατά 1.7%- 4.5% ανά dS m^{-1} αύξησης της αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος, λόγω μείωσης της φυλλικής επιφάνειας σε αυξημένες EC.

Τέλος, αν και ελάχιστες εργασίες υπάρχουν για την αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στο ρυθμό φωτοσύνθεσης του φύλλου οι Schwartz et al. (2002) μελετώντας σε καλλιέργεια τομάτας διάφορα επίπεδα προσπίπτουσας φωτοσυνθετικά ενεργού ακτινοβολίας και διάφορες αλατότητες διαπίστωσαν πως δεν υπάρχει αλληλεπίδραση εισερχόμενης ακτινοβολίας και αλατότητας στο ρυθμό φωτοσύνθεσης του φύλλου συμφωνώντας με τα αποτελέσματα που παρουσιάσθηκαν παραπάνω (Πίνακας 5.6).

5.4.1.2. Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη διαπνοή του φύλλου

Στον παρακάτω Πίνακες 5.9 φαίνονται τα περιγραφικά στατιστικά του ρυθμού διαπνοής σε $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ για τα τρία θερμοκήπια, τα δύο επίπεδα αλατότητας και την αλληλεπίδρασή τους.

Φαίνεται από τον Πίνακα 5.9 πως η διαπνοή στο θερμοκήπιο μάρτυρας είναι μεγαλύτερη από τα σκιασμένα θερμοκήπια. Οι μέσοι όροι της διαπνοής των φύλλων της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς είναι σχεδόν παρόμοιοι και για τα δύο επίπεδα αλατότητας συνολικά και μέσα σε κάθε θερμοκήπιο (αλληλεπίδραση).

Πίνακας 5.9. Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού διαπνοής φύλλου E, στα τρία θερμοκήπια, στα δύο επίπεδα αλατότητας και για κάθε θερμοκήπιο και αλτότητα (αλληλεπίδραση) κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο	Αλατότητα	Μέσος Όρος ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 1)	Τυπ. Απόκλ. ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 1)	Τυπ. Σφάλμα ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 1)	Διάσ/μα . Εμπιστ/νης.	
					Κάτω όριο	Άνω όριο
Μάρτυρας	Χαμηλή	6.395	2.16007	0.417	5.564	7.225
	Υψηλή	6.184	1.26837	0.417	5.353	7.014
	Σύνολο	6.2892	1.73879	0.295	5.702	6.877
Σκίαση 35%	Χαμηλή	4.659	1.56865	0.417	3.829	5.490
	Υψηλή	4.622	1.60155	.417	3.791	5.452
	Σύνολο	4.6404	1.55327	0.295	4.053	5.228
Σκίαση 50%	Χαμηλή					
	Υψηλή	4.992	0.96307	0.417	4.161	5.822
	Σύνολο	5.1204	1.04516	0.295	4.533	5.708
Σύνολο	Χαμηλή	5.4344	1.78819	0.241	4.955	5.914
	Υψηλή	5.2656	1.43770	0.241	4.786	5.745
	Σύνολο	5.3500	1.61410	0.170	5.011	5.689

Αυτό επιβεβαιώνεται στατιστικά από στον παρακάτω Πίνακα 5.10 που δείχνει τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Παραλλακτικότητας (ANOVA) της εξαρτημένης μεταβλητής διαπνοή του φύλλου E, για τους παράγοντες θερμοκήπιο (μάρτυρας, σκίαση 35% και σκίαση 50%), αλατότητα (2.5 dS m^{-1} και 6.5 dS m^{-1}) και την αλληλεπίδραση θερμοκήπιο* αλατότητα.

Πίνακας 5.10. Αποτελέσματα ανάλυσης παραλλακτικότητας της εξαρτημένης μεταβλητής ρυθμός διαπνοής E, για τους παράγοντες θερμοκήπιο, αλατότητα και την αλληλεπίδρασή τους θερμοκήπιο*αλατότητα για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Πηγή Παραλλακτικότητας	Άθροισμα Τετραγώνων	Βαθμοί Ελευθερίας	Μέσο Τετράγωνο	F	Σημαντικότητα
Διορθωμένο Μοντέλο	38.129 ^a	5	7.626	3.379	0.008
Σταθερός Όρος	2232.555	1	2232.555	989.312	0.000
Θερμοκήπιο	37.399	2	18.700	8.286	0.001
Αλατότητα	0.555	1	0.555	0.246	0.621
Αλληλεπίδραση (Θερμοκήπιο* Αλατότητα)	0.175	2	8.727E-02	0.039	0.962
Σφάλμα	162.481	72	2.257		
Σύνολο	2433.164	78			
Διορθωμένο Σύνολο	200.609	77			

^a $R^2 = 0.190$ (Προσαρμοσμένο $R^2 = 0.134$)

Φαίνεται από τη στήλη της σημαντικότητας πως μόνον ο παράγοντας θερμοκήπιο είναι σημαντικός, δηλαδή υπάρχουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων όρων της E. Η αλατότητα δεν είναι στατιστικώς σημαντικός παράγοντας και επομένως δεν επηρεάζει τη διαπνοή του φύλλου. Το ίδιο συμβαίνει και με την αλληλεπίδραση θερμοκήπιο*αλατότητα που επίσης δε φαίνεται να επηρεάζει το ρυθμό τη διαπνοή του φύλλου της αγγουριάς.

Στους Πίνακες 5.11 και 5.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των συμπληρωματικών ελέγχων (Post Hoc tests) με τα κριτήρια ΕΣΔ (LSD) και Duncan αντίστοιχα, προκειμένου να διαπιστωθούν οι μεταξύ των θερμοκηπίων διαφορές στη διαπνοή του φύλλου της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς.

Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 5.11 και 5.12 διαπιστώνεται πως και με τα δύο κριτήρια LSD και Duncan υπάρχει στατιστικώς σημαντική διαφορά των μέσων όρων μεταξύ του θερμοκηπίου μάρτυρα και των σκιασμένων θερμοκηπίων, όχι όμως και μεταξύ των θερμοκηπίων με σκίαση 35% και σκίαση 50% τα οποία δε διαφέρουν. Από τον έλεγχο μάλιστα των μέσων όρων της διαπνοής των σκιασμένων θερμοκηπίων προκύπτει μεγαλύτερος

ρυθμός διαπνοής, αν και χωρίς στατιστική σημαντικότητα, στο θερμοκήπιο με τη μεγαλύτερη σκίαση.

Πίνακας 5.11. Αποτελέσματα πολλαπλής σύγκρισης του ρυθμού διαπνοής στα τρία θερμοκήπια κριτήριο Ε.Σ.Δ. (LSD) για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Ε.Σ.Δ.	Θερμοκήπιο (I)ν	Θερμοκήπιο (II)	Μέση Διαφορά (I-II)	Τυπικό Σφάλμα	Σημαντικότητα
	Μάρτυρας	Σκίαση 35%	1.6488	0.41664	0.000
		Σκίαση 50%	1.1688	0.41664	0.006
	Σκίαση 35%	Μάρτυρας	-1.6488	0.41664	0.253
		Σκίαση 50%	-0.4800	0.41664	0.000
	Σκίαση 50%	Μάρτυρας	-1.1688	0.41664	0.006
		Σκίαση 50%	0.4800	0.41664	0.253

Πίνακας 5.12. Αποτελέσματα πολλαπλής σύγκρισης του ρυθμού διαπνοής στα θερμοκήπια μάρτυρας, με σκίαση 35% και με σκίαση 50% σύμφωνα με το κριτήριο Duncan για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο		Παρατηρήσεις	Υποσύνολο	
			1	2
Duncan	Σκίαση 50%	26	5,1204	
	Σκίαση 35%	26	4,6404	
	Μάρτυρας	26		6,2892
	Σημαντικότητα		0,253	1,000

Οι τιμές διαπνοής του φύλλου που παρουσιάσθηκαν στον Πίνακα 5.10 είναι μεγαλύτερες από τις τιμές που βρήκαν οι Lykoskoufis et al. (2005) για καλλιέργεια πιπεριάς.

Οι τιμές του ρυθμού διαπνοής που δίδονται από τη συσκευή μέτρησης LCpro+ σε $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ είναι δυνατόν να εκφραστούν σε W m^{-2} αν θεωρήσουμε πως (Hanan, 1998) 1 mol νερού αντιστοιχεί σε 18g νερού και η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού είναι $\lambda = 2450000 \text{ J kg}^{-1}$. Έτσι, διαπνοή ρυθμού $1 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ αντιστοιχεί σε:

$$\frac{1}{1000} \frac{\text{mmol}}{\text{mol} * \text{s} * \text{m}^2} * \frac{1}{1000} \frac{\text{kg}}{\text{g}} * 18 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 2450000 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 44.1 \frac{\text{J}}{\text{s} * \text{m}^2} = \text{II } 44.1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Επομένως, οι τιμές ρυθμού διαπνοής στα τρία θερμοκήπια ήταν (Πίνακας 13):

Πίνακας 5.13. Μέσοι όροι του ρυθμού διαπνοής του φύλλου Ε σε $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ και σε W m^{-2} , στα τρία θερμοκήπια κατά την περίοδο Σεπτέμβριος-Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο	Ρυθμός Διαπνοής ($\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Ρυθμός Διαπνοής (W m^{-2})
Μάρτυρας	6.3	277.8
Σκίαση 35%	4.6	203
Σκίαση 50%	5.1	225

Οι τιμές του παραπάνω Πίνακα είναι πολύ κοντά στις που βρήκαν οι Medrano et al. (2005) οι οποίοι σε θερμοκήπιο με καλλιέργεια αγγουριάς σε περλίτη βρήκαν τιμές διαπνοής ανά m^2 φύλλου κατά το φθινόπωρο της τάξης των $250\text{--}300 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ κατά μ.ο. από 10:00 έως 14:00, που αντιστοιχούν σε ρυθμό διαπνοής της τάξης των $205\text{--}245 \text{ W m}^{-2}$. Οι ίδιοι ερευνητές διαπίστωσαν πως οι τιμές του ρυθμού δαιπνοής επηρεάζονται γραμμικά από τα επίπεδα της εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολίας επιβεβαιώνοντας έτσι την επίδραση της σκίασης στο ρυθμό διαπνοής που βρέθηκε στο πείραμά μας.

Επίσης κοντά στις τιμές του Πίνακα 5.13 βρίσκονται και τα αποτελέσματα των Nederhof et al. (1992) που βρήκαν για καλλιέργεια γλυκειάς πιπεριάς τιμές της διαπνοής του φύλλου κατά μ.ο. γύρω στα 200 W m^{-2} .

5.4.1.3. Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη στοματική αγωγιμότητα του φύλλου

Στους παρακάτω Πίνακες 5.14 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά της στοματικής αγωγιμότητας σε $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ για τα τρία θερμοκήπια, τα δύο επίπεδα αλατότητας και την αλληλεπίδρασή τους.

Από τα στοιχεία του Πίνακα 5.14 προκύπτει πως οι μέσοι όροι της στοματικής αγωγιμότητας των φύλλων της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς είναι σχεδόν παρόμοιοι για τα τρία θερμοκήπια, τα δύο επίπεδα αλατότητας συνολικά και την αλληλεπίδρασή τους θερμοκήπιο* αλατότητα.

Πίνακας 5.14 Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις της στοματικής αγωγιμότητας του φύλλου g_c , στα τρία θερμοκήπια, στα δύο επίπεδα αλατότητας και για κάθε θερμοκήπιο και αλατότητα (αλληλεπίδραση) κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο	Αλατότητα	Μέσος Όρος ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Απόκλ. ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Σφάλμα ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Διάσ/μα . Εμπιστ/νης.	
					Κάτω όριο	Άνω όριο
Μάρτυρας	Χαμηλή	1,070	0,54185	0,222	0,627	1,513
	Υψηλή	0,879	0,34466	0,222	0,436	1,322
	Σύνολο	0,975	0,45542	0,157	0,661	1,288
Σκίαση 35%	Χαμηλή	0,914	0,83908	0,222	0,471	1,357
	Υψηλή	1,165	0,81159	0,222	0,722	1,608
	Σύνολο	1,040	0,81888	0,157	0,726	1,353
Σκίαση 50%	Χαμηλή	1,172	1,32597	0,222	0,729	1,614
	Υψηλή	0,793	0,56361	0,222	0,350	1,236
	Σύνολο	0,982	1,01669	0,157	0,669	1,296
Σύνολο	Χαμηλή	1,052	0,93904	0,128	0,796	1,308
	Υψηλή	0,946	0,60977	0,128	0,690	1,202
	Σύνολο	0,999	0,78836	0,91	0,818	1,180

Στον Πίνακα 5.15 παρουσιάζεται η Ανάλυσης Παραλλακτικότητας της στοματικής αγωγιμότητας του φύλλου g_c , για τον παράγοντα θερμοκήπιο, τον παράγοντα αλατότητα και την αλληλεπίδραση τους.

Πίνακας 5.15 Αποτελέσματα ανάλυσης παραλλακτικότητας της στοματικής αγωγιμότητας g_c , για τους παράγοντες θερμοκήπιο, αλατότητα και την αλληλεπίδρασή τους θερμοκήπιο*αλατότητα για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Πηγή Παραλλακτικότητας	Άθροισμα Τετραγώνων	Βαθμοί Ελευθερίας	Μέσο Τετράγωνο	F	Σημαντικότητα
Διορθωμένο Μοντέλο	1,644 ^a	5	0.329	0.512	0.766
Σταθερός Όρος	77.820	1	77.820	121.247	0.000
Θερμοκήπιο	6.559E-02	2	3.280E-02	0.51	0.950
Αλατότητα	0.219	1	0.219	0.341	0.561
Αλληλεπίδραση (Θερμοκήπιο* Αλατότητα)	1.360	2	0.680	1.060	0.352
Σφάλμα	46.212	72	0.642		
Σύνολο	125.676	78			
Διορθωμένο Σύνολο	47.856	77			

^a $R^2 = 0.034$ (Προσαρμοσμένο $R^2 = -0.033$)

Από τη στήλη της σημαντικότητας Πίνακα 5.15, προκύπτει πως δεν υπάρχουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές των μέσων όρων της στοματικής αγωγιμότητας για κανένα από τους παράγοντες που εξετάστηκαν. Επομένως η σκίαση των θερμοκηπίων, η διαφορετική αλατότητα του θρεπτικού διαλύματος και η αλληλεπίδραση σκίαση* αλατότητα δεν φαίνεται να επηρεάζουν τη στοματική αγωγιμότητα της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς κατά τη φθινοπωρινή περίοδο.

Αφού η ANOVA δεν έδειξε διαφορές στους μέσους όρους της g_c για κανέναν από τους παράγοντες θερμοκήπιο, αλατότητα και την αλληλεπίδρασή τους, δεν απαιτούνται πρόσθετοι έλεγχοι με τα κριτήρια LSD και Duncan.

Οι τιμές στοματικής αγωγιμότητας που βρέθηκαν στα θερμοκήπια του πειράματός μας είναι παρόμοιες με τις τιμές της στοματικής αγωγιμότητας που βρήκαν οι Mavrogianopoulos et al, (1999) σε υδροπονική καλλιέργεια πεπονιού και μεγαλύτερες από τις τιμές που βρήκαν οι Lykoskoufis et al. (2005) σε καλλιέργεια πιπεριάς.

Επίσης, οι Mavrogianopoulos et al, (1999) διαπίστωσαν μια πολύ αδύναμη επίδραση της αλατότητας στις τιμές της στοματικής αγωγιμότητας σε υδροπονική καλλιέργεια πεπονιού συμφωνώντας ουσιαστικά με τα αποτελέσματά μας.

Οι τιμές του Πίνακα 5.15 δείχνουν τιμές της στοματικής αγωγιμότητας του φύλλου για τις συνθήκες του πειράματος της τάξης του $1 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Αν δεχθούμε πως η πυκνότητα των υδρατμών είναι 0.804 g/l και 1 l νερού σε μορφή υδρατμών περιέχει 55.5 moles , τότε 1 l νερού σε μορφή υδρατμών έχει όγκο 1.24 m^3 (Rosenberg et al. 1983). Έτσι, οι τιμές της στοματικής αγωγιμότητας που βρέθηκαν στο πείραμά μας και είναι της τάξης του $1 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ κατά μ.ο., αντιστοιχούν σε στοματική αγωγιμότητα της τάξης των $22,3 \text{ mm s}^{-1}$ περίπου.

Η τιμή αυτή είναι κοντά στις τιμές των Katsoulas et al. (2001) που βρήκαν τιμές της στοματικής αγωγιμότητας της τάξης των 20 mm s^{-1} για καλλιέργεια τριανταφυλλιάς σε σκιασμένο με άσπρισμα οροφής θερμοκήπιο στην περιοχή του Βόλου. Ανάλογες τιμές έδωσαν οι Nederhof et al. (1992) που για

υδροπονική καλλιέργεια γλυκειάς πιπεριάς σε θερμοκήπιο στην Ολλανδία έδωσαν τιμές της στοματικής αγωγιμότητας της τάξης των 15- 20 mm s⁻¹.

Στην παράγραφο 5.4.3.2 είδαμε πως οι τιμές του ρυθμού διαπνοής είναι στατιστικά ίδιες στα σκιασμένα θερμοκήπια και μικρότερες από το ρυθμό διαπνοής στο θερμοκήπιο μάρτυρας (Πίνακας 5.12). Είναι γνωστό πως τιμές της στοματικής αγωγιμότητας άνω των 20 mm s⁻¹, όπως είναι οι τιμές της g_c για τα φύλλα αγγουριάς στα τρία πειραματικά μας θερμοκήπια κατά το φθινόπωρο του 2008, αντιστοιχούν σε φυσιολογική κατάσταση φυτών που διαπνέουν ελεύθερα, βρίσκονται εκτός συνθηκών stress και τα στομάτιά τους είναι ανοικτά (Hanan, 1998). Επειδή σε τέτοιες συνθήκες ο ρυθμός διαπνοής τους είναι συνάρτηση της προσπίπτουσας στα φύλλα ηλιακής ακτινοβολίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο θάλαμο του φύλλου (Κατσούλας, 2000), η μεγαλύτερη διαπνοή στο θερμοκήπιο μάρτυρας δικαιολογείται από την μεγαλύτερη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του φύλλου. Για την μη ύπαρξη διαφοράς στη διαπνοή μεταξύ των θερμοκηπίων με σκίαση 35% και με σκίαση 50% θα πρέπει να εξετασθεί αν υπήρχαν διαφορές στο έλλειμμα κορεσμού του αέρα στο θάλαμο του φύλλου μεταξύ των θερμοκηπίων με σκίαση 35% και 50%. Το έλλειμμα κορεσμού στον αέρα του θαλάμου των φύλλων της συσκευής LCpro+ μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$VPD_c = e_{sat,c} - e_{ref} \quad (5.6)$$

όπου:

VPD_c = έλλειμμα κορεσμού του αέρα στο θάλαμο του φύλλου, kPa

$e_{sat,c}$ = πίεση υδρατμών κορεσμού για την θερμοκρασία του αέρα, kPa.

e_{ref} = πίεση υδρατμών του αέρα στο θάλαμο του φύλλου, kPa

Η πίεση υδρατμών κορεσμού για τη θερμοκρασία του αέρα στο θάλαμο του φύλλου μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση (Howell and Dusek, 1995):

$$e_{sat,c} = \frac{0,611 * e^{17,27 * T_{a,c}}}{(T_{a,c} + 273) - 36} \quad (5.7)$$

όπου:

$T_{a,c}$ = θερμοκρασία του αέρα στο θάλαμο του φύλλου, °C

Υπολογίζοντας από τα δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων το έλλειμμα κορεσμού του αέρα στο θάλαμο του φύλλου σύμφωνα με τη σχέση (5.6), προβήκαμε σε ανάλυση παραλλακτικότητας για την εξαρτημένη μεταβλητή VPD_c προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπήρχαν διαφορές στα τρία θερμοκήπια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους παρακάτω Πίνακες 5.16, 5.17 και 5.18.

Πίνακας 5.16. Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο θάλαμο του φύλλου VPD_c , στα τρία θερμοκήπια, στα δύο επίπεδα αλατότητας και για κάθε θερμοκήπιο και αλατότητα (αλληλεπίδραση) κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο	Αλατότητα	Μέσος Όρος ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Απόκλ. ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Σφάλμα ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Διάσ/μα . Εμπιστ/νης.	
					Κάτω όριο	Άνω όριο
Μάρτυρας	Χαμηλή	3.2742	0.48863	0.173	2.929	3.619
	Υψηλή	3.3621	0.44202	0.173	3.017	3.707
	Σύνολο	3.3181	0.45869	0.122	3.074	3.562
Σκίαση 35%	Χαμηλή	2.9193	0.70327	0.173	2.574	3.264
	Υψηλή	2.5401	0.96001	0.173	2.195	2.885
	Σύνολο	2.7297	0.84685	0.122	2.486	2.974
Σκίαση 50%	Χαμηλή	3.2330	0.45601	0.173	2.888	3.578
	Υψηλή	3.1476	0.52735	0.173	2.803	3.493
	Σύνολο	3.1903	0.48497	0.122	2.946	3.434
Σύνολο	Χαμηλή	3.142	0.56835	0.100	2.943	3.341
	Υψηλή	3.017	0.75162	0.100	2.817	3.216
	Σύνολο	3.0794	0.66498			

Πίνακας 5.17. Αποτελέσματα ανάλυσης παραλλακτικότητας του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο θάλαμο του φύλλου VPD_c , για τους παράγοντες θερμοκήπιο, αλατότητα και την αλληλεπίδρασή τους θερμοκήπιο*αλατότητα για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Πηγή Παραλλακτικότητας	Άθροισμα Τετραγώνων	Βαθμοί Ελευθερίας	Μέσο Τετράγωνο	F	Σημαντικότητα
Διορθωμένο Μοντέλο	6.013 ¹	5	1.203	3.088	0.014
Σταθερός Όρος	739.634	1	739.634	1899.429	0.000
Θερμοκήπιο	4.981	2	2.490	6.395	0.003
Αλατότητα	0.307	1	0.307	0.790	0.377
Αλληλεπίδραση (Θερμοκήπιο* Αλατότητα)	0.725	2	0.362	0.931	0.399
Σφάλμα	28.037	72	0.389		
Σύνολο	773.683	78			
Διορθωμένο Σύνολο	34.050	77			

^a $R^2 = 0.177$ (Προσαρμοσμένο $R^2 = 0.119$)

Πίνακας 5.18. Αποτελέσματα πολλαπλής σύγκρισης του του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο θάλαμο του φύλλου VPD_c στα θερμοκήπια μάρτυρας, με σκίαση 35% και με σκίαση 50% σύμφωνα με το κριτήριο Duncan για επίπεδο σημαντικότητας 0.05 και για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο		Παρατηρήσεις	Υποσύνολο	
			1	2
Duncan	Σκίαση 50%	26		3.1903
	Σκίαση 35%	26	2.7297	
	Μάρτυρας	26		3.3181
	Σημαντικότητα		1.000	0.462

Φαίνεται πως το έλλειμμα κορεσμού είναι στατιστικά μικρότερο στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% σε σχέση με το θερμοκήπιο με σκίαση 50% και το μάρτυρα. Δοθέντος ότι τα φύλλα αγγουριάς ήταν σε καλή κατάσταση, εκτός stress, το μεγαλύτερο έλλειμμα κορεσμού του αέρα στο θάλαμο του φύλλου του θερμοκηπίου με σκίαση 50% εξηγεί, ίσως, τις μεγαλύτερες τιμές διαπνοής στο θερμοκήπιο αυτό σε σχέση με τις τιμές διαπνοής στο θερμοκήπιο με σκίαση 35% παρά τη μεγαλύτερη ένταση του εισερχόμενου φορτίου ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο αυτό.

Τέλος, από τις μετρήσεις του ρυθμού φωτοσύνθεσης διαπιστώθηκε σαφής διαφορά μεταξύ των τριών θερμοκηπίων ενώ ταυτόχρονα η στοματική αγωγιμότητα του φύλλου ήταν στατιστικά ίδια και στα τρία θερμοκήπια. Η διαπίστωση αυτή υποστηρίζεται και από τα αποτελέσματα των Bethke and Drew (1992), οι οποίοι βρήκαν πως μείωση της φωτοσύνθεσης δε συνοδεύεται απαραίτητα από κλείσιμο των στοματίων. Σύμφωνα με τους Downton et al. (1985) και Brugnoli and Lauteri (1991) η φωτοσύνθεση μειώνεται αρχικά σε βιοχημικό επίπεδο στους χλωροπλάστες και όχι λόγω κλεισίματος των στοματίων. Ενδεχομένως, τα χαμηλότερα επίπεδα εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό των θερμοκηπίων μειώνουν τη συγκέντρωση χλωροφύλλης στα φύλλα και επομένως τη φωτοσυνθετική δραστηριότητά του Downton et al. (1985).

5.4.2. Μετρήσεις σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού

Οι μετρήσεις των παραμέτρων φωτοσύνθεσης έγιναν με ένταση φωτισμού $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ σύμφωνα με κατάλληλη ρύθμιση της συσκευής μέτρησης φωτοσύνθεσης PCpro+ της ADC. Σκοπός των μετρήσεων αυτών ήταν να

διερευνηθεί με ποιο τρόπο τα φυτά των τριών θερμοκηπίων που ήταν εκτεθειμένα σε διαφορετικές συνθήκες σκίασης αντιδρούσαν στην ίδια ένταση προσπίπτοντος φωτός των $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, αν είχαν δηλαδή προσαρμοσθεί ή όχι στις συνθήκες σκίασης. Έγιναν συνολικά 84 μετρήσεις (28 σε κάθε θερμοκήπιο) φωτοσύνθεσης με σταθερό φωτισμό κατά τη διάρκεια συνεφιασμένων ημερών κατά Σεπτεμβρίου- Νοεμβρίου 2008. Η επεξεργασία των μετρήσεων έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα.

5.4.2.1 Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη φωτοσύνθεση

Στους παρακάτω Πίνακες 5.19, 5.20 και 5.21 φαίνονται τα περιγραφικά των μέσων όρων του ρυθμού φωτοσύνθεσης A με σταθερό φωτισμό, για τα τρία θερμοκήπια, τα δύο επίπεδα αλατότητας και την αλληλεπίδραση θερμοκήπιο*αλατότητα αντίστοιχα.

Πίνακας 5.19. Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού φωτοσύνθεσης A με σταθερό τεχνητό φωτισμό στα θερμοκήπια μάρτυρας, με σκίαση 35% και με σκίαση 50% κατά τη περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο	Μέσος Όρος ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Απόκλ. ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Σφάλμα ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	
				Κάτω όριο ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Άνω όριο ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Μάρτυρας	11.579	4.29414	0.639	10.307	12.852
Σκίαση 35%	12.089	2.80532	0.639	10.816	13.361
Σκίαση 50%	10.584	2.78850	0.639	9.311	11.857

Πίνακας 5.20. Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού φωτοσύνθεσης A με σταθερό τεχνητό φωτισμό σε φύλλα φυτών καλλιεργημένων σε συνθήκες θρεπτικού διαλύματος χαμηλής (2.3 dS m^{-1}) και υψηλής (6.3 dS m^{-1}) αλατότητας κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Αλατότητα	Μέσος Όρος ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Απόκλ. ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Σφάλμα ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	
				Κάτω όριο ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Άνω όριο ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Χαμηλή	11.129	3.21604	0.522	10.090	12.168
Υψηλή	11.705	3.56837	0.522	10.666	12.745

Πίνακας 5.21. Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού φωτοσύνθεσης A με σταθερό τεχνητό φωτισμό στα τρία θερμοκήπια για κάθε αλατότητα του θρεπτικού διαλύματος κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο	Αλατότητα	Μέσος Όρος ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Απόκλ. ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Σφάλμα ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Διάσ/μα . Εμπιστ/νης.	
					Κάτω όριο	Άνω όριο
Μάρτυρας	Χαμηλή	10.996	3.75719	0.904	9.196	12.796
	Υψηλή	12.163	4.84228	0.904	10.363	13.963
Σκίαση 35%	Χαμηλή	12.499	2.64665	0.904	10.699	14.299
	Υψηλή	11.678	2.99616	0.904	9.878	13.478
Σκίαση 50%	Χαμηλή	9.892	2.79462	0.904	8.092	11.692
	Υψηλή	11.28	2.70351	0.904	9.476	13.076

Από τους παραπάνω Πίνακες 5.19, 5.20 και 5.21 φαίνεται πως οι μέσοι όροι του ρυθμού φωτοσύνθεσης με σταθερό τεχνητό φωτισμό για τα τρία θερμοκήπια, τις δύο αλατότητες και την αλληλεπίδραση τους είναι σχεδόν παρόμοιοι.

Αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης παραλλακτικότητας (ANOVA) της φωτοσύνθεσης σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού για το θερμοκήπιο, για τις πηγές παραλλακτικότητας θερμοκήπιο, αλατότητα και αλληλεπίδρασή τους, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.21.

Πίνακας 5.21. Αποτελέσματα ανάλυσης παραλλακτικότητας της εξαρτημένης μεταβλητής ρυθμός φωτοσύνθεσης A με σταθερό τεχνητό φωτισμό, για τους παράγοντες θερμοκήπιο, αλατότητα και την αλληλεπίδρασή τους θερμοκήπιο*αλατότητα για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος-Νοέμβριος 2008.

Πηγή Παραλλακτικότητας	Άθροισμα Τετραγώνων	Βαθμοί Ελευθερίας	Μέσο Τετράγωνο	F	Σημαντικότητα
Διορθωμένο Μοντέλο	60.457 ^a	5	12.091	1.057	0.391
Σταθερός Όρος	10949.725	1	10949.725	956.798	0.000
Θερμοκήπιο	32.798	2	16.399	1.433	0.245
Αλατότητα	6.978	1	6.978	0.610	0.437
Αλληλεπίδραση (Θερμοκήπιο* Αλατότητα)	20.681	2	10.340	0.904	0.409
Σφάλμα	892.642	78	11.444		
Σύνολο	11902.824	84			
Διορθωμένο Σύνολο	953.099	83			

^a $R^2 = 0.063$ (Προσαρμοσμένο $R^2 = 0.003$)

Από τη στήλη της σημαντικότητας του παραπάνω Πίνακα φαίνεται πως δεν υπάρχουν στατιστικώς σημαντικές διαφορές του ρυθμού φωτοσύνθεσης σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού ούτε μεταξύ των τριών θερμοκηπίων, ούτε μεταξύ των δύο επιπέδων αλατότητας συνολικά και σε κάθε θερμοκήπιο (αλληλεπίδραση).

Έτσι, σε συνθήκες σταθερού φωτισμού $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ η φωτοσύνθεση των φύλλων αγγουριάς καλλιεργημένης σε υπόστρωμα περλίτη δεν επηρεάζεται από τη σκίαση, την αλατότητα και την αλληλεπίδραση σκίαση*αλατότητα, για επίπεδο σημαντικότητας 0.05.

5.4.2.2. Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη διαπνοή του φύλλου

Στους Πίνακες 5.22 και 5.23 φαίνονται τα περιγραφικά στατιστικά και η ανάλυση παραλλακτικότητας αντίστοιχα της εξαρτημένης μεταβλητής ρυθμός διαπνοής σε $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού, για τα τρία θερμοκήπια, τα δύο επίπεδα αλατότητας και την αλληλεπίδρασή τους.

Πίνακας 5.22. Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις ρυθμού διαπνοής φύλλου Ε, στα τρία θερμοκήπια, στα δύο επίπεδα αλατότητας και για κάθε θερμοκήπιο και αλατότητα (αλληλεπίδραση) κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο	Αλατότητα	Μέσος Όρος ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 1)	Τυπ. Απόκλ. ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 1)	Τυπ. Σφάλμα ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 1)	Διάσ/μα . Εμπιστ/νης.	
					Κάτω όριο	Άνω όριο
Μάρτυρας	Χαμηλή	3.104	1.29932	0.226	2.654	3.553
	Υψηλή	2.567	0.76873	0.226	2.118	3.017
	Σύνολο	2.835	1.08258	0.160	2.518	3.153
Σκίαση 35%	Χαμηλή	3.101	0.85223	0.226	2.651	3.550
	Υψηλή	2.827	0.65248	0.226	2.378	3.277
	Σύνολο	2.964	0.75768	0.160	2.646	3.282
Σκίαση 50%	Χαμηλή	2,7514	0,41842	0,226	2,302	3,201
	Υψηλή	2,911	0,82084	0,226	2,461	3,360
	Σύνολο	2,831	0,64443	0,160	2,513	3,149
Σύνολο	Χαμηλή	2,985	0,92146	0,130	2,726	3,245
	Υψηλή	2,768	0,74694	0,130	2,509	3,028
	Σύνολο	2,8768	0,84079			

Πίνακας 5.23. Αποτελέσματα ανάλυσης παραλλακτικότητας της εξαρτημένης μεταβλητής ρυθμός διαπνοής E, για τους παράγοντες θερμοκήπιο, αλατότητα και την αλληλεπίδρασή τους θερμοκήπιο*αλατότητα για μετρήσεις κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Πηγή Παραλλακτικότητας	Άθροισμα Τετραγώνων	Βαθμοί Ελευθερίας	Μέσο Τετράγωνο	F	Σημαντικότητα
Διορθωμένο Μοντέλο	3,035 ^a	5	0.607	0.851	0.518
Σταθερός Όρος	695.175	1	695.175	974.533	0.000
Θερμοκήπιο	0.319	2	0.160	0.224	0.800
Αλατότητα	0.988	1	0.988	1.385	0.243
Αλληλεπίδραση (Θερμοκήπιο* Αλατότητα)	1.728	2	0.864	1.211	0.303
Σφάλμα	55.641	78	0.713		
Σύνολο	753.851	84			
Διορθωμένο Σύνολο	58.676	83			

^a $R^2 = 0.052$ (Προσαρμοσμένο $R^2 = -0.009$)

Φαίνεται από τους Πίνακα 5.22 και 5.23 πως η διαπνοή του φύλλου της αγγουριάς δεν παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές διαφορές στα τρία θερμοκήπια, στα δύο επίπεδα αλατότητας σε κάθε θερμοκήπιο και συνολικά (αλληλεπίδραση). Επομένως ούτε η διαπνοή του φύλλου της υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς επηρεάζεται από τη σκίαση και την αλατότητα σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. στο θερμοκήπιο μάρτυρας είναι μεγαλύτερη από τα σκιασμένα θερμοκήπια.

5.4.2.3. Επίδραση και αλληλεπίδραση σκίασης και αλατότητας στη στοματική αγωγιμότητα του φύλλου

Τέλος, στους παρακάτω Πίνακες 5.24 και 5.25 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά της στοματικής αγωγιμότητας σε $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ για τα τρία θερμοκήπια, τα δύο επίπεδα αλατότητας και την αλληλεπίδρασή τους σε συνθήκες τεχνητού φωτισμού .

Πίνακας 5.24 Μέσος όρος, τυπική απόκλιση, τυπικό σφάλμα και διαστήματα εμπιστοσύνης για μετρήσεις της στοματικής αγωγιμότητας του φύλλου g_c με σταθερό τεχνητό φωτισμό, στα τρία θερμοκήπια, στα δύο επίπεδα αλατότητας και για κάθε θερμοκήπιο και αλατότητα (αλληλεπίδραση) κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Θερμοκήπιο	Αλατότητα	Μέσος Όρος ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Απόκλ. ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Τυπ. Σφάλμα ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Διάσ/μα . Εμπιστ/νης.	
					Κάτω όριο	Άνω όριο
Μάρτυρας	Χαμηλή	2.2350	1.95122	0.622	0.992	3.478
	Υψηλή	1.335	1.81420	0.672	-7.555E-03	2.678
	Σύνολο	1.785	1.90718	0.458	0.870	2.700
Σκίαση 35%	Χαμηλή	2.3614	3.09507	0.880	0.604	4.119
	Υψηλή	1.802	1.69743	0.736	0.331	3.273
	Σύνολο	2.082	2.30077	0.573	0.936	3.228
Σκίαση 50%	Χαμηλή	2.4654	2.75341	0.645	1.175	3.755
	Υψηλή	2.9062	2.60043	0.645	1.616	4.196
	Σύνολο	2.6858	2.63352	0.456	1.774	3.598
Σύνολο	Χαμηλή	2.354	2.45138	0.419	1.517	3.191
	Υψηλή	2.014	2.16633	0.396	1.224	2.805
	Σύνολο	2.1984	2.29894			

Πίνακας 5.25 Αποτελέσματα ανάλυσης παραλλακτικότητας της στοματικής αγωγιμότητας g_c , για τους παράγοντες θερμοκήπιο, αλατότητα και την αλληλεπίδρασή τους θερμοκήπιο*αλατότητα για μετρήσεις με σταθερό τεχνητό φωτισμό κατά την περίοδο Σεπτέμβριος- Νοέμβριος 2008.

Πηγή Παραλλακτικότητας	Άθροισμα Τετραγώνων	Βαθμοί Ελευθερίας	Μέσο Τετράγωνο	F	Σημαντικότητα
Διορθωμένο Μοντέλο	18.160 ^a	5	3.632	0.671	0.647
Σταθερός Όρος	311.425	1	311.425	57.497	0.000
Θερμοκήπιο	10.817	2	5.409	0.999	0.374
Αλατότητα	1.882	1	1.882	0.347	0.558
Αλληλεπίδραση (Θερμοκήπιο* Αλατότητα)	6.169	2	3.085	0.569	0.569
Σφάλμα	341.230	63	5.416		
Σύνολο	692.866	69			
Διορθωμένο Σύνολο	359.390	68			

^a $R^2 = 0.051$ (Προσαρμοσμένο $R^2 = -0.025$)

Όπως προκύπτει από τους παραπάνω δύο Πίνακες ούτε οι μέσοι όροι της στοματικής αγωγιμότητας του φύλλου αγγουριάς σε υδροπονική καλλιέργεια σε υπόστρωμα περλίτη διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά στα τρία θερμοκήπια με διαφορετική σκίαση και στις δύο αλατότητες (υψηλή και χαμηλή) σε κάθε θερμοκήπιο και συνολικά (αλληλεπίδραση).

Συμπερασματικά, λοιπόν, από την ανάλυση των μετρήσεων φωτοσύνθεσης που έγιναν κατά τη διάρκεια φθινοπωρινής υδροπονικής καλλιέργειας

αγγουριάς προέκυψε πως η σκίαση και η αλατότητα δεν επηρέασε καμία από τις παραμέτρους φωτοσύνθεσης. Συγκεκριμένα ούτε ο ρυθμός φωτοσύνθεσης, ούτε η διαπνοή, ούτε η στοματική αγωγιμότητα του φύλλου επηρεάσθηκαν από τα επίπεδα σκίασης και τα επίπεδα αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος της καλλιέργειας όταν οι μετρήσεις φωτοσύνθεσης έγιναν με σταθερό τεχνητό φωτισμό έντασης $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Φαίνεται, λοιπόν, πως τα φύλλα της καλλιέργειας στα σκιασμένα θερμοκήπια δεν παρουσίασαν καμία φυσιολογική προσαρμογή στις συνθήκες χαμηλής έντασης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας με αποτέλεσμα τα φύλλα σκιασμένου και μη θερμοκηπίου να έχουν τους ίδιους ρυθμούς φωτοσύνθεσης και διαπνοής όταν εκτέθηκαν σε ίδια επίπεδα φωτοσυνθετικής ροής φωτονίων $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Συνεπώς, τα φυτά που σκιάζονται για μία χρονική περίοδο και παρουσιάζουν μειωμένους ρυθμούς φωτοσύνθεσης θα συνεχίσουν να φωτοσυνθέτουν κανονικά όταν βρεθούν σε συνθήκες μη σκίασης. Αυτό αναδεικνύει τη σημασία της περιοδικής σκίασης με τοποθέτηση της σκίασης για περιόδους με υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (καλοκαίρι) και παύση της σκίασης όταν η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μειωθεί (μέσα φθινόπωρου- χειμώνα) χωρίς φωτοσυνθετικό κόστος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διατριβή έγινε προσπάθεια να μελετηθεί η επίδραση και η αλληλεπίδραση της σκίασης και της αλατότητας στο μικροκλίμα, στις ανταλλαγές ενέργειας και μάζας μιας υδροπονικής καλλιέργειας αγγουριάς.

Συγκεκριμένα σε τρία θερμοκήπια το πρώτο με συντελεστή διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία 75% (μάρτυρας), το δεύτερο με συντελεστή 50% (σκίαση 35%) και το τρίτο με συντελεστή 38% (σκίαση 50%) και σε δύο επίπεδα αλατότητας του θρεπτικού διαλύματος (2.3 dS m^{-1} και 6.3 dS m^{-1}) σε κάθε θερμοκήπιο, έγιναν μετρήσεις μικροκλίματος, διαπνοής σε υδροπονική καλλιέργεια αγγουριάς σε δύο καλλιεργητικές περιόδους κατά το καλοκαίρι και το φθινόπωρο του 2008. Κατά την φθινοπωρινή περίοδο έγιναν, επίσης, μετρήσεις φωτοσύνθεσης των φύλλων της καλλιέργειας αγγουριάς σε συνθήκες φυσικού και τεχνητού φύλλου.

Από την επεξεργασία των μετρήσεων και με τη βοήθεια της μεθόδου του ενεργειακού ισοζυγίου του θερμοκηπίου διαπιστώθηκε ότι:

- Σε συνθήκες καλοκαιρινές η σκίαση μειώνει ελάχιστα τη θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου.
- Ενώ η σκίαση μείωσε σημαντικά την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο δε μείωσε ανάλογα τη διαπνοή της καλλιέργειας. Αυτό δείχνει πως η σκίαση του θερμοκηπίου βελτιώνει τη φυσιολογική κατάσταση της καλλιέργειας επιτρέποντας στα σκιασμένα φυτά να έχουν μεγαλύτερη στοματική αγωγιμότητα και μικρότερο stress.
- Η ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου έδειξε πως ο συντελεστής εξάτμισης ε ακόμη και στα σκιασμένα θερμοκήπια δεν ξεπερνάει την τιμή 0.5, δείχνοντας έτσι πως η σκίαση ακόμη σε ποσοστό 50% δεν καταφέρνει ως συμπληρωματικός εξοπλισμός του συστήματος φυσικού αερισμού για τον κλιματισμό του θερμοκηπίου να βγάλει την καλλιέργεια από τις συνθήκες καταπόνησης καθόσον ο βαθμός σύζευξης της καλλιέργειας με το εσωτερικό κλίμα είναι μεγάλος.
- Ένα θερμοκήπιο για να μπορέσει να λειτουργήσει στις συνθήκες της Θεσσαλίας μακριά από την ευνοϊκή επίδραση της θάλασσας πρέπει να είναι εξοπλισμένο κατά τη θερμή περίοδο του έτους με σύστημα υγρής

παρειάς που βελτιώνει το έλλειμμα κορεσμού του αέρα και συμβαλλει στην αποσύζευξη της καλλιέργειας από το εσωτερικό περιβάλλον.

- Η σκίαση δεν απαιτείται για τη βεκτίωση του μικροκλίματος κατά τη φθινοπωρινή περίοδο.

Από τις μετρήσεις φωτοσύνθεσης του φύλλου προέκυψαν πως:

- Η σκίαση μειώνει γραμμικά το ρυθμό φωτοσύνθεσης του φύλλου.
- Η αλατότητα δεν επηρέασε τη φωτοσύνθεση, τη διαπνοή και τη στοματική αγωγιμότητα του φύλλου.
- Η σκίαση δεν επηρεάζει τη στοματική αγωγιμότητα του φύλλου και η μείωση της φωτοσύνθεσης κατά την φθινοπωρινή περίοδο οφείλεται στη δραστηριότητα των χλωροπλαστών.
- Η σκίαση δεν φαίνεται να επηρεάζει μόνιμα τις φυσιολογικές λειτουργίες των φύλλων της καλλιέργειας και αυτό αναδεικνύει τη χρησιμότητα της περιοδικής σκίασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ADC, 2004. LCpro+ Portable Photosynthesis System, Instruction Manual, ADC BioScientific Ltd., Hoddesdon, Herts, EN11 0DB, 84pp.
2. ASABE, 2008. Heating, Ventilating and Colling Greenhouses. ANSI/ASAE EP406.4JAN2003, American National Standrad, 9pp.
3. Adams p., 1991. Effects of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients of sofium chloride on the yield, quality and composition og tomatoes grown in rockwool. *J. Hort. Sci.* 66: 201-207.
4. Aubinet, M., Deltour, J., De Halleux, D., 1989. Stomatal regulation in greenhouse crops: Analysis and simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 48: 21-44.
5. Awang Y.B., Atherton J.G., 1994. salinity and shading effects on leaf water relations and ionic composition of strawberry plants grown on rockwool. *J. Hort. Sci.* 69: 377-383.
6. Abreu, P. E., Meneses, J. F., 2000. Influence of soil covering, plastic ageing and roof whitening on climate and tomato crop response in an unheated plastic Mediterranean greenhouse. *Acta Horticulturae* 534: 343-350
7. Baille A., 2001. Ttrends in greenhouse technology for improved climate control in mild winter climates. *Acta Horticulturae* 559: 161-168.
8. Baille M, Mermier M, Laury JC, Delmon D (1980) Le point sur les systemes d'ombrage sous serre. Internal Report M/801. INRA, Station de Bioclimatologie d'Avignon, Montfavet
9. Baille, M., Baille, A., Delmon, D., 1994. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71: 83-97
10. Baille A, Kittas C, Katsoulas N (2001) Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology* 107, 193-306
11. Bakker J.C., 1986. Measurement of canopy transpiration or evapotranspiration in greenhouses by means of a simple vapour balance model. *Agric. For. Meteorol.* 37: 133–141.

12. Bakker J.C., Bot G.P.A., Challa H. and Van de Braak N.J. (Editors), 1995. Greenhouse climate control. An integrated approach. Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands, 279 pp., ISBN 90-74134-17-3.
13. Barradas V L, Nicolás E, Torrecillas A, Alarcón J J (2005) Transpiration and Canopy conductance of young apricot (*Prunus armeniaca* L.) trees subjected to different PAR levels and water stress. *Agricultural Water Management* 77, 323-333
14. Bethke P.C., Drew M.C., 1992. Stomatal and nonstomatal components to inhibition in leaves of *Capsicum annuum* during progressive exposure to NaCl salinity. *Plant Physiol.* 99: 219-226.
15. Boulard, T., Baille, A., Le Gall, F., 1991. Etude de différentes méthodes de refroidissement sur le climat et la transpiration de tomates de serre. *Agronomie* 11: 543-554.
16. Brugnoli E., Lauteri ., 1991. Effects of salinity on stomatal conductance, photosynthetic capacity, and carbon isotope discrimination of salt-tolerant (*Gossypium hirsutum* L.) and salt-sensitive (*Phaseolus vulgaris* L.) C₃ non-halotypes. *Plant Physiol.* 95: 628-635.
17. Chartzoulakis K., 1994. Photosynthesis, water relations and leaf growth of cucumber exposed to salt stress. *Scientia Hort.* 59:27-35.
18. Chartzoulakis K., Klapaki G., 2000. Response of two greenhouse pepper hybrids to NaCl salinity during different growth stages. *Scientia Hort.* 86:247-260.
19. Chen K. Hu G., Keutgen N., Janssens M.J.J., Lenz F., 1999. Effects of NaCl salinity and CO₂ enrichment on pepino (*Solanum Muricatum* Ait.). II. Leaf photosynthetic properties and gas exchanges. *Scientia Hort.* 81: 43-56.
20. Cohen S, Raveh E, Li Y, Grava A, Goldschmidt EE (2005) Physiological response of leaves, tree growth and fruit yield of grapefruit trees under reflective shading screens. *Scientia Hort.* 107, 15-35
21. Cockshull KE, Graves CJ, Carol RJ (1992) The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science* 67, 11-24
22. Collatz G J, Ball J T, Grivet C, Berry J (1991) Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and

- transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 54, 107-136
23. Dayan, E., Fuchs, M., Plaut, Z., Presnov, E., Grava, A., Matan, E., Solphoy, A., Mugira, U., Pines, N., 2000. Cooling of roses in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 534: 351-360.
 24. De Pascale S., Ruffiero C., Barbieri G. 2003. Physiological responses of pepper to salinity and drought. *J. Am. Soc. Sci.* 128: 48-54.
 25. Downton W.J.S., Grant W.J.R., Robinson S.P., 1985. Photosynthetic and stomatal responses of spinach leaves to salt stress. *Plant Physiol.* 77: 85-88.
 26. El- Gizawy A.M., Abdallah M.M.F., Gomaa H.M., Mohamed S.S., 1992. Effect of different shading levels on tomato plants 2. Yield and fruit quality. *Acta Horticulturae* 323: 349-354.
 27. Esmailiyeh K.P., 1986. CO₂ effect on gas exchange and growth of tomato at different salinity (in German). MS thesis. Technische Universität Berlin.
 28. Fernandez-Rodriguez, E. J., Fernandez-Vadillos, J., Camacho-Ferre, F., Vazquez, J. J., Kenig, A., 2000. Radiative field uniformity under shading screens under greenhouse versus whitewash in Spain. *Acta Horticulturae*, 534: 125-130.
 29. Glowers T.J., 1999. Salinization and horticultural productions. *Sci. Hort.* 78: 1-4.
 30. Francescangeli, N., Ferratto, J., Rosania, A., Levit, C. H., 1994. Effect of bleaching, shading and water sprinkling on the cover in the temperature and other climatic parameters of greenhouse, in summer. *Acta Horticulturae*, 357: 268-268.
 31. Hanan J.J. 1998. Advanced Technology for Protected Horticulture. Taylor & Francis Inc., 720 pp.
 32. Hand D.W., Warren Wilson J., Hannah M.A., 1993 Light interception by a row crop of glasshouse pepper. *Journal of Horticultural Science* 68, 695-730

33. Healey KD, Rickert KG, Hammer GL, Bange MP (1998) Radiations use efficiency increases when the diffuse component of inside radiation is enhanced by shading. *Australian Journal of Agricultural Research* 49, 665-672.
34. Howell T. and Dusek D., 1995. Comparison of vapour- pressure-deficit calculations methods-southern high plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121: 191-198.
35. Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, Pinter P J Jr (1981) Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Research* 17, 1133-1138.
36. N. Katsoulas, C. Kittas, 2008. Impact of Greenhouse Microclimate on Plant Growth and Development with Special Reference to the Solanaceae. *European Journal of Plant Science and Biotechnology.*, 2 (1): 45- 61.
37. N. Katsoulas, T. Bartzanas, T. Boulard; M. Mermier, C. Kittas, 2006. Effect of Vent Openings and Insect Screens on Greenhouse Ventilation. *Biosystems Engineering*, 93(4): 427-436.
38. Katsoulas N, Baille A, Kittas C (2002) Influence of leaf area index on canopy energy partitioning and greenhouse cooling requirements. *Biosystems Engineering* 83, 349-359.
39. N. Katsoulas, A. Baille, C. Kittas, 2001. Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, 233-247.
40. Kittas C., 1995. A simple climagraph for characterizing regional suitability for greenhouse cropping in Greece. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78: 133-141.
41. Kittas C., Katsoulas N. Bartzanas T. Characterization and analysis of the effects of greenhouse climate control equipment on greenhouse microclimate and crop response. (Proceedings of the International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems, GreenSys 2009, June 14-19, 200, Quebec, Canada).
42. C. Kittas, T. Boulard, T. Bartzanas, N. Katsoulas, M. Mermier, 2002. Influence of an insect screen on greenhouse ventilation. *Transactions of the ASAE*, 45(4): 1083- 1090.

43. Kittas, C., Baille, A., Giaglaras, P., 1999. Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73: 341-351.
44. C. Kittas, T. Boulard, M. Mermier, G. Papadakis., 1996. Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 65, 37-49.
45. Kittas, C., Draoui, B., Boulard, T., 1995. Quantification du taux d'aération d'une serre à ouvrant continu en toiture. *Agricultural and Forest Meteorology*, 69: 205-221
46. Kittas C., Chiapale J.P., Villele de O., Aries F., 1987. " Paramètres significatifs du déterminisme de la température de l' air de la serre". *Agricultural and Forest Meteorology*, 40, 265-277.
47. Lansberg J.J., White B., Thorpe M.R., 1979. Computer analysis of the efficiency of evaporative cooling for glasshouse in a high energy environment. *J. agric. Engng. Res.*, 2 : 29-39.
48. Lloyd J, Chin Wong S, Styles J M, Batten D, Priddle R, Tunbull C, McConchie C A (1995) Measuring and modelling whole-tree gas exchange. *Aus. Journal Plant Physiology* 12, 987-1000
49. López-Hoffman, L, JL DeNoyer, IE Monroe, R Shaftel, NPR Anten, M Martínez-Ramos & DD Ackerly. 2006. Mangrove seedling net photosynthesis, growth, and survivorship are interactively affected by salinity and light. *Biotropica* 38: 606-616.
50. Lorenzo M, Sánchez-Guerrero C.M, Medrano E., García L.M, Caparrós I., Giménez M., (2003). External greenhouse mobile shading: effect on microclimate, water use efficiency and yield of a tomato crop grown under different salinity levels of the nutrient solution. *Acta Horticulturae* 609:181-186.
51. Lorenzo P, Garcia L.M, Sanchez-Guerro C.M, Medrano E, Caparros I., Giménez M., (2006). Influence of mobile shading on yield, crop transpiration and water use efficiency. *Acta Horticulturae* 719: 471-478

52. Lycoskoufis I.H., Savvas D., Mavrogiannopoulos F. 2005. Growth gas exchange and nutrient status in pepper (*Capsicum annuum* L.) grown in recirculating nutrient solution as affected by salinity imposed to half of the root system. *Scientia Hort.* 106: 147-161.
53. Maas E.V., Hoffman G.J., 1977. Crop salt tolerance- Current assessment. *J. Irrig. Drain. Div.* 103 (IR2), 115-134.
54. Mahajan G and Singh K.G., 2006. Response of greenhouse tomato to irrigation and fertigation. *Agricultural water management.* (1-2) : 202-206.
55. Medrano E., Lorenzo P., Sánchez-Guerrero M.C., Montero J.I., 2005. Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions. *Scientia Horticulturae*, 105: 163-175.
56. Medina CL, Souza RP, Machado EC, Ribeiro RV, Silva JAB, 2002. Photosynthetic response of citrus grown under reflective aluminized polypropylene shading nets. *Scientia Horticulturae* 96: 115-125.
57. Miguel AF, Silva AM, Rosa R (1994) Solar irradiation inside a single span greenhouse with shading screens. *Journal of Agricultural Engineering Research* 59, 61-72
58. Mavrogiannopoulos G.N., Spanaikis J., Tsikalas P. 1999. Effect of carbon dioxide enrichment and salinity on photosynthesis and yield in melon. *Scientia Horticulturae*, 79: 51-63.
59. Monteith J.L., 1973. Principles of environmental Physics. Arnold Ed., London, 241 pp.
60. Montero, J. I., Antón, A., 1994. Greenhouse cooling during warm periods. *Acta Horticulturae*, 357: 49-61
61. Navarro J.M., Garrido C., Carvajal M., Martinez V., 2002. Yield and fruit quality of pepper plants under sulphate and chloride salinity. *J. Hort. Sci. Biotech.* 77: 52-57.
62. Ne Smith, D. S., Raymer, P. L., Rao, M. S., Briggs, D. C., 1992. A durable, lightweight structure for conducting field shading experiments. *Horticultural Science*, 27(12): 1274-1275

63. Nederhoff E.M., Rijdsdijk, de Graaf R. 1992. Leaf conductance and rate of crop transpiration on greenhouse grown sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) as affected by carbon dioxide. *Scientia Horticulturae*, 52: 283-301.
64. Nisen A, Coutisse S (1981) Modern concept of greenhouse shading. *Plasticulture* 49, 9-26
65. Papadopoulos AP, Pararajasingham S (1997) The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill.): A review. *Scientia Horticulturae* 69, 1-29.
66. Pasternak D., 1987. Salt tolerance and crop production- A comprehensive approach. *Ann. Rev. Phytopathol.* 25: 271- 291.
67. Raveh E, Cohen S, Raz T, Grava A, Goldschmidt EE (2003) Increased growth of young citrus trees under reduced radiation load in a semi-arid climate. *Journal Experimental Botany* 54, 365-373.
68. Rosenberg N.J., Blad B.L., Verma S.B., 1983. Microclimate The Biological Environment. John Wiley & Sons, USA, 495 pp.
69. Savvas D., Lenz F., 2000. Effects of NaCl or nutrient- induced salinity on growth, yield and composition of eggplants in rockwool. *Sci. Hort.* 84: 37-47.
70. Smith, I. E., Savage, M. J., Mills, P. 1984. Shading effects on greenhouse tomatoes and cucumbers. *Acta Horticulturae*, 148: 491-500.
71. Sonneveld C., 2000. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. Ph.D. Thesis. University of Wageningen, The Netherlands.
72. Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. *PhD Thesis*, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, 150 pp
73. Schwartz D., Kläring H.-P., van Iersel M.W., Ingram K.T. 2002. Growth and photosynthetic response of tomato to nutrient solution concentration at two light levels. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 127(6): 984-990.

74. Seginer, I., 1997. Alternative design formulae for the ventilation rate of greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68(4): 355-365
75. Stanhill, G. and S. Cohen. 2001. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agric. For. Meteorol.* 107: 155-278.
76. Taleisnik E.L., 1987. Salinity effects on growth and carbon balance in *Lycopersicon esculentum* and *L. penellii*. *Physiol. Plant.* 71: 213-218.
77. Teitel, M., Tanny, J., 1999. Natural ventilation of greenhouses: experiments and model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96: 59-70.
78. Van de Sanden P.A.C.M., Veen B.W., 1992. Effects of air humidity and nutrient solution concentration on growth, water potential and stomatal conductance of cucumber seedlings. *Scientia Hort.* 50: 173-186.
79. Van Iersel M.W. and Bugbee B., 2000. A multi- chamber, semi-continuous- crop carbon dioxide exchange system: Design, calibration, and data interpretation. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 125: 86-92.
80. Wang S., Boulard T., Haxaire R., 1999. Measurements and analysis of air speed distribution in a naturally ventilated greenhouse. International Conference & British- Israeli Workshop on the Greenhouse Techniques towards the 3rd Millenium. 5- 8 September 1999, Haifa, Israel.
81. Willits, D. H., Bottcher, R. W., Marshall, J. L., Overcash, M. R., 1989 Factors affecting the performance of external shade cloths. 1989 *Summer Meeting of ASAE*, Paper No. 89-4034, Quebec, Canada.
82. Xu H.L., Gauthier L., Gosselin A., 1995. Effects of fertigation management on growth and photosynthesis of tomato plants grown in peat, rockwool and NFT. *Scientia Hort.* 63: 11- 20.
83. Yahya A., Atherton J. (1995). Growth and fruiting responses of strawberry plants grown on rockwool to shading and salinity. *Scientia Hort.* 62: 25-31.

84. Yei A.R., Caporn S.J.M., Flowers T.J., 1985. The effect of salinity upon photosynthesis in rice (*Oryza sativa* L.): Gas exchange by individual leaves in relation to their salt content. *J. Exp. Bot.* 36: 1240- 1248.
85. Γαλανοπούλου, 2002. Γεωργικός Πειραματισμός, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πανεπιστημικές Εκδόσεις Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, 102 σελίδες.
86. Κατσούλας, Ν., 2002. Επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη διαπνοή τριανταφυλλιάς υπό κάλυψη. *Διδακτορική διατριβή*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 216 σελίδες
87. Κίττας Κ., 2000. Θερμοκήπια, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής και Ζωικής Παραγωγής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σελ. 150.
88. Μαυρογιαννόπουλος Γ., 2001. Θερμοκήπια. Εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα, Σελ. 382-383.
89. Ολύμπιος Χ.Μ., 2001. Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια. Εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα. Σελ : 27-29.
90. Σουλιώτης Μ., Καυγά Α., Τρυπαναγνωστόπουλος Ι., 2001. «Εφαρμογή φακών Fresnel για τον έλεγχο του φωτισμού και της θερμοκρασίας των θερμοκηπίων». Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών- Τμήμα Θερμοκηπιακών Καλλιεργειών και Ανθοκομίας, ΤΕΙ Μεσολογγίου