

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής & Ζωικής Παραγωγής

**«Επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη
διαπνοή τριανταφυλλιάς υπό κάλυψη»**

Διδακτορική Διατριβή

Νικόλαος Η. Κατσούλας

Νέα Ιωνία, 2002

**«Επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος
στη διαπνοή τριανταφυλλιάς υπό κάλυψη»**

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Κ. Κίττας (Επιβλέπων)	Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Γεωργικές Κατασκευές
Α. Οικονόμου (Μέλος)	Καθηγητής
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης	Ανθοκομία
Γ. Παπαδάκης (Μέλος)	Επίκουρος Καθηγητής
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών	Μηχανολογικός Εξοπλισμός Αγροτικών Εκμεταλλεύσεων - Εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας και μάζας

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κ. Κίττας (Επιβλέπων)	Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Γεωργικές Κατασκευές
Α. Οικονόμου (Μέλος)	Καθηγητής
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης	Ανθοκομία
Γ. Παπαδάκης (Μέλος)	Επίκουρος Καθηγητής
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών	Μηχανολογικός Εξοπλισμός Αγροτικών Εκμεταλλεύσεων - Εφαρμογές μεταφοράς θερμότητας και μάζας
Σπυρίδων Κυρίτσης (Μέλος)	Καθηγητής
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών	Γεωργικές Κατασκευές
Χρυσούλα Νικήτα-Μαρτζοπούλου (Μέλος)	Καθηγήτρια
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης	Αγροτικές Κατασκευές και Θερμοκήπια
Μαρία Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη (Μέλος)	Καθηγήτρια
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Αρδεύσεις, Στραγγίσεις και Υδραυλική
Γεώργιος Μαυρογιαννόπουλος (Μέλος)	Αναπληρωτής Καθηγητής
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών	Θερμοκήπια και Υδροπονικές Καλλιέργειες

Νικόλαος Η. Κατσούλας

**«Επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος
στη διαπνοή τριανταφυλλιάς υπό κάλυψη»**

ISBN

Νικόλαος Η. Κατσούλας, 2002, «Επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη διαπνοή τριανταφυλλιάς υπό κάλυψη», Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Νέα Ιωνία.

26 Προκαταρτικές σελίδες, 216 Σελίδες, 11 Πίνακες, 66 Σχήματα, 6 Εικόνες, 164 Βιβλιογραφικές παραπομπές.

Περίληψη

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής ήταν η συγκριτική ανάλυση της επίδρασης των διαφόρων μεθόδων ψύξης του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού στη διαπνοή μιας θερμοκηπιακής καλλιέργειας τριανταφυλλιάς. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα από τα πλέον διαδεδομένα μέσα κλιματισμού των θερμοκηπίων κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και πιο συγκεκριμένα: ο φυσικός αερισμός, ο δυναμικός αερισμός, η σκίαση με άσπρισμα του καλύμματος του θερμοκηπίου και ο δροσισμός με τεχνητή ομίχλη. Παράλληλα, μελετήθηκε και η επίδραση της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του κλίματος του θερμοκηπίου και των ανταλλαγών μάζας και ενέργειας της καλλιέργειας, καθώς η φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας αποτελεί ένα φυσικό μέσο ψύξης του θερμοκηπίου μέσω της διαπνοής της καλλιέργειας. Μεγαλύτερη έμφαση δόθηκε: (α) στην ανάλυση των αλλαγών που προκαλούν τα παραπάνω συστήματα στον καταμερισμό της ενέργειας στο επίπεδο της καλλιέργειας μέσα από μετρήσεις της διαπνοής και υπολογισμούς της αισθητής ενέργειας και της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, (β) στον υπολογισμό της αεροδυναμικής και της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας και της πιθανής τους σύνδεσης με το ρυθμό ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου και (γ) στην ανάλυση των μεταβολών του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας. Έγινε φανερό ότι ένας υψηλός ρυθμός αερισμού δεν είναι και υποχρεωτικά η καλύτερη λύση για την ανακούφιση του θερμοκηπίου και της καλλιέργειας από τις συνθήκες καταπόνησης κατά τη διάρκεια καλοκαιρινών συνθηκών. Η χρήση διαφορετικού τύπου αερισμού (φυσικός-δυναμικός) προκάλεσε σημαντικές διαφορές στην αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Οι μεταβολές αυτές δεν επηρέασαν τον καταμερισμό της ενέργειας στο επίπεδο της καλλιέργειας. Η χρήση του συστήματος δροσισμού προκάλεσε μείωση του ελλείμματος κορεσμού στο θερμοκήπιο κάτι που οδήγησε σε σημαντική αύξηση της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, επιτρέποντας έτσι στη διαπνοή να παραμείνει σε παρόμοια επίπεδα, όπως στην περίπτωση χωρίς το σύστημα δροσισμού. Αντίθετα, η σκίαση του θερμοκηπίου και η μεγάλη φυλλική επιφάνεια οδήγησαν μέσα από τις αλληλεπιδράσεις της καλλιέργειας με το μικροκλίμα σε αύξηση του ρυθμού διαπνοής της καλλιέργειας αυξάνοντας έτσι τη διαδικασία της ψύξης στο θερμοκήπιο. Τέλος, από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην εργασία αυτή, έγινε φανερή η σημαντικότητα του δείκτη φυλλικής επιφάνειας, τόσο στον έλεγχο του μικροκλίματος όσο και στο σχεδιασμό των συστημάτων ψύξης των θερμοκηπίων. Για το λόγο αυτό ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας θα πρέπει να λαμβάνεται ως μία βασική παράμετρος τόσο στους αλγορίθμους για τον έλεγχο του μικροκλίματος όσο και στη διαδικασία του σχεδιασμού των συστημάτων ψύξης των θερμοκηπίων. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι η απόφαση για τη χρήση του δροσισμού της σκίασης ή του αερισμού για παράδειγμα εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την τιμή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας. Επιπλέον, έγινε φανερό ότι ο δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας αποτελεί ένα χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον έλεγχο του κλίματος στο θερμοκήπιο. Τέλος έγιναν οι απαραίτητες ποιοτικές παρατηρήσεις και μετρήσεις για την ποσοτική περιγραφή των μηχανισμών που επηρεάζουν και καθορίζουν τα κριτήρια για τη βελτιστοποίηση του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Συνέχεια της εργασίας αυτής αποτελεί η ενσωμάτωση όλων των πληροφοριών που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή σε ένα προσομοίωμα για τον έλεγχο και βελτιστοποίηση του μικροκλίματος του θερμοκηπίου.

Πρόλογος και Ευχαριστίες

«Δεν φτάνει μονάχα η γη το χώμα της να δώσει, χρειάζεται η συμβουλή, χρειάζεται και η γνώση», αναφέρει ο Κωστής Παλαμάς.

Τώρα που οι προσπάθειές μου καρποφορούν και οι κόποι μου αμείβονται, θα το θεωρούσα βασική παράλειψη εάν δεν αναφερόμουν στα πρόσωπα εκείνα που με προέτρεψαν, με νουθέτησαν και με όπλισαν με τα απαραίτητα εφόδια, ώστε να πραγματοποιήσω αυτό το ταξίδι.

Πρώτον από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου και επιβλέποντα της εργασίας αυτής κ. Κωνσταντίνο Κίττα, ο οποίος με ενθάρρυνε να ασχοληθώ με το θέμα αυτό και ο οποίος αποτέλεσε το βασικό καθοδηγητή της όλης διατριβής. Η δυνατότητα που μου έδωσε αρχικά, όταν ακόμη ήμουν φοιτητής του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, να ασχοληθώ με τα ερευνητικά θέματα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, αποτέλεσε το έναυσμα για να διαπιστώσω το ιδιαίτερο ενδιαφέρον που παρουσιάζει το ερευνητικό αυτό πεδίο. Η συνεχής παρότρυνση και ενθάρρυνσή του, το ιδιαίτερο ενδιαφέρον του για την πρόοδο του ερευνητικού πεδίου με το οποίο ασχολήθηκα καθώς και η αμέριστη συμπαράστασή του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής συνέβαλαν καθοριστικά στην άρτια διαμόρφωση και ολοκλήρωση της εν λόγω διατριβής. Τον ευχαριστώ θερμά για την αγάπη και την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλε.

Στο σημαντικό αυτό σταθμό της πορείας μου θα ήταν βασική παράλειψη εάν δεν αναφερόμουν στο Διευθυντή Ερευνών του INRA της Αβινιόν της Γαλλίας και Επισκέπτη Καθηγητή στο Πανεπιστήμιο της Καρθαγένης της Ισπανίας, Alain Baille. Η καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου και η συνεχής συμβολή του στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων ήταν καθοριστική για την εξέλιξη της διατριβής μου. Η ουσιαστική βοήθειά του συνετέλεσε στο να τελεσφορήσει η προσπάθειά μου αυτή.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, κ.κ. Α. Οικονόμου, Καθηγητή του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και Γ. Παπαδάκη, Επίκουρο Καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών για την επίβλεψη, παρακολούθηση και διόρθωση της παρούσης διατριβής.

Σημαντική στάθηκε η οικονομική βοήθεια που μου πρόσφερε το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών. Η υποτροφία που μου παρείχε με βοήθησε να αντεπεξέλθω στις οικονομικές υποχρεώσεις κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου.

Ιδιαίτερα σημαντική, στο ξεκίνημα κυρίως της διατριβής αυτής, υπήρξε και η συμβολή του Διδάκτορα και μέλους του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Π.Θ., κ. Παναγιώτη Γιαγλάρα. Οι εποικοδομητικές συζητήσεις που είχα μαζί του στο ξεκίνημα της προσπάθειάς μου με βοήθησαν στην τελική επιλογή του θέματος της παρούσης εργασίας. Παράλληλα, οι επισημάνσεις του όσον αφορά στην τελική δομή και παρουσίαση της εργασίας ήταν καθοριστικές.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το φίλο μου και Υποψήφιο Διδάκτορα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Π.Θ., κ. Χ. Λύκα, με τον οποίο μοιράστηκα τις φροντίδες της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο, έργο αρκετά επίπονο και χρονοβόρο. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το φίλο μου και Υποψήφιο Διδάκτορα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Π.Θ., Θ. Μπαρτζάνα, για τη συμπαράστασή του κατά τη διάρκεια της έρευνάς μου.

Ιδιαίτερα δύσκολο ήταν το πειραματικό κομμάτι της εργασίας αυτής καθώς απαιτούσε την εγκατάσταση και παρακολούθηση των απαραίτητων μετρητικών διατάξεων για τις πειραματικές μετρήσεις. Στην προσπάθειά μου για εξοικείωση με τα επιστημονικά όργανα στην αρχή της εργασίας μου, σημαντική ήταν η βοήθεια του φίλου μου, Δ. Κουβά, τον οποίο και ευχαριστώ.

Ιδιαίτερη ήταν η ηθική συμπαράσταση της Ντίνας καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνάς μου. Η υπομονή, η κατανόηση και η υποστήριξή της σε κάθε βήμα της εργασίας, μου έδιναν θάρρος να συνεχίσω το έργο μου και για το λόγο αυτό την ευχαριστώ πολύ.

Τέλος, αισθάνομαι αδήριτη ανάγκη να μοιραστώ τη χαρά της επιτυχίας με τους γονείς μου και την αδερφή μου, οι οποίοι μόχθησαν μαζί μου για να φέρω εις πέρας το δύσκολο αυτό έργο. Η αμέριστη ηθική και υλική υποστήριξή τους συνέβαλαν καθοριστικά στην υλοποίηση της διατριβής μου.

Στους γονείς μου

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 . Γενική Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά	3
1.1.1 Ο κλάδος των θερμοκηπίων.....	3
1.1.2 Προβλήματα του κλάδου των θερμοκηπίων στην Ελλάδα.....	5
1.1.3 Σημασία και μέθοδοι ρύθμισης της διαπνοής στο θερμοκήπιο	7
1.1.4 Προϋποθέσεις και προβλήματα για τη βελτιστοποίηση της ρύθμισης του κλίματος	11
1.2 Αντικείμενο και δομή της εργασίας.....	14
Κεφάλαιο 2 . Θεωρητική Ανάλυση.....	17
2.1 Επίδραση των συστημάτων ελέγχου στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια.....	19
2.1.1 Φυσικός και δυναμικός αερισμός	19
2.1.2 Σκίαση με άσπρισμα της οροφής του θερμοκηπίου	28
2.1.3 Δροσισμός με τεχνητή ομίχλη	31
2.1.4 Δείκτης φυλλικής επιφάνειας	35
2.2 Φαινόμενα μεταφοράς στο θερμοκήπιο.....	40
2.2.1 Γενικά	40
2.2.2 Ισοζύγιο ενέργειας στο θερμοκήπιο	40
2.2.3 Διαπνοή.....	48
2.3 Σύνδεση του φύλλου με τον περιβάλλοντα αέρα - Παράγοντας ωμέγα	61
2.3.1 Γενικά	61
2.3.2 Εφαρμογή για μια πλήρη καλλιέργεια.....	64
2.3.3 Εφαρμογή σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες.....	65
2.4 Συμπεράσματα	71
Κεφάλαιο 3 . Πειραματικός Εξοπλισμός	75
3.1 Εισαγωγή.....	77
3.2 Το θερμοκήπιο	78
3.2.1 Ψύξη του θερμοκηπίου	79
3.3 Η καλλιέργεια	84
3.4 Μετρήσεις	86

Κεφάλαιο 4 . Μελέτη της επίδρασης του αερισμού στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια 93

4.1	Αποτελέσματα.....	95
4.1.1	Το Μικροκλίμα του θερμοκηπίου	95
4.1.2	Καταμερισμός ενέργειας	102
4.1.3	Συνολική και στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας.....	104
4.1.4	Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας.....	107
4.2	Συζήτηση.....	109
4.2.1	Επίδραση στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου.....	109
4.2.2	Καταμερισμός ενέργειας και στοματική αγωγιμότητα.....	109
4.2.3	Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας.....	112
4.3	Συμπεράσματα.....	113

Κεφάλαιο 5 . Μελέτη της επίδρασης της σκίασης στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια ... 115

5.1	Αποτελέσματα.....	117
5.1.1	Επίδραση του ασπρίσματος του θερμοκηπίου στη διαπερατότητα του θερμοκηπίου.....	117
5.1.2	Θερμοκρασία και έλλειμμα κορεσμού του αέρα.....	119
5.1.3	Διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας αέρα και έλλειμμα κορεσμού της καλλιέργειας	121
5.1.4	Επίδραση του ασπρίσματος στον καταμερισμό της ενέργειας σε αισθητή και λανθάνουσα στο επίπεδο της καλλιέργειας.....	123
5.1.5	Στοματική και αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας.....	125
5.1.6	Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας.....	127
5.2	Συζήτηση.....	129
5.2.1	Αλλαγές στο μικροκλίμα	129
5.2.2	Επίδραση του ασπρίσματος στον καταμερισμό της ενέργειας στο θερμοκήπιο	129
5.2.3	Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας	132
5.2.4	Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας.....	133
5.3	Συμπεράσματα.....	135

Κεφάλαιο 6 . Μελέτη της επίδρασης του δροσισμού στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια....137

6.1	Αποτελέσματα.....	139
6.1.1	Εξωτερικές συνθήκες.....	139
6.1.2	Εσωτερικό μικροκλίμα	140
6.1.3	Ρυθμός διαπνοής.....	140
6.1.4	Διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα	143
6.1.5	Η Αισθητή ενέργεια και ο λόγος Bowen	144
6.1.6	Αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας.....	145
6.1.7	Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας	147
6.1.8	Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας.....	149
6.2	Συζήτηση.....	152
6.2.1	Αλλαγές στο μικροκλίμα	152
6.2.2	Κατανομή της ενέργειας.....	152
6.2.3	Αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας.....	153
6.2.4	Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας.....	154
6.2.5	Ανάλυση και ερμηνεία των φαινομένων υστέρησης.....	155
6.3	Συμπεράσματα.....	157

Κεφάλαιο 7 . Μελέτη της επίδρασης του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια.....159

7.1	Αποτελέσματα.....	161
7.1.1	Εξωτερικές κλιματικές συνθήκες	161
7.1.2	Φορτίο ακτινοβολίας	162
7.1.3	Διαπνοή και αισθητή ενέργεια.....	165
7.1.4	Αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας.....	166
7.1.5	Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας	168
7.1.6	Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας.....	169
7.1.7	Συντελεστής εξάτμισης.....	170
7.2	Συζήτηση.....	172
7.2.1	Επίδραση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στον καταμερισμό ενέργειας και τη φυσιολογική κατάσταση της καλλιέργειας.....	172

7.2.2 Επίδραση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στις απαιτήσεις του θερμοκηπίου για ψύξη	175
7.3 Συμπεράσματα.....	178
Κεφάλαιο 8 . Συμπεράσματα.....	179
Βιβλιογραφία	187
Summary	203
Résumé	209
Resumen	213

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1. Επίδραση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα ($N h^{-1}$) στη διαφορά θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου με τον εξωτερικό αέρα (ΔT_{i-o} °C), στο έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου (e_i kPa), στη διαφορά ελλείμματος κορεσμού μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα (Δe_{i-o} kPa), στην αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου (g_v mm s ⁻¹) και στο λόγο Bowen (β).	23
Πίνακας 2.2. 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.....	29
Πίνακας 2.3. Υπολογισμένες τιμές του παράγοντα Ω_i για φύλλα διαφορετικού μεγέθους που εκτίθενται σε ρεύμα αέρα $1 m s^{-1}$ στους 18°C με στοματική αγωγιμότητα $10 mm s^{-1}$	63
Πίνακας 2.4. Υπολογισμένες τιμές του παράγοντα Ω_c για διάφορες καλλιέργειες στον ελεύθερο αγρό.	65
Πίνακας 4.1. Μέσες τιμές (για το διάστημα 9:00 έως 19:00) των παραμέτρων του εξωτερικού κλίματος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με δυναμικό (8 Αυγούστου 1999) και φυσικό αερισμό (10 Αυγούστου 1999).	95
Πίνακας 5.1. Μέσες τιμές (διάστημα 9:00 – 19:00) των εξωτερικών κλιματικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια των τριών επιλεγμένων ημερών (28 Ιουνίου 1999, δέκα ημέρες πριν το άσπρισμα του θερμοκηπίου, 8 Ιουλίου 1999, μία ημέρα μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου και 16 Ιουλίου 1999, εννέα ημέρες μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου). Το άσπρισμα του θερμοκηπίου έγινε στις 7 Ιουλίου 1999.....	117
Πίνακας 5.2. Διαπερατότητα του θερμοκηπίου και ολοκληρώματα της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας (ολοκλήρωση της μέσης υπολογισμένης τιμής της ακτινοβολίας ανά 30 λεπτά στο διάστημα 9:00 έως 19:00), πριν (28 Ιουνίου) και μετά (16 Ιουλίου) το άσπρισμα του θερμοκηπίου.	119
Πίνακας 5.3. Υπολογισμός της αισθητής ενέργειας που χανόταν από το θερμοκήπιο με αερισμό και διαφυγές H_v ($W m^{-2}$), της αεροδυναμικής αγωγιμότητας του θερμοκηπίου g_v ($mm s^{-1}$) και του ρυθμού ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου N (h^{-1}).....	131
Πίνακας 6.1. Μέσες τιμές (για το διάστημα 8:00 έως 19:00) των παραμέτρων του εξωτερικού κλίματος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων χωρίς το σύστημα δροσισμού, 19-20-21 Αυγούστου 1998 και με το σύστημα δροσισμού 25-26-27 Αυγούστου 1998.....	139
Πίνακας 7.1. Μέσες τιμές (διάστημα 8:00 - 19:00) των εξωτερικών κλιματικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια των τριών ημερών.....	162
Πίνακας 7.2. Μέσες τιμές (διάστημα 8:00-19:00) των μεταβλητών της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των τριών ημερών.	163

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3.1. Εξωτερική άποψη του πειραματικού θερμοκηπίου. (Ο θάλαμος στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι ο δεύτερος από αριστερά).....	78
Εικόνα 3.2. Εξωτερική άποψη των παραθύρων οροφής του θερμοκηπίου.	80
Εικόνα 3.3. Άποψη του εσωτερικού του θερμοκηπίου με το σύστημα δροσισμού σε λειτουργία.....	82
Εικόνα 3.4. Άποψη του εσωτερικού του θερμοκηπίου με το σύστημα δροσισμού εκτός λειτουργίας.	82
Εικόνα 3.5. Καλλιέργεια τριανταφυλλιάς στο θερμοκήπιο.....	84
Εικόνα 3.6. Όργανα μετρήσεων μετεωρολογικών δεδομένων (α) έξω από και (β) μέσα στο θερμοκήπιο.....	86

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Καλυμμένη έκταση με θερμοκήπια σε παγκόσμια κλίμακα (Συνολική έκταση 2 800 000 στρέμματα εκτός της Κίνας, Πηγή: ICAP).	3
Σχήμα 1.2. (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).	4
Σχήμα 1.3. Εκτάσεις που καλλιεργούνται με λαχανοκομικές και ανθοκομικές καλλιέργειες στην Ελλάδα κατά την περίοδο 1995-1998 (Πηγή: Υπουργείο Γεωργίας).	5
Σχήμα 1.4. Διαπνοή LE 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.	8

Σχήμα 1.5. Άμεση 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.....	9
Σχήμα 2.1. Εκτίμηση αναγκών αερισμού σε θερμοκήπιο με καλλιέργεια τριανταφυλλιάς σύμφωνα με τον Κίττα και συνεργάτες (1999).....	21
Σχήμα 2.2. Προσομοίωση (α) της θερμοκρασίας και (β) του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, συναρτήσει του ρυθμού ανανεώσης του αέρα του θερμοκηπίου, για διάφορες παροχές νερού ($\text{kg m}^{-2} \text{ ημέρα}^{-1}$) από το σύστημα δροσίσιμου σύμφωνα με τους Boulard and Baille (1993). Εξωτερικές κλιματικές συνθήκες: ηλιακή ακτινοβολία $G_o = 820 \text{ W m}^{-2}$, θερμοκρασία αέρα $T_o = 25^\circ\text{C}$, έλλειμμα κορεσμού αέρα $D_o = 1.9 \text{ kPa}$. Δείκτης φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας $I_{LA} = 3$	22
Σχήμα 2.3. Επίδραση του αερισμού στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια. T_i = θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου, T_c = θερμοκρασία της καλλιέργειας, D_i = έλλειμμα κορεσμού του αέρα, D_c = έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα, g_c = στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, g_a = αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας.....	25
Σχήμα 2.4. Προσομοίωση της διαπνοής θερμοκηπιακής καλλιέργειας τομάτας, συναρτήσει του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου, για διάφορες παροχές νερού από το σύστημα δροσίσιμου ($\text{kg m}^{-2} \text{ ημέρα}^{-1}$) σύμφωνα με τους Boulard and Baille (1993). Εξωτερικές κλιματικές συνθήκες: ηλιακή ακτινοβολία $G_o = 820 \text{ W m}^{-2}$, θερμοκρασία αέρα $T_o = 25^\circ\text{C}$, έλλειμμα κορεσμού αέρα $D_o = 1.9 \text{ kPa}$. Δείκτης φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας $I_{LA} = 3$	26
Σχήμα 2.5. Προσομοίωση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, για διάφορες τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας σύμφωνα με τον Jolliet (1999).....	36
Σχήμα 2.6. Κύκλος ανάδρασης διαπνοής-μικροκλίματος με εξωτερικό παράγοντα τη φυλλική επιφάνεια.....	38
Σχήμα 2.7. Προσομοίωση του ρυθμού διαπνοής καλλιέργειας τομάτας συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, για διάφορες τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας σύμφωνα με τον Jolliet (1999).....	38
Σχήμα 2.8. Ημερήσια πορεία (α) της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα T_c-T_i και (β) της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας g_c σύμφωνα με τους González-Real and Baille (2001).....	39
Σχήμα 2.9. Απλοποιημένο ενεργειακό ισοζύγιο σε ένα μη θερμαινόμενο θερμοκήπιο.....	42
Σχήμα 2.10. Διαπνοή λE (W m^{-2}), συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας G (W m^{-2}), για δύο περιόδους του έτους: Φεβρουάριος και Ιούλιος σύμφωνα με τον Κατσούλα και συνεργάτες (2000).....	43
Σχήμα 2.11. Ροές υδρατμών στο θερμοκήπιο.....	46
Σχήμα 2.12. Μεταβολή της διαπνοής κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου για δύο περιόδους: (- - -) χειμώνας και (—) καλοκαίρι. Μέση τιμή R_n και λE (διάστημα 9:00-19:00) 65 W m^{-2} και 52 W m^{-2} για το χειμώνα και 200 W m^{-2} και 500 W m^{-2} για το καλοκαίρι, αντίστοιχα.....	46
Σχήμα 2.13. Σχηματική απεικόνιση της στοματικής $g_{i,c}$ και της αεροδυναμικής $g_{i,a}$ αγωγιμότητας ενός φύλλου. e_i , D_b και T_i είναι η πίεση ατμών, το έλλειμμα κορεσμού και η θερμοκρασία του αέρα αντίστοιχα, e_m και T_1 η πίεση ατμών και η θερμοκρασία του φύλλου και e_s και D_s η πίεση ατμών και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα στην επιφάνεια του φύλλου.....	50
Σχήμα 2.14. (α) Πλήρως συζευγμένο φύλλο, (β) μη συζευγμένο φύλλο.....	61
Σχήμα 2.15. Ανταλλαγές ενέργειας με μεταφορά από το εσωτερικό της καλλιέργειας στον εξωτερικό αέρα.....	67
Σχήμα 2.16. (α) Αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου g_v συναρτήσει του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου N και (β) αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_a συναρτήσει του δείκτη φυλλικής επιφάνειας I_{LA}	68
Σχήμα 2.17. Παράγοντας Ω_g συναρτήσει του ρυθμού ανανεώσης του αέρα του θερμοκηπίου, για διάφορες τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Για τους υπολογισμούς θεωρήθηκαν: $g_{i,c} = 5 \text{ mm s}^{-1}$ και $g_{i,a} = 10 \text{ mm s}^{-1}$	69
Σχήμα 3.1. Πειραματικό θερμοκήπιο και μετρητικές διατάξεις.....	88
Σχήμα 3.2. Πειραματικό θερμοκήπιο και διάταξη των μετεωρολογικών οργάνων. 1, 2 και 3 αεριζόμενα ψυχρόμετρα σε ύψος 0.3, 0.8 και 1.8 m από το έδαφος αντίστοιχα, 4 και 5 ραδιόμετρα πάνω και κάτω από την καλλιέργεια αντίστοιχα και 6 και 7 πυρνόμετρα πάνω και κάτω από την καλλιέργεια αντίστοιχα.....	89
Σχήμα 3.3. Πειραματικό θερμοκήπιο και μετρητικές διατάξεις.....	90

Σχήμα 4.1. (α) Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.3 m και του εξωτερικού αέρα ΔT_{i-o} ($= T_{i,0.3} - T_o$) ($^{\circ}\text{C}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός. (β) Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 1.8 m και 0.3 m ΔT_{i-o} ($= T_{i,1.8} - T_{i,0.3}$) ($^{\circ}\text{C}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.	97
Σχήμα 4.2. (α) Διαφορά πίεσης ατμών μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.3 m και του εξωτερικού αέρα Δe_{i-o} ($= e_{i,0.3} - e_o$) (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός. (β) Διαφορά πίεσης ατμών μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 1.8 m και 0.3 m Δe_{i-o} ($= e_{i,1.8} - e_{i,0.3}$) (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.	98
Σχήμα 4.3. (α) Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της καλλιέργειας και του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.3 m ΔT_c ($= T_c - T_{i,0.3}$) ($^{\circ}\text{C}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός. (β) Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της καλλιέργειας και της μέσης τιμής του αέρα του θερμοκηπίου ΔT_c ($= T_c - T_i$) ($^{\circ}\text{C}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.	99
Σχήμα 4.4. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της καλλιέργειας και του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.3 m ΔT_c ($= T_c - T_{i,0.3}$) ($^{\circ}\text{C}$) συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού του αέρα σε ύψος 0.3 m $D_{i,0.3}$ (kPa). (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.	100
Σχήμα 4.5. Έλλειμμα κορεσμού μεταξύ της καλλιέργειας και του αέρα σε ύψος 0.3 m $D_{c,0.3}$ (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.	101
Σχήμα 4.6. Ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας λE_c (W m^{-2}) συναρτήσει της εισερχόμενης στο θερμοκήπιο ηλιακής ακτινοβολίας G_a (W m^{-2}). (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.	102
Σχήμα 4.7. Ροή αισθητής ενέργειας H_c (W m^{-2}) συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας της καλλιέργειας και του αέρα σε ύψος 0.3 m από το έδαφος ΔT_c ($= T_c - T_{i,0.3}$) ($^{\circ}\text{C}$). (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.	104
Σχήμα 4.8. (α) Συνολική αγωγιμότητα της καλλιέργειας $g_{t,0.3}$ (mm s^{-1}) υπολογισμένη χρησιμοποιώντας το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα στα 0.3 m $D_{c,0.3}$ (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός. (β) Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας $g_{c,0.3}$ (kPa) υπολογισμένη χρησιμοποιώντας το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα στα 0.3 m $D_{c,0.3}$ (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.	105
Σχήμα 4.9. (α) Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας $g_{c,0.3}$ (mm s^{-1}) συναρτήσει της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας G_a (W m^{-2}). (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός. (β) Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας $g_{c,0.3}$ (mm s^{-1}) συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού του αέρα $D_{i,0.3}$ (kPa). (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.	106
Σχήμα 4.10. Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας $I_{\text{CWS},0.3}$ υπολογισμένος με τη θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 0.3 m $T_{i,0.3}$ ($^{\circ}\text{C}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.	108
Σχήμα 4.11. Ομαλοποιημένη στοματική αγωγιμότητα g_c^* ($= g_c/G_a$) συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού στην επιφάνεια της καλλιέργειας D_s (kPa). (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.	111
Σχήμα 5.1. Ημερήσια πορεία του συντελεστή διαπερατότητας του θερμοκηπίου τ , πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).	118
Σχήμα 5.2. Ημερήσια πορεία της διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού-εξωτερικού αέρα ΔT_{i-o} ($= T_{i,1.8} - T_o$) ($^{\circ}\text{C}$), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).	120
Σχήμα 5.3. Ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα $D_{i,1.8}$ (kPa), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).	121
Σχήμα 5.4. Ημερήσια πορεία της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ΔT_c ($= T_c - T_{i,0.5}$) ($^{\circ}\text{C}$), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).	122

Σχήμα 5.5. Ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού καλλιέργειας-αέρα D_c (kPa), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).	123
Σχήμα 5.6. Ημερήσια πορεία του ρυθμού διαπνοής της καλλιέργειας λE_c ($W m^{-2}$), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).	124
Σχήμα 5.7. Ημερήσια πορεία της ροής αισθητής ενέργειας H_c ($W m^{-2}$), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).	125
Σχήμα 5.8. Ημερήσια πορεία του λόγου Bowen β , πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).	126
Σχήμα 5.9. Ημερήσια πορεία της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας g_c ($mm s^{-1}$), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).	127
Σχήμα 5.10. Ημερήσια πορεία του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας I_{CWS} , πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).	128
Σχήμα 6.1. Πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα D_i (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (ο) 19-20-21 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 25-26-27 Αυγούστου, με δροσισμό.	140
Σχήμα 6.2. Ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας λE_c ($W m^{-2}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (ο) 19-20-21 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 25-26-27 Αυγούστου, με δροσισμό.	141
Σχήμα 6.3. (α) Ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας λE_c ($W m^{-2}$) συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την καλλιέργεια G_a ($W m^{-2}$). (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό. (β) Ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας λE_c ($W m^{-2}$) συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού του αέρα D_i (kPa). (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό.	142
Σχήμα 6.4. Διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ΔT_c ($^{\circ}C$) συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού του αέρα D_i (kPa). Οι μετρήσεις έγιναν κατά το διάστημα 8:00 έως 19:00. (—) με δροσισμό (27 Αυγούστου) και χωρίς δροσισμό μέχρι τις 10:00 στις 19 Αυγούστου, (- - -) χωρίς δροσισμό 10:00 έως 17:00 (19 Αυγούστου), (***), χωρίς δροσισμό 17:00 έως 19:00 (19 Αυγούστου). (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό.	143
Σχήμα 6.5. Ροή αισθητής ενέργειας H_c ($W m^{-2}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό.	144
Σχήμα 6.6. Λόγος Bowen β κατά τη διάρκεια της ημέρας. (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό.	145
Σχήμα 6.7. Ροή αισθητής ενέργειας H_c ($W m^{-2}$) συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ΔT_c ($^{\circ}C$). Οι ευθείες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις γραμμές γραμμικής παλινδρόμησης των πειραματικών δεδομένων. (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό.	146
Σχήμα 6.8. Σύγκριση της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση των Penman-Monteith $g_{c,PM}$ ($mm s^{-1}$), με τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, όπως υπολογίστηκε από την σχέση (2.29) $g_{c,direct}$ ($mm s^{-1}$). (ο) 19-20-21 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 25-26-27 Αυγούστου, με δροσισμό.	147
Σχήμα 6.9. Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_c ($mm s^{-1}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (ο) 19-20-21 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 25-26-27 Αυγούστου, με δροσισμό.	148
Σχήμα 6.10. (α) Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_c ($mm s^{-1}$) συναρτήσει της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας G_a ($W m^{-2}$). (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό. (β) Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_c ($mm s^{-1}$) συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού του αέρα D_i (kPa). (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό.	150
Σχήμα 6.11. Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας I_{CWS} κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας υπολογίστηκε με τιμή για την $g_m = 30 mm s^{-1}$. (ο) 19-20-21 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 25-26-27 Αυγούστου, με δροσισμό.	151
Σχήμα 6.12. Ομαλοποιημένη αγωγιμότητα, g_c^* ($= g_c/R_{s,a}$) συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού στην επιφάνεια της καλλιέργειας D_s (kPa). (ο) 19-20-21 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 25-26-27 Αυγούστου, με δροσισμό. Η καμπύλη είναι προσαρμοσμένη σε όλα τα δεδομένα ($g_c^* = 0.0756 D_s^{-0.504}$, $R^2 = 0.62$).	156
Σχήμα 7.1. (α) Έλλειμμα κορεσμού του αέρα D_i (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (ο), 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA} . (β) Έλλειμμα κορεσμού	

	καλλιέργειας-αέρα D_c (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (ο), 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA}	164
Σχήμα 7.2.	Διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα $\Delta T_c (= T_c - T_i)$ ($^{\circ}\text{C}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (ο), 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA}	165
Σχήμα 7.3.	Ρυθμός διαπνοής λE_c (W m^{-2}) και ροή αισθητής ενέργειας H_c (W m^{-2}) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), λE_c 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (ο), λE_c 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA} , (▲), H_c 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (Δ), H_c 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA}	166
Σχήμα 7.4.	Ροή αισθητής ενέργειας H_c (W m^{-2}) συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα $\Delta T_c (= T_c - T_i)$ ($^{\circ}\text{C}$). (●), 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (ο), 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA}	167
Σχήμα 7.5.	Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_c (mm s^{-1}) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (ο), 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA}	168
Σχήμα 7.6.	Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας I_{CWS} κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (ο), 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA}	169
Σχήμα 7.7.	Συντελεστής εξάτμισης ε κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 14 Ιουλίου 1998, ασπρισμένο θερμοκήπιο, υψηλός I_{LA} , (ο), 13 Αυγούστου 1999, ασπρισμένο θερμοκήπιο, χαμηλός I_{LA} , (Δ), 28 Ιουνίου 1999, μη ασπρισμένο θερμοκήπιο, χαμηλός, I_{LA}	171
Σχήμα 7.8.	Συντελεστής εξάτμισης ε συναρτήσει του θερμικού φορτίου $R_{n,a}$ (W m^{-2}). (●), 14 Ιουλίου 1998, ασπρισμένο θερμοκήπιο, υψηλός I_{LA} , (ο), 13 Αυγούστου 1999, ασπρισμένο θερμοκήπιο, χαμηλός I_{LA} , (Δ), 28 Ιουνίου 1999, μη ασπρισμένο θερμοκήπιο, χαμηλός, I_{LA}	177

Κατάλογος Συμβόλων

A	συντελεστής που ορίζεται στην εξίσωση (2.30)	-	(2.30)
A_c	επιφάνεια εδάφους θερμοκηπίου καλυμμένη με καλλιέργεια	m^2	
A_g	συνολική επιφάνεια εδάφους θερμοκηπίου	m^2	(2.12)
B	συντελεστής που ορίζεται στην εξίσωση (2.30)	-	(2.30)
C	πυκνότητα ροής ενέργειας που αποθηκεύεται στην καλλιέργεια	$W m^{-2}$	(2.4)
C_p	ειδική θερμότητα του αέρα σε σταθερή πίεση	$J kg^{-1} [αέρα] K^{-1}$	(2.11)
D_c	έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα	kPa	(2.21)
$D_{c,0.3}$	έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα υπολογισμένο για τον αέρα σε ύψος 0.3 m	kPa	
D_i	έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου	kPa	(2.25)
$D_{i,0.3}$	έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.3 m	kPa	(4.1)
$D_{i,0.5}$	έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.5 m	kPa	
$D_{i,0.8}$	έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.8 m	kPa	
$D_{i,1.8}$	έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 1.8 m	kPa	
$D_{l,s}$	έλλειμμα κορεσμού του αέρα στην επιφάνεια του φύλλου	kPa	(2.35)
$D_{l,eq}$	έλλειμμα κορεσμού εξισορρόπησης του αέρα στην επιφάνεια του φύλλου	kPa	(2.35)
D_o	έλλειμμα κορεσμού του εξωτερικού αέρα	kPa	
D_s	έλλειμμα κορεσμού στην επιφάνεια της καλλιέργειας	kPa	
d	χαρακτηριστικό μήκος φύλλου	m	(7.8)
E	ρυθμός διαπνοής	$kg m^{-2} s^{-1}$	(2.4)
E_a	ρυθμός παροχής νερού στο θερμοκήπιο με το σύστημα δροσίσιμου	$kg m^{-2} s^{-1}$	(2.15)
E_c	ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας	$kg m^{-2} [εδάφους$	

		καλυμμένου με καλλιέργεια] s ⁻¹	
$E_{c,eq}$	ρυθμός διαπνοής εξισορρόπησης της καλλιέργειας	kg m ⁻² s ⁻¹	(2.38)
$E_{c,imp}$	ρυθμός επιβαλλόμενης διαπνοής της καλλιέργειας	kg m ⁻² s ⁻¹	(2.37)
$E_{c,p}$	ρυθμός δυναμικής διαπνοής της καλλιέργειας	kg m ⁻² s ⁻¹	
E_d	ρυθμός απομάκρυνσης νερού από το θερμοκήπιο με το σύστημα αφύγρανσης	kg m ⁻² s ⁻¹	(2.15)
E_{eq}	ρυθμός διαπνοής εξισορρόπησης	kg m ⁻² s ⁻¹	
Eff	αποτελεσματικότητα συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη	%	(2.1)
E_g	ρυθμός εξάτμισης από το έδαφος	kg m ⁻² [εδάφους θερμοκηπίου] s ⁻¹	(2.15)
E_{imp}	ρυθμός επιβαλλόμενης διαπνοής	kg m ⁻² s ⁻¹	
E_l	ρυθμός διαπνοής του φύλλου	kg m ⁻² s ⁻¹	(2.31)
$E_{l,a}$	ρυθμός μεταφοράς υδρατμών από την επιφάνεια του φύλλου στον αέρα	kg m ⁻² s ⁻¹	(2.18)
$E_{l,eq}$	ρυθμός διαπνοής εξισορρόπησης του φύλλου	kg m ⁻² s ⁻¹	(2.32)
$E_{l,imp}$	ρυθμός επιβαλλόμενης διαπνοής του φύλλου	kg m ⁻² s ⁻¹	(2.31)
$E_{l,s}$	ρυθμός μεταφοράς υδρατμών από το εσωτερικό προς την επιφάνεια του φύλλου	kg m ⁻² s ⁻¹	(2.17)
E_k	ρυθμός συμπύκνωσης υδρατμών στο κάλυμμα του θερμοκηπίου	kg m ⁻² s ⁻¹	(2.15)
E_{sa}	ρυθμός μεταβολής της υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου	kg m ⁻² s ⁻¹	(2.15)
E_v	ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το θερμοκήπιο με αερισμό και διαφυγές	kg m ⁻² s ⁻¹	(2.15)
e	πίεση ατμών του αέρα	kPa	
e^*_i	πίεση ατμών του αέρα στον κορεσμό	kPa	(2.23)
$e^*(T_l)$	πίεση ατμών του αέρα στον κορεσμό στη θερμοκρασία T_l	kPa	(2.20)
e_i	πίεση ατμών του αέρα του θερμοκηπίου	kPa	(2.16)

$e_{i,0.3}$	πίεση ατμών του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.3 m	kPa	
e_m	πίεση ατμών του αέρα στο εσωτερικό του φύλλου	kPa	(2.17)
e_o	πίεση ατμών του εξωτερικού αέρα	kPa	(2.16)
e_s	πίεση ατμών του αέρα στην επιφάνεια του φύλλου	kPa	(2.17)
G	πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας (στη συνέχεια για λόγους συντομίας θα αναφέρεται ως ηλιακή ακτινοβολία)	$W m^{-2}$	
G_a	ηλιακή ακτινοβολία πάνω από την καλλιέργεια	$W m^{-2}$	(7.5)
G_b	ηλιακή ακτινοβολία κάτω από την καλλιέργεια	$W m^{-2}$	
G_o	ηλιακή ακτινοβολία έξω από το θερμοκήπιο	$W m^{-2}$	
g_a	αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας	$m s^{-1}$	(2.2)
g_c	στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας	$m s^{-1}$	(2.3)
g_c^*	ομαλοποιημένη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας ($= g_c/G_a$)	$m s^{-1}$	
$g_{c,0.3}$	στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας υπολογισμένη με την εξίσωση (2.29), χρησιμοποιώντας τιμές των D_c και g_a στα 0.3 m	$m s^{-1}$	
$g_{l,a}$	αεροδυναμική αγωγιμότητα του φύλλου	$m s^{-1}$	(2.2)
$g_{l,c}$	στοματική αγωγιμότητα του φύλλου	$m s^{-1}$	(2.3)
$g_{l,t}$	συνολική αγωγιμότητα του φύλλου	$m s^{-1}$	(2.21)
g_M	μέγιστη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας	$m s^{-1}$	(2.28)
g_t	συνολική αγωγιμότητα της καλλιέργειας	$m s^{-1}$	(2.37)
$g_{t,0.3}$	συνολική αγωγιμότητα της καλλιέργειας υπολογισμένη σε ύψος 0.3 m	$m s^{-1}$	
$g_{t,a}$	συνολική αεροδυναμική αγωγιμότητα στη μεταφορά των υδρατμών από την επιφάνεια της καλλιέργειας στον εξωτερικό αέρα	$m s^{-1}$	(2.41)
g_v	αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου	$m s^{-1}$	(2.11)
H	πυκνότητα ροής αισθητής ενέργειας (στη	$W m^{-2}$	(2.4)

συνέχεια για λόγους συντομίας θα αναφέρεται ως αισθητή ενέργεια)

H_c	αισθητή ενέργεια που ανταλλάσσεται από την καλλιέργεια	$W m^{-2}$ [εδάφους καλυμμένου με καλλιέργεια]	(4.3)
H_r	αισθητή ενέργεια που χάνεται από το θερμοκήπιο με ακτινοβολία και μεταφορά	$W m^{-2}$	(2.9)
H_v	αισθητή ενέργεια που χάνεται από το θερμοκήπιο με αερισμό και διαφυγές	$W m^{-2}$ [εδάφους καλυμμένου με καλλιέργεια]	(2.9)
H_g	αισθητή ενέργεια που απελευθερώνεται στο θερμοκήπιο από το ακάλυπτο έδαφος	$W m^{-2}$	(5.1)
h_v	αγωγιμότητα στη μεταφορά υδρατμών με αερισμό και διαφυγές	$m s^{-1}$	(2.16)
I_{CWS}	δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας	-	(1.1)
$I_{CWS,0.3}$	δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας υπολογισμένος με τη θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 0.3 m	-	
I_{LA}	δείκτης φυλλικής επιφάνειας	m^2 [φύλλων] m^{-2} [εδάφους]	(2.2)
$I_{LA,c}$	δείκτης φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας με αναφορά στην καλυμμένη με καλλιέργεια επιφάνεια του θερμοκηπίου A_c	m^2 [φύλλων] m^{-2} [εδάφους καλυμμένου με καλλιέργεια]	
$I_{LA,g}$	δείκτης φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας με αναφορά στη συνολική επιφάνεια του θερμοκηπίου A_g	m^2 [φύλλων] m^{-2} [εδάφους θερμοκηπίου]	
J	πυκνότητα ροής ενέργειας που αποθηκεύεται στο έδαφος	$W m^{-2}$	(2.4)
L	μήκος φύλλου	m	(3.1)
N	ρυθμός ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου	m^3 [αέρα] $s^{-1} m^{-2}$ [εδάφους] ή h^{-1}	(2.12)
p	ποσοστό της καλυμμένης με καλλιέργεια	m^2 [εδάφους]	(5.1)

	επιφάνειας του εδάφους του θερμοκηπίου (=A _c /A _g)	καλυμμένου με καλλιέργεια] m ⁻² [εδάφους θερμοκηπίου]	
<i>Q_v</i>	παροχή αερισμού	m ³ [αέρα] m ⁻² [εδάφους] s ⁻¹	(7.5)
<i>R²</i>	συντελεστής προσδιορισμού	-	
<i>R_n</i>	πυκνότητα ροής καθαρής ακτινοβολίας (στη συνέχεια για λόγους συντομίας θα αναφέρεται ως καθαρή ακτινοβολία)	W m ⁻²	(2.4)
<i>R_{n,a}</i>	καθαρή ακτινοβολία πάνω από την καλλιέργεια,	W m ⁻²	(4.5)
<i>R_{n,b}</i>	καθαρή ακτινοβολία κάτω από την καλλιέργεια	W m ⁻²	
<i>R_{n,int}</i>	απορροφούμενη από την καλλιέργεια καθαρή ακτινοβολία (= <i>R_{n,a}</i> – <i>R_{n,b}</i>)	W m ⁻²	(7.7)
<i>S</i>	φυλλική επιφάνεια	m ²	(3.1)
<i>T</i>	θερμοκρασία	°C	
<i>T_{0.3}</i>	θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.3 m	°C	
<i>T_{0.5}</i>	θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.5 m	°C	
<i>T_{0.8}</i>	θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.8 m	°C	
<i>T_{1.8}</i>	θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 1.8 m	°C	
<i>T_c</i>	θερμοκρασία της καλλιέργειας	°C	(1.1)
<i>T_e</i>	θερμοκρασία του αέρα που βγαίνει από το θερμοκήπιο	°C	(7.5)
<i>T_i</i>	θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου	°C	(2.1)
<i>T_l</i>	θερμοκρασία του φύλλου	°C	(2.20)
<i>T_m</i>	ελάχιστη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί στην καλλιέργεια	°C	(1.1)
<i>T_M</i>	μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να επιτευχθεί στην καλλιέργεια	°C	(1.1)

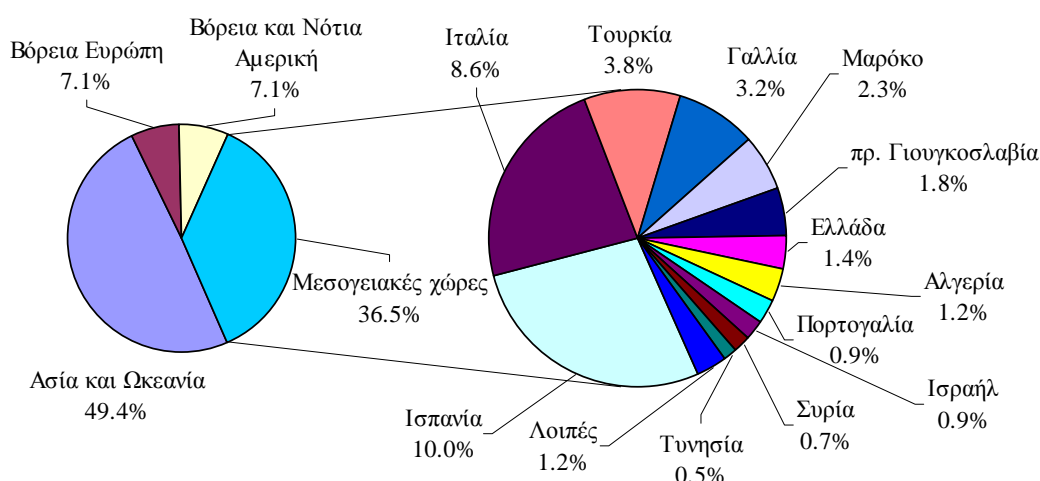
T_o	θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα	°C	(2.1)
$T_{o,w}$	θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου του εξωτερικού αέρα	°C	(2.1)
U_r	συντελεστής απωλειών θερμότητας με ακτινοβολία και μεταφορά	$W m^{-2} K^{-1}$	(2.10)
u	ταχύτητα του αέρα έξω από το θερμοκήπιο	$m s^{-1}$	
V	όγκος του θερμοκηπίου	m^3	(2.12)
v	ταχύτητα του αέρα κοντά στην επιφάνεια του φύλλου	$m s^{-1}$	(7.8)
α	λόγος της ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε λανθάνουσα ενέργεια	-	(2.6)
β	λόγος Bowen ($= H_c/\lambda E_c$)	-	(2.8)
γ	ψυχομετρική σταθερά	$kPa K^{-1}$	(2.16)
Δe	διαφορά πίεσης ατμών	kPa	
Δe_{i-o}	διαφορά πίεσης ατμών εσωτερικού εξωτερικού αέρα του θερμοκηπίου	kPa	(2.16)
ΔT	διαφορά θερμοκρασίας	°C	
ΔT_{i-o}	διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού εξωτερικού αέρα του θερμοκηπίου	°C	(2.10)
ΔT_c	διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα	°C	(2.27)
δ	κλίση της καμπύλης κορεσμού του αέρα σε σταθερή πίεση	$kPa K^{-1}$	(2.22)
ε	συντελεστής εξάτμισης ($=\lambda E/R_{n,a}$)	-	(7.5)
λ	λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού	$J kg^{-1}$	(2.4)
		[υδρατμών]	
ρ	πυκνότητα του αέρα	$kg [αέρα] m^{-3}$	(2.11)
		[αέρα]	
τ	συντελεστής διαπερατότητας του θερμοκηπίου ($= G_a/G_o$)	-	
Ω	παράγοντας ωμέγα	-	
Ω_c	παράγοντας ωμέγα της καλλιέργειας	-	(2.39)
Ω_g	παράγοντας ωμέγα του θερμοκηπίου	-	(2.40)
Ω_l	παράγοντας ωμέγα του φύλλου	-	(2.33)

Κεφάλαιο 1. Γενική Εισαγωγή

1.1 Γενικά

1.1.1 Ο κλάδος των θερμοκηπίων

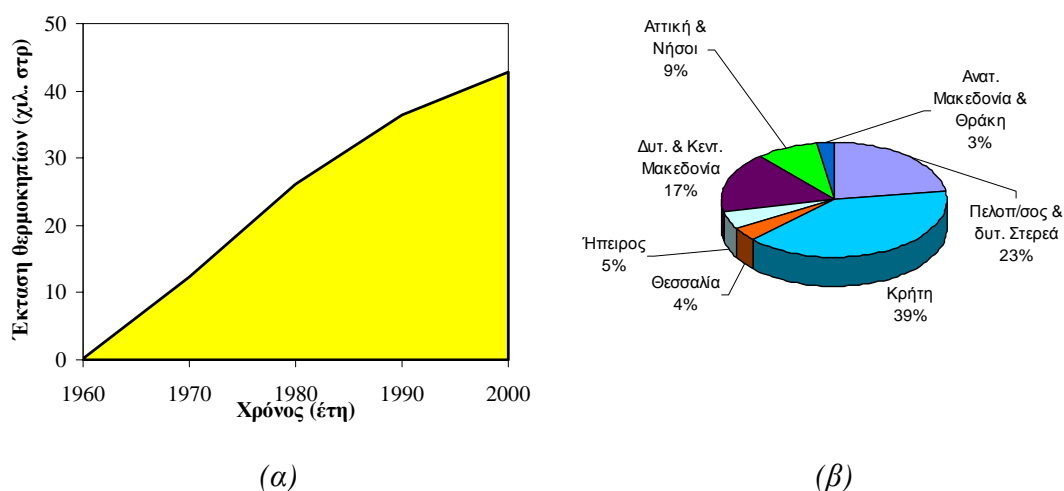
Οι απαιτήσεις για παραγωγή φρέσκων λαχανικών και ανθέων κατά τη διάρκεια όλου του έτους έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ενδιαφέροντος για καλλιέργειες υπό κάλυψη. Τα θερμοκήπια, τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα καλλιέργειας υπό κάλυψη, έχουν αναπτυχθεί και βελτιωθεί σημαντικά εδώ και αρκετό καιρό.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

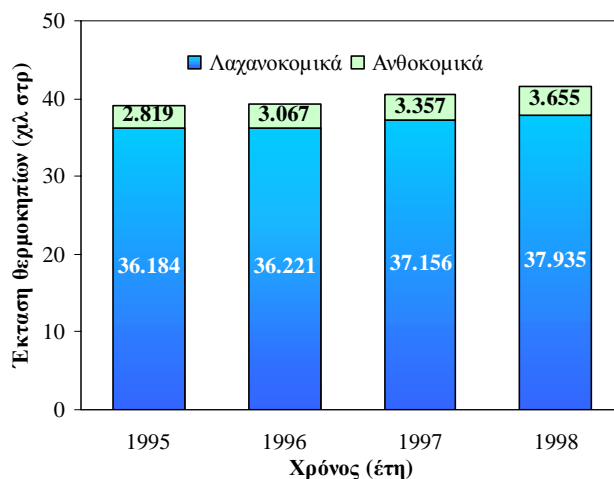
Στην Ελλάδα, η οποία καλύπτει το 1.4% της παγκόσμιας έκτασης σε θερμοκήπια, η αύξηση των θερμοκηπιακών εκτάσεων ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακή την εικοσαετία 1960-1980 (Σχήμα 1.2.α). Κατά τη δεκαετία του '80 η αύξηση συνεχίστηκε αλλά με χαμηλότερους ρυθμούς, ενώ κατά την τελευταία δεκαετία οι ρυθμοί ήταν ακόμη χαμηλότεροι. Εν τούτοις, σε απόλυτα μεγέθη, οι θερμοκηπιακές εκτάσεις στην Ελλάδα δεν έχουν γνωρίσει την ανάπτυξη εκείνη που θα δικαιολογούσαν οι ευνοϊκοί παράγοντες που επικρατούν στη χώρα μας για τις καλλιέργειες αυτές. Κατά συνέπεια, η χώρα μας υστερεί σημαντικά στον τομέα αυτό έναντι άλλων χωρών με παρόμοιες κλιματολογικές συνθήκες, όπως είναι η Ισπανία και η Ιταλία.

Στην Ελλάδα, η Κρήτη κατέχει το μεγαλύτερο τμήμα της καλυμμένης έκτασης σε θερμοκήπια με ποσοστό περίπου 39% (Σχήμα 1.2.β).



Σχήμα 1.2. (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).

Οι θερμοκηπιακές εκτάσεις στις οποίες καλλιεργούνται λαχανοκομικές καλλιέργειες αντιπροσωπεύουν ποσοστό μεγαλύτερο του 90% των συνολικών θερμοκηπιακών εκτάσεων, ενώ αντίστοιχα οι εκτάσεις που καλλιεργούνται με ανθοκομικά είδη περιορίζονται σε ποσοστό μικρότερο του 10% (Σχήμα 1.3).



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

Στα λαχανοκομικά, τις μεγαλύτερες εκτάσεις καλύπτουν η τομάτα και το αγγούρι καταλαμβάνοντας μερίδιο της τάξης του 80%, ενώ στα ανθοκομικά, τα δρεπτά άνθη (τριαντάφυλλα, γαρύφαλλα, χρυσάνθεμα κλπ) καλύπτουν συνολικά ποσοστό 65.5% του αντίστοιχου συνόλου.

Από τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν, φαίνεται καθαρά ότι παρά την πρόοδο που σημειώθηκε στον τομέα των καλλιεργειών υπό κάλυψη, η χώρα μας δεν έχει φθάσει ακόμη στη μέγιστη δυνατή ανάπτυξη.

1.1.2 Προβλήματα του κλάδου των θερμοκηπίων στην Ελλάδα

Η επέκταση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών στην Ελλάδα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ανταγωνισμό με τις υπαίθριες, πρώιμες και όψιμες καλλιέργειες και τις εισαγωγές 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 κατά την ίδια περίοδο.

Σε ότι 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 είναι πρόβλημα που αντιμετωπίζουν όλες οι 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.

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. 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. Αντίθετα, η υψηλή θερμοκρασία και τα μεγάλα φορτία ακτινοβολίας που εμφανίζονται αργά την άνοιξη μέχρι νωρίς το φθινόπωρο είναι από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι παραγωγοί. Έτσι, το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού είναι η υδατική και θερμική καταπόνηση.

1.1.3 Σημασία και μέθοδοι ρύθμισης της διαπνοής στο θερμοκήπιο

Η συγκέντρωση του νερού στα φυτά θα πρέπει να διατηρείται μέσα σε ένα στενό εύρος έτσι ώστε να παρέχει τις προϋποθέσεις για βέλτιστη ανάπτυξη. Μία μείωση κατά 10% θα μπορούσε να επηρεάσει τη λειτουργία και την ανάπτυξη των φυτών ή ακόμη και να προκαλέσει το θάνατό τους.

Στα φυτά, το νερό εξασφαλίζει ένα μεγάλο εύρος λειτουργιών:

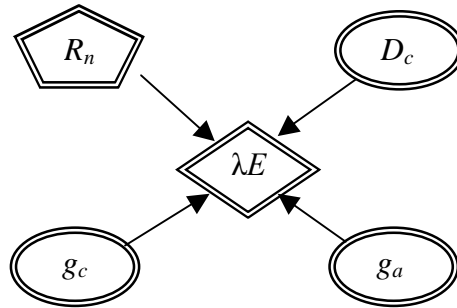
- Είναι το μεγαλύτερο σε συγκέντρωση συστατικό και αποτελεί περίπου το 70% έως 95% του νερού τους βάρους. Δίνει το σχήμα και την ακαμψία στα φυτά.
- Χρησιμοποιείται ως μέσο διάλυσης και πηγής ιόντων, είναι το μέσο μεταφοράς των θρεπτικών στοιχείων από το έδαφος στο φυτό και είναι απαραίτητο σε πολλές βιοχημικές αντιδράσεις.
- Τέλος, λόγω της μεγάλης του ειδικής θερμότητας, το νερό ψύχει τα φύλλα και προλαμβάνει την υπερθέρμανσή τους.

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

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

Η διαπνοή επηρεάζεται από (Σχήμα 1.4):

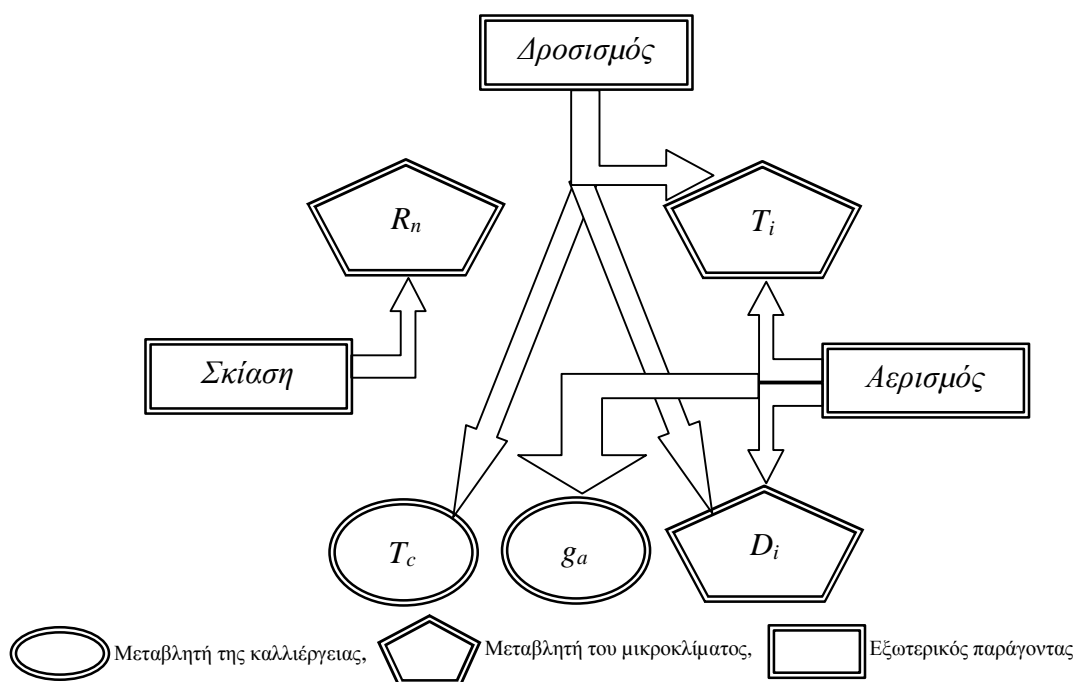
- την ακτινοβολία,
- τη διαφορά μεταξύ της πίεσης ατμών του αέρα και της πίεσης ατμών στον κορεσμό στη θερμοκρασία του φύλλου (έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα),
- την αγωγιμότητα στη μεταφορά των υδρατμών από το εσωτερικό του φύλλου στην επιφάνειά του (στοματική αγωγιμότητα) και
- την αγωγιμότητα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



Σχήμα 1.4. 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.

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 (Choudhury and Monteith 1986). 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) (Σχήμα 1.5), παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα (R_n) ή έμμεσα (T_i , D_i) τη διαπνοή των καλλιεργειών.



Σχήμα 1.5. Άμεση 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.

➤ Αερισμός

Σε χώρες με θερμό καλοκαίρι ο αποτελεσματικός αερισμός των θερμοκηπίων είναι προϋπόθεση για τον έλεγχο του θερμοκηπιακού μικροκλίματος. 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 αερισμό, έκτοτε 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 έξοδο του από το θερμοκήπιο. Το πλεονέκτημα του δυναμικού αερισμού είναι ότι μπορεί να συνδυαστεί με συστήματα υγρής παρειάς τα οποία θα δούμε στη συνέχεια.

➤ **Υγρή παρειά**

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 το τοίχωμα της υγρής παρειάς. Η υγρή παρειά λειτουργεί σαν ένας μεγάλος ψύκτης με την αποτελεσματικότητά της να δίνεται ανάλογα με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ξηρού και του υγρού θερμομέτρου. Έτσι, η αποτελεσματικότητα του συστήματος αυξάνεται σε περιοχές με ξηρό και θερμό κλίμα.

➤ **Τεχνητή ομίχλη**

Στις μέρες μας, τα συστήματα δροσισμού με τεχνητή ομίχλη επιτρέπουν τη δημιουργία περισσότερο ομοιογενών συνθηκών στο θερμοκήπιο, μειώνουν τις απαιτήσεις για δυναμικό αερισμό ενώ παράλληλα έχουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα ψύξης.

Τα συστήματα ψύξης με τεχνητή ομίχλη χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στα συστήματα: (α) υψηλής ($\approx 6 \text{ MPa} \approx 60 \text{ bar}$) και (β) 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.

Τα συστήματα δροσισμού υψηλής πίεσης, παρέχουν εξαιρετικά λεπτά σταγονίδια νερού (π.χ. διαμέτρου 10 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. Παράλληλα, λόγω της ισχυρής ομίχλης που επικρατεί στο θερμοκήπιο, μειώνεται και η ένταση της προσπίπτουσας στην καλλιέργεια ακτινοβολίας. Η θερμοκρασία και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα μειώνονται ταυτόχρονα με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη μείωση της διαπνοής. Παρόλα αυτά η μείωση της θερμοκρασίας των φύλλων είναι περιορισμένη, εκτός αν η εξάτμιση λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια των φύλλων. Πλεονέκτημα του συστήματος αυτού έναντι των συστημάτων ψύξης με υγρή παρειά είναι η ομοιογένεια των συνθηκών που δημιουργούν στο θερμοκήπιο. Μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης και η απαίτηση για καλής ποιότητας νερό. Νερό που περιέχει άλατα προκαλεί βλάβες στον εξοπλισμό και στα φύλλα των φυτών.

➤ 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.

1.1.4 Προϋποθέσεις και προβλήματα για τη βελτιστοποίηση της ρύθμισης του κλίματος

Παρά το γεγονός ότι ο έλεγχος του θερμοκηπιακού μικροκλίματος αποσκοπεί στον έλεγχο της υδατικής κατάστασης των φυτών, δεν είναι ακόμα επακριβώς γνωστή η επίδραση των παραπάνω συστημάτων στη διαπνοή της καλλιέργειας.

Προκειμένου να επιτευχθεί ο βέλτιστος έλεγχος του θερμοκηπιακού μικροκλίματος είναι απαραίτητο:

- να ορισθεί το ή τα κριτήρια (δείκτες) που θα χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση και να προσδιορισθούν οι μηχανισμοί που τα καθορίζουν,
- να γίνουν παρατηρήσεις και ποιοτική περιγραφή των μηχανισμών που επηρεάζουν τα κριτήρια και
- να γίνουν μετρήσεις για την ποσοτική περιγραφή (παραμετροποίηση) των μηχανισμών.

Το πρόβλημα στην επίτευξη του βέλτιστου ελέγχου στο θερμοκήπιο έγκειται στο γεγονός ότι:

- το κριτήριο για τον βέλτιστο έλεγχο δεν είναι πάντα το ίδιο και εξαρτάται από την οπτική γωνία από την οποία εξετάζει το πρόβλημα ο κάθε ερευνητής (π.χ.: εξοικονόμηση ενέργειας, αύξηση κέρδους, μεγιστοποίηση παραγωγής κλπ),
- υπάρχουν πολλές παρατηρήσεις και μετρήσεις που περιγράφουν τους μηχανισμούς που εμπλέκονται αλλά έχουν γίνει κάτω από διαφορετικές συνθήκες (κλίμα, καλλιέργεια) και κατά συνέπεια χρειάζονται πάντα εξακρίβωση πριν την εφαρμογή τους και
- το μικροκλίμα του θερμοκηπίου επηρεάζεται από το εξωτερικό κλίμα και την αντίδραση της καλλιέργειας. Η αντίδραση της καλλιέργειας επηρεάζεται από το μικροκλίμα του θερμοκηπίου το οποίο καθορίζεται μεν σε μεγάλο βαθμό από το εξωτερικό κλίμα αλλά δέχεται και σημαντικές επιδράσεις από την καλλιέργεια.

Ως κριτήριο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη ρύθμιση του κλίματος στο θερμοκήπιο για τη βέλτιστη διαχείριση θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας I_{CWS} ο οποίος δίνεται από τη σχέση (Jackson *et al.* 1981):

$$I_{CWS} = \frac{T_c - T_m}{T_M - T_m} \quad (1.1)$$

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

1.2 Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Από την εισαγωγή που προηγήθηκε γίνεται φανερό ότι γνωρίζοντας επακριβώς την επίδραση του μικροκλίματος και των μεταβολών του στην καλλιέργεια και τη διαπνοή της, είναι ευκολότερο να προβλέψουμε την τροποποίηση που θα ακολουθήσει τόσο στη φυσιολογική κατάσταση της καλλιέργειας όσο και στο κλίμα του θερμοκηπίου.

Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια διερεύνησης της επίδρασης των παραγόντων του περιβάλλοντος στη διαπνοή μιας θερμοκηπιακής καλλιέργειας τριανταφυλλιάς. Οι πληροφορίες αυτές αναμένεται να βοηθήσουν τις προσπάθειες για καλύτερη ρύθμιση του κλίματος στο θερμοκήπιο.

Το *επιστημονικό αντικείμενο* της εργασίας αυτής είναι η λεπτομερής μελέτη και ανάλυση των αλληλεπιδράσεων (και της σύζευξης) μεταξύ του κλίματος του θερμοκηπίου και των ανταλλαγών μάζας και ενέργειας της καλλιέργειας, όταν αυτό ελέγχεται με διάφορα συστήματα ελέγχου (σύστημα αερισμού, σύστημα δροσισμού, σκίαση). Η γνώση των αλληλεπιδράσεων αυτών είναι απαραίτητη, προκειμένου να κατανοηθούν και προσομοιωθούν οι μηχανισμοί σύζευξης μεταξύ του περιβάλλοντος και της καλλιέργειας σε ένα θερμοκήπιο.

Το *πρακτικό αντικείμενο* της εργασίας είναι η μελέτη του κλίματος του θερμοκηπίου και της φυσιολογικής κατάστασης της καλλιέργειας και πώς αυτά επηρεάζονται από τους διάφορους χειρισμούς των συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του κλίματος, με σκοπό να καταστεί δυνατό να προταθεί πιο σύστημα και πώς πρέπει να χρησιμοποιηθεί, προκειμένου να επιτευχθούν στο θερμοκήπιο οι βέλτιστες συνθήκες για την ανάπτυξη της καλλιέργειας.

Μετά τη γενική εισαγωγή που προηγήθηκε, στη συνέχεια γίνεται (*Κεφάλαιο 2*): (α) βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την επίδραση του αερισμού, του δροσισμού, της σκίασης και της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια και (β) σύντομη αναφορά στο ισοζύγιο ενέργειας και μάζας του θερμοκηπίου, στις προσπάθειες που έχουν γίνει για την προσομοίωση της διαπνοής στο θερμοκήπιο μέχρι σήμερα, στη σύζευξη της καλλιέργειας με το περιβάλλον του θερμοκηπίου και τη σύζευξη του θερμοκηπίου με το εξωτερικό περιβάλλον.

Κατόπιν, ακολουθεί το πειραματικό μέρος της εργασίας όπου στο *Κεφάλαιο 3* παρουσιάζεται ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και γίνεται περιγραφή της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των συστημάτων ψύξης του θερμοκηπίου στο μικροκλίμα και τη διαπνοή της καλλιέργειας.

Στη συνέχεια (*Κεφάλαιο 4*) γίνεται προσπάθεια για την σε βάθος μελέτη της επίδρασης του ρυθμού ανανέωσης του αέρα στο θερμοκήπιο, στη θερμοκρασία, τη στοματική και αεροδυναμική αγωγιμότητα και το δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας και την κατανομή της ενέργειας στο επίπεδο της καλλιέργειας σε αισθητή και λανθάνουσα. Μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στη μελέτη της αεροδυναμικής και της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας και της πιθανής τους σύνδεσης με το ρυθμό ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου.

Στο *Κεφάλαιο 5* ακολουθεί η μελέτη της επίδρασης της σκίασης του θερμοκηπίου με άσπρισμα της οροφής, στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και τη συμπεριφορά της καλλιέργειας. Μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στην ανάλυση των αλλαγών που προκαλεί στον καταμερισμό της ενέργειας στο επίπεδο της καλλιέργειας μέσα από το χαρακτηρισμό της διαπνοής, της αισθητής ενέργειας και της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, καθώς επίσης και στην εξελικτική τους πορεία, πριν και μετά την εφαρμογή της σκίασης στο θερμοκήπιο.

Κατόπιν, (*Κεφάλαιο 6*) εξετάζεται η επίδραση του δροσισμού με τεχνητή ομίχλη στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, στη διαπνοή και την αγωγιμότητα της καλλιέργειας και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με την περίπτωση των αποτελεσμάτων του θερμοκηπίου χωρίς το σύστημα δροσισμού.

Στο *Κεφάλαιο 7* γίνεται λεπτομερής μελέτη της επίδρασης του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στη φυσιολογική κατάσταση της καλλιέργειας, κυρίως μέσα από την ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου της καλλιέργειας, της στοματικής αγωγιμότητας και του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας. Τα παραπάνω ήταν ο πρωτεύων στόχος της ενότητας αυτής. Ο δευτερεύων στόχος της ενότητας αυτής ήταν η μελέτη της επίδρασης του δείκτη φυλλικής επιφάνειας και του φορτίου της ακτινοβολίας (όπως αυτό τροποποιείται από το άσπρισμα του θερμοκηπίου) στην τιμή ενός σημαντικού σχεδιαστικού παράγοντα ο οποίος χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού των συστημάτων ψύξης των θερμοκηπίων, δηλαδή στην τιμή του συντελεστή εξάτμισης, ο οποίος υπολογίζεται από το λόγο της λανθάνουσας

ενέργειας που ελευθερώνεται από την καλλιέργεια και το έδαφος προς το φορτίο ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο, το οποίο γενικά λαμβάνεται ισοδύναμο με την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία.

Τέλος, στο *Κεφάλαιο 8* παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής και γίνονται προτάσεις για την καλύτερη χρήση των συστημάτων ελέγχου του κλίματος του θερμοκηπίου, προκειμένου να επιτευχθούν οι βέλτιστες συνθήκες για την ανάπτυξη της καλλιέργειας.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητική Ανάλυση

2.1 Επίδραση των συστημάτων ελέγχου στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια

2.1.1 Φυσικός και δυναμικός αερισμός

Σε ένα θερμοκήπιο, που διαθέτει ανοίγματα οροφής και πλαϊνά, η ροή αέρα μέσω ενός ανοίγματος προκαλείται από το συνδυασμό των διαφορών πίεσης που δημιουργούνται (α) λόγω των δυνάμεων άνωσης που οφείλονται σε διαφορές θερμοκρασίας (φαινόμενο ‘καμινάδας’) και (β) λόγω της ταχύτητας του ανέμου. Στην περίπτωση του δυναμικού αερισμού η ροή προκαλείται από τη διαφορά πίεσης που δημιουργείται από τους ανεμιστήρες.

Η ροή του αέρα επιδρά άμεσα τόσο στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία, το έλλειμμα κορεσμού και τη συγκέντρωση του CO₂ στον αέρα, όσο και στην καλλιέργεια όσον αφορά την επίδραση στην αεροδυναμική αγωγιμότητα, αλλά και έμμεσα στις υπόλοιπες μεταβλητές και τις φυσιολογικές της λειτουργίες (θερμοκρασία, έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα, στοματική αγωγιμότητα, διαπνοή).

Ένας ικανοποιητικός και επιδέξιος χειρισμός των ανοιγμάτων αερισμού και των ανεμιστήρων είναι απαραίτητος προκειμένου να διατηρηθούν ικανοποιητικές συνθήκες ανάπτυξης (θερμοκρασία, υγρασία, συγκέντρωση CO₂) για τα φυτά στο θερμοκήπιο.

2.1.1.1 Επίδραση στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου

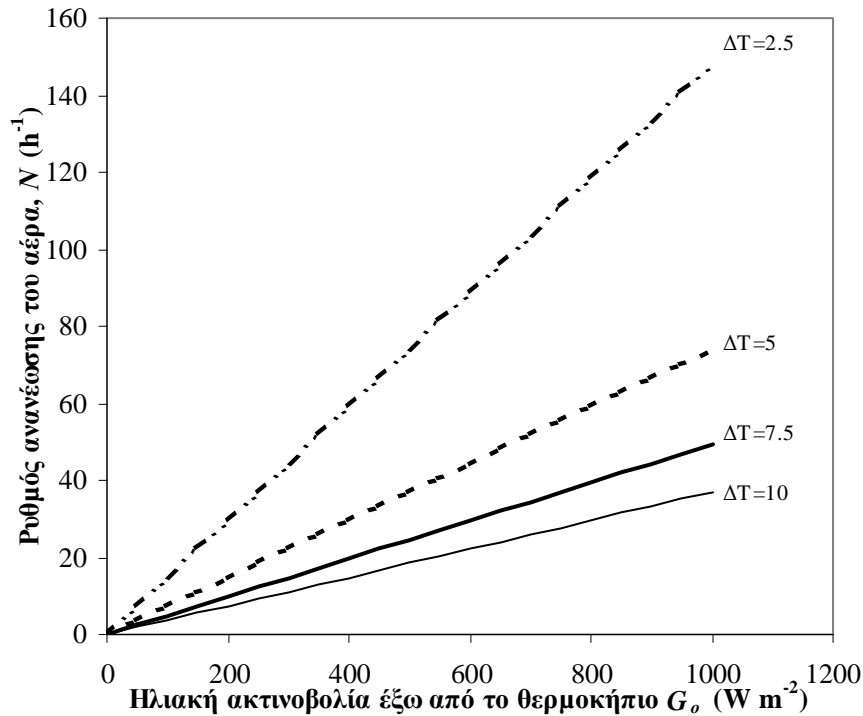
Στις χώρες με θερμό κλίμα, ο σημαντικός ρόλος του αερισμού, εξηγεί το αυξημένο ενδιαφέρον των ερευνητών να διερευνήσουν τη ροή του αερισμού στο θερμοκήπιο και να αποκτήσουν νέα, καλύτερη γνώση των μηχανισμών που την προκαλούν. Η μελέτη του αερισμού των θερμοκηπίων έγινε είτε με πειράματα (Fernandez and Bailey 1992, Boulard and Draoui 1995, Kittas *et al.* 1995, Boulard and Baille 1995, Boulard *et al.* 1995, Kittas *et al.* 1996, Papadakis *et al.* 1996, Wang and Deltour 1996, Kittas *et al.* 1997, Miguel *et al.* 1998, Wang 1998, Baptista *et al.* 1999, Munoz *et al.*

1999, Teitel and Tanny 1999), είτε με τεχνικές προσομοίωσης με λογισμικά υπολογιστικής ρευστομηχανικής (Short and Duyne 1990, Boulard *et al.* 1997, Mistriotis *et al.* 1997, Karica *et al.* 1998, Haxaire 1999, Haxaire *et al.* 1999).

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές εργασίες που αναφέρονται στην επίδραση του αερισμού στη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα (White 1975, Verlodt *et al.* 1984, Brun and Lagier 1985, Boulard *et al.* 1991, Boulard and Baille 1993, Fuchs 1993, Fernandez and Bailey 1994, Stanghellini and de Jong 1995, de Jong and Stanghellini 1996, Fuchs *et al.* 1997, Zhang *et al.* 1997, Κίττας και συνεργάτες 1999, Dayan *et al.* 2000, Kittas *et al.* 2001). Παρόλα αυτά λίγες από τις παραπάνω εργασίες πραγματοποιήθηκαν σε μεσογειακά θερμοκήπια και σε περιόδους, κατά τις οποίες η καλλιέργεια μέσω της διαπνοής της συνεισφέρει σημαντικά στην ψύξη του θερμοκηπίου (Seginer 1997).

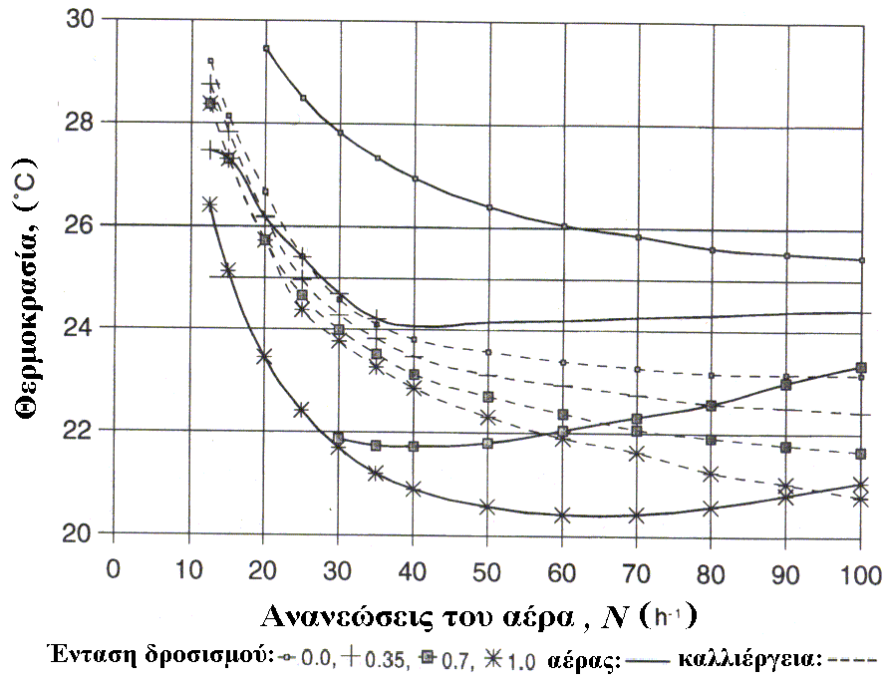
Ο Kittas *et al.* (1987) βαθμονόμησαν μία σχέση πρόβλεψης του ρυθμού ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου σε συνάρτηση με τη διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού και εξωτερικού αέρα και της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από το θερμοκήπιο, για ένα ακαλλιέργητο πλαστικό θερμοκήπιο, ενώ ο Κίττας και συνεργάτες (1999) βαθμονόμησαν την ίδια σχέση για ένα πλαστικό θερμοκήπιο με καλλιέργεια τριανταφυλλιάς (Σχήμα 2.1).

Η θερμοκρασία στο θερμοκήπιο επηρεάζεται σημαντικά από το ρυθμό ανανέωσης του αέρα, όταν αυτός είναι μικρότερος από 20 αλλαγές ανά ώρα, ενώ επηρεάζεται ελάχιστα, όταν ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα είναι μεγαλύτερος από 30 h^{-1} (Σχήμα 2.2.α), (Boulard and Baille 1993).

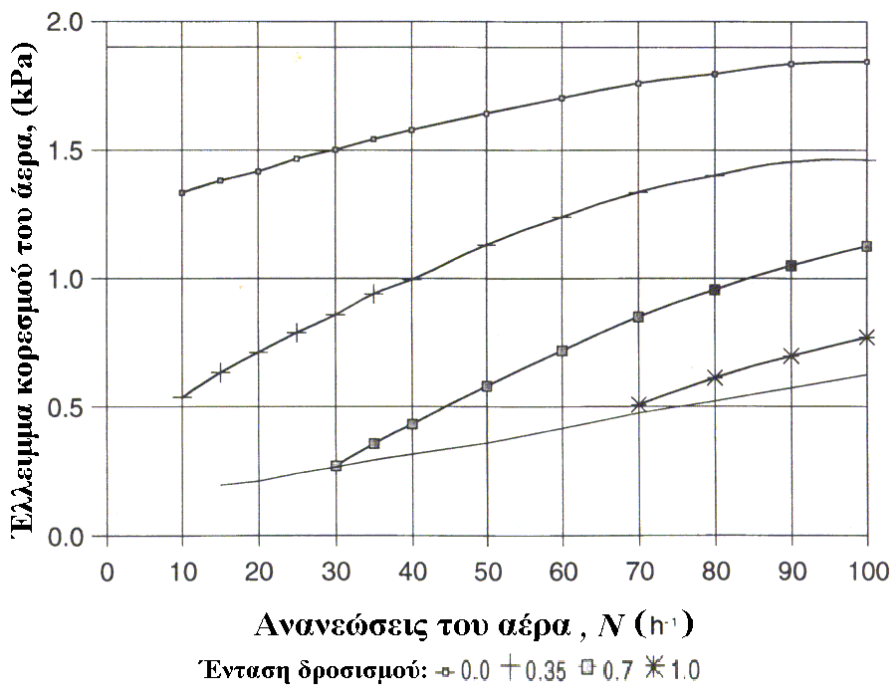


Σχήμα 2.1. Εκτίμηση αναγκών αερισμού σε θερμοκήπιο με καλλιέργεια τριανταφυλλιάς σύμφωνα με τον Κίττα και συνεργάτες (1999).

Στο Σχήμα 2.2.β παρουσιάζεται η επίδραση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα στο έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου, όπως προσομοιώθηκε από τους Boulard and Baille (1993) για ένα θερμοκήπιο με καλλιέργεια τομάτας, ενώ στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται η επίδραση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα N (h^{-1}) στη θερμοκρασία και υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου, όπως σημειώθηκε από τον Fuchs *et al.* (1997), για ένα ακαλλιέργητο θερμοκήπιο. Οι παραπάνω ερευνητές παρατήρησαν ότι η αύξηση του N από την τιμή 3 σε τιμή 8 μείωσε τη θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου κατά $10^{\circ}C$ αλλά περαιτέρω αύξηση του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα δεν ήταν δυνατό να προκαλέσει ανάλογη μεταβολή. Παράλληλα, παρατήρησαν ότι η αύξηση του N προκάλεσε ανάλογη αύξηση της αεροδυναμικής αγωγιμότητας του θερμοκηπίου και του λόγου Bowen. Τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνητών (Fuchs *et al.* 1997) μπορεί να μη βρίσκουν εφαρμογή σε ένα θερμοκήπιο με καλλιέργεια με μεγάλο δείκτη φυλλικής επιφάνειας, αλλά μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα θερμοκήπιο με πρόσφατα εγκατεστημένη καλλιέργεια με μικρή φυλλική επιφάνεια (Seginer 1994).



(α)



(β)

Σχήμα 2.2. Προσομοίωση (α) της θερμοκρασίας και (β) του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, συναρτήσει του ρυθμού ανανεώσης του αέρα του θερμοκηπίου, για διάφορες παροχές νερού ($kg\ m^{-2}\ ημερ\alpha^{-1}$) από το σύστημα δροσισμού σύμφωνα με τους Boulard and Baille (1993). Εξωτερικές κλιματικές συνθήκες: ηλιακή ακτινοβολία $G_o = 820\ W\ m^{-2}$, θερμοκρασία αέρα $T_o = 25^\circ C$, έλλειμμα κορεσμού αέρα $D_o = 1.9\ kPa$. Δείκτης φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας $I_{LA} = 3$.

Πίνακας 2.1. Επίδραση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα ($N \text{ h}^{-1}$) στη διαφορά θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου με τον εξωτερικό αέρα ($\Delta T_{i-o} \text{ } ^\circ\text{C}$), στο έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου ($e_i \text{ kPa}$), στη διαφορά ελλείμματος κορεσμού μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα ($\Delta e_{i-o} \text{ kPa}$), στην αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου ($g_v \text{ mm s}^{-1}$) και στο λόγο Bowen (β).

N	ΔT_{i-o}	e_i	Δe_{i-o}	g_v	β
h^{-1}	$^\circ\text{C}$	kPa	kPa	mm s^{-1}	
3.1	20	4.69	2.43	4.0	0.55
8.1	9.65	2.98	0.97	10.8	0.66
13.3	6.55	2.55	0.55	17.7	0.79
44.1	5.05	2.83	0.23	58.8	1.44

(Στοιχεία από Fuchs *et al.* 1997).

2.1.1.2 Επίδραση στην καλλιέργεια

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.5, ο αερισμός επιδρά άμεσα στη θερμοκρασία και στο έλλειμμα κορεσμού του αέρα.

Παράλληλα όμως επιδρά και στην αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, μέσω της μεταβολής που προκαλεί στην ταχύτητα του ανέμου στο θερμοκήπιο. Στην περίπτωση του κλειστού θερμοκηπίου, η ταχύτητα του ανέμου στο εσωτερικό του είναι πολύ μικρή και θα ήταν αποδεκτή μια σταθερή τιμή για την αεροδυναμική αγωγιμότητα. Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώθηκε και με πειραματικά αποτελέσματα (Stanghellini 1987). Κατά τη διάρκεια περιόδων με αερισμό, η ταχύτητα του ανέμου στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι σημαντική και η επίδραση της στην αεροδυναμική αγωγιμότητα δεν μπορεί να αγνοηθεί. Συνεπώς, για τις συνθήκες αυτές θα πρέπει να θεωρηθεί μια πιο ρεαλιστική υπόθεση η οποία θα θεωρεί την αεροδυναμική αγωγιμότητα ως μια παράμετρο που αυξάνεται με το ρυθμό ανανέωσης του αέρα (Seginer 1994).

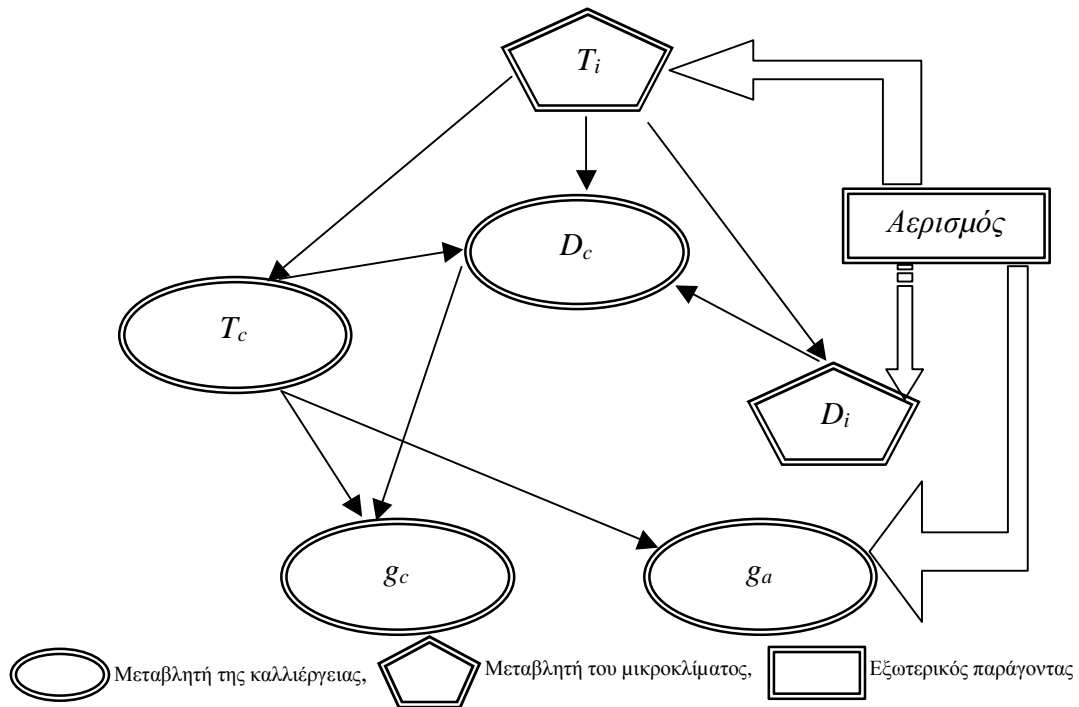
Εκτός από την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, ο αερισμός επηρεάζει και την αγωγιμότητα στη μεταφορά των υδρατμών από το εσωτερικό του θερμοκηπίου στον εξωτερικό αέρα (αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου).

Πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα στην αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου δίνονται στον Πίνακα 2.1 (Fuchs *et al.* 1997).

Ο κύριος στόχος του αερισμού του θερμοκηπίου είναι η μείωση της θερμοκρασίας της καλλιέργειας μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα και αυτό γιατί η θερμοκρασία της καλλιέργειας είναι αυτή που επηρεάζει περισσότερο την αύξηση και την ανάπτυξή της.

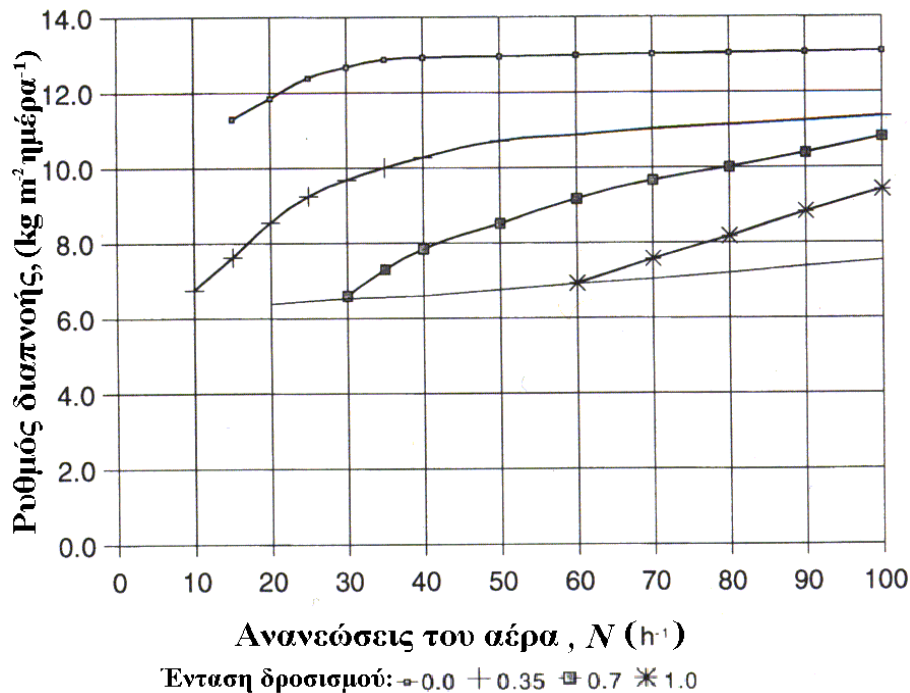
Αρκετοί ερευνητές αναφέρουν την επίδραση του αερισμού στη θερμοκρασία της καλλιέργειας (Boulard *et al.* 1991, Boulard and Baille 1993, Fuchs 1993, Montero and Antón 1994, Seginer 1994, 1997, Dayan *et al.* 2000, Kittas *et al.* 2001), σημειώνοντας ότι ένας κατάλληλος ρυθμός αερισμού των θερμοκηπίων σε ξηρά και υγρά κλίματα, μπορεί να διατηρήσει τη θερμοκρασία της καλλιέργειας κάτω από μία κρίσιμη τιμή (π.χ. 28°C για καλλιέργεια τομάτας) (Σχήμα 2.2.α) (Boulard and Baille 1993, Fuchs 1993). Η θερμοκρασία των φύλλων μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα και για μια καλλιέργεια που διαπνέει ελεύθερα παίρνει μικρότερες τιμές από αυτές της θερμοκρασίας του αέρα. Αντίθετα, αύξηση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα πάνω από την τιμή των 30 h⁻¹ δεν προκαλεί σημαντική μείωση της θερμοκρασίας των φύλλων (Fuchs 1993, Montero and Antón 1994).

Ο αερισμός του θερμοκηπίου επηρεάζει και τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας μέσω των μεταβολών που προκαλούνται στη θερμοκρασία της καλλιέργειας και στο έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα. Το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα επηρεάζεται τόσο από τη θερμοκρασία της καλλιέργειας, όσο και από το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (Σχήμα 2.3). Ο Bunce (1985) παρατήρησε ότι για την ίδια αύξηση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα, η αγωγιμότητα της καλλιέργειας, όταν η ταχύτητα του ανέμου ήταν 3 m s⁻¹, μειωνόταν από 1.6 έως 3 φορές περισσότερο συγκριτικά με την περίπτωση όπου η ταχύτητα του ανέμου ήταν 0.5 m s⁻¹.



Σχήμα 2.3. Επίδραση του αερισμού στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια. T_i = θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου, T_c = θερμοκρασία της καλλιέργειας, D_i = έλλειμμα κορεσμού του αέρα, D_c = έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα, g_c = στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, g_a = αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας.

Οι Boulard and Baille (1993) έδειξαν πώς μεταβάλλεται η διαπνοή της καλλιέργειας συναρτήσει του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου (Σχήμα 2.4), αποδεικνύοντας πως η διαπνοή επηρεάζεται σημαντικά από τον αερισμό και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου, το οποίο μεταβάλλεται συναρτήσει του αερισμού όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.β. Οι ίδιοι ερευνητές κατέληξαν ότι στην περίπτωση που τα ανοίγματα αερισμού είχαν τη μέγιστη επιφάνεια, η διαπνοή αντιπροσώπευε το 45% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ στην περίπτωση μικρής επιφάνειας αερισμού, η διαπνοή αντιπροσώπευε το 30% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.4. Προσομοίωση της διαπνοής θερμοκηπιακής καλλιέργειας τομάτας, συναρτήσει του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου, για διάφορες παροχές νερού από το σύστημα δροσισμού ($kg\ m^{-2}\ ημέρα^{-1}$) σύμφωνα με τους Boulard and Baille (1993). Εξωτερικές κλιματικές συνθήκες: ηλιακή ακτινοβολία $G_o = 820\ W\ m^{-2}$, θερμοκρασία αέρα $T_o = 25^\circ C$, έλλειμμα κορεσμού αέρα $D_o = 1.9\ kPa$. Δείκτης φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας $I_{LA} = 3$.

Ο Fuchs (1993) μελέτησε τη διαπνοή μιας καλλιέργειας τομάτας σε συνάρτηση με το ρυθμό ανανέωσης του αέρα για διάφορες συνθήκες ακτινοβολίας και υγρασίας. Σημειωτέον, ότι η στοματική και η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας και η αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου βρίσκονται σε σειρά και ότι η διαπνοή ή γενικότερα η ροή υδρατμών από το εσωτερικό του θερμοκηπίου στον εξωτερικό αέρα, ελέγχεται από την αγωγιμότητα με τις μικρότερες τιμές. Όταν ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου έχει υψηλές τιμές, η διαπνοή ελέγχεται πιθανότατα από τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, κάτι που μπορεί να μην ισχύει φυσικά στην περίπτωση χαμηλού ρυθμού ανανέωσης του αέρα. Ο Fuchs (1993) λοιπόν, παρατήρησε ότι για χαμηλές τιμές ($10\ h^{-1}$) του ρυθμού ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου η διαπνοή δεν επηρεαζόταν από τις αλλαγές της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, ενώ για μεγάλες τιμές του ρυθμού ανανέωσης του

αέρα, η διαπνοή επηρεαζόταν άμεσα από τις μεταβολές της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας.

2.1.2 Σκίαση με άσπρισμα της οροφής του θερμοκηπίου

Στην προηγούμενη παράγραφο είδαμε ότι ο αερισμός του θερμοκηπίου έχει ιδιαίτερη σημασία για τη δημιουργία των απαραίτητων συνθηκών όσον αφορά την ανάπτυξη της καλλιέργειας κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Παρόλα αυτά, ο φυσικός αερισμός από μόνος του δεν επαρκεί για την απομάκρυνση της πλεονάζουσας αισθητής ενέργειας από το θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια ηλιόλουστων καλοκαιρινών ημερών (Baille 1999). Για το λόγο αυτό ο αερισμός θα πρέπει να εφαρμόζεται σε συνδυασμό με κάποιο άλλο σύστημα ψύξης του θερμοκηπίου.

Μία από τις πιο συνηθισμένες μεθόδους που εφαρμόζεται από τους παραγωγούς, λόγω της απλότητάς της και του χαμηλού κόστους εφαρμογής, είναι το άσπρισμα της οροφής του θερμοκηπίου. Με το άσπρισμα της οροφής του θερμοκηπίου επιτυγχάνεται μείωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο, κάτι το οποίο προκαλεί άμεσα μείωση της θερμοκρασίας του αέρα και της καλλιέργειας λόγω μείωσης της διαθέσιμης ενέργειας και μεταβολής της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας.

Ένα πλεονέκτημα του ασπρίσματος έναντι των άλλων τεχνικών σκίασης είναι ότι δεν επηρεάζει τον αερισμό του θερμοκηπίου, ενώ οι εσωτερικά ή εξωτερικά τοποθετημένες κουρτίνες σκίασης επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση του αερισμού (Montero and Antón 1992). Το άσπρισμα αυξάνει επίσης σημαντικά το ποσοστό της διάχυτης ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο, κάτι το οποίο είναι γνωστό πως αυξάνει την αποτελεσματικότητα χρήσης της ακτινοβολίας (Alados and Alados-Arboledas 1993).

2.1.2.1 Επίδραση στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου

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 σχετίζονται με τη μελέτη άλλων μεθόδων σκίασης, όπως οι εξωτερικές ή εσωτερικές κουρτίνες σκίασης 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, Montero and Antón 1992, Ne Smith *et al.* 1992, Francescangeli *et al.* 1994, Miguel *et al.* 1994). Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα μετρήσεων της θερμοκρασίας σε θερμοκήπια με εξωτερικές ή εσωτερικές κουρτίνες σκίασης (Montero and Antón 1994).

Πίνακας 2.2. 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).

Ο Baille *et al.* (1980) και πρόσφατα οι Abreu and Meneses (2000) 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. Σε μια πρόσφατη έρευνα, ο Kittas *et al.* (1999a) παρατήρησαν ότι, όταν εφαρμόστηκε άσπρισμα της οροφής σε γυάλινο θερμοκήπιο, αυξήθηκε ελαφρά το ποσοστό της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας και μειώθηκε το ποσοστό της υπέρυθρης 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. Παρόλα αυτά, ο Fernandez-Rodriguez *et al.* (2000) αναφέρουν πως η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία κατανεμόταν περισσότερο ομοιόμορφα στο θερμοκήπιο, όταν αυτό ήταν σκιασμένο με δίχτυ σκίασης παρά όταν ήταν ασπρισμένο.

2.1.2.2 Επίδραση στην καλλιέργεια

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, 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.* 1993a, el Gizawy *et al.* 1993b) 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. Η μείωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο αναμένεται να προκαλέσει μείωση του ελλείμματος κορεσμού καλλιέργειας-αέρα. Αν κατά την περίοδο χωρίς σκίαση, το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα κυμαινόταν σε υψηλά επίπεδα (κάτι που ισχύει για τα μεσογειακά θερμοκήπια), η σκίαση του θερμοκηπίου μπορεί να οδηγήσει την καλλιέργεια εκτός συνθηκών υδατικής και θερμικής καταπόνησης και κατά συνέπεια σε αύξηση της στοματικής αγωγιμότητας.

Τέλος, αρκετοί 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.

2.1.3 Δροσισμός με τεχνητή ομίχλη

Τα συστήματα της ψύξης με εξάτμιση βασίζονται στη μετατροπή της αισθητής θερμότητας σε λανθάνουσα, μέσω της απευθείας παροχής νερού στην ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου (σύστημα τεχνητής ομίχλης, σύστημα μικροψεκαστήρων) ή μέσω της ψύξης του αέρα με διέλευση μέσα από υγρή παρειά.

Η επίδραση του συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη στο θερμοκήπιο είναι άμεση, όσον αφορά το μικροκλίμα του θερμοκηπίου (θερμοκρασία και έλλειμμα κορεσμού του αέρα) (Cohen *et al.* 1983, Arbel *et al.* 1999) και έμμεση στην καλλιέργεια (θερμοκρασία, στοματική και αεροδυναμική αγωγιμότητα, διαπνοή κλπ).

Η αποτελεσματικότητα Eff (%) του συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη δίνεται από τη σχέση (ASHRAE 1983):

$$Eff = \frac{T_o - T_i}{T_o - T_{o,w}} 100\% \quad (2.1)$$

όπου: T_o (°C) είναι η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα, T_i (°C) η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου και $T_{o,w}$ (°C) η θερμοκρασία του υγρού θερμομέτρου έξω από το θερμοκήπιο.

2.1.3.1 Επίδραση στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου

Τα συστήματα δροσισμού με τεχνητή ομίχλη διαφοροποιούνται από αυτά της υγρής παρειάς ως προς το γεγονός ότι η εξάτμιση του νερού πραγματοποιείται σε όλο τον όγκο του αέρα του θερμοκηπίου. Μερικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών, έναντι εκείνων της υγρής παρειάς είναι: η ομοιομορφία των συνθηκών που δημιουργούν μέσα στο θερμοκήπιο, η μείωση των αναγκών αερισμού και η μείωση των αυξημένων απαιτήσεων για αεροστεγανά θερμοκήπια (Montero *et al.* 1990).

Με τη χρήση του συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη μπορεί να επιτευχθεί θερμοκρασία του αέρα στο θερμοκήπιο μικρότερη από αυτήν του εξωτερικού αέρα ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται μείωση και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα. Διάφοροι ερευνητές αναφέρουν μείωση της θερμοκρασίας του αέρα από 1°C έως και 10°C και μείωση του ελλείμματος κορεσμού έως και 4 kPa (Cohen *et al.* 1983,

Giacomelli *et al.* 1985, Montero *et al.* 1990, Boulard *et al.* 1991, Boulard and Baille 1993, Montero and Segal 1993, Montero and Antón, 1994, Arbel *et al.* 1999, Dayan *et al.* 2000).

Όπως φαίνεται από τη σχέση (2.1), η αποτελεσματικότητα του συστήματος δροσισμού αυξάνεται με μείωση της απόλυτης υγρασίας του εξωτερικού αέρα (μείωση του παρονομαστή μέσω της αύξησης της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του ξηρού και του υγρού βολβού). Οι Montero and Segal (1993) έδειξαν ότι με τη χρήση του συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη, η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου που βρίσκονταν σε περιοχή με εξωτερική υγρασία 71%, ήταν κατά 1°C μικρότερη από αυτή του εξωτερικού αέρα. Η αντίστοιχη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα ενός θερμοκηπίου που βρίσκονταν σε περιοχή με εξωτερική υγρασία 38%, ήταν κατά 8°C μικρότερη από αυτή του εξωτερικού. Εντούτοις, ορισμένοι ερευνητές αναφέρουν ότι τα συστήματα δροσισμού είναι αποτελεσματικά ακόμη και σε υγρά παραλιακά κλίματα (Cohen *et al.* 1983, Montero *et al.* 1990).

Οι Boulard and Baille (1993) παρουσίασαν ένα προσομοίωμα πρόβλεψης της θερμοκρασίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου συναρτήσει του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου και της παροχής νερού από το σύστημα δροσισμού (Σχήμα 2.2). Οι παραπάνω ερευνητές παρατήρησαν ότι η θερμοκρασία (Σχήμα 2.2.α) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (Σχήμα 2.2.β) μειωνόταν, καθώς αυξανόταν ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα και ο ρυθμός παροχής νερού στον αέρα του θερμοκηπίου. Ο ρυθμός μείωσης ήταν μικρότερος όταν ο ρυθμός ανανεώσεων του αέρα ξεπερνούσε τις 40 αλλαγές ανά ώρα, τιμή για την οποία επιτυγχανόταν στο θερμοκήπιο θερμοκρασία αέρα $T_i < 24^{\circ}\text{C}$ και έλλειμμα κορεσμού του αέρα $D_i < 1 \text{ kPa}$. Άλλοι ερευνητές τέλος (Montero and Segal 1993), υπογραμμίζουν ότι απαιτείται ένας ελάχιστος ρυθμός ανανεώσεων, περίπου 30 αλλαγές του αέρα ανά ώρα, προκειμένου να επιτευχθεί στο θερμοκήπιο θερμοκρασία μικρότερη των 30°C.

2.1.3.2 Επίδραση στην καλλιέργεια

Η επίδραση του συστήματος τεχνητής ομίχλης στην καλλιέργεια γίνεται κυρίως μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα

συμβάλλοντας έτσι στη μείωση της θερμικής και υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.5, εκτός από τη μείωση της θερμοκρασίας του αέρα, ο δροσισμός προκαλεί και μείωση της θερμοκρασίας της καλλιέργειας άμεσα, όταν η εξάτμιση του νερού γίνεται πάνω στα φύλλα, ή έμμεσα, μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα και της μεταβολής της διαπνοής. Επιπλέον, μέσω της μείωσης της θερμοκρασίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα τροποποιείται η στοματική και η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, οι οποίες, μαζί με το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα, επηρεάζουν τη διαπνοή της καλλιέργειας (Σχήμα 1.4).

Βρέθηκε ότι η χρήση του συστήματος δροσισμού σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια τριανταφυλλιάς βελτίωσε την υδατική της κατάσταση μειώνοντας την υδατική καταπόνηση της καλλιέργειας (Spoelstra 1975, Plaut and Zieslin 1977). Όσον αφορά στην παραγωγή, διάφοροι ερευνητές (Spoelstra 1975, Plaut and Zieslin 1977, Plaut *et al.* 1979, Javoy *et al.* 1990) παρατήρησαν αύξηση της ποιότητας και της ποσότητας της παραγωγής. Αναφορικά με τη διάρκεια ζωής των ανθέων μετά τη συγκομιδή, δεν παρατηρήθηκε καμία επίδραση του συστήματος δροσισμού (Urban *et al.* 1995). Τέλος, έχει παρατηρηθεί ότι η χρήση του συστήματος δροσισμού προκαλεί αύξηση της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας (Plaut *et al.* 1979, Gautier *et al.* 1999).

Ο Boulard *et al.* (1991) παρατήρησαν ότι, με τη χρήση του συστήματος δροσισμού, η θερμοκρασία της καλλιέργειας ήταν έως και 3°C μικρότερη από τη θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου, ενώ παράλληλα το προσομοίωμα των Boulard and Baille (1993) προβλέπει ότι η θερμοκρασία της καλλιέργειας μειώνεται με αύξηση της παροχής νερού από το σύστημα δροσισμού και του ρυθμού ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου (Σχήμα 2.2.α).

Πολλοί ερευνητές (π.χ.: Kaufman 1982, el Sharkawy and Cock 1986, Schulze 1986, Munro 1989, Bakker 1991, Jolliet and Bailey 1992, Baille *et al.* 1994a) έχουν μελετήσει την επίδραση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Οι περισσότερες εργασίες έχουν πραγματοποιηθεί σε περιοχές της βόρειας Ευρώπης, όπου επικρατούν χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας και ελλείμματος κορεσμού του αέρα. Ο Bakker (1991) για παράδειγμα, παρατήρησε μείωση της στοματικής αγωγιμότητας, περίπου κατά 65%, για αύξηση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα κατά 1 kPa. Ο Montero *et al.* (2001) αντίθετα, δεν παρατήρησαν σημαντική μείωση της αγωγιμότητας για αύξηση του ελλείμματος

κορεσμού από την τιμή του 1.4 kPa στα 3.4 kPa. Οι Aphalo and Jarvis (1991, 1993) τέλος, αναφέρουν ότι δεν υπάρχουν σαφείς ενδείξεις ότι η στοματική αγωγιμότητα επηρεάζεται άμεσα από το έλλειμμα κορεσμού του αέρα. Παρόλα αυτά, ο Baille *et al.* (1994a), παρατήρησαν ότι η χρήση του συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη προκάλεσε σημαντική αύξηση στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας και ανέφεραν ότι η μέγιστες τιμές της σημειώνονταν όταν η ακτινοβολία ξεπερνούσε τα 300 W m^{-2} .

Όσον αφορά την επίδραση του συστήματος δροσισμού στη διαπνοή, διάφοροι ερευνητές (π.χ.: Plaut and Zieslin 1977, Boulard *et al.* 1991, Dayan *et al.* 2000) ανέφεραν ότι η χρήση του συστήματος δροσισμού προκάλεσε μείωση στη διαπνοή της καλλιέργειας. Αντίθετα, άλλοι ερευνητές (π.χ.: Boulard and Baille 1993, Urban *et al.* 1995) αναφέρουν αύξηση της διαπνοής με τη χρήση του συστήματος δροσισμού (Σχήμα 2.4).

Τέλος, ο Baille *et al.* (1994a) επικεντρώθηκαν στην επίδραση των συστημάτων τεχνητής ομίχλης στην ημερήσια υστέρηση που παρατηρείται μεταξύ της διαπνοής και του ελλείμματος κορεσμού αφενός και της διαπνοής και της ηλιακής ακτινοβολίας αφετέρου, παρατηρώντας σημαντική επίδραση του συστήματος δροσισμού στην ημερήσια πορεία των καμπυλών της υστέρησης.

2.1.4 Δείκτης φυλλικής επιφάνειας

Η διαπνοή, μέσα από τη διαδικασία της ψύξης με εξάτμιση, αντιπροσωπεύει τον κυριότερο μηχανισμό ψύξης των φύλων των καλλιεργειών και του περιβάλλοντός τους. Αυτό εξηγεί γιατί η διατήρηση υψηλών επιπέδων ρυθμού διαπνοής σε μια θερμοκηπιακή καλλιέργεια είναι ένας από τους αποτελεσματικότερους και λιγότερο δαπανηρούς τρόπους ψύξης του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια θερμών περιόδων του έτους με υψηλά θερμικά φορτία, όπως συμβαίνει από τον Απρίλιο μέχρι τον Οκτώβριο στις Μεσογειακές χώρες, όπως η Ελλάδα (Baille 1999). Προκειμένου να επιτευχθούν υψηλοί ρυθμοί διαπνοής, είναι απαραίτητο να πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις:

- Η καλλιέργεια πρέπει να έχει καλά ανεπτυγμένο και καλά αρδευόμενο ριζικό σύστημα.
- Το εναέριο τμήμα της καλλιέργειας πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο, ώστε να μπορεί να μετατρέψει την επιπλέον αισθητή ενέργεια σε λανθάνουσα μέσω της διαπνοής.
- Τα στόματα θα πρέπει να παραμένουν ανοιχτά, ενώ ιδιαίτερη φροντίδα θα πρέπει να ληφθεί προκειμένου να μην επικρατούν συνθήκες υδατικής καταπόνησης για τα φυτά. Η πιθανότητα κλεισίματος των στομάτων προκαλείται συνήθως από μη κατάλληλο έλεγχο του αερισμού. Το έλλειμμα κορεσμού του αέρα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με την είσοδο του ξηρού εξωτερικού αέρα στο θερμοκήπιο, όταν διατηρούνται υψηλοί ρυθμοί αερισμού (Seginer 1994). Είναι γνωστό ότι τα υψηλά επίπεδα ελλείμματος κορεσμού του αέρα οδηγούν σε συνθήκες υδατικής καταπόνησης, που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μερικό ή ολικό κλείσιμο των στομάτων (Baille *et al.* 1994a, Monteith 1995, Bunce 1996). Θα πρέπει έτσι, να αναμένονται αρνητικές επιπτώσεις στις ανταλλαγές αερίων (διαπνοή, φωτοσύνθεση) και κατά συνέπεια και στην παραγωγή και ποιότητα των προϊόντων.

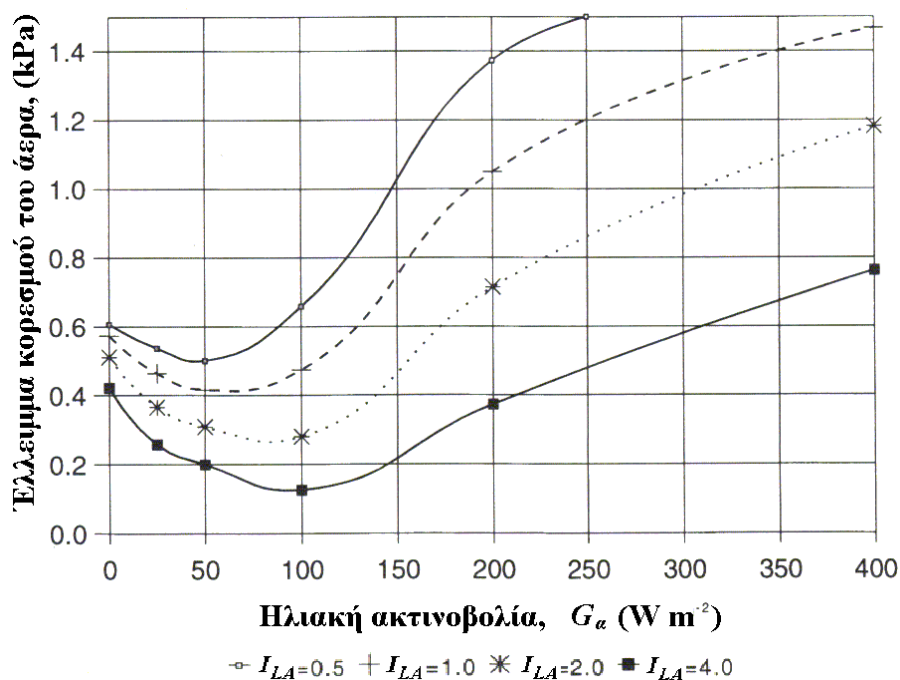
Ο παραπάνω τρόπος ψύξης του θερμοκηπίου μέσω της διατήρησης μέγιστου ρυθμού διαπνοής κατά τη διάρκεια της ημέρας αφορά τόσο τη φυσιολογική συμπεριφορά της καλλιέργειας όσο και τον έλεγχο του κλίματος. Οι δύο αυτές

πλευρές είναι στενά συνδεδεμένες στο θερμοκήπιο, διότι η συμπεριφορά της καλλιέργειας επηρεάζει κατά πολύ το θερμοκηπιακό μικροκλίμα και αντιστρόφως.

2.1.4.1 Επίδραση στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου

Παρά τη σημαντική επίδραση της φυλλικής επιφάνειας στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, η βιβλιογραφία που σχετίζεται με το θέμα αυτό είναι ελάχιστη.

Ο Jolliet (1999), χρησιμοποιώντας το HORTITRANS (Jolliet 1994) μελέτησε την επίδραση του I_{LA} στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου. Όπως αναφέρει, η αύξηση της φυλλικής επιφάνειας προκαλεί μείωση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου (Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5. Προσομοίωση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, για διάφορες τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας σύμφωνα με τον Jolliet (1999).

2.1.4.2 Επίδραση στην καλλιέργεια

Η αεροδυναμική αγωγιμότητα αντιπροσωπεύει την κύρια μεταβλητή στον έλεγχο των ανταλλαγών αερίων της καλλιέργειας διότι είναι ο κύριος παράγοντας περιορισμού της διαδικασίας της μεταφοράς της αισθητής ενέργειας και του νερού από την καλλιέργεια στον αέρα.

Ένας μεγάλος δείκτης φυλλικής επιφάνειας I_{LA} θα πρέπει να αυξήσει την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_a , αφού με μία πρώτη προσέγγιση μπορεί να υποθεθεί ότι η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$g_a = 2 I_{LA} g_{ba} \quad (2.2)$$

όπου $g_{l,a}$ είναι η αεροδυναμική αγωγιμότητα του φύλλου.

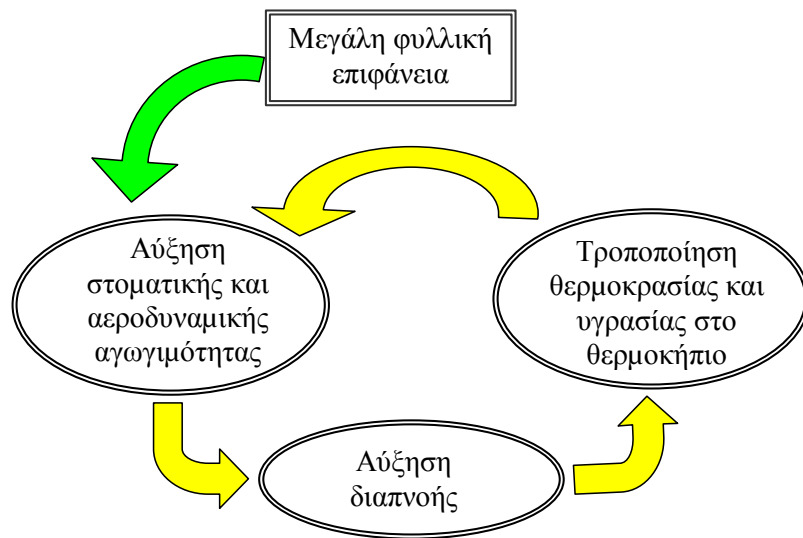
Η ίδια υπόθεση μπορεί να ισχύσει και για τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_c :

$$g_c = 2 I_{LA} g_{ba} \quad (2.3)$$

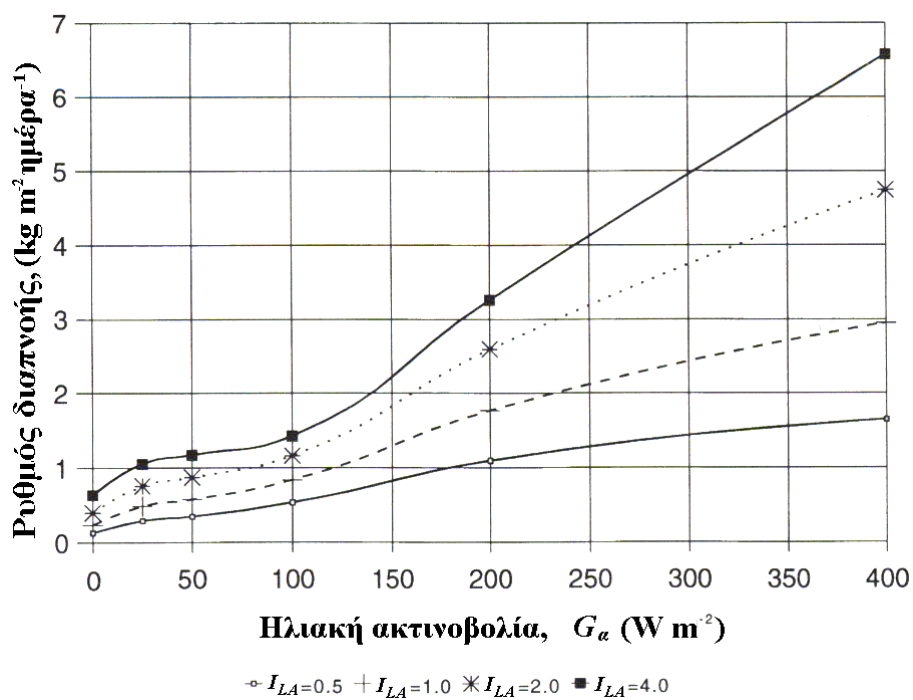
όπου $g_{l,c}$ είναι η στοματική αγωγιμότητα του φύλλου.

Έτσι, διατηρώντας ένα μεγάλο δείκτη φυλλικής επιφάνειας στην καλλιέργεια στο θερμοκήπιο, αυξάνονται σημαντικά οι ανταλλαγές αερίων, οι οποίες με τη σειρά τους τροποποιούν το μικροκλίμα του θερμοκηπίου, κυρίως τη θερμοκρασία και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα. Στη συνέχεια οι αλλαγές αυτές στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου δρουν στη στοματική αγωγιμότητα, οδηγώντας σε έναν έλεγχο αμφίδρομης τροφοδότησης ή ανάδρασης (Σχήμα 2.6), όπως έχει αναλυθεί και διατυπωθεί σε διάφορες εργασίες (Aubinet *et al.* 1989, Nederhoff and Vegter 1992, Baille 1999).

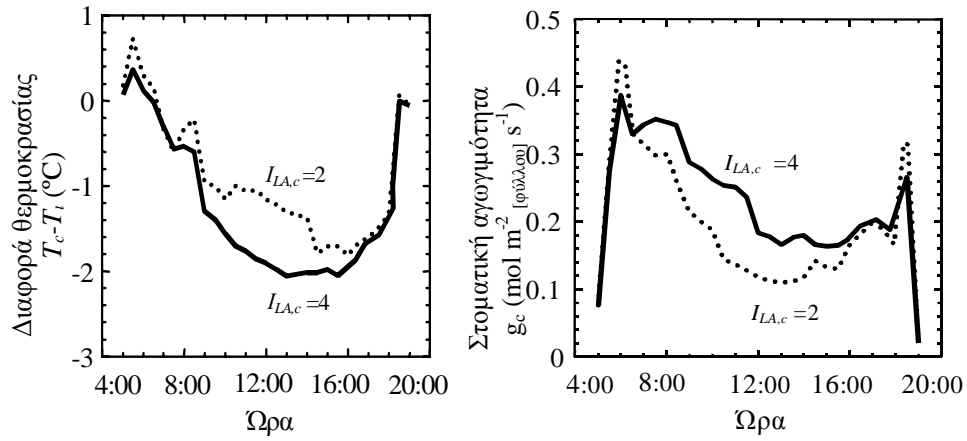
Ο Jolliet (1999), χρησιμοποιώντας το HORTITRANS (Jolliet 1994) παρουσίασε την επίδραση του I_{LA} στη διαπνοή της καλλιέργειας (Σχήμα 2.7) ενώ πιο πρόσφατα οι González-Real and Baille (2001) παρουσίασαν την επίδραση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στη διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα και τη διαπνοή της καλλιέργειας (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.6. Κύκλος ανάδρασης διαπνοής-μικροκλίματος με εξωτερικό παράγοντα τη φυλλική επιφάνεια.



Σχήμα 2.7. Προσομοίωση του ρυθμού διαπνοής καλλιέργειας τομάτας συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, για διάφορες τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας σύμφωνα με τον Jolliet (1999).



Σχήμα 2.8. Ημερήσια πορεία (α) της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα $T_c - T_i$ και (β) της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας g_c σύμφωνα με τους González-Real and Baille (2001).

2.2 Φαινόμενα μεταφοράς στο θερμοκήπιο

2.2.1 Γενικά

Το θερμοκήπιο μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα σύστημα. Το περιβάλλον του συστήματος ρυθμίζεται: α) από το εξωτερικό κλίμα και β) τον παραγωγό, ο οποίος χρησιμοποιεί τον εξοπλισμό του θερμοκηπίου προκειμένου να ελέγξει το κλίμα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Το σύστημα θερμοκήπιο μπορεί να χωριστεί σε τρία βασικά επίπεδα, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και είναι: η ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου, η καλλιέργεια και το έδαφος. Η συμπεριφορά ολόκληρου του συστήματος εξαρτάται από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των βασικών επιπέδων και επηρεάζεται τόσο από το εξωτερικό κλίμα και τις ενέργειες του παραγωγού (μέσω των επεμβάσεών του στο μικροκλίμα με τον εξοπλισμό του θερμοκηπίου) όσο και από την καλλιέργεια (μέσα από τις φυσιολογικές της λειτουργίες: διαπνοή, φωτοσύνθεση).

Προκειμένου να κατανοηθούν οι μηχανισμοί που εμπλέκονται στη δημιουργία και διαμόρφωση του μικροκλίματος του θερμοκηπίου θα πρέπει να ληφθεί υπόψη:

- το ισοζύγιο ενέργειας στο θερμοκήπιο, το οποίο αναλύεται σε ισοζύγιο αισθητής και λανθάνουσας ενέργειας και
- η διαπνοή, η οποία επηρεάζεται και επηρεάζει τα ισοζύγια αισθητής και λανθάνουσας ενέργειας

2.2.2 Ισοζύγιο ενέργειας στο θερμοκήπιο

Για την ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου του θερμοκηπίου πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν μαθηματικά προσομοιώματα τα οποία επιτρέπουν τη διερεύνηση των παραγόντων και των φαινομένων που προσδιορίζουν το μικροκλίμα του θερμοκηπίου (Seginer and Kantz 1986, Boulard and Baille 1987, 1993).

Το ενεργειακό ισοζύγιο στο θερμοκήπιο μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$R_n - H - \lambda E - J - C = 0 \quad (2.4)$$

όπου: R_n (W m^{-2}) είναι η καθαρή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο, H (W m^{-2}) η αισθητή ενέργεια, λ (J kg^{-1}) η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού, E ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής και J και C η ενέργεια (W m^{-2}) που αποθηκεύεται στο έδαφος και την καλλιέργεια αντίστοιχα. Αναμφίβολα, όλες οι παραπάνω ροές μπορεί να αντιπροσωπεύουν κέρδος ή απώλειες ενέργειας. Επειδή οι όροι J και C είναι σχετικά μικροί σε σχέση με τους H και λE , μπορεί να αγνοηθούν και έτσι το απλοποιημένο ενεργειακό ισοζύγιο του θερμοκηπίου, δίδεται από τη σχέση:

$$R_n = H + \lambda E \quad (2.5)$$

Από πλευράς φυσικής, το θερμοκήπιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ηλιακός συλλέκτης. Η σημαντικότερη διαφορά του από τον ηλιακό συλλέκτη, όσον αφορά στην προσομοίωση, είναι η παρουσία της καλλιέργειας που διαπνέει και με τον τρόπο αυτό τροποποιεί το ισοζύγιο λανθάνουσας ενέργειας. Χρησιμοποιώντας αυτή την αναλογία με τον ηλιακό συλλέκτη, ο Baille (1996) πρότεινε τις παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό της αισθητής και λανθάνουσας ενέργειας:

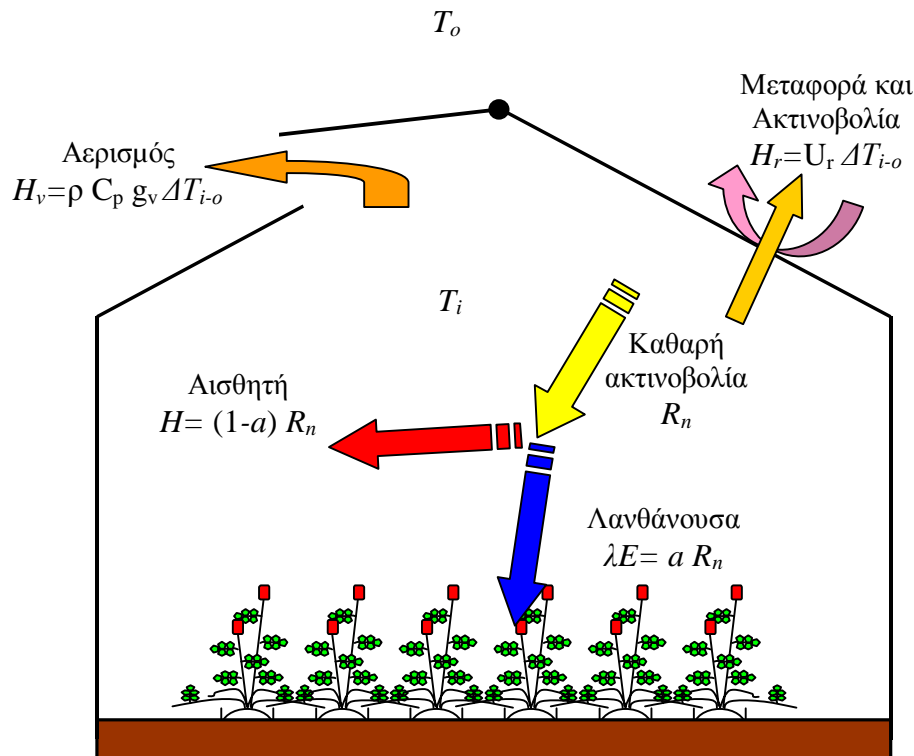
$$H = (1-\alpha) R_n \quad (2.6)$$

$$\lambda E = \alpha R_n \quad (2.7)$$

Ο συντελεστής α εκφράζει το μέρος της καθαρής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε λανθάνουσα. Η κατανομή της καθαρής ακτινοβολίας σε αισθητή και λανθάνουσα ενέργεια συχνά εκφράζεται από το λόγο Bowen:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (2.8)$$

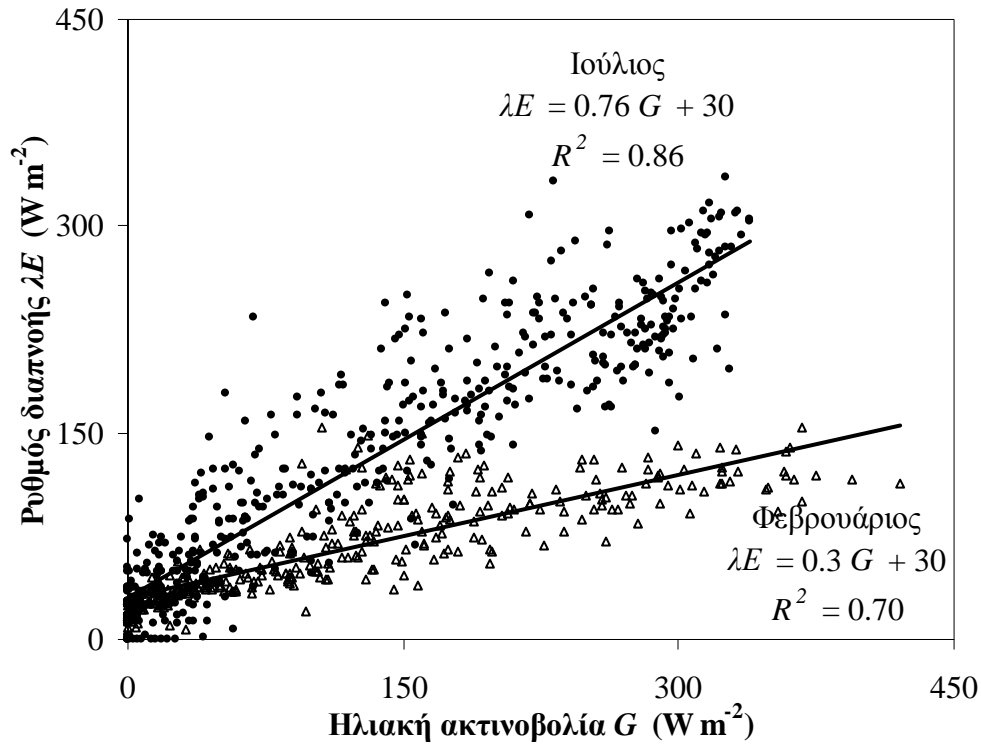
Ο λόγος Bowen εξαρτάται από την ένταση των φαινομένων εξατμισοδιαπνοής (Landsberg *et al.* 1979).



Σχήμα 2.9. Απλοποιημένο ενεργειακό ισοζύγιο σε ένα μη θερμαινόμενο θερμοκήπιο.

Η σχέση (2.7) αποτελεί μια προσεγγιστική εκτίμηση του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής. Η καθαρή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο R_n θα μπορούσε να θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας ισοδυναμεί με την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στο θερμοκήπιο G (W m^{-2}). Κατά συνέπεια, η λανθάνουσα ενέργεια μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (Morris *et al.* 1957, de Villèle 1972, van der Post *et al.* 1974, Yang *et al.* 1990, Κατσούλας και συνεργάτες 2000), (Σχήμα 2.10).

Στην πραγματικότητα, το ποσοστό της ενέργειας στο θερμοκήπιο που χρησιμοποιείται για την εξατμισοδιαπνοή είναι μία πολύπλοκη συνάρτηση πολλών μικροκλιματικών και φυσιολογικών παραμέτρων οι οποίες είναι δύσκολο να μετρηθούν. Οι Garzoli and Blackwell (1973) βρήκαν πειραματικά ότι η διαπνοή μιας πλήρως ανεπτυγμένης καλλιέργειας μεταβάλλεται μεταξύ 48 και 75% της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας με μία μέση τιμή περίπου 57%.



Σχήμα 2.10. Διαπνοή λE ($W m^{-2}$), συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας G ($W m^{-2}$), για δύο περιόδους του έτους: Φεβρουάριος και Ιούλιος σύμφωνα με τον Κατσούλα και συνεργάτες (2000).

2.2.2.1 Ισοζύγιο αισθητής ενέργειας

Οι απώλειες αισθητής ενέργειας από το θερμοκήπιο γίνονται κυρίως (i) με μεταφορά και ακτινοβολία από τα τοιχώματα του θερμοκηπίου (H_r , $W m^{-2}$) και (ii) με μεταφορά, λόγω διαφυγών αέρα ή αερισμού του θερμοκηπίου (H_v , $W m^{-2}$) (Σχήμα 2.9). Είναι δηλαδή:

$$H = H_r + H_v \quad (2.9)$$

Οι απώλειες με ακτινοβολία και μεταφορά από τα τοιχώματα του θερμοκηπίου δίδονται από τη σχέση:

$$H_r = U_r (T_i - T_o) = U_r \Delta T_{i-o} \quad (2.10)$$

όπου U_r ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) είναι ο συντελεστής απωλειών θερμότητας του θερμοκηπίου με ακτινοβολία και μεταφορά και ΔT_{i-o} ($^\circ\text{C}$) η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου T_i ($^\circ\text{C}$) και του εξωτερικού αέρα T_o ($^\circ\text{C}$).

Οι απώλειες λόγω διαφυγών ή αερισμού του θερμοκηπίου H_v , δίδονται από τη σχέση:

$$H_v = \rho C_p g_v \Delta T_{i-o} \quad (2.11)$$

όπου ρ και C_p είναι η πυκνότητα (kg m^{-3}) και η ειδική θερμότητα του αέρα ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) αντίστοιχα και g_v (m s^{-1}) είναι ο συντελεστής μεταφοράς αισθητής θερμότητας με αερισμό (αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου), ο οποίος μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του ρυθμού ανανέωσης του αέρα N (= αλλαγές του αέρα του θερμοκηπίου ανά ώρα):

$$g_v = \frac{N \frac{V}{A_g}}{3600} \quad (2.12)$$

όπου V (m^3) είναι ο όγκος του θερμοκηπίου και A_g (m^2) η επιφάνεια του εδάφους του θερμοκηπίου.

Έτσι, από τις σχέσεις (2.6) και (2.9) έχουμε:

$$H_r + H_v = (1-\alpha) R_n \quad (2.13)$$

Αντικαθιστώντας τα H_r και H_v στη σχέση (2.13) από τις σχέσεις (2.10) και (2.11), μπορούμε να πούμε ότι η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου δίνεται από τη σχέση:

$$T_i = T_o + \frac{(1-\alpha)R_n}{U_r + \rho C_p \left(\frac{NV/A_g}{3600} \right)} \quad (2.14)$$

Από τη σχέση (2.14) καθίσταται προφανές ότι η θερμοκρασία του θερμοκηπίου μπορεί να μειωθεί με τους εξής τρόπους:

- 1) Μειώνοντας την καθαρή ακτινοβολία R_n (άσπρισμα, κουρτίνες σκίασης κλπ).
- 2) Αυξάνοντας το συντελεστή α , το μέρος δηλαδή της R_n , που μετατρέπεται σε λανθάνουσα ενέργεια, με διοχέτευση υδρατμών στο θερμοκήπιο (τεχνητή ομίχλη, μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια κλπ).
- 3) Αυξάνοντας το ποσοστό ανανεώσεων του αέρα N .
- 4) Αυξάνοντας το συντελεστή U_r (ψεκασμός νερού στην οροφή).
- 5) Ψύχοντας τον εξωτερικό αέρα T_o , προτού τον διοχετεύσουμε στο θερμοκήπιο (σύστημα δροσισμού με ανεμιστήρες και υγρή παρειά).
- 6) Αυξάνοντας τον όγκο V του θερμοκηπίου.

Οι τρόποι αυτοί βρίσκουν εφαρμογή στα συστήματα ελέγχου του κλίματος στο θερμοκήπιο.

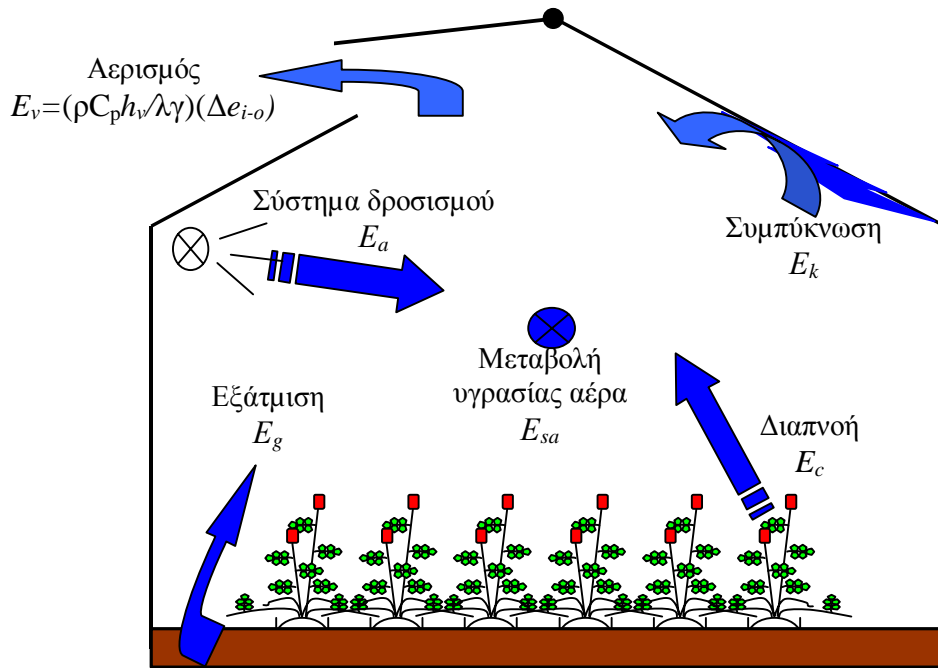
2.2.2.2 Ισοζύγιο λανθάνουσας ενέργειας

Το ισοζύγιο λανθάνουσας ενέργειας στο θερμοκήπιο περιγράφεται από τη σχέση:

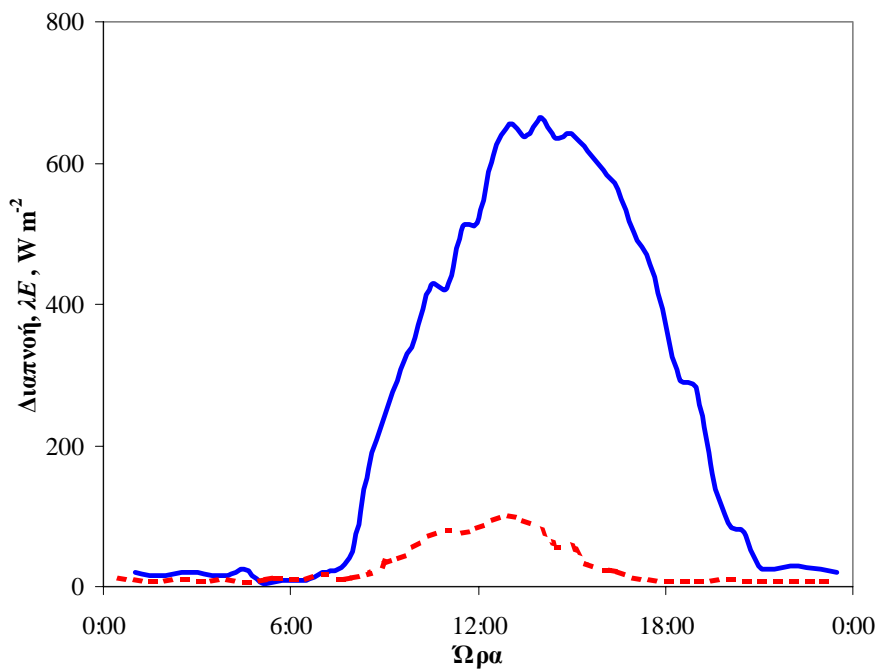
$$E_c + E_g + E_a - E_d - E_k - E_v - E_{sa} = 0 \quad (2.15)$$

όπου (σε $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$): E_c είναι η διαπνοή της καλλιέργειας, E_g η εξάτμιση από το έδαφος, E_a το νερό που προστίθεται στο θερμοκήπιο από το σύστημα δροσισμού, E_d το νερό που αφαιρείται από το θερμοκήπιο με το σύστημα αφύγρανσης, E_k η συμπύκνωση στο κάλυμμα του θερμοκηπίου, E_v το νερό που απομακρύνεται με διαφυγές και με αερισμό από το θερμοκήπιο και E_{sa} οι μεταβολές της υγρασίας του αέρα στο θερμοκήπιο (Σχήμα 2.11).

Η σημαντικότερη από τις πηγές υδρατμών είναι η διαπνοή (Baille 1996). Στο Σχήμα 2.12, όπου παρουσιάζεται η μεταβολή της διαπνοής κατά τη διάρκεια μιας καλοκαιρινής (Kittas *et al.* 2001) και μιας χειμωνιάτικης (Κατσούλας και συνεργάτες 2000) ημέρας, φαίνεται ότι η διαπνοή μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας και περιορίζεται αισθητά κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Σχήμα 2.11. Ροές υδρατμών στο θερμοκήπιο.



Σχήμα 2.12. Μεταβολή της διαπνοής κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου για δύο περιόδους: (- - -) χειμώνας και (—) καλοκαίρι. Μέση τιμή R_n και λE (διάστημα 9:00-19:00) 65 W m^{-2} και 52 W m^{-2} για το χειμώνα και 200 W m^{-2} και 500 W m^{-2} για το καλοκαίρι, αντίστοιχα.

Η συμπύκνωση στο κάλυμμα παρατηρείται σε περιόδους με μεγάλη σχετική υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και χαμηλή θερμοκρασία στο κάλυμμα, κυρίως δηλαδή το χειμώνα και κατά τη διάρκεια της νύχτας, όταν η θερμοκρασία του τοιχώματος του θερμοκηπίου είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία δρόσου του αέρα.

Το καλοκαίρι, η απώλεια υδρατμών από το θερμοκήπιο μέσω αερισμού έχει ιδιαίτερη σημασία. Με τον αερισμό γίνεται εναλλαγή αέρα μεταξύ του εσωτερικού του θερμοκηπίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Έτσι, ο υγρός αέρας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου αντικαθίσταται από τον ξηρότερο εξωτερικό αέρα. Η ανταλλαγή υδρατμών δίνεται από τη σχέση:

$$E_v = \frac{\rho C_p h_v}{\lambda \gamma} (e_i - e_o) = \frac{\rho C_p h_v}{\lambda \gamma} \Delta e_{i-o} \quad (2.16)$$

όπου: e_i (kPa) είναι η πίεση ατμών του εσωτερικού αέρα, e_o (kPa) η πίεση ατμών του εξωτερικού αέρα, Δe_{i-o} (kPa) η διαφορά τους, γ ($= 0.066 \text{ kPa K}^{-1}$) η ψυχομετρική σταθερά και h_v (m s^{-1}) ο συντελεστής μεταφοράς υδρατμών λόγω αερισμού και διαφυγών. Ο συντελεστής h_v , μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ίδιος με το συντελεστή g_v , που αντιπροσωπεύει την αγωγιμότητα στη μεταφορά αισθητής ενέργειας και επομένως μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (2.12). Ως εκ τούτου, η αγωγιμότητα στη μεταφορά ενέργειας και μάζας θα συμβολίζεται στη συνέχεια με το σύμβολο g .

2.2.3 Διαπνοή

2.2.3.1 Εισαγωγή

Η διαπνοή αποτελεί το σημαντικότερο μέρος του ισοζυγίου της λανθάνουσας ενέργειας και ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία του ενεργειακού ισοζυγίου. Όπως παρατηρήθηκε από πολλούς ερευνητές (π.χ.: Morris *et al.* 1957, de Villèle 1972, van der Post *et al.* 1974 για καλλιέργεια τομάτας, Yang *et al.* 1990 για καλλιέργεια αγγουριού και Κατσούλας και συνεργάτες 2000 για καλλιέργεια τριανταφυλλιάς), υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ της διαπνοής των φυτών και της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας G_a πάνω από τα φυτά. Αυτές οι δύο μεταβλητές συνδέονται με το συντελεστή α της σχέσης (2.7), ο οποίος εξαρτάται και από το στάδιο της καλλιέργειας. Έτσι, για παράδειγμα, για νεαρές καλλιέργειες τομάτας και αγγουριού είναι περίπου το 1/5 της τιμής του αντίστοιχου συντελεστή για ώριμη καλλιέργεια (de Graaf and van den Ende 1981).

Η υγρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου έχει εξίσου σημαντική αλλά μικρότερη επίδραση στη διαπνοή. Η επίδρασή της χαρακτηρίζεται από το έλλειμμα κορεσμού του αέρα D_i (kPa), το οποίο ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της πίεσης ατμών του αέρα, όταν αυτός βρίσκεται στον κορεσμό e_i^* (kPa), με την πραγματική πίεση του αέρα e_i (kPa). Το έλλειμμα κορεσμού, ένα χαρακτηριστικό της ξηρότητας του αέρα, για μια δεδομένη θερμοκρασία είναι αντιστρόφως ανάλογο της υγρασίας του αέρα. Για ένα απλό γυάλινο θερμοκήπιο οι Jolliet and Bailey (1992) παρατήρησαν ότι υπάρχει συσχέτιση του D_i με την ηλιακή ακτινοβολία G .

Ως εκ τούτου, στις περισσότερες περιπτώσεις, η ηλιακή ακτινοβολία από μόνη της μπορεί να εξηγήσει το μεγαλύτερο μέρος της παραλλακτικότητας της διαπνοής, καθώς 'κρύβει' και την επίδραση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα. Είναι απαραίτητο, όμως να λάβουμε υπόψη το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, στην περίπτωση που χρησιμοποιείται κάποιο σύστημα θέρμανσης, δροσισμού ή αφύγρανσης.

Η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα και η θερμοκρασία των σωλήνων θέρμανσης δε βρέθηκε να επηρεάζουν σημαντικά και άμεσα το ρυθμό διαπνοής (de Graaf and van den Ende 1981, Jolliet 1999).

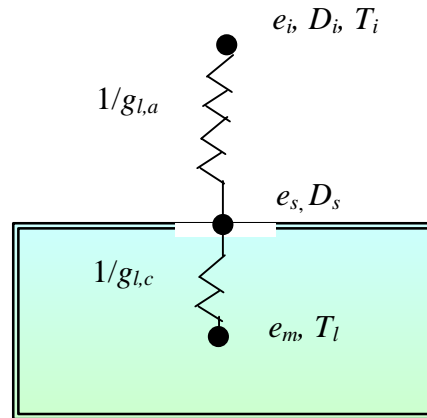
Η βασική εξίσωση για τον υπολογισμό της διαπνοής είναι αυτή των Penman-Monteith (Monteith 1973) (επεξηγηματικό, μηχανισμικό προσομοίωμα), η οποία έχει αναπτυχθεί για καλλιέργειες ανοιχτού αγρού, είναι αρκετά απλή και παρέχει ακριβείς εκτιμήσεις της εξατμισοδιαπνοής μιας καλλιέργειας. Παρόλα αυτά, κατά καιρούς έχουν αναπτυχθεί και βαθμονομηθεί διάφορες απλοποιημένες περιγραφικές σχέσεις με κυριότερη αυτή που περιγράφει η σχέση (2.7). Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εξίσωση των Penman-Monteith και κατόπιν γίνεται αναφορά στις απλοποιημένες σχέσεις που υπάρχουν στη βιβλιογραφία.

2.2.3.2 Η εξίσωση των Penman-Monteith

Ο ρυθμός μεταφοράς υδρατμών από το εσωτερικό ενός φύλλου στην επιφάνειά του $\lambda E_{l,s}$ (W m^{-2}) δίνεται συναρτήσει της αγωγιμότητας στη μεταφορά των υδρατμών από το εσωτερικό του φύλλου στην επιφάνειά του (στοματική αγωγιμότητα) $g_{l,c}$ (m s^{-1}) και της διαφοράς μεταξύ της πίεσης ατμών στο εσωτερικό του φύλλου e_m (kPa) και της πίεσης ατμών στην επιφάνεια του φύλλου e_s (kPa) (Σχήμα 2.13), από τη σχέση:

$$\lambda E_{l,s} = \frac{\rho C_p g_{l,c}}{\gamma} (e_m - e_s) \quad (2.17)$$

Η στοματική αγωγιμότητα υπολογίζεται συναρτήσει διαφόρων κλιματικών παραμέτρων. Ο Collatz *et al.* (1991) έχουν κάνει ανασκόπηση στις σχέσεις που υπάρχουν για τον υπολογισμό της στοματικής αγωγιμότητας. Στην παράγραφο 2.2.3.2.3 της παρούσης διατριβής γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στη στοματική αγωγιμότητα και τους παράγοντες που την επηρεάζουν.



Σχήμα 2.13. Σχηματική απεικόνιση της στοματικής $g_{l,c}$ και της αεροδυναμικής $g_{l,a}$ αγωγιμότητας ενός φύλλου. e_i , D_i , και T_i είναι η πίεση ατμών, το έλλειμμα κορεσμού και η θερμοκρασία του αέρα αντίστοιχα, e_m , και T_l η πίεση ατμών και η θερμοκρασία του φύλλου και e_s και D_s η πίεση ατμών και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα στην επιφάνεια του φύλλου.

Ο ρυθμός μεταφοράς υδρατμών από την επιφάνεια του φύλλου στον αέρα $\lambda E_{l,a}$ (W m^{-2}) δίδεται σε συνάρτηση με την αεροδυναμική αγωγιμότητα του φύλλου $g_{l,a}$ (m s^{-1}) και τη διαφορά μεταξύ της πίεσης ατμών στην επιφάνεια του φύλλου e_s (kPa) και της πίεσης ατμών του αέρα e_i (kPa) από τη σχέση:

$$\lambda E_{l,a} = \frac{\rho C_p g_{l,a}}{\gamma} (e_s - e_i) \quad (2.18)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.17) και (2.18) προκύπτει η σχέση που περιγράφει το ρυθμό μεταφοράς υδρατμών από το εσωτερικό του φύλλου στον αέρα λE_l (W m^{-2}):

$$\lambda E_l = \frac{\frac{\rho C_p}{\gamma} (e_m - e_i)}{(g_{l,c})^{-1} + (g_{l,a})^{-1}} \quad (2.19)$$

Αν θεωρήσουμε ότι ο αέρας που υπάρχει στους υποστομάτιους χώρους βρίσκεται στον κορεσμό και ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας του φύλλου T_l ($^{\circ}\text{C}$) είναι αντιπροσωπευτική της θερμοκρασίας του φύλλου, τότε έχουμε:

$$e_m = e^*(T_l) \quad (2.20)$$

και συνεπώς η (2.19) γίνεται:

$$\lambda E_l = \frac{\rho C_p [e^*(T_l) - e_i]}{(g_{l,c})^{-1} + (g_{l,a})^{-1}} = \rho C_p D_c g_{l,t} \quad (2.21)$$

όπου: $[e^*(T_l) - e_i]$ είναι το έλλειμμα κορεσμού φύλλου-αέρα D_c (kPa) και $g_{l,t}$ (m s^{-1}) η συνολική αγωγιμότητα ενός φύλλου $[= (g_{l,a})^{-1} + (g_{l,c})^{-1}]$.

Η πίεση ατμών στον κορεσμό στη θερμοκρασία του φύλλου $e^*(T_l)$, δίδεται από τη σχέση:

$$e^*(T_l) = e_i^* + \delta (T_l - T_i) \quad (2.22)$$

όπου e_i^* (kPa) είναι η πίεση ατμών του αέρα στον κορεσμό (*) και δ είναι η κλίση της καμπύλης κορεσμού του αέρα ($=de_i^*/dT_i$) (kPa K^{-1}). Από τις σχέσεις (2.21) και (2.22) προκύπτει η σχέση:

$$\lambda E_l = \frac{\delta \rho C_p (T_l - T_i) + \frac{\delta \rho C_p}{\gamma} (e_i^* - e_i)}{(g_{l,c})^{-1} + (g_{l,a})^{-1}} \quad (2.23)$$

Η σχέση που περιγράφει τη μεταφορά της αισθητής ενέργειας από ένα φύλλο στον αέρα είναι:

$$H = \rho C_p g_{l,a} (T_l - T_i) \quad (2.24)$$

Σύμφωνα με την υπόθεση που διατυπώθηκε στην παράγραφο 2.2.2.2, ότι η αγωγιμότητα στη μεταφορά ενέργειας είναι ίδια με αυτή στη μεταφορά μάζας, από τις εξισώσεις (2.5), (2.23) και (2.24) προκύπτει η σχέση των Penman-Monteith (Monteith 1973):

$$\lambda E_l = \frac{\delta R_n + \rho C_p D_i g_{l,a}}{\delta + \gamma \left(1 + \frac{g_{l,a}}{g_{l,c}}\right)} \quad (2.25)$$

Η σχέση (2.25) εκτιμά τη διαπνοή ενός φύλλου συναρτήσει:

- της καθαρής ακτινοβολίας R_n , που απορροφάται από το φύλλο και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα D_i . Οι μεταβλητές αυτές χαρακτηρίζουν το μικροκλίμα γύρω από το φύλλο, με την R_n να είναι συνάρτηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας του φύλλου,
- των χαρακτηριστικών αγωγιμοτήτων του φύλλου, δηλαδή της στοματικής και της αεροδυναμικής αγωγιμότητας.

2.2.3.2.1 Η θεώρηση του 'μεγάλου φύλλου'

Για τον υπολογισμό και την προσομοίωση των ανταλλαγών ενέργειας και μάζας μεταξύ της καλλιέργειας και του αέρα, κυριαρχούν δύο τάσεις (González-Real 1995). Η πρώτη υποθέτει ότι η καλλιέργεια χωρίζεται σε διακριτά επίπεδα και για τους υπολογισμούς των ανταλλαγών απαιτείται η γνώση και ο χαρακτηρισμός των συνθηκών που επικρατούν στο κάθε στρώμα-επίπεδο της καλλιέργειας (Yang 1995). Χρησιμοποιούνται απλά υπο-προσομοιώματα για τον υπολογισμό των ανταλλαγών σε κάθε επίπεδο, αλλά απαιτούνται πολύπλοκα προσομοιώματα για τον υπολογισμό των απαραίτητων άγνωστων παραμέτρων για το κάθε επίπεδο (θερμοκρασία, υγρασία, ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου, CO₂ κλπ) και την ολοκλήρωσή τους από τα επιμέρους επίπεδα (π.χ. επίπεδο φύλλων) στο συνολικό επίπεδο (π.χ. επίπεδο της καλλιέργειας). Η δεύτερη τάση που επικρατεί για τον υπολογισμό των ανταλλαγών ενέργειας και μάζας μεταξύ της καλλιέργειας και του αέρα, θεωρεί την καλλιέργεια σαν ένα μεγάλο φύλλο ('*big leaf*') και ότι όλα τα εσωτερικά στρώματά της βρίσκονται στις ίδιες κλιματικές συνθήκες (Stanghellini 1995). Στην περίπτωση δηλαδή αυτή, γίνεται η υπόθεση ότι όλα τα φύλλα ανταλλάσσουν ενέργεια και μάζα παράλληλα και ότι βρίσκονται στις ίδιες κλιματικές συνθήκες. Η διαπνοή της καλλιέργειας στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (Monteith 1973):

$$\lambda E = \frac{\delta R_n}{\delta + \gamma(1 + g_a/g_c)} + \frac{\rho C_p D_i g_a}{\delta + \gamma(1 + g_a/g_c)} \quad (2.26)$$

με την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_a να δίδεται από τη σχέση (2.2) και τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_c να δίδεται από τη σχέση (2.3). Στη σχέση (2.26), R_n είναι η καθαρή ακτινοβολία, που απορροφάται από την καλλιέργεια και D_i είναι το έλλειμμα κορεσμού του αέρα.

2.2.3.2.2 Αεροδυναμική αγωγιμότητα.

Η αεροδυναμική αγωγιμότητα, η οποία αντιπροσωπεύει τη μεταφορά των υδρατμών από την επιφάνεια του φύλλου ή της καλλιέργειας στον περιβάλλοντα αέρα, μπορεί να υπολογιστεί με δύο τρόπους: είτε συναρτήσει της αισθητής ενέργειας της καλλιέργειας και της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα (Seginer 1984), είτε με την κλασική θεωρία της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιώντας αδιάστατους αριθμούς (Stanghellini 1987). Στην εργασία αυτή, η αεροδυναμική αγωγιμότητα υπολογίστηκε με τον πρώτο τρόπο.

Αν εφαρμόσουμε τη σχέση (2.24) στην περίπτωση μιας καλλιέργειας και λύσουμε τη σχέση ως προς την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$g_a = \rho C_p \frac{H}{\Delta T_c} \quad (2.27)$$

Το πρόβλημα που προκύπτει συνήθως από τη χρήση της σχέσης (2.27), σχετίζεται με την επιλογή των σημείων στα οποία θα υπολογιστεί η διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ΔT_c . Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές διαφωνίες ως προς το ποια διαφορά θερμοκρασίας πρέπει να λαμβάνεται. Στην περίπτωση που η αεροδυναμική αγωγιμότητα υπολογιστεί από μετρήσεις της θερμοκρασίας του αέρα πάνω και όχι μέσα στην καλλιέργεια, το αποτέλεσμα είναι περισσότερο μια ενδεικτική τιμή (Yang 1995).

Ο Yang (1995) θεωρώντας ότι η παραδοχή του μεγάλου φύλλου δεν είναι αντιπροσωπευτική, αφού η ταχύτητα του αέρα πάνω από την καλλιέργεια είναι έως

και μία τάξη μεγαλύτερη από αυτή στο μέσο της καλλιέργειας, πρότεινε ότι ο προσδιορισμός και η προσομοίωση της αεροδυναμικής αγωγιμότητας πρέπει να γίνεται μεταξύ τριών διαφορετικών επιπέδων: (α) καλλιέργειας-αέρα, (β) εδάφους-αέρα και (γ) αέρα (που βρίσκεται μέσα στην καλλιέργεια) - αέρα (πάνω από την καλλιέργεια). Η Stanghellini (Stanghellini 1995), σημείωσε προς απάντηση στον Yang (Yang 1995), ότι δεν έχει αποδειχθεί πως ένα προσομοίωμα της αεροδυναμικής αγωγιμότητας σε τρία επίπεδα θα ήταν περισσότερο ακριβές από ένα απλό (ενός επιπέδου) προσομοίωμα, το οποίο, τουλάχιστον για την περίπτωση κλειστού θερμοκηπίου με το σύστημα θέρμανσης σε λειτουργία, έχει αποδειχθεί αρκετά ικανοποιητικό (Stanghellini 1983).

2.2.3.2.3 Στοματική αγωγιμότητα

Η στοματική αγωγιμότητα παίζει σημαντικό ρόλο στον καταμερισμό της ενέργειας σε αισθητή και λανθάνουσα και επηρεάζεται από μία σειρά παραμέτρων του μικροκλίματος.

Η στοματική αγωγιμότητα, στο επίπεδο του φύλλου ή της καλλιέργειας, έχει συσχετιστεί με την ηλιακή ακτινοβολία, το έλλειμμα κορεσμού, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του CO₂ στον αέρα, καθώς επίσης και με το υδατικό δυναμικό του φύλλου (Turner 1974, van Bavel 1974, Jarvis 1976, Takami and Uchijima 1977, Farquhar 1978, Farquhar and Sharkey 1982, Kaufmann 1982, Choudhury 1983, Zeiger 1983, Dwyer and Stewart 1984, Avissar *et al.* 1985, Choudhury and Idso 1985, Lindroth 1985, Simpson *et al.* 1985, Grantz and Zeiger 1986, Baldocchi *et al.* 1987, Stanghellini 1987) ή με φυσιολογικούς παράγοντες, όπως η φωτοσύνθεση (Ball *et al.* 1987, Collatz *et al.* 1991, Leuning 1995) και η διαπνοή (Monteith 1973, Monteith 1995). Από τους ανωτέρω παράγοντες, ως γνωστόν, το σπουδαιότερο ρόλο παίζει η ακτινοβολία. Παρά το γεγονός ότι έχει βρεθεί η μορφή της σχέσης της στοματικής αγωγιμότητας με τους παραπάνω παράγοντες (π.χ.: Lange *et al.* 1971, Neilson and Jarvis 1975, Stanghellini 1987), δεν έχει αναπτυχθεί ως τώρα κάποιο μηχανιστικό μοντέλο, το οποίο να προβλέπει το άνοιγμα των στομάτων και έτσι μόνο εμπειρικές μέθοδοι είναι διαθέσιμες. Επιπλέον, επειδή δεν υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία αρκετές αναφορές σχετικά με τη στοματική αγωγιμότητα των θερμοκηπιακών καλλιεργειών, τόσο στο επίπεδο του φύλλου όσο και στο επίπεδο της καλλιέργειας,

θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική η απόκτηση περισσότερης γνώσης, σχετικής με τη συμπεριφορά και την αντίδραση της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας στις αλλαγές του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Αυτό είναι απαραίτητο, αφενός μεν για να ελεγχθεί η ισχύς των παραπάνω προσομοιωμάτων, αφετέρου δε για να εκληφθούν ορθά υπόψη οι επιδράσεις που προκαλούνται από το μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την ιδιαιτερότητα του σε σχέση με τον ανοιχτό αγρό, στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 26 περίπου ετών, η πιο κοινή σχέση, η οποία εκφράζει την επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη συμπεριφορά των στομάτων, είναι η σχέση του Jarvis (1976):

$$g_c = g_M f_1(R_n) f_2(D_i) f_3(T_i) f_4(CO_2) \quad (2.28)$$

Στη σχέση αυτή, η στοματική αγωγιμότητα εκφράζεται ως η μέγιστη αγωγιμότητα g_M , η οποία πολλαπλασιάζεται με μία σειρά παραγόντων (ακτινοβολία, έλλειμμα κορεσμού του αέρα, θερμοκρασία του αέρα και συγκέντρωση CO_2 στον αέρα). Οι παράγοντες αυτοί θεωρούνται ανεξάρτητοι μεταξύ τους, καταπονούν υδατικά την καλλιέργεια και δρουν πολλαπλασιαστικά για το τελικό αποτέλεσμα. Η μορφή των μαθηματικών συναρτήσεων f_1 , f_2 , f_3 και f_4 είναι γενικά γνωστή (π.χ.: Stanghellini 1987, Παπαδάκης 1989, Baille *et al.* 1994b), ενώ η τιμή της μέγιστης αγωγιμότητας g_M , η οποία διαφέρει από είδος σε είδος, μπορεί να μετρηθεί ή να βρεθεί στη βιβλιογραφία. Τέλος, η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας μπορεί να υπολογιστεί:

- με αντιστροφή και λύση της σχέσης (2.21) για την περίπτωση ενός φύλλου ή της καλλιέργειας, χρησιμοποιώντας τις ανάλογες αγωγιμότητες:

$$g_c = \frac{\rho C_p}{\gamma \lambda E} D_c - g_a \quad (2.29)$$

- με αντιστροφή της εξίσωσης των Penman-Monteith, [σχέση (2.25) για την περίπτωση ενός φύλλου ή σχέση (2.26) για την περίπτωση της καλλιέργειας].

2.2.3.3 Απλοποιημένες σχέσεις για τον υπολογισμό της διαπνοής

Η χρήση της ολοκληρωμένης σχέσης των Penman-Monteith (2.26), όπως είδαμε παραπάνω, απαιτεί τη γνώση και εισαγωγή πολλών σταθερών και παραμέτρων που δεν είναι εύκολα διαθέσιμοι. Ιδιαίτερα η αεροδυναμική και η στοματική αγωγιμότητα των φύλλων πρέπει να είναι γνωστές για κάθε είδος φυτού και πιθανόν για κάθε ποικιλία. Παράλληλα, η εξίσωση των Penman-Monteith είναι ευαίσθητη και επηρεάζεται από λανθασμένες τιμές της στοματικής και αεροδυναμικής αγωγιμότητας (Choudhury and Monteith 1986, Stanghellini 1987, Jolliet and Bailey 1992), ενώ ταυτόχρονα δεν λαμβάνει υπόψη τις διαφορές μεταξύ των διαφόρων θερμοκηπιακών καλλιέργειών (Bakker 1991).

Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο άλλοι ερευνητές (π.χ.: Okuya and Okuya 1988, Jolliet and Bailey 1992, Baille *et al.* 1994a,c), έχουν προσπαθήσει να υπερβούν το πρόβλημα της εκτίμησης των αγωγιμοτήτων με τη χρήση μιας απλοποιημένης σχέσης των Penman-Monteith, του τύπου:

$$\lambda E = A R_n + B D_i \quad (2.30)$$

Οι συντελεστές A και B μπορεί να θεωρηθούν, με μια πρώτη προσέγγιση, ως συναρτήσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας, I_{LA} (Baille *et al.* 1994a). Οι παραπάνω συντελεστές έχουν προσδιοριστεί για αρκετά θερμοκηπιακά είδη φυτών (π.χ.: Boulard and Jemaa 1992, Baille *et al.* 1994c, Jolliet 1994, González-Real 1995, Kittas *et al.* 1999b) και για διάφορες περιόδους του έτους (π.χ.: Jolliet and Bailey 1992, Katsoulas *et al.* 1999), αλλά δεν έχει αποδειχθεί ότι οι τιμές των A και B , που βρίσκονται στη βιβλιογραφία για μια δεδομένη καλλιέργεια, ισχύουν ακόμα και για την ίδια καλλιέργεια, όταν αυτή αναπτύσσεται με διαφορετικό τρόπο (π.χ.: τριανταφυλλιά σε διαμόρφωση με λυγισμένους βλαστούς ή κλασική). Έτσι, ο προσδιορισμός των συντελεστών A και B πρέπει να γίνεται για την κάθε καλλιέργεια, ενώ επιπλέον έχει αναφερθεί ότι ακόμη και ίδιες καλλιέργειες αλλά διαφορετικές ποικιλίες έχουν δώσει σημαντικά διαφορετικούς συντελεστές (Kittas *et al.* 1999b). Οι Jolliet and Bailey (1992), μετά από σύγκριση που έκαναν μεταξύ απλοποιημένων σχέσεων που προβλέπουν τη διαπνοή για καλλιέργεια τομάτας (de Villèle 1972, van der Post *et al.* 1974, FAO 1977, de Graaf and van den Ende 1981, Okyua and Okyua 1988) και

καλλιέργεια αγγουριού (de Graaf *et al.* 1981, Yang *et al.* 1990), κατέληξαν στο ότι η προβλεπτική ικανότητα τέτοιων απλοποιημένων σχέσεων είναι περιορισμένη και ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες διαφορετικές από αυτές που βαθμονομήθηκαν. Παράλληλα, πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει απλοποιημένες σχέσεις στα πρότυπα των Penman-Monteith, υπολογίζοντας τη διαπνοή συναρτήσει της ακτινοβολίας, του ελλείμματος κορεσμού του αέρα και της συνολικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας (π.χ.: Chen 1984, Katerji and Perrier 1985, Yang *et al.* 1989, Boulard *et al.* 1991).

Άλλοι συγγραφείς έχουν προτείνει σχέσεις βασισμένες στο ολοκληρωμένο ενεργειακό ισοζύγιο της καλλιέργειας που επιτρέπουν μια ικανοποιητική εκτίμηση του ποσού της διαπνοής μιας θερμοκηπιακής καλλιέργειας.

Ο van Bavel *et al.* (1981), οι Chalabi and Bailey (1989) και οι Aikman and Houter (1990) υπέθεσαν ότι η στοματική αγωγιμότητα μεταβάλλεται μεταξύ μιας σταθερής τιμής για την ημέρα και μιας σταθερής τιμής για τη νύχτα. Η Stanghellini (1987) παρουσίασε ένα προσομοίωμα της διαπνοής βασισμένο στη θεώρηση των Penman-Monteith, στο οποίο η διαπνοή καλλιέργειας τομάτας υπολογίζεται συναρτήσει: της καθαρής ακτινοβολίας που απορροφάται από την καλλιέργεια, της ενέργειας που αποθηκεύεται στην καλλιέργεια, του δείκτη φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας, του ελλείμματος κορεσμού του αέρα και της στοματικής και αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας.

Σε μια συγκριτική έρευνα που έγινε από τους Jolliet and Bailey (1992) μεταξύ των προσομοιωμάτων των: (i) Penman (FAO 1977), (ii) Stanghellini (1987), (iii) Chalabi and Bailey (1989) και (iv) Aikman and Houter (1990), το προσομοίωμα της Stanghellini (Stanghellini 1987) αποδείχθηκε το περισσότερο ακριβές στην πρόβλεψη της διαπνοής. Συμπερασματικά, κατέληξαν ότι η ηλιακή ακτινοβολία, το έλλειμμα κορεσμού αλλά και η κίνηση του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαπνοή και πρέπει να εμπεριέχονται σε κάθε προσομοίωμα υπολογισμού της.

Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι αρκετά από τα προσομοιώματα που υπάρχουν, όπως αυτό της Stanghellini (1987), βαθμονομήθηκαν και αναπτύχθηκαν για περιοχές και περιόδους με χαμηλές τιμές για την ακτινοβολία και τη θερμοκρασία των φύλλων. Χαρακτηριστικό είναι ότι, κατά την περίοδο της βαθμονόμησης του προσομοιώματος της Stanghellini (1987) (Μάρτιος και Απρίλιος), η θερμοκρασία του

αέρα ήταν σχεδόν πάντα μικρότερη από τους 25°C, η θερμοκρασία των φύλλων ελάχιστα υπερέβαινε τους 24.5°C, ενώ η ακτινοβολία ήταν συνήθως μικρότερη από 300 W m⁻². Επιπλέον, στο προσομοίωμα της Stanghellini (1987), η επίδραση της ακτινοβολίας στη στοματική αγωγιμότητα και τη διαπνοή γίνεται περισσότερο έμμεσα παρά άμεσα, μέσω της επίδρασης στη διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα. Έτσι, μία αύξηση της ακτινοβολίας, σύμφωνα με το προσομοίωμα, επηρεάζει ελάχιστα τη διαπνοή, αλλά αισθητά τη θερμοκρασία των φύλλων αφού δεν υπάρχει εξισορρόπηση της θερμοκρασίας των φύλλων από αντίστοιχη αύξηση της λανθάνουσας ενέργειας. Συνεπώς, σύμφωνα με το προσομοίωμα, όταν η θερμοκρασία των φύλλων ξεπερνά τους 24.5°C, η στοματική αγωγιμότητα μειώνεται απότομα, κάτι που οδηγεί σε μείωση της διαπνοής και περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας της καλλιέργειας. Κατά συνέπεια, το προσομοίωμα προβλέπει λανθασμένες θερμοκρασίες για την καλλιέργεια, κοντά στους 35°C, με θερμοκρασίες εξωτερικού αέρα κοντά στους 24°C με 25°C. Είναι λοιπόν φανερό ότι το προσομοίωμα της Stanghellini (1987) δεν είναι κατάλληλο για την περιοχή της Ελλάδας ή για περιοχές με παρόμοιο κλίμα, όπως οι Μεσογειακές περιοχές κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Παρόλα αυτά, είναι κατάλληλο και δίνει ακριβείς προβλέψεις όταν χρησιμοποιείται σε συνθήκες παρόμοιες με αυτές που βαθμονομήθηκε.

Ωστόσο, άλλοι ερευνητές ανέπτυξαν ή βαθμονόμησαν προσομοιώματα παρόμοια με της Stanghellini (1987) για μεσογειακές συνθήκες (π.χ.: Papadakis *et al.* 1994a, Boulard *et al.* 1996)

Ο Jolliet (1994) παρουσίασε ένα σχετικά απλό προσομοίωμα, συμπεριλαμβάνοντας στους υπολογισμούς του την αλληλεπίδραση της υγρασίας και της συμπύκνωσης στο κάλυμμα. Το προσομοίωμά του ελέγχθηκε με πειραματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι είναι αρκετά ακριβές, ώστε να μπορεί να προβλέπει τη διαπνοή, τη σχετική υγρασία και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα. Παράλληλα, το παραπάνω προσομοίωμα είναι ικανό να προβλέψει την ποσότητα του νερού και της ενέργειας που πρέπει να αφαιρεθεί ή να προστεθεί στο θερμοκήπιο, προκειμένου να επιτευχθεί μία συγκεκριμένη τιμή για την υγρασία του αέρα ή το ρυθμό διαπνοής της καλλιέργειας.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι αρκετές από τις απλοποιημένες σχέσεις που προτάθηκαν, δίνουν ικανοποιητικές προβλέψεις και θα μπορούσαν επομένως να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια (π.χ. έλεγχος

άρδευσης). Παρόλα αυτά, η ισχύς των απλοποιημένων σχέσεων είναι περιορισμένη διότι: αφενός μεν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και διαφορετικά στάδια ανάπτυξης ή διαμόρφωσης της καλλιέργειας από αυτά που βαθμονομήθηκαν, χωρίς να προηγηθεί νέα βαθμονόμηση για την κάθε περίπτωση, αφετέρου δε η χρήση τους περιορίζεται σε εφαρμογές όπου δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια. Έτσι, απλοποιημένες σχέσεις πρόβλεψης της διαπνοής, δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές, όπως ο έλεγχος του κλίματος όπου απαιτούνται γενικότερα και ακριβέστερα προσομοιώματα της διαπνοής (Bailey 1985, Challa *et al.* 1988, van Meurs and Stanghellini 1989).

Παράλληλα, είναι καλύτερο να χρησιμοποιούνται συσχετίσεις που προκύπτουν από πειραματικά αποτελέσματα ή προσομοιώματα με συντελεστές προσέγγισης, όπως αυτοί που αναφέρθηκαν παραπάνω, παρά να χρησιμοποιείται η πολύπλοκη εξίσωση των Penman-Monteith με λάθος τιμές για τη στοματική αγωγιμότητα. Επί τόπου (*in situ*) εξακρίβωση και επιβεβαίωση των συντελεστών των προσομοιωμάτων είναι μία άλλη δυνατότητα (Boulard and Jeema 1992), αλλά μέχρι τώρα χρησιμοποιείται μόνο για καθαρά ερευνητικούς σκοπούς.

2.2.3.3.1 Διαπνοή από προβλέψεις με βάση το εξωτερικό κλίμα.

Το μεγαλύτερο εμπόδιο στην πρόβλεψη της διαπνοής μιας θερμοκηπιακής καλλιέργειας με ακρίβεια είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ της υγρασίας του αέρα και της διαπνοής. Στην περίπτωση προσομοιωμάτων που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο του κλίματος του θερμοκηπίου είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν και να συμπεριληφθούν υπο-προσομοιώματα της διαπνοής τα οποία να προβλέπουν απευθείας τη διαπνοή, συναρτήσει των εξωτερικών κλιματικών συνθηκών και των χαρακτηριστικών του θερμοκηπίου.

Μέχρι πρόσφατα, μόνο πολύπλοκα δυναμικά προσομοιώματα ήταν δυνατό να το επιτύχουν αυτό (π.χ.: Bot 1983, Kimball 1986, Chalabi and Bailey 1989). Προκειμένου να υπολογιστεί η ροή ενέργειας και μάζας με τα προσομοιώματα αυτά, το θερμοκήπιο χωρίζεται σε επίπεδα (έδαφος, καλλιέργεια, κάλυμμα κλπ) και αφού γίνουν οι υπολογισμοί αρχικά στο κάθε επίπεδο, γίνεται τελικά η ολοκλήρωση στο συνολικό σύστημα. Για το λόγο αυτό, τα προσομοιώματα αυτά γίνονται πολύπλοκα, απαιτούν τη γνώση αρκετών συντελεστών και παραμέτρων, χαρακτηριστικών για το

κάθε επίπεδο και κατά συνέπεια είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν σε λογισμικά (αλγορίθμους) βελτιστοποίησης του κλίματος του θερμοκηπίου. Για τον έλεγχο της υγρασίας και τον υπολογισμό της διαπνοής στις Μεσογειακές χώρες, άλλοι ερευνητές (π.χ.: Fuchs 1993, Boulard and Baille 1993, Seginer 1994) παρουσίασαν προσομοιώματα που επιτρέπουν τον υπολογισμό της θερμοκρασίας και της υγρασίας του εσωτερικού αέρα, καθώς επίσης και της διαπνοής της καλλιέργειας συναρτήσει του αερισμού και δροσισμού (με σύστημα τεχνητής ομίχλης) του θερμοκηπίου. Προηγουμένως, ο Fuchs (1990) παρουσίασε ένα απλοποιημένο προσομοίωμα το οποίο ισχύει μόνο σε θερμοκήπια με μεγάλο ρυθμό ανανεώσεων του αέρα. Πρόσφατα, οι Boulard και Wang (2000) έδωσαν μια έκφραση που προβλέπει τη διαπνοή συναρτήσει εξωτερικών κλιματικών παραμέτρων.

2.2.3.4 Βαθμός ελέγχου της διαπνοής από τη στοματική ή την αεροδυναμική αγωγιμότητα

Από τα παραπάνω και σε συνέχεια της συζήτησης που έγινε στο *Κεφάλαιο 1*, ενισχύεται η σημαντικότητα της μελέτης για τη σχέση της διαπνοής με το μικροκλίμα του θερμοκηπίου.

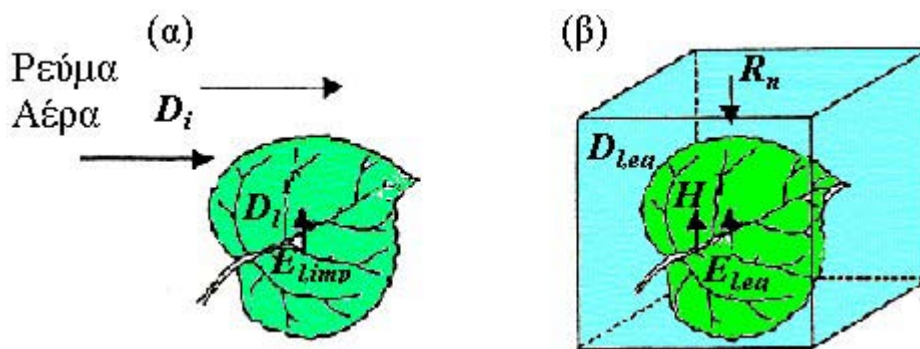
Μια θεωρητική ανάλυση του βαθμού κατά τον οποίο η διαπνοή ελέγχεται από τη στοματική ή την αεροδυναμική αγωγιμότητα γίνεται στην επόμενη ενότητα. Αυτό θα βοηθήσει στην κατανόηση των φαινομένων και των μηχανισμών που εμπλέκονται στη μεταφορά μάζας και ενέργειας στο θερμοκήπιο, καθώς οι δύο αγωγιμότητες εμπλέκονται στο βαθμό σύζευξης του φύλλου, της καλλιέργειας ή του θερμοκηπίου με το περιβάλλον τους. Ο βαθμός σύζευξης δύο συστημάτων (π.χ.: φύλλου-αέρα, καλλιέργειας-αέρα θερμοκηπίου, εσωτερικού θερμοκηπίου-εξωτερικού περιβάλλοντος) αντικατοπτρίζει τη δυνατότητα και ικανότητα των συστημάτων να ανταλλάσσουν μάζα και ενέργεια (Monteith 1981). Στην περίπτωση ανταλλαγής υδρατμών και CO₂, ο βαθμός σύζευξης χαρακτηρίζει το βαθμό κατά τον οποίο τα στόματα και η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας ελέγχουν τη διαπνοή και την απορρόφηση CO₂.

2.3 Σύνδεση του φύλλου με τον περιβάλλοντα αέρα - Παράγοντας ωμέγα

2.3.1 Γενικά

Όπως αναφέρουν οι Penman (1948) και Monteith (1973), η διαπνοή αποτελείται από δύο συνιστώσες: τη διαπνοή ‘εξισορρόπησης’ λE_{eq} (*equilibrium*), η οποία εξαρτάται από τη διαθέσιμη καθαρή ακτινοβολία και την ‘επιβαλλόμενη’ διαπνοή λE_{imp} (*imposed*) που εξαρτάται από το έλλειμμα κορεσμού του αέρα και ρυθμίζεται από τη στοματική αγωγιμότητα.

Προκειμένου να κατανοήσουμε καλύτερα τις έννοιες της επιβαλλόμενης διαπνοής λE_{imp} και της διαπνοής εξισορρόπησης λE_{eq} , θεωρούμε ένα φύλλο πάνω από το οποίο διέρχεται ένα ρεύμα αέρα (Σχήμα 2.14.α). Αν οι συνθήκες θερμοκρασίας και ελλείμματος κορεσμού του αέρα στην επιφάνεια του φύλλου ήταν ίδιες με αυτές του διερχόμενου ρεύματος αέρα, τότε θα υπήρχε τέλεια σύζευξη μεταξύ φύλλου και αέρα (οριακή κατάσταση). Αυτό θα συνέβαινε αν το φύλλο ήταν πολύ καλά αεριζόμενο με αποτέλεσμα το οριακό επιφανειακό στρώμα να είναι πολύ λεπτό και ο ρυθμός ανταλλαγής υδρατμών της επιφάνειάς του με τον αέρα υψηλός.



Σχήμα 2.14. (α) Πλήρως συζευγμένο φύλλο, (β) μη συζευγμένο φύλλο.

Σε μια εκ διαμέτρου αντίθετη οριακή κατάσταση μπορούμε να θεωρήσουμε ένα φύλλο εντελώς απομονωμένο από το περιβάλλον του (Σχήμα 2.14.β). Εξαιτίας της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φύλλο, της μειωμένης, λόγω κλειστού χώρου, θερμότητας με συναγωγή και των υδρατμών (λόγω διαπνοής) που συνεχώς προστίθενται στον αέρα γύρω από το απομονωμένο φύλλο, η θερμοκρασία και η

υγρασία του αέρα αυξάνουν συνεχώς, ενώ το έλλειμμα κορεσμού στην επιφάνεια του φύλλου είναι αρκετά διαφορετικό από αυτό του περιβάλλοντος αέρα.

Έτσι στην περίπτωση ενός τέλεια συζευγμένου φύλλου, η διαπνοή αντιπροσωπεύει την επιβαλλόμενη διαπνοή λE_{imp} και δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda E_l = \frac{\rho C_p g_{l,s} D_i}{\gamma} = \lambda E_{l, imp} \quad (2.31)$$

Από την άλλη πλευρά, όταν το φύλλο είναι πλήρως απομονωμένο από τον περιβάλλοντα αέρα, η τιμή της διαπνοής προσαρμόζεται και ρυθμίζεται προς μια κατάσταση ισορροπίας και ελέγχεται αποκλειστικά από τη ροή καθαρής ακτινοβολίας R_n . Στην περίπτωση αυτή, δε συνδέεται απευθείας με το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ή τη συνολική αγωγιμότητα της καλλιέργειας αντιπροσωπεύει τη διαπνοή εξισορρόπησης και δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda E_l = \frac{(\delta R_n / \gamma)}{(\delta / \gamma) + 1} = \lambda E_{l, eq} \quad (2.32)$$

Το ποσοστό συνεισφοράς της μιας ή της άλλης συνιστώσας στη συνολική διαπνοή εξαρτάται από το βαθμό σύζευξης των φύλλων με τον περιβάλλοντα αέρα. Ο βαθμός αυτός εκφράζεται με έναν αδιάστατο συντελεστή, τον 'παράγοντα Ωμέγα' Ω . Ο παράγοντας Ω εξαρτάται από το λόγο της αεροδυναμικής αγωγιμότητας προς τη στοματική αγωγιμότητα, λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 και, για την περίπτωση ενός φύλλου, δίνεται από τη σχέση (Jarvis 1985, Jarvis and McNaughton 1986):

$$\Omega_l = \frac{\frac{\delta}{\gamma} + 1}{\frac{\delta}{\gamma} + 1 + \frac{g^{l,a}}{g^{l,c}}} \quad (2.33)$$

όπου Ω_l είναι ο παράγοντας Ω του φύλλου.

Όσο μικρότερες είναι οι τιμές του παράγοντα Ω_l τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση της μεταβολής της στοματικής αγωγιμότητας στη διαπνοή. Στην αντίθετη περίπτωση,

η διαπνοή δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές της στοματικής αγωγιμότητας και εξαρτάται κυρίως από τη διαθεσιμότητα της καθαρής ακτινοβολίας.

Η διαπνοή ενός φύλλου λE_l και το έλλειμμα κορεσμού στην επιφάνειά του $D_{l,s}$ συναρτήσει του παράγοντα Ω_l δίνονται από τις σχέσεις (Jarvis 1985):

$$\lambda E_l = \lambda E_{l,eq} \Omega_l + \lambda E_{l,imp} (1 - \Omega_l) \quad (2.34)$$

$$D_{l,s} = D_{l,eq} \Omega_l + D_i (1 - \Omega_l) \quad (2.35)$$

Κατά συνέπεια όταν ο παράγοντας Ω τείνει στο μηδέν, το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ‘επιβάλλεται’ στην επιφάνεια του φύλλου και είναι $D_{l,s} \approx D_i$. Αντίθετα, όταν ο παράγοντας Ω τείνει στο 1, το έλλειμμα κορεσμού του αέρα στην επιφάνεια του φύλλου παίρνει μια σταθερή τιμή, την τιμή ισορροπίας και είναι $D_{l,s} \approx D_{l,eq}$. Στη δεύτερη περίπτωση η διαπνοή δε σχετίζεται με το έλλειμμα κορεσμού του περιβάλλοντος αέρα και η τιμή της εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη διαθέσιμη ενέργεια στην επιφάνεια του φύλλου. Με άλλα λόγια μπορούμε να πούμε ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο Ω_l , τόσο μικρότερη είναι η σχετική σημασία της ταχύτητας του ανέμου, του D_i και της αγωγιμότητας στον έλεγχο της διαπνοής.

Σημαντικό ρόλο στη σύζευξη ενός φύλλου με το περιβάλλον του παίζει το μέγεθος και το σχήμα του. Στον Πίνακα 2.3 δίνονται υπολογισμένες τιμές του παράγοντα Ω_l για διάφορα φύλλα (Jarvis 1985).

Πίνακας 2.3. Υπολογισμένες τιμές του παράγοντα Ω_l για φύλλα διαφορετικού μεγέθους που εκτίθενται σε ρεύμα αέρα 1 m s^{-1} στους 18°C με στοματική αγωγιμότητα 10 mm s^{-1} .

Φυτό	Πλάτος φύλλου (mm)	Ω_l
Αγγουράκι	250	0.7
Φασόλι	60	0.5
Κρεμμύδι	8	0.3
Σπαράγγι	1	0.1

(Στοιχεία από Jarvis 1985).

Με βάση την σχέση (2.33) μπορούμε να πούμε ότι η επίδραση της $g_{l,c}$ στη διαπνοή εξαρτάται από την τιμή του Ω_l . Για συγκεκριμένες τιμές των R_n , D_i , και T_i , οι Jarvis and McNaughton (1986) απέδειξαν ότι η επίδραση μιας μικρής μεταβολής της στοματικής αγωγιμότητας στη διαπνοή δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{d\lambda E_l}{\lambda E_l} = (1 - \Omega_l) \frac{dg_{l,c}}{g_{l,c}} \quad (2.36)$$

Όταν η αεροδυναμική αγωγιμότητα $g_{l,a}$ είναι μικρή, συγκρινόμενη με τη στοματική $g_{l,c}$, όπως συμβαίνει για μεγάλου μεγέθους και όχι καλά αεριζόμενα φύλλα, τότε ο Ω_l τείνει στο 1 με αποτέλεσμα η διαπνοή να μην επηρεάζεται από αλλαγές της στοματικής αγωγιμότητας. Από την άλλη πλευρά, όταν η αεροδυναμική αγωγιμότητα είναι μεγάλη σε σχέση με τη στοματική, όπως συμβαίνει σε μικρά καλά αεριζόμενα φύλλα κυρίως στον ανοιχτό αγρό, τότε ο Ω_l τείνει στο μηδέν και η διαπνοή είναι πολύ ευαίσθητη σε αλλαγές της στοματικής αγωγιμότητας.

2.3.2 Εφαρμογή για μια πλήρη καλλιέργεια

Η διαπνοή στο επίπεδο της καλλιέργειας μπορεί να αναλυθεί με παρόμοιο τρόπο όπως στην περίπτωση του φύλλου. Έτσι η επιβαλλόμενη διαπνοή της καλλιέργειας δίνεται αντίστοιχα από τη σχέση:

$$\lambda E_{c, imp} = \frac{\rho C_p g_t D_i}{\gamma} \quad (2.37)$$

όπου g_t είναι η συνολική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Η διαπνοή εξισορρόπησης δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda E_{c, eq} = \frac{(R_n \delta / \gamma)}{(\delta / \gamma) + 1} \quad (2.38)$$

ενώ ο παράγοντας Ω της καλλιέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$\Omega_c = \frac{\frac{\delta}{\gamma} + 1}{\frac{\delta}{\gamma} + 1 + \frac{g_a}{g_c}} \quad (2.39)$$

Είναι φανερό από τις παραπάνω σχέσεις ότι η $\lambda E_{c,eq}$ είναι ανεξάρτητη από την καλλιέργεια, ενώ η $\lambda E_{c,imp}$ είναι συνάρτηση της αγωγιμότητάς της g_c . Επομένως, ο παράγοντας Ω_c σε αναλογία με τον παράγοντα Ω_l του φύλλου ορίζει το βαθμό εξάρτησης της διαπνοής της καλλιέργειας από παράγοντες ακτινοβολίας ή παράγοντες μεταφοράς. Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται υπολογισμένες τιμές του παράγοντα Ω_c για διάφορες καλλιέργειες στον ελεύθερο αγρό (Jarvis 1985).

Πίνακας 2.4. Υπολογισμένες τιμές του παράγοντα Ω_c για διάφορες καλλιέργειες στον ελεύθερο αγρό.

Φυτό	Ύψος καλλιέργειας	Ω_c
Φράουλα	0.2	0.9
Τομάτα	0.4	0.7
Αμπέλι	1	0.5
Βατόμουρο	1.5	0.4

(Στοιχεία από Jarvis 1985).

2.3.3 Εφαρμογή σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες

Τα θερμοκήπια, λόγω της ειδικής κατασκευής τους, δεν επιτρέπουν συχνά τον καλό αερισμό του εσωτερικού τους, με αποτέλεσμα η κίνηση του αέρα μέσα σε αυτά να είναι πολύ μικρότερη από ότι σε συνθήκες ελεύθερου αγρού και η εναλλαγή του αέρα με το εξωτερικό περιβάλλον να είναι περιορισμένη. Έτσι, υπό συνθήκες θερμοκηπίου, λόγω των χαμηλών ταχυτήτων ανέμου, το οριακό στρώμα είναι μεγαλύτερο και έτσι η αεροδυναμική αγωγιμότητα g_a σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες είναι αρκετά μικρότερη από αυτή που παρατηρείται σε παρόμοιες καλλιέργειες σε συνθήκες αγρού.

Η τιμή του παράγοντα Ω , στην περίπτωση μιας θερμοκηπιακής καλλιέργειας, είναι πολύ υψηλότερη συγκριτικά με την ίδια καλλιέργεια στον ανοιχτό αγρό. Ο Jarvis (1985) έκανε μια προσπάθεια ανάλυσης της αλληλεπίδρασης του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου με το εξωτερικό περιβάλλον χρησιμοποιώντας τον παράγοντα Ω , αλλά δεν προχώρησε αρκετά τονίζοντας ότι δεν υπάρχουν τα απαραίτητα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό του παράγοντα Ω σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Παρόλα αυτά, η πρόοδος στον τομέα της προσομοίωσης του μικροκλίματος των θερμοκηπίων και της διαπνοής των θερμοκηπιακών καλλιεργειών τα τελευταία χρόνια, κάνει πιο εύκολο το έργο της ανάλυσης της σύζευξης του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Πρόσφατα, ο Boulard (1996) έκανε μια προσπάθεια εφαρμογής του παράγοντα Ω σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Παρατήρησε ότι ο βαθμός σύνδεσης μεταξύ της καλλιέργειας και του εξωτερικού περιβάλλοντος ελέγχεται κυρίως από την αγωγιμότητα στη μεταφορά ενέργειας και υδρατμών g_v από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του θερμοκηπίου (αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου). Η αγωγιμότητα αυτή σχετίζεται όπως είδαμε με το ρυθμό ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου [σχέση (2.12)], (Σχήμα 2.15).

Σε ένα κλειστό θερμοκήπιο, η αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου g_v μπορεί να είναι μικρότερη από την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_a , καθιστώντας την έτσι ως τον περιοριστικό παράγοντα της διαπνοής. Καθίσταται σαφώς φανερό λοιπόν ότι απαιτείται ένας ελάχιστος ρυθμός αερισμού, προκειμένου να διατηρηθεί η g_v σε υψηλότερα από την g_a επίπεδα, επιτρέποντας έτσι στη διαπνοή να φθάσει στη μέγιστη τιμή της με περιοριστικό παράγοντα την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας.

Ο παράγοντας Ω_g του θερμοκηπίου, σε αναλογία με τους Ω_l και Ω_c , δίδεται από τη σχέση:

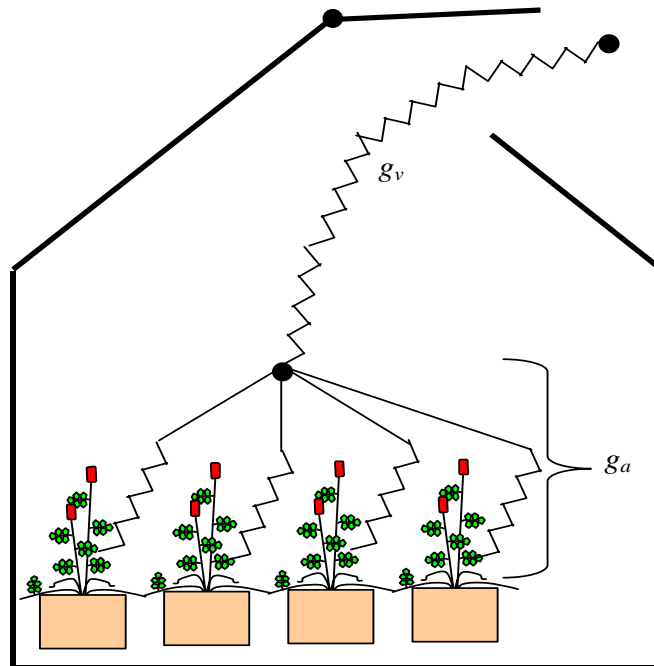
$$\Omega_g = \frac{\frac{\delta}{\gamma} + 1}{\frac{\delta}{\gamma} + 1 + \frac{g_{t,a}}{g_c}} \quad (2.40)$$

όπου $g_{t,a}$ είναι η συνολική αεροδυναμική αγωγιμότητα για τη μεταφορά των υδρατμών από την επιφάνεια της καλλιέργειας στον εξωτερικό αέρα και η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$g_{t,a} = \frac{g_a g_v}{g_a + g_v} \quad (2.41)$$

Στη σχέση (2.40), αν αντικαταστήσουμε την $g_{t,a}$ με την $g_{t,a}$ από τη σχέση (2.41) τότε προκύπτει:

$$\Omega_g = \frac{\frac{\delta}{\gamma} + 1}{\frac{\delta}{\gamma} + 1 + \frac{g_a g_v}{g_c(g_a + g_v)}} \quad (2.42)$$

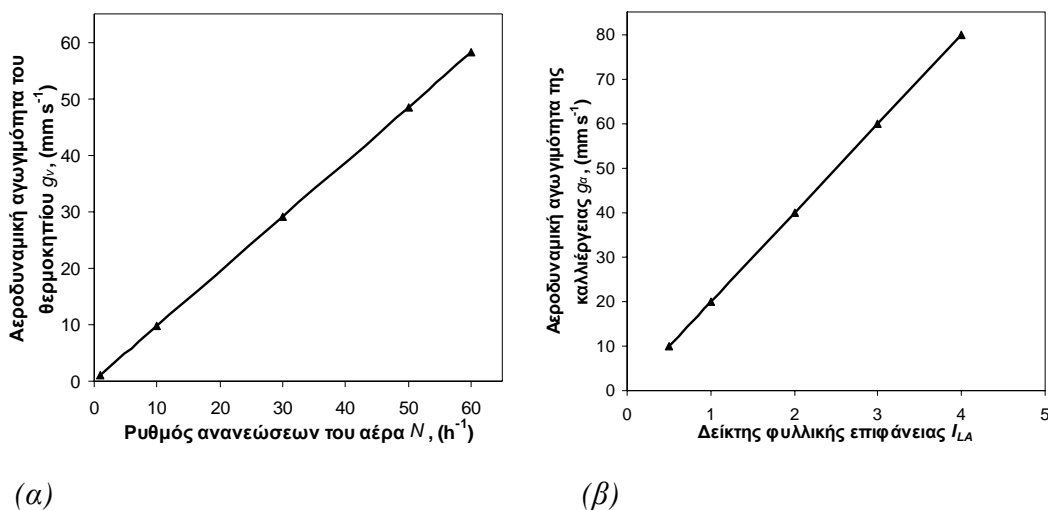


Σχήμα 2.15. Ανταλλαγές ενέργειας με μεταφορά από το εσωτερικό της καλλιέργειας στον εξωτερικό αέρα.

2.3.3.1 Σύγκριση της αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας με την αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου

Στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζεται η σχέση της αεροδυναμικής αγωγιμότητας του θερμοκηπίου, συναρτήσει του ρυθμού ανανεώσης του αέρα του θερμοκηπίου και της αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, συναρτήσει του δείκτη φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας. Η τιμή της αεροδυναμικής αγωγιμότητας του θερμοκηπίου, για θερμοκήπιο με όγκο $V = 700 \text{ m}^3$ και επιφάνεια εδάφους $A_g = 200 \text{ m}^2$ υπολογίστηκε από τη σχέση (2.12). Η τιμή της αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας υπολογίστηκε από τη σχέση: $g_a = 2 I_{LA} \times g_{l,a}$, με $g_{l,a} = 10 \text{ mm s}^{-1}$ για την αεροδυναμική αγωγιμότητα του φύλλου, για θερμοκήπιο με 30 περίπου ανανεώσεις του αέρα ανά ώρα (Kittas *et al.* 2001). Στο Σχήμα 2.16 βλέπουμε ότι για καλλιέργεια με δείκτη φυλλικής επιφάνειας $I_{LA} = 2$ και για $N = 30 \text{ h}^{-1}$, είναι $g_a = 40 \text{ mm s}^{-1}$ και $g_v = 29 \text{ mm s}^{-1}$, γεγονός που δηλώνει ότι ο περιοριστικός παράγοντας των ανταλλαγών στην περίπτωση αυτή είναι η αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου.

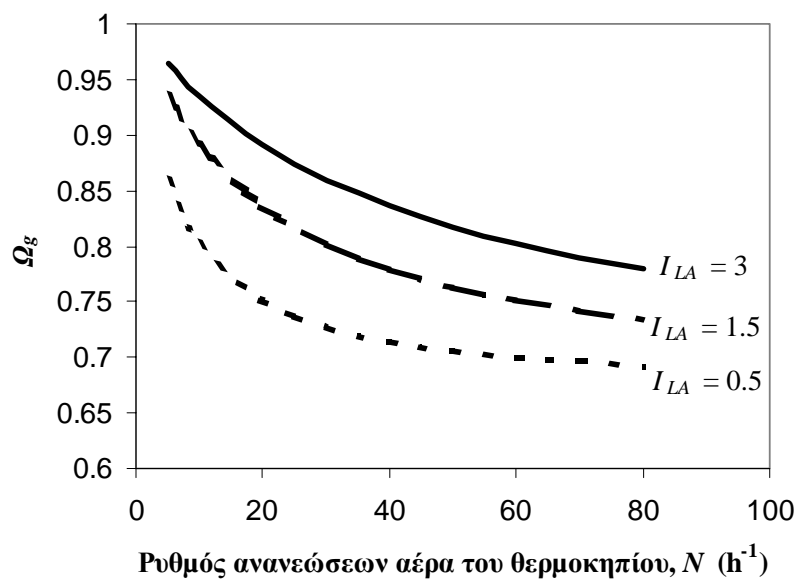
Επομένως, ο ρυθμός ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 40 h^{-1} , προκειμένου να μην αποτελεί η αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου τον περιοριστικό παράγοντα της διαπνοής.



Σχήμα 2.16. (α) Αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου g_v συναρτήσει του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου N και (β) αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_a συναρτήσει του δείκτη φυλλικής επιφάνειας I_{LA} .

Στο Σχήμα 2.17 βλέπουμε πώς η φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας και ο ρυθμός ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου επηρεάζουν τις δύο αγωγιμότητες. Οι παράγοντες αυτοί συνεισφέρουν εξίσου στη μεταφορά των υδρατμών από το εσωτερικό του θερμοκηπίου στον εξωτερικό αέρα. Εντούτοις, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεταβολές στην τιμή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας δεν επηρεάζουν μόνο την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, αλλά και τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, σύμφωνα με τη σχέση: $g_c = 2 I_{LA} \times g_{l,c}$.

Η σχέση (2.42) επιτρέπει τη μελέτη της επίδραση της αεροδυναμικής και της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, της αεροδυναμικής αγωγιμότητας του θερμοκηπίου (και συνεπώς και του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα) και της φυλλικής επιφάνειας στον παράγοντα Ω του θερμοκηπίου. Στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζεται η επίδραση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας και του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα του θερμοκηπίου στον παράγοντα Ω_g .



Σχήμα 2.17. Παράγοντας Ω_g συναρτήσει του ρυθμού ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου, για διάφορες τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Για τους υπολογισμούς θεωρήθηκαν: $g_{l,c} = 5 \text{ mm s}^{-1}$ και $g_{l,a} = 10 \text{ mm s}^{-1}$.

Συνάγεται ότι, για μικρές τιμές του δείκτη φυλλικής επιφάνειας - $I_{LA} < 0.5$, όταν δηλαδή η λανθάνουσα ενέργεια είναι σχετικά μικρή - ακόμα και ένας μικρός ρυθμός

ανανέωσης του αέρα είναι ικανός να μειώσει την τιμή του παράγοντα Ω_g και να συζεύξει κατά αυτόν τον τρόπο το περιβάλλον του θερμοκηπίου με τον εξωτερικό αέρα.

Όταν η φυλλική επιφάνεια είναι σχετικά μεγάλη (π.χ. $I_{LA}=3$), προκειμένου η τιμή του παράγοντα Ω_g να πάρει τιμές μικρότερες του 0.85, απαιτείται ένας ρυθμός ανανέωσης του αέρα περίπου $N=40\text{ h}^{-1}$.

2.4 Συμπεράσματα

Είναι γεγονός ότι τα προσομοιώματα της διαπνοής στο θερμοκήπιο αναπτύχθηκαν πρώτα σε περιοχές της βόρειας Ευρώπης και της Αμερικής για καλλιέργειες, όπως η τομάτα (Stanghellini 1987, Jolliet and Bailey 1992), το αγγουράκι (Yang *et al.* 1990) κ.α. Σε αυτά τα βόρεια κλίματα τα θερμοκήπια έχουν συνήθως μικρές απαιτήσεις σε αερισμό κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Η αεροδυναμική αγωγιμότητα για τις καλλιέργειες αυτές τείνει να είναι πολύ μικρότερη από αυτή των καλλιεργειών σε θερμοκήπια των Μεσογειακών περιοχών. Έτσι οι θερμοκηπιακές αυτές καλλιέργειες είναι ισχυρά ‘απομονωμένες’ από το εξωτερικό κλίμα, λόγω του καλύμματος του θερμοκηπίου και η θερμότητα και το νερό που ελευθερώνονται από την καλλιέργεια συγκεντρώνονται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Συνεπώς, ο ρυθμός διαπνοής ρυθμίζεται μέχρι να φθάσει σε ισορροπία, ανάλογα με την καθαρή ακτινοβολία που λαμβάνει η καλλιέργεια (Jarvis 1985).

Από την άλλη πλευρά η διαπνοή των καλλιεργειών σε Μεσογειακά ή θερμά κλίματα είναι πολύ περισσότερο εξαρτώμενη από τη μετάδοση με μεταφορά. Καθώς ο αερισμός και η τυρβώδης ροή είναι σημαντικά, το έλλειμμα κορεσμού στην επιφάνεια του φύλλου είναι στενά συζευγμένο με αυτό του περιβάλλοντος αέρα, ενώ το έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου επηρεάζεται άμεσα από αυτό του εξωτερικού αέρα.

Παρόλα αυτά, και παρά τη σημαντική επίδραση του αερισμού στο θερμοκήπιο, λίγα είναι γνωστά σχετικά με την επίδραση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα στην ενεργειακή και φυσιολογική συμπεριφορά της καλλιέργειας και ειδικότερα σχετικά με την επίδραση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα στον καταμερισμό της ενέργειας σε αισθητή και λανθάνουσα στο επίπεδο της καλλιέργειας. Δύο από τις πιο σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζονται από τον αερισμό και επηρεάζουν τον καταμερισμό της ενέργειας στο θερμοκήπιο είναι η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας και του θερμοκηπίου.

Σε ένα κλειστό θερμοκήπιο η αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου g_v μπορεί να είναι μικρότερη από την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_a , καθιστώντας την έτσι ως τον περιοριστικό παράγοντα της διαπνοής. Καθίσταται σαφώς φανερό ότι είναι απαραίτητη η περαιτέρω μελέτη για τον υπολογισμό ενός ελάχιστου ικανοποιητικού ρυθμού ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου,

προκειμένου να διατηρηθεί η αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου σε υψηλότερα επίπεδα από αυτή της καλλιέργειας έτσι ώστε να μην αποτελεί τον περιοριστικό παράγοντα της διαπνοής, επιτρέποντας έτσι στη διαπνοή να φθάσει στη μέγιστη τιμή της με περιοριστικούς παράγοντες μόνο την αεροδυναμική ή τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας.

Αναφορικά με την αεροδυναμική και τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, είναι γενικά παραδεκτό ότι η στοματική αγωγιμότητα είναι αυτή που ως επί το πλείστον ελέγχει τη διαπνοή. Παρόλα αυτά, δεν είναι ξεκάθαρος ο βαθμός κατά τον οποίο η στοματική και η αεροδυναμική αγωγιμότητα ελέγχουν τη διαπνοή. Η μελέτη των συνθηκών που επιδρούν στη στοματική και την αεροδυναμική αγωγιμότητα και ελέγχουν τη διαπνοή, είναι ένας από τους στόχους της παρούσης διατριβής.

Ένα άλλο σημαντικό σημείο που θα πρέπει να εξεταστεί εκτενέστερα, είναι η επίδραση του υψηλού ρυθμού ανανέωσης του αέρα στη φυσιολογική συμπεριφορά της καλλιέργειας. Δεν είναι ακόμη ξεκάθαρο με ποιο τρόπο επηρεάζεται και αντιδρά η καλλιέργεια στις αλλαγές της υγρασίας του αέρα, καθώς αυτή μεταβάλλεται από τον υψηλό ρυθμό ανανέωσης του αέρα. Όταν ο εξωτερικός αέρας είναι πολύ ξηρός, η είσοδος του στο θερμοκήπιο μπορεί να οδηγήσει σε καταστάσεις υδατικής καταπόνησης, διότι η αύξηση της ξηρότητας του αέρα γύρω από την καλλιέργεια ίσως να μην μπορεί να αντισταθμιστεί με την απελευθέρωση ισόποσης λανθάνουσας ενέργειας από την καλλιέργεια, μέσω της διαπνοής. Αυτή η κατάσταση μπορεί να συμβεί ιδιαίτερα, όταν η καλλιέργεια διαπνέει ήδη με το μέγιστο ρυθμό, είτε λόγω μικρής φυλλικής επιφάνειας, είτε λόγω περιορισμένης ανάπτυξης του ριζικού συστήματος και μη ικανοποιητικής τροφοδοσίας σε νερό.

Επιπλέον, στις περιοχές της βόρειας Ευρώπης, όπου έχουν γίνει και οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες σχετικά με την επίδραση του μικροκλίματος στη διαπνοή, επικρατούν χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας και ελλείμματος κορεσμού του αέρα. Ο Bakker (1991) για παράδειγμα, παρατήρησε μείωση της στοματικής αγωγιμότητας, περίπου κατά 65%, για αύξηση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα κατά 1 kPa. Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις του Bakker (1991) ήταν: θερμοκρασία 20-27°C, έλλειμμα κορεσμού του αέρα 0.1-1.8 kPa και ακτινοβολία 0-150 W m⁻². Οι συνθήκες όμως αυτές ξεπερνιούνται κατά πολύ στα μεσογειακά θερμοκήπια, όπου ο Montero *et al.* (2001) για παράδειγμα, δεν παρατήρησαν σημαντική μείωση της αγωγιμότητας για αύξηση του ελλείμματος

κορεσμού από την τιμή του 1.4 kPa στα 3.4 kPa. Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι δεν είναι ακόμη ξεκάθαρο όσον αφορά την επίδραση του ελλείμματος κορεσμού στην καλλιέργεια, ιδιαίτερα στις μεσογειακές συνθήκες.

Παράλληλα, από όσα γνωρίζουμε, λίγα είναι γνωστά σχετικά με την επίδραση του συστήματος δροσισμού στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Ο Baille *et al.* (1994a), αναφέρουν ότι η χρήση του συστήματος δροσισμού με τεχνητή ομίχλη προκάλεσε σημαντική αύξηση στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας και παρατήρησαν ότι η μέγιστες τιμές της σημειώνονταν όταν η ακτινοβολία ξεπερνούσε τα 300 W m^{-2} . Επιπλέον, οι απόψεις σχετικά με την επίδραση του δροσισμού στη διαπνοή της καλλιέργειας δίστανται αφού άλλοι ερευνητές αναφέρουν αύξηση και άλλοι μείωση της διαπνοής.

Ένα άλλο σημείο που δεν έχει διερευνηθεί διεξοδικά ακόμη και παρά το γεγονός της ευρείας χρήσης της σκίασης ως μέσο ψύξης του θερμοκηπίου στις Μεσογειακές χώρες, αφορά την επίδραση της σκίασης στη φυσιολογική αντίδραση της καλλιέργειας και ειδικότερα στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Η μείωση της εισερχόμενης ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο αναμένεται να προκαλέσει μείωση του ελλείμματος κορεσμού καλλιέργειας-αέρα. Αν κατά την περίοδο χωρίς σκίαση, το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα κυμαινόταν σε υψηλά επίπεδα (κάτι που ισχύει για τα μεσογειακά θερμοκήπια), η σκίαση του θερμοκηπίου μπορεί να οδηγήσει την καλλιέργεια εκτός συνθηκών υδατικής και θερμικής καταπόνησης και κατά συνέπεια σε αύξηση της στοματικής αγωγιμότητας και πιθανόν και της διαπνοής.

Τέλος, είναι γεγονός ότι η διαπνοή, μέσα από τη διαδικασία της ψύξης με εξάτμιση, αντιπροσωπεύει τον κυριότερο μηχανισμό ψύξης της καλλιέργειας και του περιβάλλοντός της. Έτσι, διατηρώντας ένα μεγάλο δείκτη φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο, αυξάνονται σημαντικά οι ανταλλαγές αερίων, οι οποίες με τη σειρά τους τροποποιούν το μικροκλίμα του θερμοκηπίου, κυρίως τη θερμοκρασία και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα. Παρόλα αυτά δεν υπάρχουν σχετικά στοιχεία στη βιβλιογραφία που να στηρίζουν πειραματικά τα παραπάνω σχετικά με την επίδραση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στις ανταλλαγές ενέργειας και μάζας στο θερμοκήπιο.

Προκειμένου λοιπόν να καταστεί δυνατό να προταθεί το κατάλληλο σύστημα ψύξης του θερμοκηπίου, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες, με σκοπό να επιτευχθούν στο θερμοκήπιο οι βέλτιστες συνθήκες για την ανάπτυξη της καλλιέργειας (χρησιμοποιώντας ως δείκτες τη στοματική αγωγιμότητα, τη διαπνοή και το δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας), κρίνεται απαραίτητο να μελετηθούν διεξοδικότερα όλα τα παραπάνω και να γίνει μια πιο λεπτομερής μελέτη και ανάλυση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του κλίματος του θερμοκηπίου και των ανταλλαγών μάζας και ενέργειας της καλλιέργειας. Επιπλέον, η γνώση και ανάλυση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του κλίματος του θερμοκηπίου και των ανταλλαγών μάζας και ενέργειας της καλλιέργειας, όταν αυτό ελέγχεται με διάφορα συστήματα ψύξης, είναι απαραίτητη προκειμένου να κατανοηθούν και προσομοιωθούν καλύτερα οι μηχανισμοί σύζευξης μεταξύ του περιβάλλοντος και της καλλιέργειας σε ένα θερμοκήπιο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα από τα πιο διαδεδομένα συστήματα ψύξης του θερμοκηπίου, δηλαδή:

- ψύξη με φυσικό αερισμό,
- ψύξη με δυναμικό αερισμό,
- ψύξη με σκίαση του θερμοκηπίου και
- ψύξη με σύστημα τεχνητής ομίχλης

Παράλληλα, καθώς η φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας αποτελεί ένα φυσικό μέσο ψύξης του θερμοκηπίου μέσω της διαπνοής της καλλιέργειας, κρίθηκε απαραίτητο να συμπεριληφθεί στη διατριβή αυτή και η μελέτη της επίδρασης της μεταβολής του δείκτη φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του κλίματος του θερμοκηπίου και των ανταλλαγών μάζας και ενέργειας της καλλιέργειας.

Κεφάλαιο 3. Πειραματικός Εξοπλισμός

3.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του δροσισμού, του αερισμού και της σκίασης των θερμοκηπίων στο μικροκλίμα και την καλλιέργεια, έγιναν μετρήσεις κατά τη διάρκεια των ετών 1998, 1999 και 2000 σε περιόδους όπου χρησιμοποιούνταν το ένα ή το άλλο σύστημα (δροσισμός με τεχνητή ομίχλη, φυσικός αερισμός, δυναμικός αερισμός, σκίαση) ή συνδυασμός δύο συστημάτων (σκίαση και δροσισμός, σκίαση και φυσικός αερισμός, σκίαση και δυναμικός αερισμός) για τον έλεγχο του κλίματος των θερμοκηπίων, ενώ παράλληλα μελετήθηκε και η επίδραση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας, στο μικροκλίμα και την καλλιέργεια στο θερμοκήπιο.

Τα πειράματα έγιναν σε πολλαπλό αμφίρρικτο θερμοκήπιο 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. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από ζεστά και ξηρά καλοκαίρια, με μέση μέγιστη θερμοκρασία κατά το θερμότερο μήνα περίπου 37°C και από ήπιους χειμώνες με μέση ελάχιστη θερμοκρασία κατά τον ψυχρότερο μήνα 4°C . Οι επικρατούντες άνεμοι της περιοχής έχουν κατεύθυνση είτε από Νοτιοανατολικά προς Βορειοδυτικά (συνήθως τις πρωινές ώρες), είτε από Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά (συνήθως τις απογευματινές ώρες).

3.2 Το θερμοκήπιο

Το θερμοκήπιο στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις κατασκευάστηκε το 1994, με σκελετό από γαλβανισμένο χάλυβα και κάλυψη από γυαλί και αποτελείτο από πέντε ξεχωριστούς θαλάμους. Η συνολική έκταση του θερμοκηπίου ήταν 1000 m², ενώ ο θάλαμος που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις κάλυπτε συνολικά 200 m². Εξωτερική άποψη του θερμοκηπίου παρουσιάζεται στην *Εικόνα 3.1*. Το θερμοκήπιο είχε προσανατολισμό Βορρά-Νότο με απόκλιση του άξονά του από το Βορρά περίπου 34° ανατολικά.



Εικόνα 3.1. Εξωτερική άποψη του πειραματικού θερμοκηπίου. (Ο θάλαμος στον οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι ο δεύτερος από αριστερά).

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου ήταν: μήκος 31 m, πλάτος 6.5 m, ύψος ορθοστάτη 2.9 m, ύψος κορφιά 4 m, γωνία κλίσης οροφής 20°, είχε όγκο 690 m³, ενώ η κάθετη τομή του θερμοκηπίου κάλυπτε επιφάνεια 28 m².

Το έδαφος του θερμοκηπίου ήταν πλήρως καλυμμένο με τσιμέντο.

3.2.1 Ψύξη του θερμοκηπίου

3.2.1.1 Αερισμός

Ο αερισμός του θερμοκηπίου ήταν είτε φυσικός είτε δυναμικός. Ο φυσικός αερισμός γινόταν με τη βοήθεια ενός συνεχόμενου παραθύρου οροφής το οποίο ήταν τοποθετημένο από τη μία πλευρά της οροφής του θερμοκηπίου (δυτική πλευρά), με μέγιστη επιφάνεια ανοίγματος περίπου 26 m^2 ($30.5 \text{ m} * 0.85 \text{ m}$) (Εικόνα 3.2). Ο έλεγχος ανοίγματος του παραθύρου γινόταν με θερμοστάτη τοποθετημένο στο μέσο του θερμοκηπίου. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με φυσικό ή δυναμικό αερισμό το παράθυρο οροφής βρισκόταν στο μέγιστο άνοιγμα. Κατά το υπόλοιπο διάστημα το παράθυρο άνοιγε όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ξεπερνούσε τους 24°C .

Ο δυναμικός αερισμός γινόταν με τη βοήθεια τεσσάρων ανεμιστήρων, οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι ανά δύο στις μετώπες του θερμοκηπίου (Σχήμα 3.2, Σχήμα 3.3). Ο αέρας εισέρχονταν στο θερμοκήπιο με υπερπίεση από τους ανεμιστήρες και εξέρχονταν από το άνοιγμα αερισμού της οροφής (παράθυρο οροφής ανοιχτό στο μέγιστο). Η παροχή του κάθε ανεμιστήρα ήταν περίπου $4000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Με παράλληλη λειτουργία των ανεμιστήρων και του παραθύρου οροφής, ήταν δυνατό να επιτευχθούν 50 περίπου ανανεώσεις του αέρα του θερμοκηπίου ανά ώρα, ενώ με φυσικό αερισμό επιτυγχάνονταν, ανάλογα με την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, από 5 έως 30 περίπου ανανεώσεις του αέρα του θερμοκηπίου ανά ώρα. Ο δυναμικός αερισμός γενικά, ετίθετο σε λειτουργία εμπειρικά και με βάση την εξωτερική θερμοκρασία κατά τη διάρκεια ημερών όπου θεωρούνταν ότι ο φυσικός αερισμός δεν ήταν επαρκής για την ψύξη του θερμοκηπίου. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με δυναμικό αερισμό, το σύστημα ετίθετο σε λειτουργία από νωρίς το πρωί μέχρι αργά το απόγευμα.

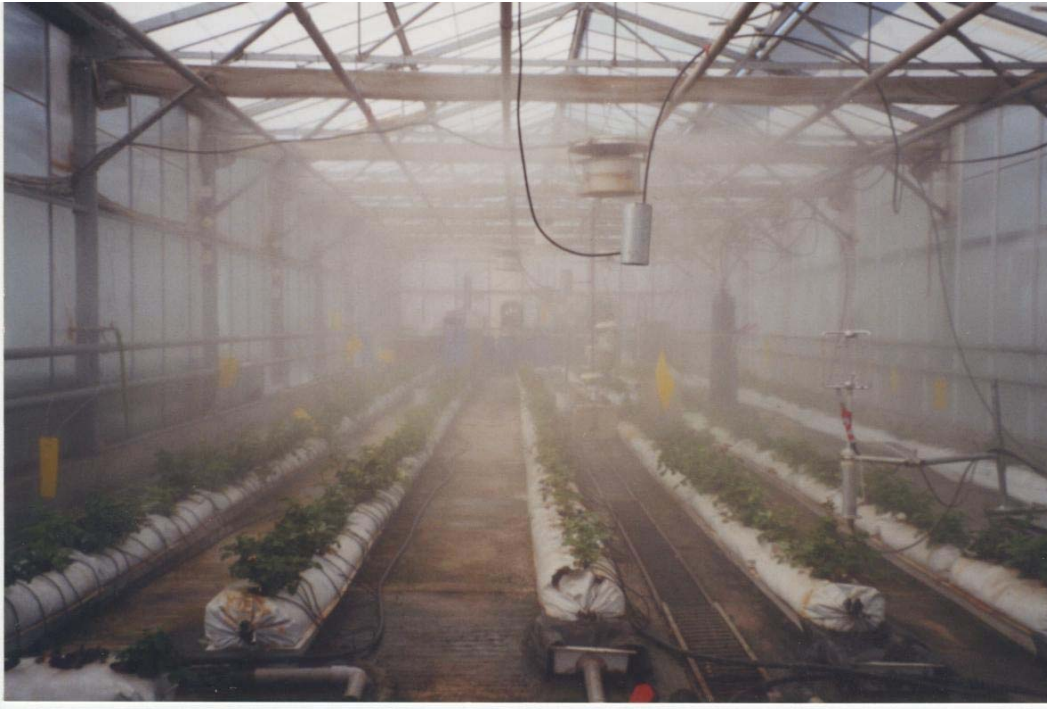


Εικόνα 3.2. Εξωτερική άποψη των παραθύρων οροφής του θερμοκηπίου.

3.2.1.2 Δροσισμός

Για το δροσισμό του θερμοκηπίου υπήρχε εγκατεστημένο σύστημα τεχνητής ομίχλης υψηλής πίεσης. Το σύστημα περιελάμβανε δύο μονάδες με ανεμιστήρες και σύστημα ψεκασμού του νερού με κάλυψη 100 m^2 η κάθε μία. Οι ανεμιστήρες, σε κατακόρυφη θέση, χρησιμοποιούνταν ταυτόχρονα για τη διασπορά στο χώρο των σταγονιδίων του νερού και την ανακύκλωση του αέρα στο θερμοκήπιο. Η διανομή του νερού γινόταν από ένα κυκλικό δακτύλιο με 8 ακροφύσια, τοποθετημένο πάνω από την έξοδο του ρεύματος του αέρα του ανεμιστήρα. Κάθε μονάδα ανεμιστήρα-ψεκαστήρα είχε συνολική παροχή περίπου 45 l h^{-1} στην πίεση λειτουργίας (50 bar). Σύμφωνα με τον προγραμματισμό λειτουργίας του συστήματος, το σύστημα δροσισμού λειτουργούσε 48 δευτερόλεπτα ανά λεπτό. Επομένως, το νερό που διοχετευόταν μέσω του συστήματος δροσισμού στο θερμοκήπιο ήταν 36 lit h^{-1} ανά 100 m^2 εδάφους ή $10^{-4} \text{ lit s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ εδάφους του θερμοκηπίου. Αν όλο το νερό που παρέχονταν από το σύστημα στο θερμοκήπιο εξατμίζονταν, τότε η ισοδύναμη ποσότητα της αισθητής ενέργειας που θα δεσμευόταν θα αντιπροσώπευε το δυναμικό ψύξης του συστήματος. Αυτό μπορεί να υπολογιστεί αν πολλαπλασιάσουμε την ποσότητα του νερού που διοχετεύονταν από το σύστημα δροσισμού στο θερμοκήπιο με τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού. Στην προκειμένη περίπτωση, το δυναμικό ψύξης του συστήματος ήταν 245 W m^{-2} (εδάφους θερμοκηπίου), δηλαδή με τη χρήση του συστήματος τεχνητής ομίχλης ήταν δυνατή η μετατροπή 245 W m^{-2} αισθητής ενέργειας σε λανθάνουσα. Η λειτουργία του συστήματος ελεγχόταν από αισθητήριο υγρασίας τοποθετημένο στο μέσο του θερμοκηπίου και το σύστημα λειτουργούσε όταν η σχετική υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου ήταν μικρότερη από 75%. Παράλληλα, κατά την περίοδο λειτουργίας του συστήματος δροσισμού, το παράθυρο του θερμοκηπίου ήταν ανοιχτό στο 20% του συνολικού ανοίγματος.

Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος και λόγω της υψηλής πίεσης του νερού, δημιουργούνταν σταγονίδια τα οποία έτειναν να παραμένουν στον αέρα, δημιουργώντας έτσι ομίχλη στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Στην *Εικόνα 3.3* φαίνεται το εσωτερικό του θερμοκηπίου με το σύστημα δροσισμού σε λειτουργία, ενώ στην *Εικόνα 3.4* το σύστημα δροσισμού είναι εκτός λειτουργίας.



Εικόνα 3.3. Άποψη του εσωτερικού του θερμοκηπίου με το σύστημα δροσισμού σε λειτουργία.



Εικόνα 3.4. Άποψη του εσωτερικού του θερμοκηπίου με το σύστημα δροσισμού εκτός λειτουργίας.

3.2.1.3 Σκίαση

Η σκίαση του θερμοκηπίου γινόταν με άσπρισμα της οροφής του θερμοκηπίου.

Προκειμένου να ασπριστεί η οροφή του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκε ασβέστης και η εφαρμογή έγινε με ψεκάσμο διαλύματος ασβέστη, με πυκνότητα παρόμοια με αυτή που εφαρμόζουν οι παραγωγοί της περιοχής (περίπου 8 kg CaO ανά 100 kg νερό).

Το θερμοκήπιο ήταν ασπρισμένο από τις 15 Ιουνίου για το 1998 και από τις 7 Ιουλίου για το 1999 με μέση μείωση της διαπερατότητας 40% και 59% αντίστοιχα για τα δύο έτη. Η απομάκρυνση του ασβέστη γινόταν κοντά στο τέλος του Σεπτεμβρίου.

3.3 Η καλλιέργεια

Στο θερμοκήπιο υπήρχε εγκατεστημένη υδροπονική καλλιέργεια τριανταφυλλιάς (Εικόνα 3.5), (*Rosa hybrida* cv. First Red) σε υπόστρωμα περλίτη. Η καλλιέργεια εγκαταστάθηκε το Μάρτιο του 1997 σε σάκους περλίτη μήκους 1 m, πλάτους 0.3 m και χωρητικότητας 48 lit. Η πυκνότητα φύτευσης ήταν 6 φυτά m⁻², ενώ η απόσταση μεταξύ των γραμμών ήταν 1 m.

Η άρδευση και λίπανση της καλλιέργειας (Κατσούλας και συνεργάτες 2000) γινόταν αυτόματα, κάθε ώρα από τις 6:00 έως τις 21:00, με σύστημα ελεγχόμενο από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ο ρυθμός απορροής ήταν κοντά στο 40% (Lorenzo *et al.* 1993), όπως συνηθίζεται και από τους παραγωγούς, προκειμένου να διατηρούνται άριστες συνθήκες ανάπτυξης των φυτών.



Εικόνα 3.5. Καλλιέργεια τριανταφυλλιάς στο θερμοκήπιο

Το κλάδεμα και η διαμόρφωση της καλλιέργειας γινόταν σύμφωνα με την τεχνική του λυγίσματος των βλαστών (*bending*) (Kool and van de Pol 1996). Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, οι βλαστοί που είναι λεπτοί και δεν πρόκειται να δώσουν καλής ποιότητας άνθη λυγίζονται και αφήνονται πλάγια. Με τον τρόπο αυτό ευνοείται η

ανάπτυξη λαίμαργων βλαστών οι οποίοι δίνουν καλής ποιότητας άνθη ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια και κατά συνέπεια αύξηση της φωτοσύνθεσης (González-Real and Baille 2000, 2001) και της διαπνοής των φυτών.

Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 1998 λυγίζονταν ο μέγιστος αριθμός βλαστών προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη φυλλική επιφάνεια, με τους λυγισμένους βλαστούς να αντιπροσωπεύουν το 75% περίπου της συνολικής φυλλικής επιφάνειας. Το 1999, ο αριθμός των βλαστών που λυγίζονταν μειώθηκε κατά ένα παράγοντα 2, με συνέπεια οι λυγισμένοι βλαστοί να αντιπροσωπεύουν το 40% περίπου της συνολικής φυλλικής επιφάνειας.

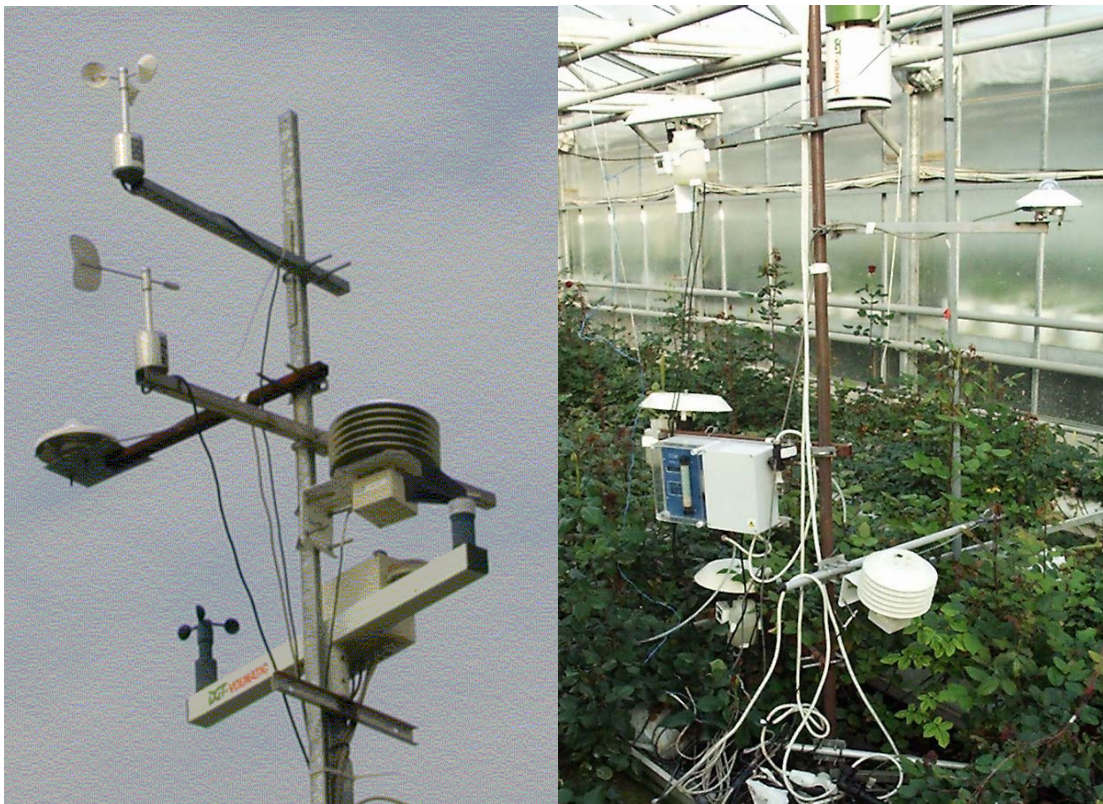
Τέλος, κατά την περίοδο των μετρήσεων η επιφάνεια του εδάφους του θερμοκηπίου που καλύπτονταν με καλλιέργεια A_c , ήταν περίπου 100 m^2 , δίνοντας έτσι στο λόγο της καλυμμένης με καλλιέργεια επιφάνειας του εδάφους προς τη συνολική επιφάνεια του εδάφους του θερμοκηπίου, τιμή $p = 0.5$.

3.4 Μετρήσεις

Οι μετρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αφορούσαν κυρίως τους κλιματικούς παράγοντες μέσα και έξω από το θερμοκήπιο, τη διαπνοή και τη φυλλική επιφάνεια των φυτών.

Αναλυτικότερα έξω από το θερμοκήπιο καταγραφόταν (Εικόνα 3.6.α):

- η θερμοκρασία (T_o , °C) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (D_o , kPa) με αεριζόμενο ψυχρόμετρο τύπου Assman (τύπος VP1, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Το έλλειμμα κορεσμού του αέρα υπολογιζόταν από μετρήσεις της θερμοκρασίας του υγρού και ξηρού θερμομέτρου.
- η ηλιακή ακτινοβολία (G_o , $W m^{-2}$) με πυρανόμετρο (τύπος CM-6B, Kipp and Zonen, Delft, The Netherlands),
- η ταχύτητα (u , $m s^{-1}$) του ανέμου με ανεμόμετρο κυπέλλων (τύπος AN1-UM-3, Delta-T Devices, Cambridge, UK) και διεύθυνση του ανέμου με ανεμοδείκτη (τύπος WD1-UM-3, Delta-T Devices, Cambridge, UK).



(α)

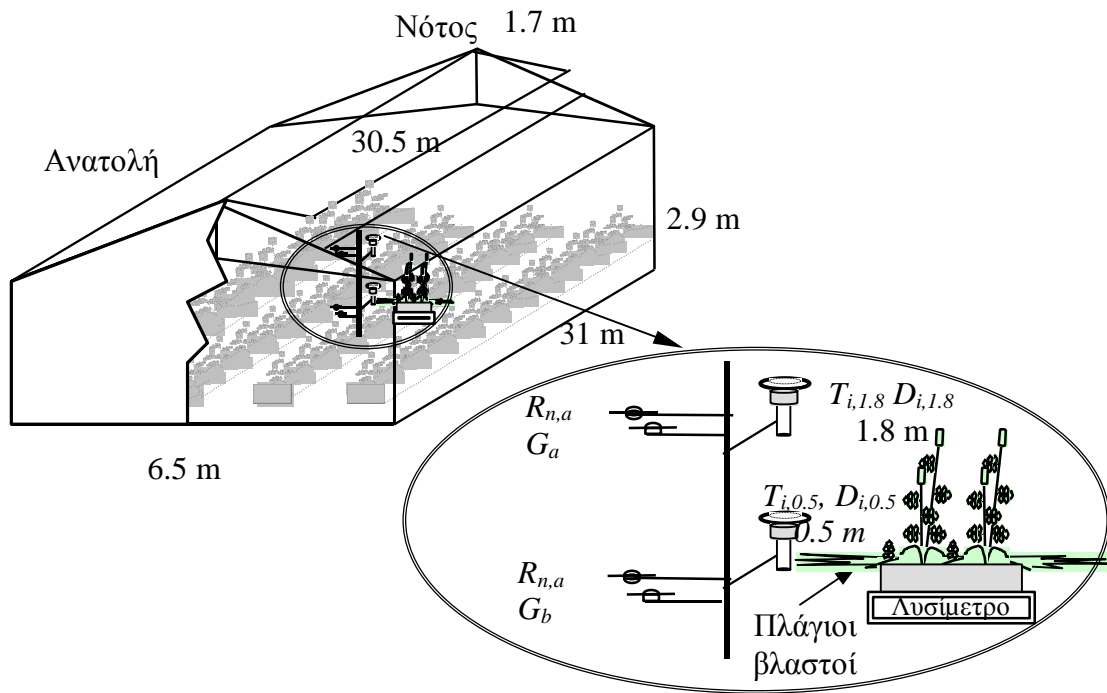
(β)

Εικόνα 3.6. Όργανα μετρήσεων μετεωρολογικών δεδομένων (α) έξω από και (β) μέσα στο θερμοκήπιο.

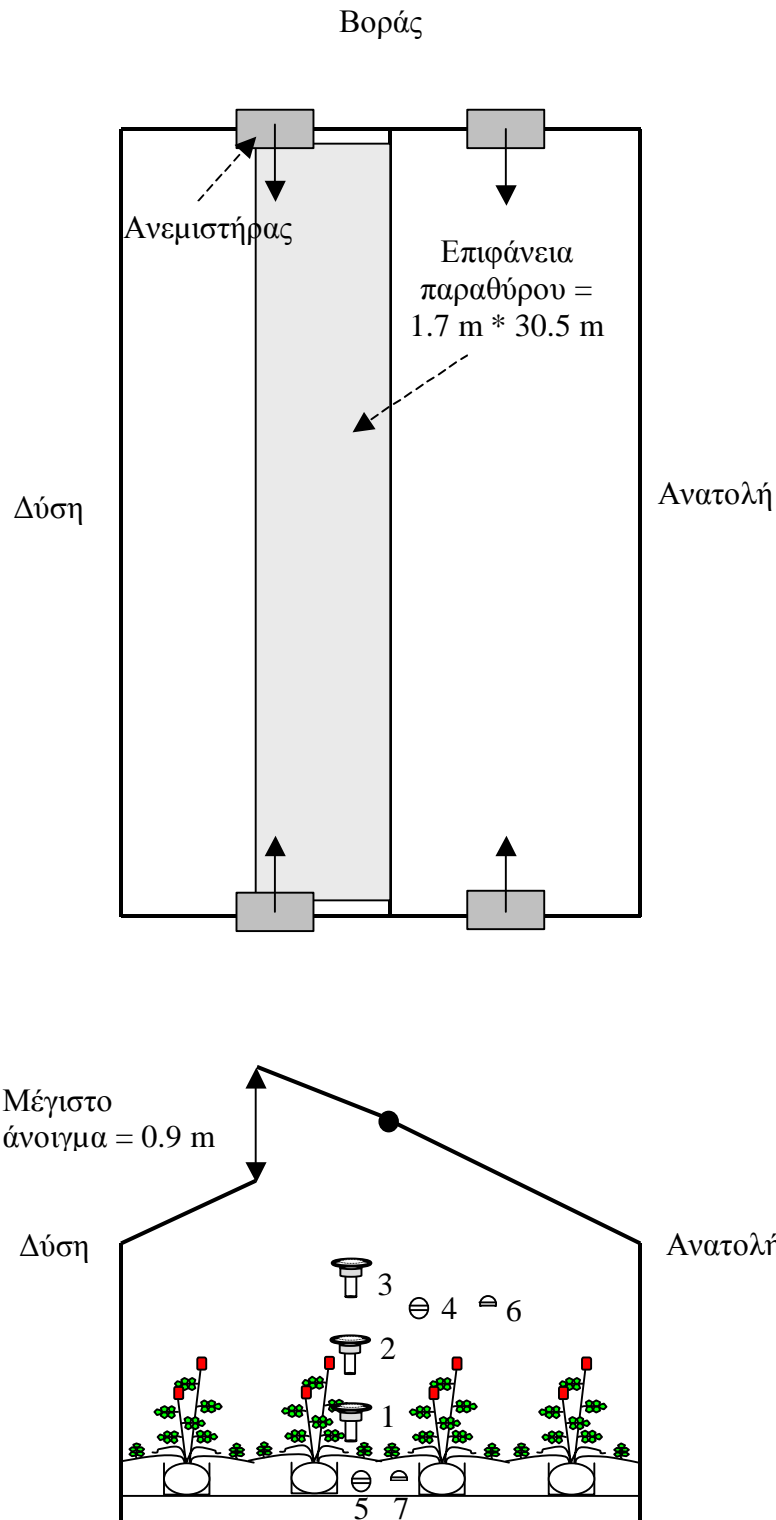
Στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καταγραφόταν (Εικόνα 3.6.β, Σχήμα 3.2, Σχήμα 3.3):

- η θερμοκρασία (T_i , °C) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (D_i , kPa) σε διάφορα επίπεδα, με αεριζόμενα ψυχρόμετρα τύπου Assman (τύπος VP1, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων για τη μελέτη του αερισμού η θερμοκρασία και έλλειμμα κορεσμού του αέρα καταγραφόταν σε 3 διαφορετικά επίπεδα: στο επίπεδο των λυγισμένων βλαστών (0.3 m) ($T_{i,0.3}$, $D_{i,0.3}$), στο επίπεδο των ανθοφόρων βλαστών (0.8 m) ($T_{i,0.8}$, $D_{i,0.8}$) και στο επίπεδο πάνω από τους ανθοφόρους βλαστούς 1.8 m ($T_{i,1.8}$, $D_{i,1.8}$). Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων για τη μελέτη της σκίασης η θερμοκρασία και έλλειμμα κορεσμού του αέρα καταγραφόταν στα 0.5 m ($T_{i,0.5}$, $D_{i,0.5}$) και στα 1.8 m, ενώ κατά τη διάρκεια των μετρήσεων για τη μελέτη του δροσισμού και της φυλλικής επιφάνειας καταγραφόταν στα 0.5 m.
- η ακτινοβολία πάνω (G_a , $W m^{-2}$) και κάτω (G_b , $W m^{-2}$) από την καλλιέργεια με πυρανόμετρα (τύπος CM-6B, Kipp and Zonen, Delft, The Netherlands),
- η καθαρή ακτινοβολία πάνω ($R_{n,a}$, $W m^{-2}$) και κάτω ($R_{n,b}$, $W m^{-2}$) από την καλλιέργεια με ραδιόμετρα (τύπος Q-7, REBS, Seattle, Washington). (Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων για τη μελέτη του δροσισμού η καθαρή ακτινοβολία κάτω από την καλλιέργεια δεν καταγραφόταν). Από τη διαφορά των δύο ραδιομέτρων, πάνω και κάτω από την καλλιέργεια ($R_{n,a} - R_{n,b}$) υπολογιζόταν η απορροφούμενη καθαρή ενέργεια από την καλλιέργεια $R_{n,int}$ ($W m^{-2}$).
- η θερμοκρασία 7 φύλλων (T_i , °C) με θερμοζεύγη χαλκού-κωνσταντάνης (τύπος T, Omega, UK), διαμέτρου 0.1 mm, τα οποία ήταν κολλημένα στην κάτω επιφάνεια των φύλλων: 4 σε φύλλα πλαγίων-λυγισμένων βλαστών (χαμηλό τμήμα της καλλιέργειας) και 3 σε φύλλα ανθοφόρων βλαστών. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας της καλλιέργειας (T_c , °C) υπολογιζόταν από τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας των φύλλων.
- η διαπνοή της καλλιέργειας με διάταξη λυσιμέτρου, τοποθετημένου στο κέντρο του θερμοκηπίου. Η συσκευή αποτελούνταν από μία ηλεκτρονική ζυγαριά, με δίσκο που περιελάμβανε 2 φυτά. Παράλληλα υπήρχε

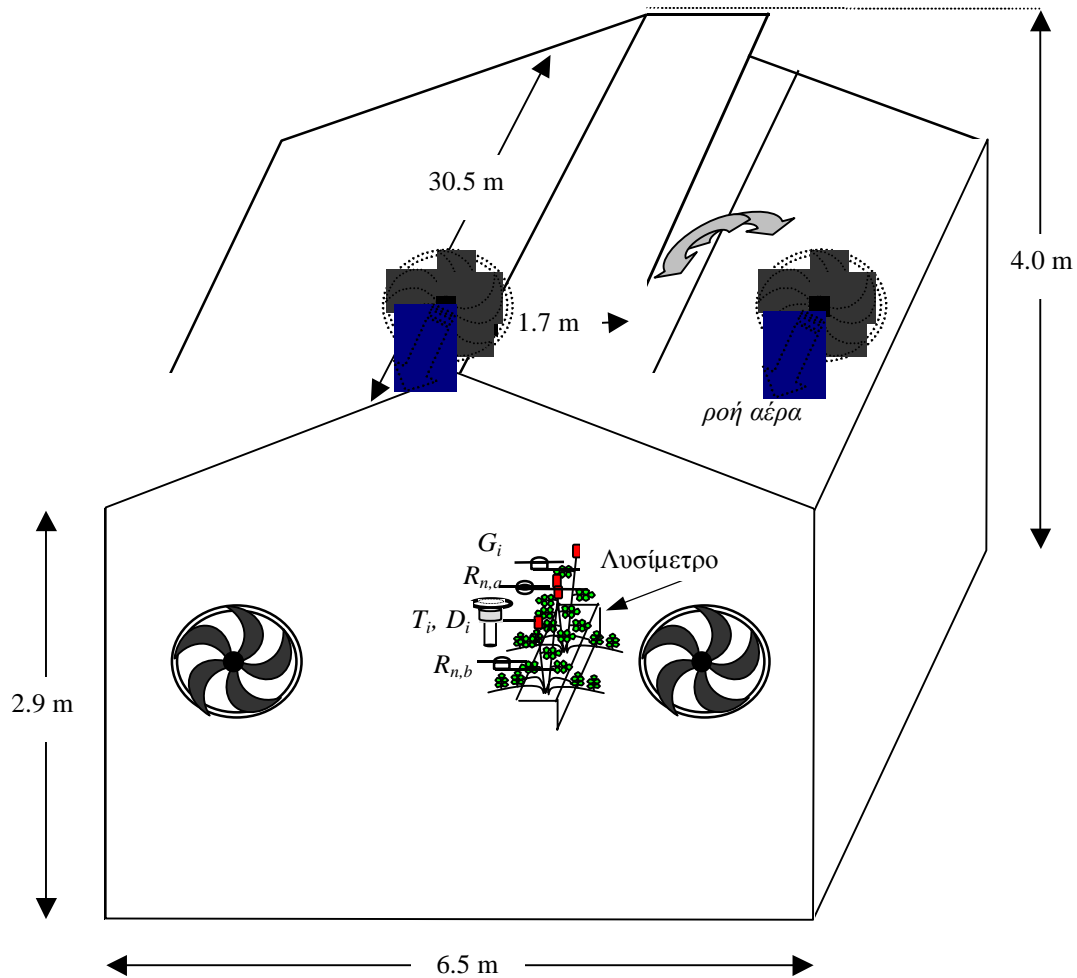
ανεξάρτητο σύστημα τροφοδοσίας και στράγγισης του θρεπτικού διαλύματος. Έτσι, καθώς η εξάτμιση από το υπόστρωμα ήταν μηδενική, η απώλεια βάρους που καταγραφόταν στη ζυγαριά ισοδυναμούσε με τη διαπνοή των φυτών.



Σχήμα 3.1. Πειραματικό θερμοκήπιο και μετρητικές διατάξεις.



Σχήμα 3.2. Πειραματικό θερμοκήπιο και διάταξη των μετεωρολογικών οργάνων. 1, 2 και 3 αεριζόμενα ψυχρόμετρα σε ύψος 0.3, 0.8 και 1.8 m από το έδαφος αντίστοιχα, 4 και 5 ραδιόμετρα πάνω και κάτω από την καλλιέργεια αντίστοιχα και 6 και 7 πυρανόμετρα πάνω και κάτω από την καλλιέργεια αντίστοιχα.



Σχήμα 3.3. Πειραματικό θερμοκήπιο και μετρητικές διατάξεις.

Για τη συλλογή, την αρχική επεξεργασία και την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε σύστημα συλλογής και καταγραφής δεδομένων (DL 3000, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Οι μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε 30 δευτερόλεπτα και κάθε 10 λεπτά καταγραφόταν η μέση τιμή όλων των παραμέτρων.

Ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας I_{LA} (m^2 φύλλων m^{-2} εδάφους) υπολογίζονταν από μετρήσεις του μήκους των φύλλων (L , m). Μετά από μετρήσεις της φυλλικής επιφάνειας (S , m^2) και του μήκους των φύλλων στο εργαστήριο, προέκυψε μια απλή σχέση συσχέτισης του μήκους των φύλλων με τη φυλλική επιφάνεια:

$$S = 0.26 L^2 \quad (3.1)$$

Κατά την περίοδο των μετρήσεων του 1998 η τιμή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας με αναφορά στη συνολική επιφάνεια του εδάφους του θερμοκηπίου $I_{LA,g}$, υπολογίστηκε ίση με 2, ενώ η τιμή του δείκτη με αναφορά στην καλυμμένη με καλλιέργεια επιφάνεια $I_{LA,c}$, υπολογίστηκε ίση με 4. Κατά την περίοδο του 1999 οι αντίστοιχες τιμές των $I_{LA,g}$ και $I_{LA,c}$ ήταν 1.1 και 2.2. Στη συνέχεια, ο ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας λE_c , εκφράζεται με αναφορά στην καλυμμένη με καλλιέργεια επιφάνεια του θερμοκηπίου A_c ($A_c = 100 \text{ m}^2$).

Κεφάλαιο 4. Μελέτη της επίδρασης του αερισμού στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια

4.1 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή αφορούν δύο ηλιόλουστες ημέρες, με παρόμοιες εξωτερικές συνθήκες ακτινοβολίας, την 8^η Αυγούστου 1999, με δυναμικό αερισμό και την 10^η Αυγούστου 1999, με φυσικό αερισμό.

Λόγω της χρονικής γειτνίασης των δύο ημερών, έγινε δεκτή η υπόθεση ότι δεν υπήρχαν σημαντικές αλλαγές στη φυλλική επιφάνεια και τη φυσιολογική κατάσταση της καλλιέργειας. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων του εξωτερικού κλίματος κατά τη διάρκεια των δύο ημερών (μέσες τιμές για την περίοδο από 9:00 έως 19:00).

Πίνακας 4.1. Μέσες τιμές (για το διάστημα 9:00 έως 19:00) των παραμέτρων του εξωτερικού κλίματος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων με δυναμικό (8 Αυγούστου 1999) και φυσικό αερισμό (10 Αυγούστου 1999).

Ημέρα	G_o $W m^{-2}$	T_o $^{\circ}C$	e_o kPa	D_o kPa	u $m s^{-1}$
8 Αυγούστου	606	33.5	2.3	2.9	2.1
10 Αυγούστου	610	35.5	2.6	3.3	1.9

G_o = ηλιακή ακτινοβολία ($W m^{-2}$), T_o = θερμοκρασία αέρα ($^{\circ}C$), e_o = πίεση ατμών του αέρα (kPa), D_o = έλλειμμα κορεσμού του αέρα (kPa), u = ταχύτητα ανέμου ($m s^{-1}$).

4.1.1 Το Μικροκλίμα του θερμοκηπίου

4.1.1.1 Θερμοκρασία και Υγρασία

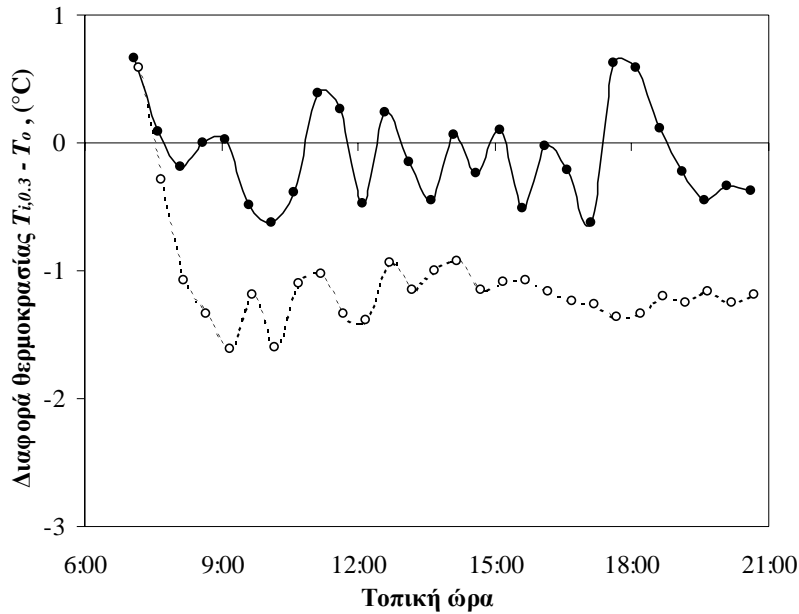
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατά τη διάρκεια των ημερών 8 και 10 Αυγούστου, επέτρεψαν την εμφάνιση και μελέτη της επίδρασης του ρυθμού ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου, όπως αυτός διαμορφώθηκε από τα συστήματα αερισμού του θερμοκηπίου (φυσικός και δυναμικός αερισμός), στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου. Η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου φάνηκε να επηρεάζεται από τη μέθοδο αερισμού. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1.α όπου παρουσιάζεται η

ημερήσια πορεία (μέσες τιμές ανά 30 λεπτά) της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.3 m και του εξωτερικού αέρα, $T_{i,0.3} - T_o$ για τις ημέρες 8 και 10 Αυγούστου. Υπό συνθήκες φυσικού αερισμού, η θερμοκρασία του αέρα στα 0.3 m ήταν 1 έως 2°C μικρότερη από την εξωτερική θερμοκρασία T_o , ενώ υπό συνθήκες δυναμικού αερισμού ήταν κοντά στην εξωτερική θερμοκρασία. Παρατηρήθηκε επίσης κατακόρυφη διαβάθμιση στη θερμοκρασία, στη διαφορά δηλαδή της θερμοκρασίας του αέρα στα 0.3 m και 1.8 m (Σχήμα 4.1.β), μεγαλύτερη στην περίπτωση του φυσικού αερισμού (πάνω από 2.5°C), συγκρινόμενη με την περίπτωση του δυναμικού αερισμού. Η θερμοκρασία του αέρα στα 1.8 m ήταν ελαφρά υψηλότερη (0.5 έως 1.0°C) από την εξωτερική θερμοκρασία και για τις δύο περιπτώσεις, με φυσικό και δυναμικό αερισμό. Οι τιμές της θερμοκρασίας του αέρα στα 0.8 m ήταν μεταξύ των τιμών της θερμοκρασίας στα 0.3 m και 1.8 m, έχοντας γενικά τιμές πιο κοντά στη θερμοκρασία του αέρα στα 1.8 m.

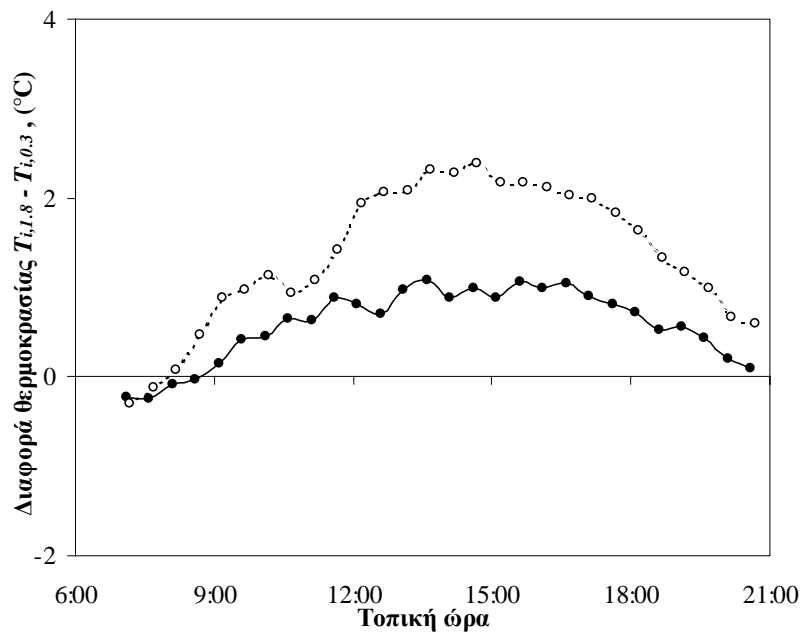
Η ανάλυση των διαφορών μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής πίεσης ατμών του αέρα ($\Delta e = e_{i,0.3} - e_o$) έδειξε, ότι το χαμηλότερο στρώμα του αέρα ήταν περισσότερο υγρό υπό συνθήκες φυσικού αερισμού, παρά υπό συνθήκες δυναμικού αερισμού (Σχήμα 4.2.α). Όπως και στην περίπτωση της θερμοκρασίας, βρέθηκε κατακόρυφη διαβάθμιση στην πίεση ατμών του αέρα και στις δύο περιπτώσεις αερισμού, μεγαλύτερη στην περίπτωση του φυσικού αερισμού (Σχήμα 4.2.β), με τον αέρα να είναι σημαντικά πιο υγρός στα χαμηλότερα στρώματα παρά σε ύψος 1.8 m. Στο επίπεδο αυτό (1.8 m), οι τιμές της υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου ήταν κοντά στις τιμές της υγρασίας του εξωτερικού αέρα.

4.1.1.2 Διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα

Βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στη διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα μεταξύ των μεταχειρίσεων με φυσικό και δυναμικό αερισμό. Οι τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας ήταν περισσότερο αρνητικές, όταν ο αερισμός ήταν φυσικός είτε εξεταζόταν η θερμοκρασία σε ύψος 0.3 m (Σχήμα 4.3.α) είτε η μέση θερμοκρασία του αέρα (Σχήμα 4.3.β). Οι τιμές στη διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ήταν μικρότερες όταν εξεταζόταν η μέση θερμοκρασία του αέρα σε κατακόρυφο επίπεδο.

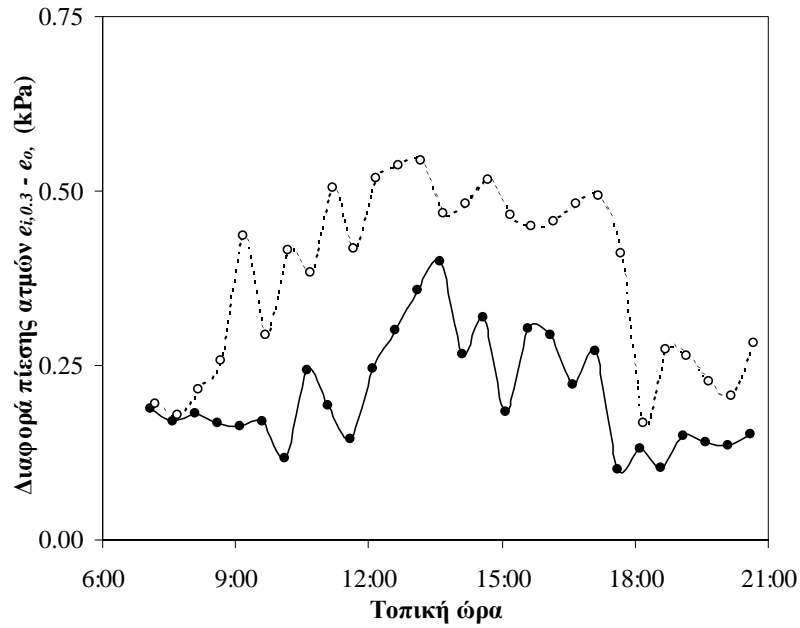


(α)

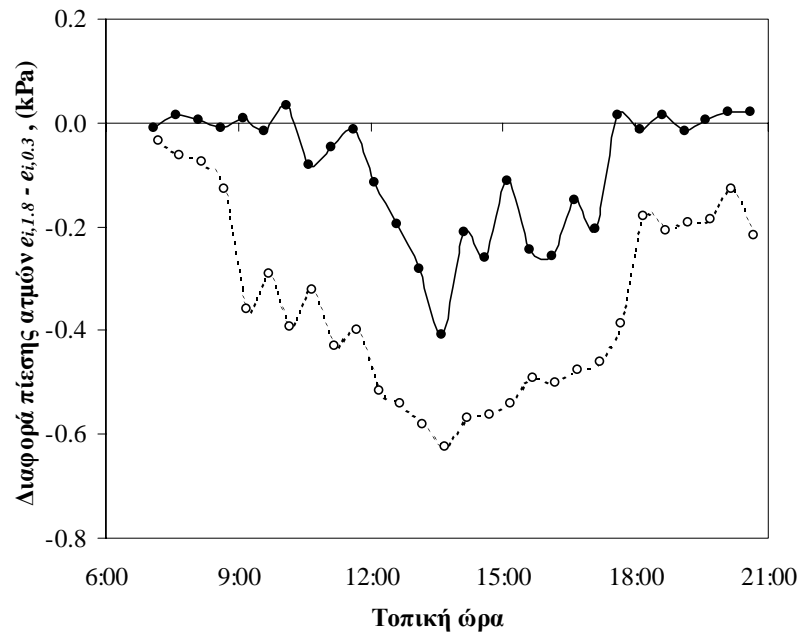


(β)

Σχήμα 4.1. (α) Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.3 m και του εξωτερικού αέρα ΔT_{i-o} ($= T_{i,0.3} - T_o$) ($^{\circ}\text{C}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός. (β) Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 1.8 m και 0.3 m ΔT_{i-o} ($= T_{i,1.8} - T_{i,0.3}$) ($^{\circ}\text{C}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.

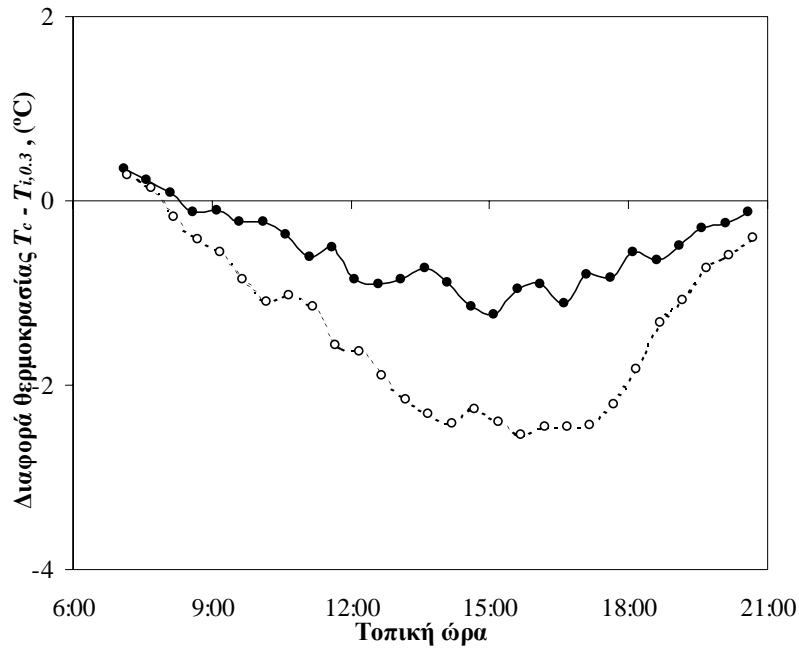


(α)

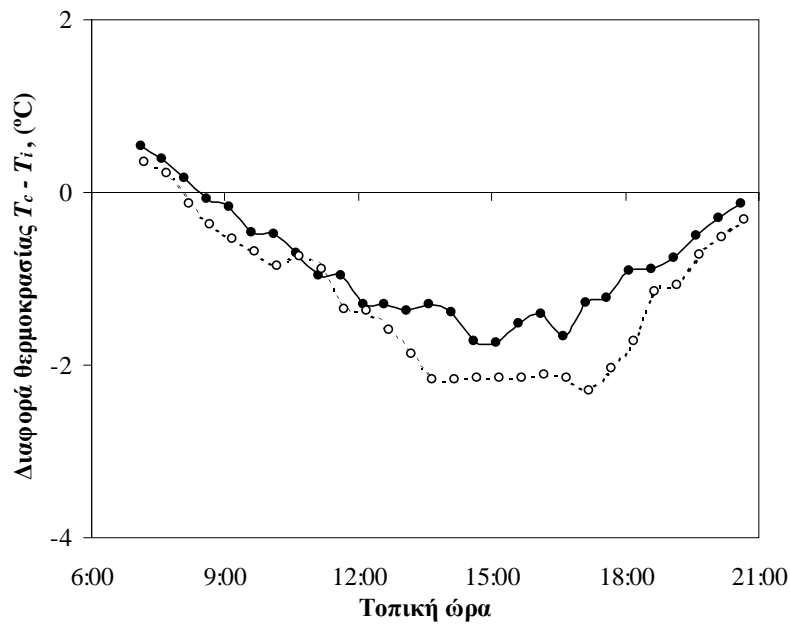


(β)

Σχήμα 4.2. (α) Διαφορά πίεσης ατμών μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.3 m και του εξωτερικού αέρα Δe_{i-o} ($= e_{i,0.3} - e_o$) (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός. (β) Διαφορά πίεσης ατμών μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 1.8 m και 0.3 m Δe_{i-o} ($= e_{i,1.8} - e_{i,0.3}$) (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.



(α)



(β)

Σχήμα 4.3. (α) Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της καλλιέργειας και του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.3 m $\Delta T_c (= T_c - T_{i,0.3})$ ($^{\circ}\text{C}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (○), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός. (β) Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της καλλιέργειας και της μέσης τιμής του αέρα του θερμοκηπίου $\Delta T_c (= T_c - T_i)$ ($^{\circ}\text{C}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (○), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.

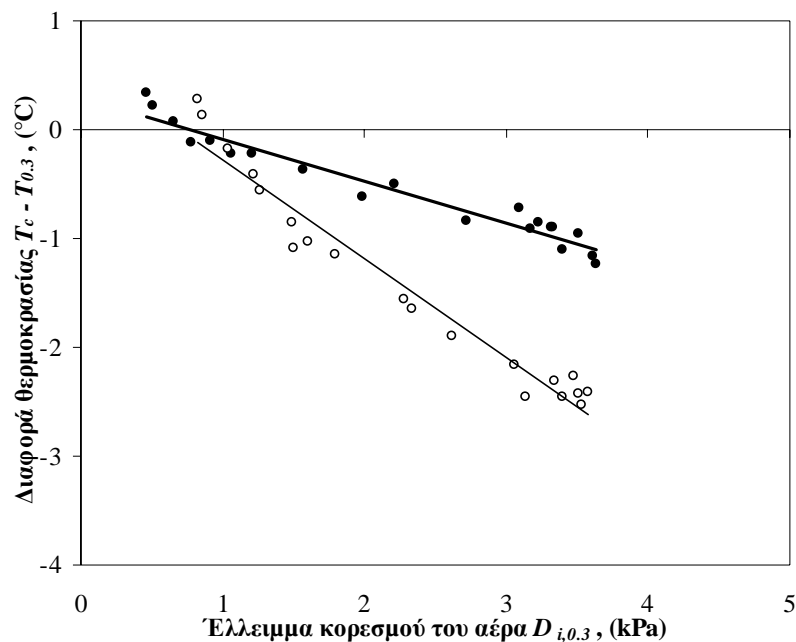
Η σχέση μεταξύ της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στα 0.3 m δίνεται στο Σχήμα 4.4 (διάστημα 9:00-17:00). Μπορούμε να δούμε ότι τα αποτελέσματα ακολουθούν μια λογική πορεία και παρουσιάζουν την συχνά παρατηρούμενη εξάρτηση της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα από το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (Idso 1982). Με γραμμική παλινδρόμηση βρέθηκαν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\Delta T_c = 0.63 - 0.91 D_{i,0.3} \quad (4.1)$$

για φυσικό αερισμό, με τιμή για το συντελεστή προσδιορισμού R^2 0.96 και

$$\Delta T_c = 0.30 - 0.38 D_{i,0.3} \quad (4.2)$$

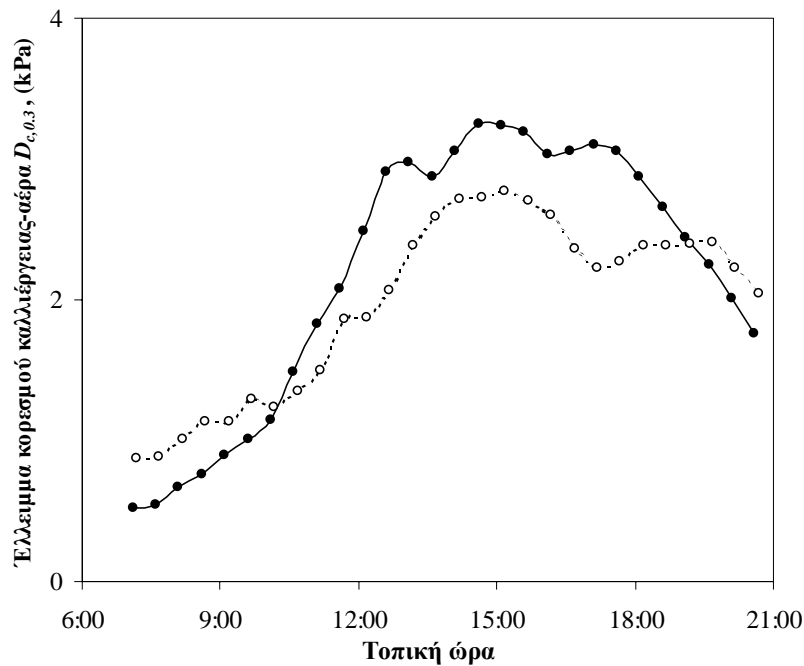
για δυναμικό αερισμό, με τιμή για το συντελεστή προσδιορισμού R^2 0.95.



Σχήμα 4.4. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της καλλιέργειας και του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 0.3 m ΔT_c ($= T_c - T_{i,0.3}$) ($^{\circ}\text{C}$) συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού του αέρα σε ύψος 0.3 m $D_{i,0.3}$ (kPa). (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (○), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.

4.1.1.3 Έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα

Η πορεία του ελλείμματος κορεσμού μεταξύ της καλλιέργειας και του αέρα στα 0.3 m ($D_{c,0.3}$, Σχήμα 4.5) δείχνει ότι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τη διαπνοή ήταν ελαφρά μεγαλύτερος όταν ο αερισμός ήταν δυναμικός σε σύγκριση με την περίπτωση που ο αερισμός ήταν φυσικός, κυρίως κατά το θερμότερο μέρος της ημέρας. Αυτό εξηγεί τη μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα και την υψηλότερη υγρασία του αέρα στα 0.3 m κατά τη διάρκεια της περιόδου με φυσικό αερισμό. Παρόλα αυτά, δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές στο έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα αν αυτό υπολογιζόταν με τις μέσες τιμές σε κατακόρυφο επίπεδο (τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται).

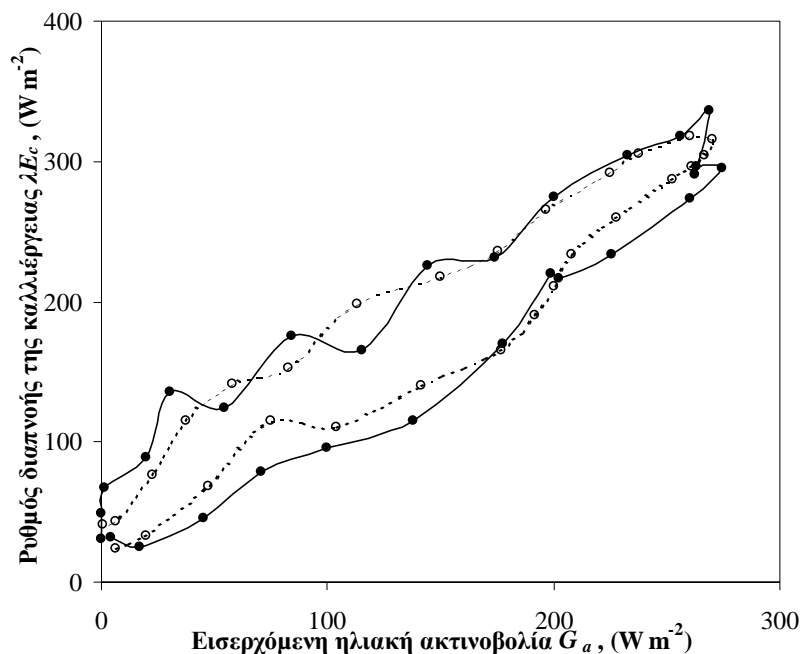


Σχήμα 4.5. Έλλειμμα κορεσμού μεταξύ της καλλιέργειας και του αέρα σε ύψος 0.3 m $D_{c,0.3}$ (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (○), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.

4.1.2 Καταμερισμός ενέργειας

4.1.2.1 Ρυθμός διαπνοής

Δε βρέθηκαν σημαντικές διαφορές στο ρυθμό διαπνοής μεταξύ των δύο μεταχειρίσεων αερισμού (φυσικός-δυναμικός αερισμός). Όταν η διαπνοή απεικονίστηκε γραφικά, συναρτήσκει της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την καλλιέργεια (Σχήμα 4.6), εμφανίστηκαν φαινόμενα υστέρησης με τη διαπνοή, για την ίδια τιμή της ακτινοβολίας, να παίρνει μεγαλύτερες τιμές το πρωί από ότι το απόγευμα.



Σχήμα 4.6. Ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας λE_c ($W m^{-2}$) συναρτήσκει της εισερχόμενης στο θερμοκήπιο ηλιακής ακτινοβολίας G_a ($W m^{-2}$). (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (○), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.

4.1.2.2 Αισθητή ενέργεια και αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας

Όπως η διαπνοή, έτσι και η αισθητή ενέργεια H_c αναφέρεται ανά m^2 εδάφους καλυμμένου με καλλιέργεια. Καθώς η διαπνοή ήταν παρόμοια για τις δύο περιπτώσεις αερισμού, η αισθητή ενέργεια η οποία υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.5) από μετρήσεις της διαπνοής λE_c και της απορροφούμενης καθαρής ακτινοβολίας $R_{n,int}$ ($= R_{n,a} - R_{n,b}$) και ο λόγος Bowen β , βρέθηκαν επίσης παρόμοια για τις δύο περιπτώσεις αερισμού. Η αισθητή ενέργεια είχε σχετικά υψηλές τιμές με μέγιστη τιμή περίπου 250 W m^{-2} κατά το μεσημέρι. Τις πρωινές ώρες ο λόγος Bowen ήταν σχετικά σταθερός ($\beta \approx -0.6$ έως -0.7), ενώ μειωνόταν το απόγευμα έως ότου έφτανε κοντά στο -1.0 .

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της αισθητής ενέργειας H_c και της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ΔT_c στα 0.3 m . Η θέση αυτή για τον υπολογισμό της διαφοράς θερμοκρασίας θεωρήθηκε ως η πιο ρεαλιστική, αφού το μεγαλύτερο μέρος της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας (λυγισμένοι βλαστοί) βρίσκονταν στο χαμηλότερο επίπεδο ($0-0.5 \text{ m}$) της καλλιέργειας. Βρέθηκε σχετικά καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών μεταβλητών, ενώ η κλίση της γραμμής παλινδρόμησης επέτρεψε τον υπολογισμό της μέσης τιμής της αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας g_a [σχέση (2.27)]. Η γραμμή παλινδρόμησης ήταν:

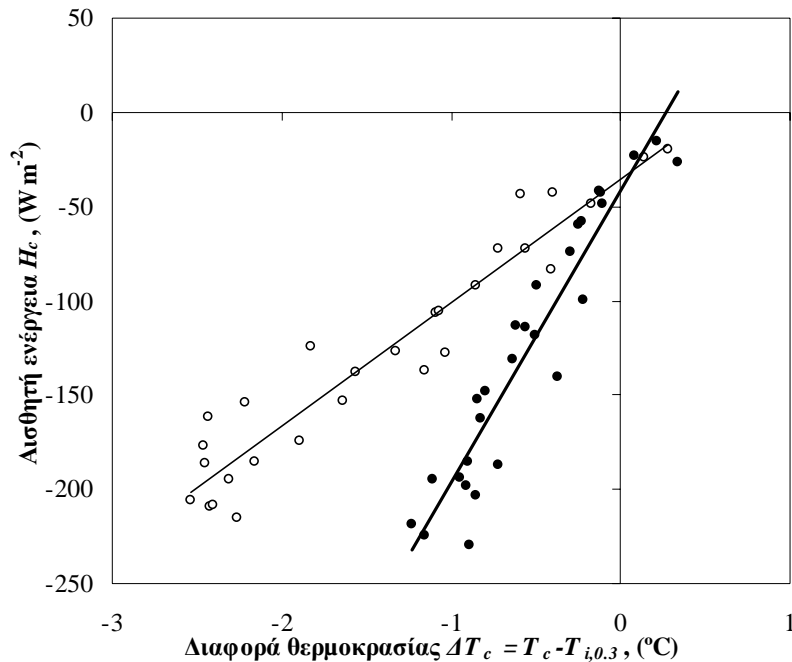
$$H_c = 65.4 \Delta T_c - 35.7 \quad (4.3)$$

για το φυσικό αερισμό, με τιμή για το συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.92$ και

$$H_c = 154.2 \Delta T_c - 41.8 \quad (4.4)$$

για το δυναμικό αερισμό, με τιμή για το συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.90$.

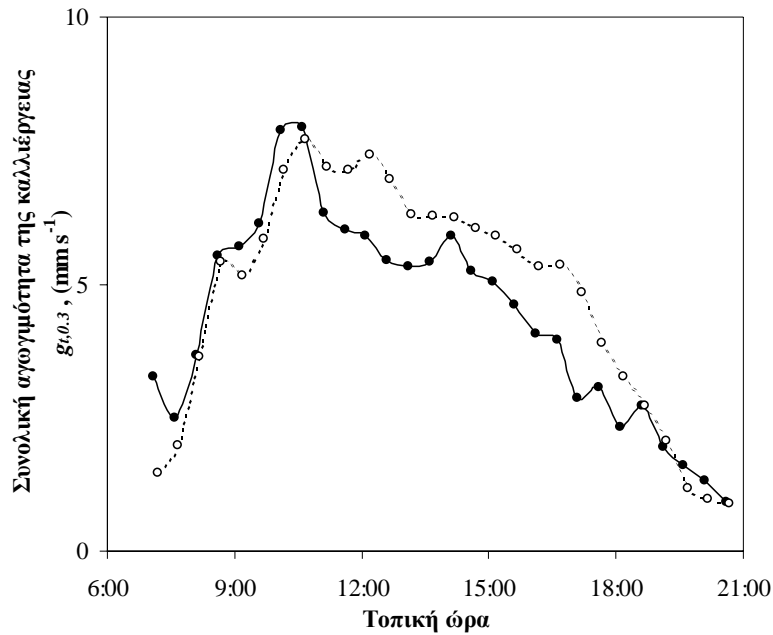
Έτσι, οι αντίστοιχες τιμές της αεροδυναμικής αγωγιμότητας g_a που υπολογίστηκαν από την κλίση των γραμμών παλινδρόμησης ήταν, 52 mm s^{-1} για το φυσικό αερισμό και 123 mm s^{-1} για το δυναμικό αερισμό.



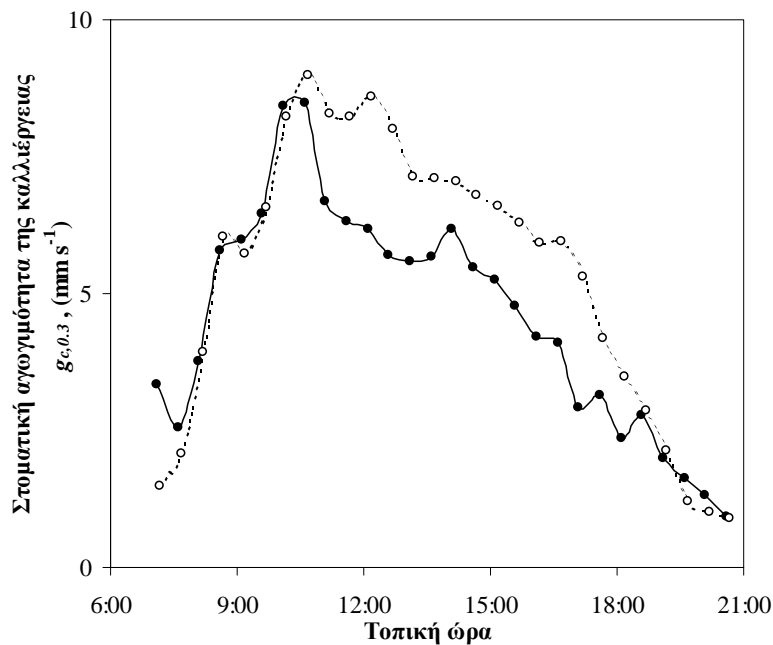
Σχήμα 4.7. Ροή αισθητής ενέργειας H_c ($W m^{-2}$) συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας της καλλιέργειας και του αέρα σε ύψος 0.3 m από το έδαφος $\Delta T_c (= T_c - T_{i,0.3})$ ($^{\circ}C$). (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (○), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.

4.1.3 Συνολική και στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας

Η ημερήσια πορεία της συνολικής $g_{t,0.3}$ και της στοματικής αγωγιμότητας $g_{c,0.3}$ της καλλιέργειας κατά τη διάρκεια των δύο ημερών, όπως αυτές υπολογίστηκαν από τις σχέσεις (2.21) (για την περίπτωση της καλλιέργειας) και (2.29) αντίστοιχα, από μετρήσεις του ελλείματος κορεσμού στα 0.3 m (με τιμές για την αεροδυναμική αγωγιμότητα g_a 52 και 123 $mm s^{-1}$, για φυσικό και δυναμικό αερισμό αντίστοιχα), παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.8.α και 4.8.β, αντίστοιχα. Μπορούμε να δούμε ότι η συνολική $g_{t,0.3}$ και η στοματική αγωγιμότητα $g_{c,0.3}$ ήταν ελαφρά μεγαλύτερες υπό συνθήκες φυσικού αερισμού. Και στις δύο περιπτώσεις, η μέγιστη τιμή της στοματικής αγωγιμότητας g_c (περίπου 10 $mm s^{-1}$) επιτυγχανόταν την ίδια ώρα, περίπου στις 10 το πρωί. Βρέθηκε επίσης υστέρηση μεταξύ της στοματικής αγωγιμότητας και της ηλιακής ακτινοβολίας και του ελλείματος κορεσμού του αέρα (Σχήματα 4.9.α και 4.9.β, αντίστοιχα).

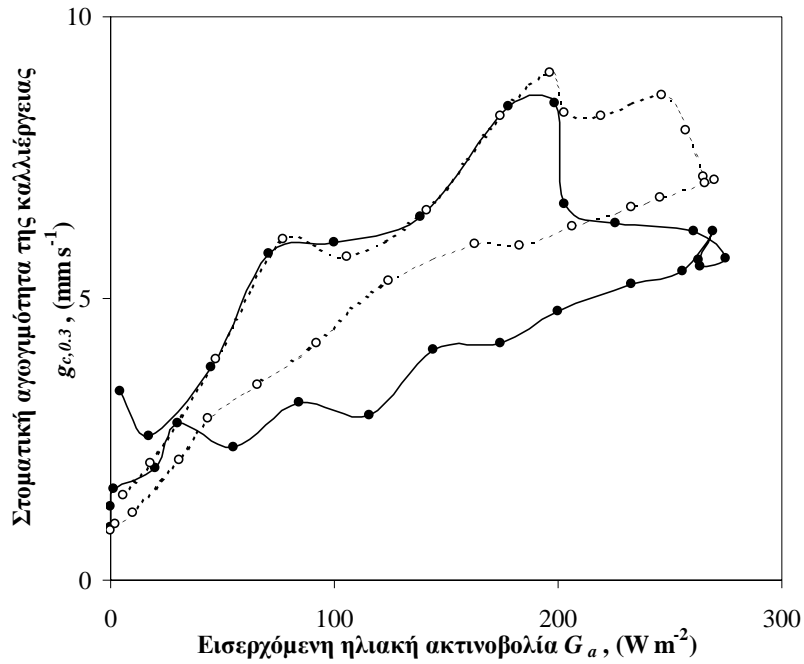


(α)

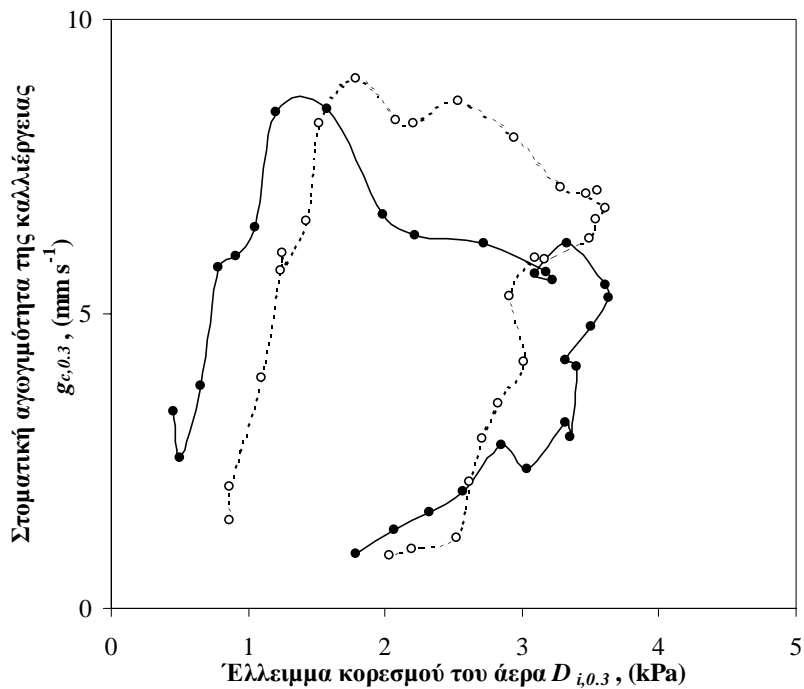


(β)

Σχήμα 4.8. (α) Συνολική αγωγιμότητα της καλλιέργειας $g_{t,0.3}$ (mm s^{-1}) υπολογισμένη χρησιμοποιώντας το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα στα 0.3 m $D_{c,0.3}$ (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός. (β) Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας $g_{c,0.3}$ (kPa) υπολογισμένη χρησιμοποιώντας το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα στα 0.3 m $D_{c,0.3}$ (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (ο), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.



(α)



(β)

Σχήμα 4.9. (α) Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας $g_{c,0.3}$ (mm s^{-1}) συναρτήσει της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας G_a (W m^{-2}). (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (○), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός. (β) Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας $g_{c,0.3}$ (mm s^{-1}) συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού του αέρα $D_{i,0.3}$ (kPa). (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (○), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.

4.1.4 Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας

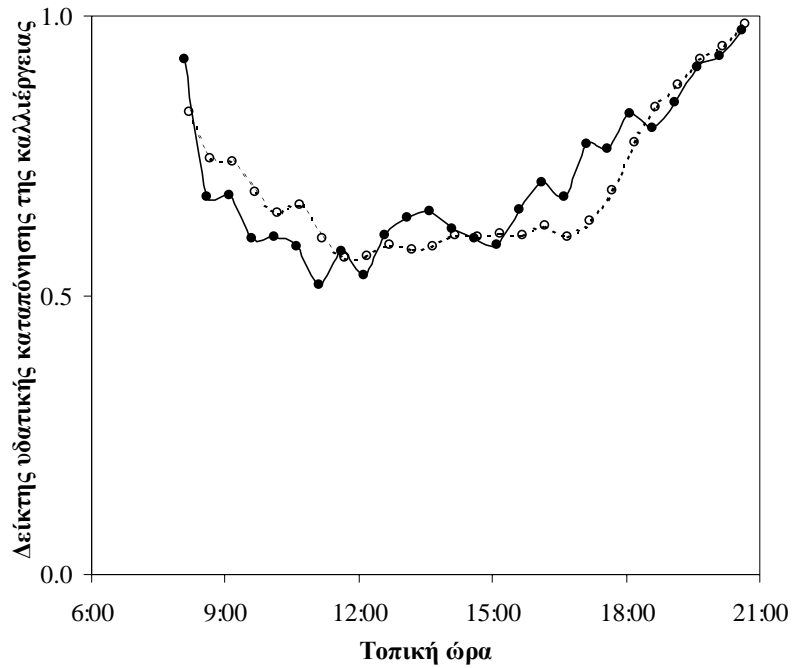
Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας I_{CWS} υπολογίστηκε από τη σχέση (1.1) με τη μέγιστη θερμοκρασία T_M που μπορεί να επιτευχθεί από την καλλιέργεια να δίνεται από τη σχέση:

$$T_M = T_i + \frac{R_{n,a}}{g_a \rho C_p} \quad (4.5)$$

Η ελάχιστη θερμοκρασία T_m , που μπορεί να επιτευχθεί από την καλλιέργεια, θεωρήθηκε ότι επιτεύχθηκε με τη μέγιστη δυνατή αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_M και υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$T_m = T_i + \frac{\left(\frac{1}{g_a} + \frac{1}{g_M} \right) \frac{R_{n,a}}{\rho C_p} - \frac{D_i}{\gamma}}{1 + \frac{\delta}{\gamma} + \frac{g_a}{g_M}} \quad (4.6)$$

Η ημερήσια πορεία του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας, όπως υπολογίστηκε στα 0.3 m και με τιμή για την g_M 15 mm s⁻¹, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10. Η τιμή αυτή της g_M ήταν η μέγιστη αγωγιμότητα που παρατηρήθηκε στην καλλιέργεια, όπως θα δούμε στο Κεφάλαιο 6, όταν η καλλιέργεια βρισκόταν υπό συνθήκες μη υδατικής καταπόνησης. Οι τιμές του δείκτη υδατικής καταπόνησης ήταν παρόμοιες και για τις δύο περιπτώσεις. Οι υψηλότερες τιμές του δείκτη νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα οφείλονταν κυρίως στα χαμηλά επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας και δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στον προσδιορισμό του επιπέδου της υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας. Για το υπόλοιπο μέρος της ημέρας, μπορούμε να δούμε ότι σύμφωνα με το δείκτη υδατικής καταπόνησης η καλλιέργεια εμφανιζόταν να βρίσκεται σε συνθήκες σχετικής καταπόνησης, με μέση τιμή του δείκτη περίπου 0.6.



Σχήμα 4.10. Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας $I_{CWS,0.3}$ υπολογισμένος με τη θερμοκρασία του αέρα σε ύψος 0.3 m $T_{i,0.3}$ (°C) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (○), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.

4.2 Συζήτηση

4.2.1 Επίδραση στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου

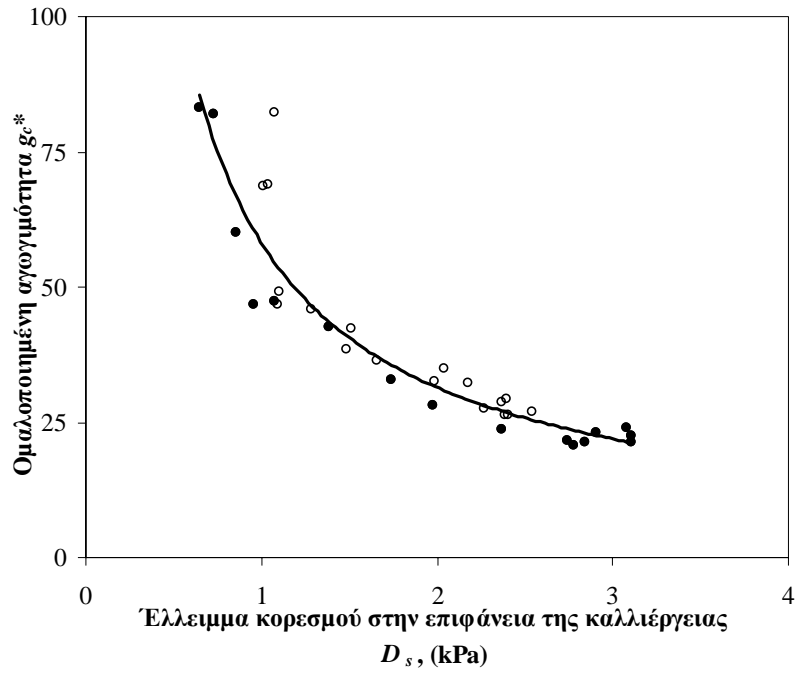
Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στα Σχήματα 4.1 και 4.2 υποδηλώνουν ότι, όσον αφορά τη θερμοκρασία και την υγρασία, ο δυναμικός αερισμός είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός περισσότερο ομογενούς κλίματος σε κατακόρυφο επίπεδο αφού, σε αντίθεση με το φυσικό αερισμό, ήταν δυνατό να προκαλεί αρκετά καλή ανάμιξη του αέρα στο θερμοκήπιο. Ο αέρας που περιέβαλλε το κατώτερο στρώμα της καλλιέργειας ήταν ψυχρότερος και περισσότερο υγρός υπό συνθήκες φυσικού αερισμού. Και στις δύο περιπτώσεις, οι τιμές της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα σε ύψος 1.8 m ήταν κοντά σε αυτές του εξωτερικού αέρα, υποδεικνύοντας ότι η ανάμιξη του αέρα στο επίπεδο αυτό ήταν αρκετά καλή και ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ανταλλαγής ενέργειας και μάζας γινόταν στο επίπεδο από 0 έως 1.8 m.

4.2.2 Καταμερισμός ενέργειας και στοματική αγωγιμότητα

Τα επίπεδα του ρυθμού διαπνοής της καλλιέργειας, η αισθητή ενέργεια και ο λόγος Bowen ήταν παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις. Ο τύπος του αερισμού δε φάνηκε να επηρέασε σημαντικά τον καταμερισμό της ενέργειας στο επίπεδο της καλλιέργειας, παρόλο που η μέση τιμή της αεροδυναμικής αγωγιμότητας ήταν διπλάσια υπό συνθήκες δυναμικού αερισμού (120 mm s^{-1}), παρά υπό συνθήκες φυσικού αερισμού (περίπου 50 mm s^{-1}). Η εξήγηση μπορεί να βρίσκεται στην αντίδραση των στομάτων στην υγρασία στο επίπεδο της επιφάνειας της καλλιέργειας, όπως φαίνεται από την ανάλυση της ημερήσιας πορείας της υστέρησης της διαπνοής και της αγωγιμότητας συναρτήσει της ακτινοβολίας και του ελλείμματος κορεσμού. Τα φαινόμενα αυτά έχουν ήδη αναφερθεί σε συνθήκες θερμοκηπίου (Baille *et al.* 1994a), καθώς επίσης και σε συνθήκες ανοιχτής καλλιέργειας (Gutierrez *et al.* 1994). Οι τελευταίοι ερευνητές απέδωσαν την ημερήσια υστέρηση στην επίδραση της συμμεταβολής της ηλιακής ακτινοβολίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στην αντίδραση των στομάτων και ομαλοποίησαν την αγωγιμότητα της καλλιέργειας με την ηλιακή

ακτινοβολία. Η ομαλοποίηση απομάκρυνε την υστέρηση και εμφάνισε την ισχυρή αντίδραση των στομάτων στην υγρασία. Ο ίδιος τύπος ομαλοποίησης εφαρμόστηκε στη στοματική αγωγιμότητα και στην προκειμένη περίπτωση. Στο *Σχήμα 4.11* παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της ομαλοποιημένης αγωγιμότητας g_c^* (η οποία ορίζεται ως g_c/G_a) και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο επίπεδο της επιφάνειας της καλλιέργειας D_s . Η μεταβλητή D_s επιλέχθηκε διότι χρησιμοποιείται συχνά ως η μεταβλητή αναφοράς στην περίπτωση μελετών που πραγματεύονται την αντίδραση των στομάτων στην υγρασία (Aphalo and Jarvis 1993). Όταν τα πειραματικά δεδομένα, που επιτεύχθηκαν με τις δύο μεταχειρίσεις, συγκεντρώθηκαν και απεικονίσθηκαν συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού της επιφάνειας της καλλιέργειας, βρέθηκε ότι η υστέρηση απομακρύνθηκε και εμφανίστηκε μια καμπυλόγραμμη μείωση της ομαλοποιημένης αγωγιμότητας όταν το έλλειμμα κορεσμού αυξανόταν. Η μεταβολή της αγωγιμότητας ικανοποιούσε την ίδια σχέση και στις δύο περιπτώσεις αερισμού ($g_c^* = 58.2 D_s^{-0.88}$). Έτσι, φαίνεται ότι οι συνθήκες υγρασίας στην επιφάνεια της καλλιέργειας εξηγούν τις διαφορές στη στοματική αγωγιμότητα και τα παρόμοια επίπεδα ρυθμού διαπνοής υπό συνθήκες φυσικού και δυναμικού αερισμού. Οι διαφορές αυτές στην υγρασία στο επίπεδο της επιφάνειας της καλλιέργειας είναι το αποτέλεσμα διαφόρων αλληλεπιδράσεων μεταξύ:

- της έντασης της ανάμειξης του αέρα και των χαρακτηριστικών της ροής του γύρω από την καλλιέργεια, τα οποία καθορίζουν και την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας (υψηλότερο έλλειμμα κορεσμού του αέρα στην περίπτωση του δυναμικού αερισμού),
- του τοπικού κλίματος που δημιουργείται γύρω από την καλλιέργεια και
- της φυσιολογικής προσαρμογής της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας στο έλλειμμα κορεσμού του αέρα στο επίπεδο της επιφάνειας της καλλιέργειας (όπως υποδεικνύεται από το *Σχήμα 4.11*), η οποία έδωσε μία παλίνδρομη τροφοδότηση στην υγρασία, σχέση που εξηγεί το λόγο για τον οποίο ο δυναμικός αερισμός δεν αύξησε την κατανάλωση νερού σε σύγκριση με το φυσικό αερισμό.



Σχήμα 4.11. Ομαλοποιημένη στοματική αγωγιμότητα g_c^* ($= g_c/G_a$) συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού στην επιφάνεια της καλλιέργειας D_s (kPa). (●), 8 Αυγούστου, δυναμικός αερισμός, (○), 10 Αυγούστου, φυσικός αερισμός.

4.2.3 Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας.

Η διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα, συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας (Jackson *et al.* 1981, Idso 1982, Idso *et al.* 1990). Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 4.10 υποδηλώνουν ότι ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας (κοντά στο 2) δεν ήταν τόσο υψηλός, ώστε να αυξήσει την υγρασία στην ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου. Το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ήταν περίπου 4 kPa πριν το μεσημέρι και μειωνόταν σημαντικά αργότερα, υποδεικνύοντας μία σημαντική ζήτηση του κλίματος σε υγρασία, η οποία δεν μπορούσε να ικανοποιηθεί από την καλλιέργεια, παρόλο που η τελευταία ήταν καλά αρδευόμενη. Πιθανόν ένας μεγαλύτερος δείκτης φυλλικής επιφάνειας ή η χρήση ενός συστήματος δροσισμού, θα ήταν απαραίτητα προκειμένου να ενταθεί η διαδικασία της ψύξης του θερμοκηπίου με εξάτμιση και να μειωθεί η ένταση των συνθηκών θερμικής και υδατικής καταπόνησης στο θερμοκήπιο. Η ελαφρά χαμηλότερη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας υπό συνθήκες βεβιασμένης συναγωγής δεν προκάλεσε και μεγαλύτερη τιμή του δείκτη υδατικής καταπόνησης, υποδηλώνοντας ότι άλλοι παράγοντες, όπως η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, εξουδετέρωσαν την επίδραση της στοματικής αγωγιμότητας στο δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας. Η τελευταία επηρεάζει σημαντικά την υπολογισμένη τιμή της μέγιστης δυνατής θερμοκρασίας της καλλιέργειας T_M [σχέση (4.5)] και για το λόγο αυτό, όσον αφορά τη διαμόρφωση της τιμής του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας, μπορεί να έχει την ίδια ή ακόμα και μεγαλύτερη σημασία συγκρινόμενη με τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας.

4.3 Συμπεράσματα

Τα σπουδαιότερα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα αυτή δηλώνουν ότι η χρήση διαφορετικού τύπου αερισμού (φυσικός-δυναμικός) προκαλεί σημαντικές διαφορές στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και στην αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Οι μεταβολές αυτές δε φαίνεται να επηρεάζουν τον καταμερισμό της ενέργειας στο επίπεδο της καλλιέργειας. Η ροή αισθητής και λανθάνουσας ενέργειας δεν αυξήθηκε σημαντικά υπό συνθήκες δυναμικού αερισμού, ενώ ο λόγος Bowen ήταν παρόμοιος και στις δύο περιπτώσεις, παίρνοντας τιμές στο εύρος από - 0.5 έως - 1.0. Η ανάλυση της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας έδειξε ότι η αντίδραση των στομάτων στην υγρασία στο επίπεδο του φύλλου, εξηγεί τη διατήρηση του ρυθμού διαπνοής σε παρόμοια επίπεδα, λόγω της αλληλεπίδρασης και ανάδρασης μεταξύ του ελλείμματος κορεσμού καλλιέργειας-αέρα και της στοματικής αγωγιμότητας. Η χαμηλότερη στοματική αγωγιμότητα που παρατηρούνταν μετά τις 10:00 το πρωί υπό συνθήκες δυναμικού αερισμού, υποδηλώνει ότι τα φυτά, πιθανόν λόγω κλεισίματος των στομάτων, να είχαν μικρότερη φωτοσύνθεση υπό τις συνθήκες αυτές. Αυτό φυσικά θα πρέπει να επιβεβαιωθεί διότι υπάρχουν και άλλοι κλειστοί κύκλοι αλληλεπίδρασης-ανάδρασης όσον αφορά την απορρόφηση του CO₂, που σχετίζονται με την επιφανειακή και μεσοκυττάρια συγκέντρωση του CO₂.

Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι ένας υψηλός ρυθμός αερισμού δεν είναι και υποχρεωτικά η καλύτερη λύση για την ανακούφιση της καλλιέργειας από τις συνθήκες καταπόνησης κατά τη διάρκεια καλοκαιρινών συνθηκών. Ο φυσικός αερισμός, όταν δεν περιορίζεται εξαιτίας των πολύ χαμηλών ταχυτήτων του εξωτερικού ανέμου, ίσως είναι περισσότερο κατάλληλος για την αποφυγή συνθηκών καταπόνησης, καθόσον δημιουργεί ένα λιγότερο ομοιογενές αλλά περισσότερο υγρό και ψυχρό περιβάλλον γύρω από την καλλιέργεια. Έτσι φαίνεται πως υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του ρυθμού ανανέωσης του αέρα, η οποία βασίζεται σε φυσιολογικά κριτήρια και η οποία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως οι συνθήκες ταχύτητας ανέμου έξω από το θερμοκήπιο, η θερμοκρασία και υγρασία, τα χαρακτηριστικά της ροής του ανέμου μέσα στο θερμοκήπιο (τα οποία εξαρτώνται από τον τύπο του αερισμού), η αεροδυναμική αγωγιμότητα και η ιδιαίτερη αντίδραση των διαφόρων ειδών στην υγρασία. Επομένως, όταν γίνεται έρευνα για την εύρεση της

βέλτιστης (και χρονικά μεταβαλλόμενης) τιμής του ρυθμού ανανέωσης του αέρα, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και να συνεκτιμηθούν όλες οι παραπάνω παράμετροι.

**Κεφάλαιο 5. Μελέτη της επίδρασης της σκίασης στο
μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια**

5.1 Αποτελέσματα

Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν να αναλυθούν και να παρουσιαστούν στην ενότητα αυτή αφορούν τρεις ηλιόλουστες ημέρες με παρόμοιες συνθήκες ακτινοβολίας:

- την 28^η Ιουνίου 1999 (δέκα ημέρες πριν από το άσπρισμα του θερμοκηπίου),
- την 8^η Ιουλίου 1999 (μία ημέρα μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου) και
- την 16^η Ιουλίου 1999 (εννέα ημέρες μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου)

Οι μέσες ημερήσιες τιμές (διάστημα 9:00-19:00) των εξωτερικών κλιματικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια των τριών ημερών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1. Μέσες τιμές (διάστημα 9:00 – 19:00) των εξωτερικών κλιματικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια των τριών επιλεγμένων ημερών (28 Ιουνίου 1999, δέκα ημέρες πριν το άσπρισμα του θερμοκηπίου, 8 Ιουλίου 1999, μία ημέρα μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου και 16 Ιουλίου 1999, εννέα ημέρες μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου). Το άσπρισμα του θερμοκηπίου έγινε στις 7 Ιουλίου 1999.

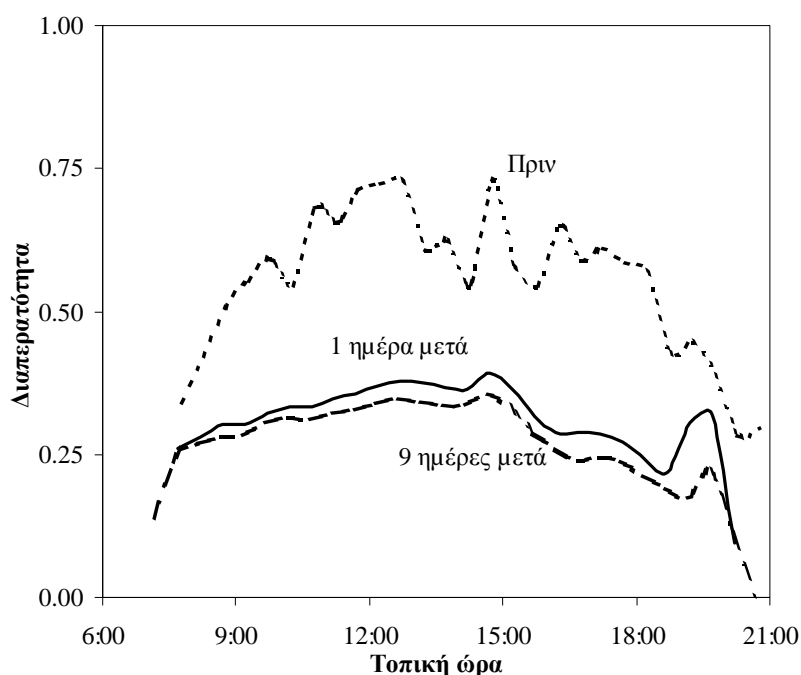
Ημέρα	G_o MJ m ⁻²	T_o °C	e_o kPa	D_o kPa	u m s ⁻¹
28 Ιουνίου	27.70	31.5	2.06	2.64	2.38
8 Ιουλίου	25.56	32.8	2.01	3.02	2.33
16 Ιουλίου	26.74	29.5	1.67	2.47	1.98

G_o = ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία (MJ m⁻²), T_o = θερμοκρασία αέρα (°C), e_o = πίεση ατμών του αέρα (kPa), D_o = έλλειμμα κορεσμού του αέρα (kPa), u = ταχύτητα ανέμου (m s⁻¹).

5.1.1 Επίδραση του ασπρίσματος του θερμοκηπίου στη διαπερατότητα του θερμοκηπίου

Ο συντελεστής διαπερατότητας του θερμοκηπίου στην ακτινοβολία, τ , υπολογίστηκε από το λόγο μετρημένων τιμών της εισερχόμενης προς την εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία ($\tau = G_d/G_o$). Η ημερήσια πορεία του συντελεστή διαπερατότητας

του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια των τριών επιλεγμένων ημερών παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1. Ημερήσια πορεία του συντελεστή διαπερατότητας του θερμοκηπίου τ , πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).

Η μέση τιμή του συντελεστή τ (κατά το διάστημα 9:00-19:00) ήταν 0.62 πριν το άσπρισμα του θερμοκηπίου, με μεγάλες διακυμάνσεις γύρω από την τιμή αυτή λόγω της απορρόφησης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από το σκελετό του θερμοκηπίου και τον εξοπλισμό που βρισκόταν πάνω από τα αισθητήρια μέτρησης της ακτινοβολίας. Η μέγιστη τιμή του συντελεστή διαπερατότητας του θερμοκηπίου επιτυγχανόταν κατά το διάστημα του μεσημεριού με το συντελεστή να φθάνει στο 0.72, όταν κανένα μέρος του σκελετού ή του εξοπλισμού δεν εμπόδιζε την πρόσπτωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Μετά το άσπρισμα, η μέση τιμή του συντελεστή διαπερατότητας του θερμοκηπίου ήταν περίπου 0.31, με μικρές μεταβολές γύρω από την τιμή αυτή, καθώς η ακτινοβολία που εισερχόταν στο θερμοκήπιο ήταν κυρίως διάχυτη και συνεπώς λιγότερο ευαίσθητη στην παρουσία εσωτερικών εμποδίων.

Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα ποσά των ροών της ακτινοβολίας (MJ m^{-2}) για το διάστημα 9:00-19:00, κατά τη διάρκεια της 28 Ιουνίου και 16 Ιουλίου, ημέρες οι οποίες παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές για την εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία (27.07 και 26.74 MJ m^{-2} , αντίστοιχα).

Πίνακας 5.2. Διαπερατότητα του θερμοκηπίου και ολοκληρώματα της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ημέρας (ολοκλήρωση της μέσης υπολογισμένης τιμής της ακτινοβολίας ανά 30 λεπτά στο διάστημα 9:00 έως 19:00), πριν (28 Ιουνίου) και μετά (16 Ιουλίου) το άσπρισμα του θερμοκηπίου.

Ημέρα	G_o MJ m^{-2}	G_a MJ m^{-2}	τ	$R_{n,a}$ MJ m^{-2}	$R_{n,a}/G_a$
28 Ιουνίου	27.07	16.80	0.62	11.81	0.70
16 Ιουλίου	26.74	8.19	0.31	5.99	0.73

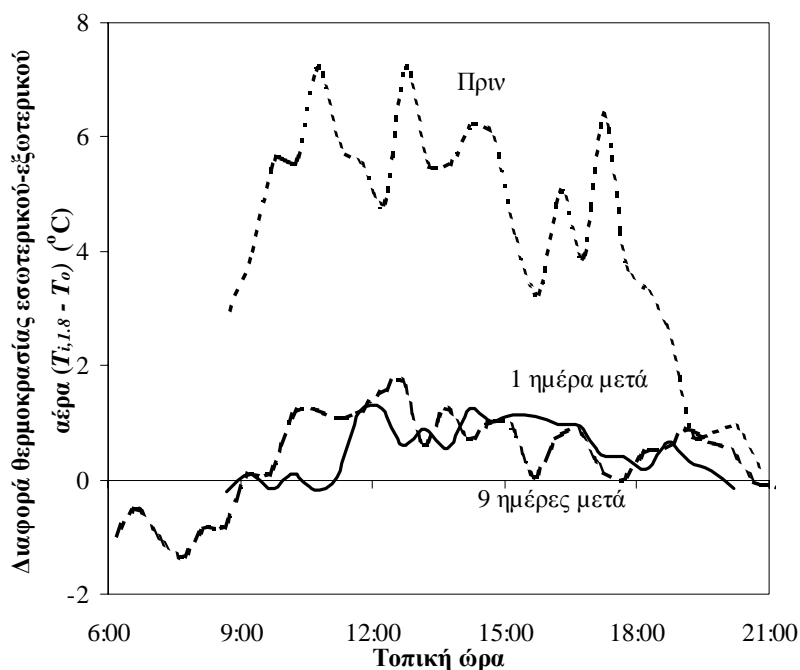
G_o = ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία έξω από το θερμοκήπιο (MJ m^{-2}), G_a = ενέργεια από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο επίπεδο πάνω από την καλλιέργεια (MJ m^{-2}), τ = συντελεστής διαπερατότητας του θερμοκηπίου στην ακτινοβολία, G_a = καθαρή ενέργεια πάνω από την καλλιέργεια (MJ m^{-2}).

Η πυκνότητα του διαλύματος που εφαρμόστηκε για το άσπρισμα του θερμοκηπίου ήταν σχετικά ισχυρή και μείωσε κατά τον ίδιο βαθμό (περίπου 50%) την εισερχόμενη ηλιακή G_a και καθαρή $R_{n,a}$ πάνω από την καλλιέργεια ακτινοβολία. Ο λόγος της καθαρής ακτινοβολίας προς την ηλιακή ακτινοβολία πάνω από την καλλιέργεια δεν άλλαξε σημαντικά μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου ($R_{n,a}/G_a = 0.70$ και 0.73 πριν και μετά το άσπρισμα αντίστοιχα). Το ίδιο παρατηρήθηκε και για το λόγο της ηλιακής προς την απορροφούμενη από την καλλιέργεια καθαρή ακτινοβολία, του οποίου η τιμή ήταν περίπου 0.72 και για τις δύο περιπτώσεις.

5.1.2 Θερμοκρασία και έλλειμμα κορεσμού του αέρα

Η ημερήσια μεταβολή της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου σε ύψος 1.8 m και του εξωτερικού αέρα του θερμοκηπίου $\Delta T_{i-o} = T_{i,1.8} - T_o$, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2. Παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στη διαφορά

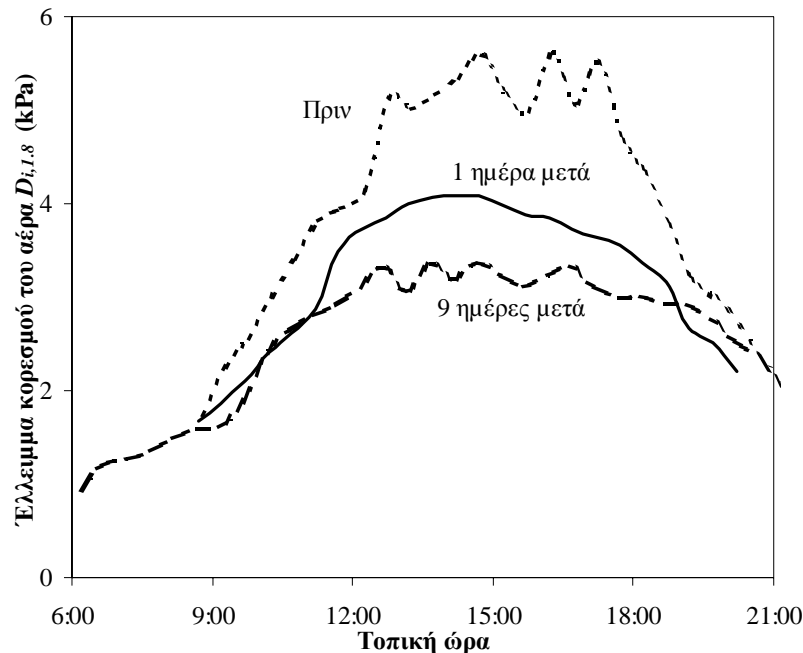
θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των ημερών μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου, η μέση τιμή (διάστημα 9:00-19:00) της οποίας ήταν περίπου 5°C, στις 28 Ιουνίου και μόνο 0.6°C στις 8 και 16 Ιουλίου. Η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου ήταν 40.2°C, στις 28 Ιουνίου (μέγιστη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα T_o περίπου 35.0°C), ενώ η αντίστοιχη τιμή της θερμοκρασίας στις 8 Ιουλίου ήταν μόνο 36.0°C (μέγιστη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα T_o περίπου 35.3°C). Η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου σε απόσταση 0.5 m από το έδαφος ήταν ελαφρώς μικρότερη σε σχέση με αυτή στα 1.8 m (διαφορά περίπου 1°C), τόσο πριν όσο και μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου (τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται).



Σχήμα 5.2. Ημερήσια πορεία της διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού-εξωτερικού αέρα $\Delta T_{i-o} (= T_{i,1.8} - T_o)$ (°C), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).

Η ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου $D_{i,1.8}$, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3. Κατά την περίοδο πριν από το άσπρισμα του θερμοκηπίου, η μέγιστη τιμή του ελλείμματος κορεσμού του αέρα ήταν κοντά στα 6 kPa και σημειωνόταν κατά τη διάρκεια του απογεύματος, ενώ μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου το έλλειμμα κορεσμού του αέρα δεν ξεπερνούσε τα 4 kPa. Οι χαμηλότερες τιμές του $D_{i,1.8}$ στις 16 Ιουλίου, συγκρινόμενες με τις τιμές του στις 8

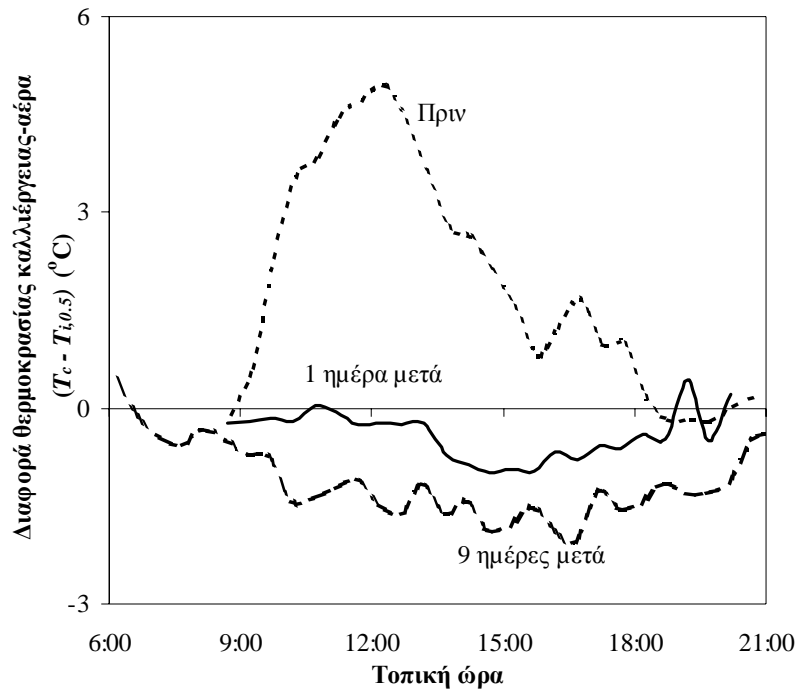
Ιουλίου μπορούν να αποδοθούν στις χαμηλότερες τιμές του ελλείμματος κορεσμού του εξωτερικού αέρα κατά τη διάρκεια της 16^{ης} Ιουλίου (μέση διαφορά στο έλλειμμα κορεσμού του εξωτερικού αέρα, μεταξύ των δύο ημερών, περίπου 0.6 kPa).



Σχήμα 5.3. Ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα $D_{i,1.8}$ (kPa), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).

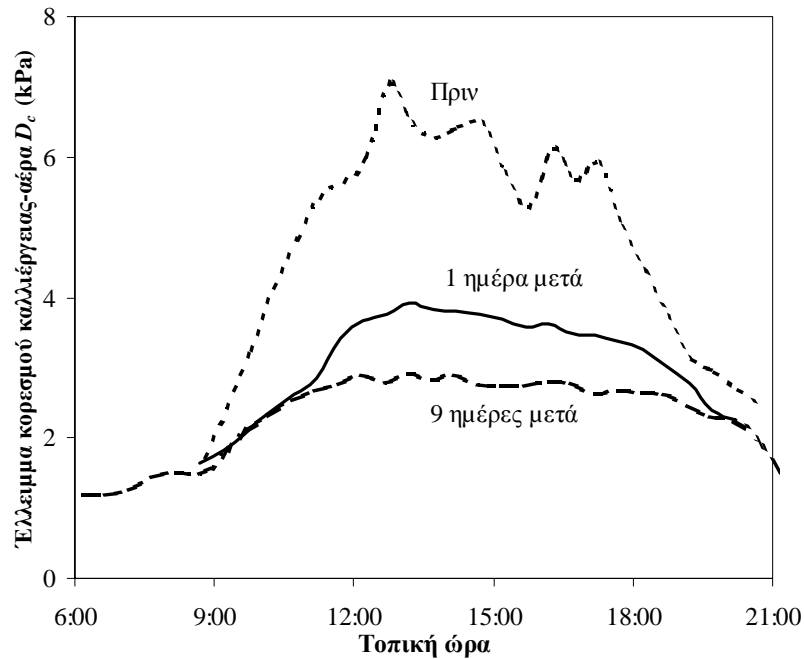
5.1.3 Διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας αέρα και έλλειμμα κορεσμού της καλλιέργειας

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα, $\Delta T_c (= T_c - T_{i,0.5})$. Μπορούμε να δούμε ότι η θερμοκρασία της καλλιέργειας ήταν σημαντικά υψηλότερη από αυτή του αέρα, πριν το άσπρισμα του θερμοκηπίου (μέγιστη θετική διαφορά ΔT_c περίπου 5°C αργά το πρωί), ενώ ήταν ελαφρώς, λογικά χαμηλότερη από αυτή του αέρα, μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου (μέγιστη αρνητική διαφορά ΔT_c περίπου -1°C στις 8 Ιουλίου και -2°C στις 16 Ιουλίου).



Σχήμα 5.4. Ημερήσια πορεία της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα $\Delta T_c (= T_c - T_{i,0.5})$ ($^{\circ}\text{C}$), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).

Η ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού καλλιέργειας-αέρα (D_c , σημείο υπολογισμού 0.5 m, Σχήμα 5.5) παρουσίαζε παρόμοιες μεταβολές, όπως και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου $D_{i,1.8}$ (Σχήμα 5.3), με ακόμη μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των δύο περιόδων, πριν και μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου. Πριν το άσπρισμα, το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα σημείωνε τη μέγιστη τιμή του, περίπου 7 kPa, κατά τη διάρκεια του απογεύματος, ενώ ήταν λιγότερο από 4 kPa στις 8 Ιουλίου και λιγότερο από 3 kPa στις 16 Ιουλίου. Κατά μέσο όρο, για το διάστημα από 9:00 έως 19:00, η μέση μείωση που παρατηρήθηκε στο D_c λόγω του ασπρίσματος του θερμοκηπίου ήταν σημαντικά μεγαλύτερη (περίπου 2.5 έως 3 kPa) από αυτή που παρατηρήθηκε στο έλλειμμα κορεσμού του αέρα (1.5 έως 2 kPa). Όπως παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα, το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα ήταν χαμηλότερο στις 16 Ιουλίου από ότι στις 8 Ιουλίου.



Σχήμα 5.5. Ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού καλλιέργειας-αέρα D_c (kPa), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).

5.1.4 Επίδραση του ασπρίσματος στον καταμερισμό της ενέργειας σε αισθητή και λανθάνουσα στο επίπεδο της καλλιέργειας

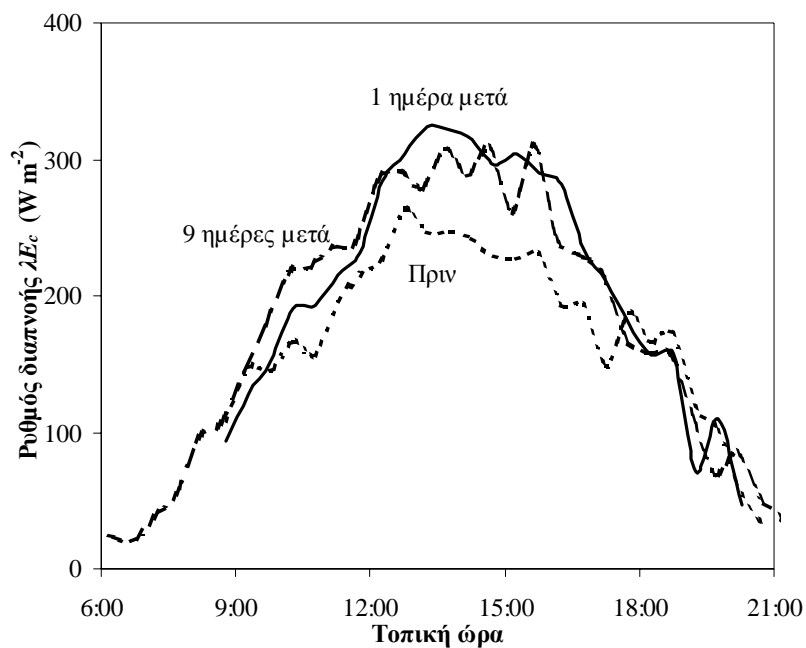
5.1.4.1 Ρυθμός διαπνοής

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία του ρυθμού διαπνοής της καλλιέργειας λE_c , κατά τη διάρκεια των τριών ημερών. Μετά το άσπρισμα της οροφής του θερμοκηπίου παρατηρήθηκε 18% αύξηση στο ρυθμό διαπνοής της καλλιέργειας. Οι σημαντικότερες διαφορές παρατηρήθηκαν κυρίως κατά το θερμότερο διάστημα της ημέρας, από 10:00 έως 17:00.

5.1.4.2 Αισθητή ενέργεια της καλλιέργειας

Η ημερήσια πορεία της ροής αισθητής ενέργειας της καλλιέργειας H_c (Σχήμα 5.7) αποκαλύπτει μια ριζική αλλαγή στον καταμερισμό της ενέργειας στο επίπεδο της

καλλιέργειας, κάτι που φάνηκε αρχικά και από τις διαφορές στη διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα, πριν και μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου. Η αισθητή ενέργεια είχε θετικές τιμές πριν την εφαρμογή του ασπρίσματος του θερμοκηπίου και αρνητικές μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου. Οι διακυμάνσεις που παρατηρήθηκαν στην τιμή της H_c πριν το άσπρισμα, οφείλονταν πιθανόν στην επίδραση του σκελετού του θερμοκηπίου (πρόσπτωση της άμεσης ακτινοβολίας) στον αισθητήρα μέτρησης της καθαρής ακτινοβολίας. Οι διακυμάνσεις αυτές δεν παρατηρήθηκαν μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου, αφού η ακτινοβολία που εισερχόταν στο θερμοκήπιο ήταν κυρίως διάχυτη.

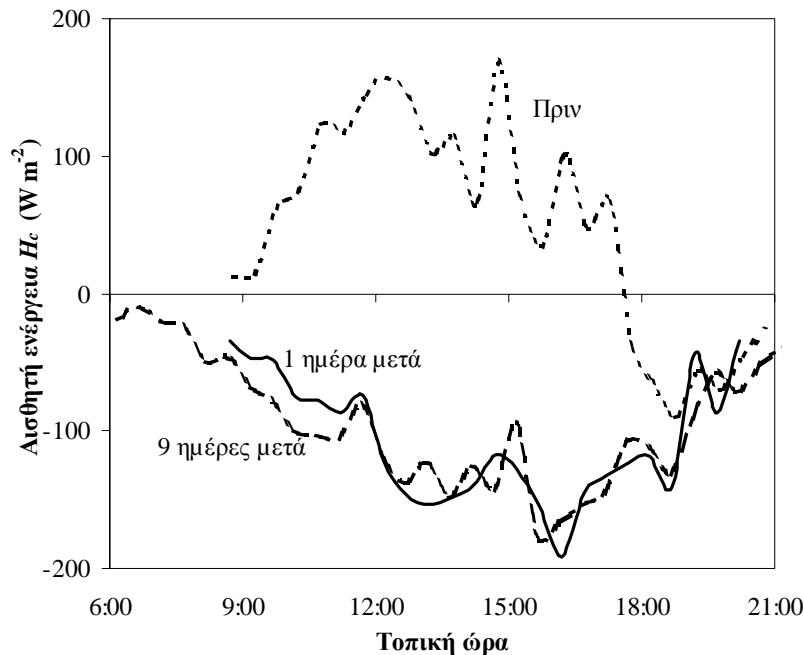


Σχήμα 5.6. Ημερήσια πορεία του ρυθμού διαπνοής της καλλιέργειας λE_c ($W m^{-2}$), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).

5.1.4.3 Λόγος Bowen

Πριν το άσπρισμα, ο λόγος του Bowen β ($= H_c/\lambda E_c$), είχε θετικές τιμές κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας στο εύρος 0.4 έως 0.8, εκτός περιόδων νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα. Οι λόγοι που προκαλούσαν τις διακυμάνσεις του λόγου Bowen

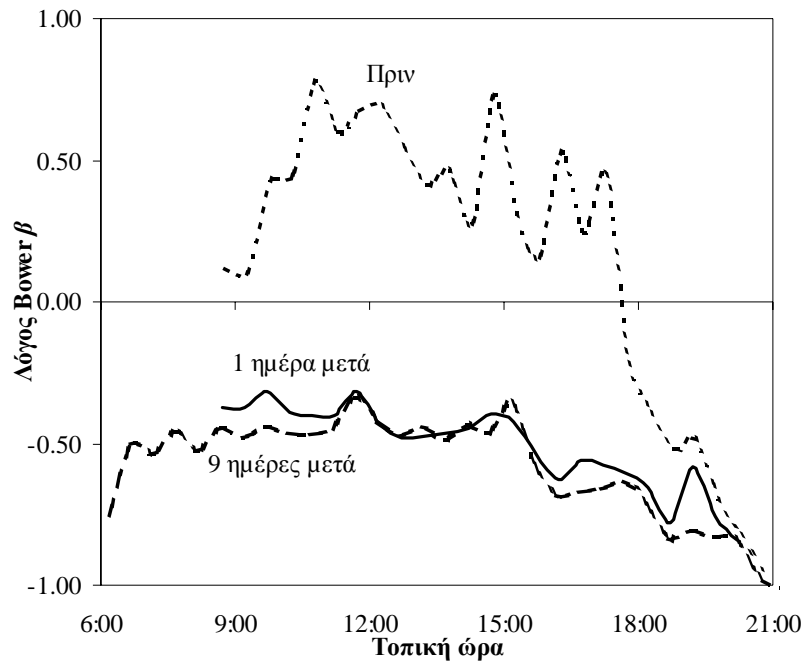
πριν το άσπρισμα του θερμοκηπίου, μπορούμε να πούμε ότι ήταν οι ίδιοι με αυτούς που προκαλούσαν τις διακυμάνσεις στην αισθητή ενέργεια. Μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου, ο β ήταν αρνητικός και μειώνονταν σταθερά κατά τη διάρκεια της ημέρας με τιμές από -0.4 έως -0.6 (Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.7. Ημερήσια πορεία της ροής αισθητής ενέργειας H_c ($W m^{-2}$), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).

5.1.5 Στοματική και αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας

Η μέση τιμή της αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας g_a υπολογίστηκε για κάθε ημέρα ξεχωριστά από τη γραμμική σχέση που συνδέει την αισθητή ενέργεια H_c με τη διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ΔT_c (σχέση 2.27). Οι τιμές της αεροδυναμικής αγωγιμότητας που υπολογίστηκαν για τις τρεις ημέρες ήταν παρόμοιες με διακυμάνσεις από 35 έως 52 mm s^{-1} . Στους υπολογισμούς που γίνονται στη συνέχεια, η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας θεωρήθηκε σταθερή με τιμή 40 mm s^{-1} .

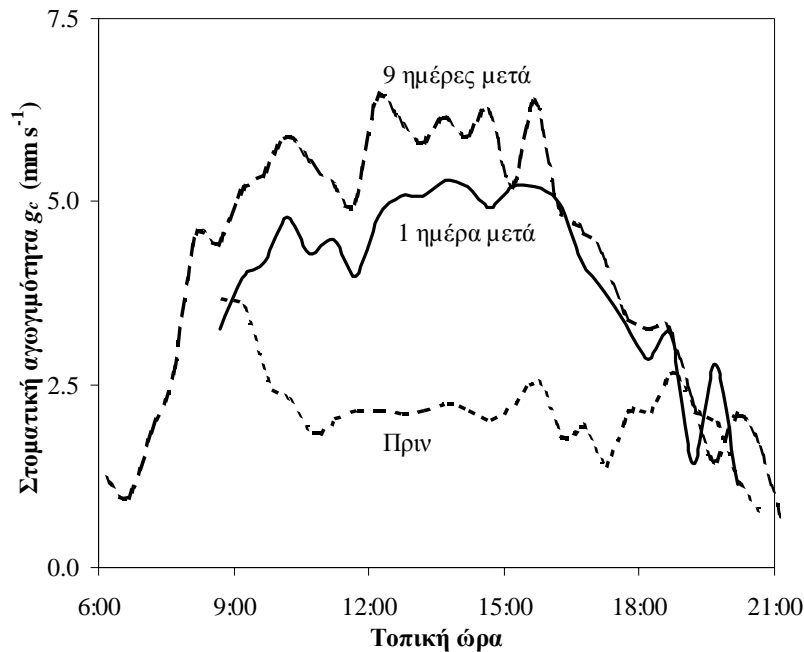


Σχήμα 5.8. Ημερήσια πορεία του λόγου Bower β , πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— —).

Πριν το άσπρισμα του θερμοκηπίου, η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_c έπαιρνε τη μέγιστη τιμή της νωρίς το πρωί (4 mm s^{-1} στις 9:00) και στη συνέχεια μειώνονταν απότομα, μέχρι να πάρει δύο ώρες αργότερα, την τιμή των 2.5 mm s^{-1} . Αργά το απόγευμα σημειωνόταν μια μικρή αύξηση στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας (Σχήμα 5.9).

Μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου, παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στην ημερήσια πορεία της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας.

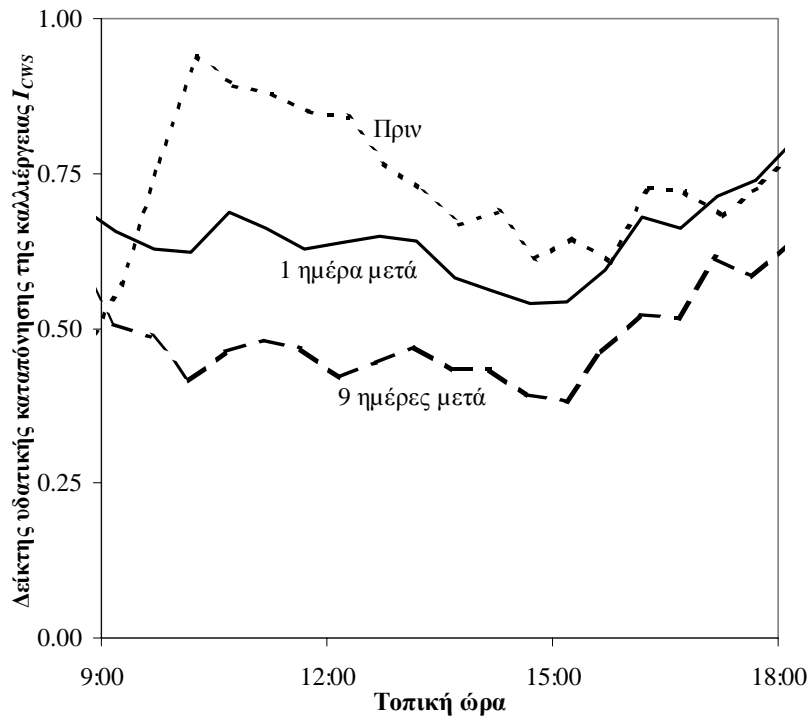
Συγκεκριμένα, την ημέρα αμέσως μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου (8 Ιουλίου), η τιμή της στοματικής αγωγιμότητας στις 9:00 το πρωί ήταν η ίδια, όπως και στις 28 Ιουνίου, με τη διαφορά ότι η τιμή αυτή διατηρήθηκε –αυξανόμενη ελαφρά μέχρι τα 5 mm s^{-1} – για όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η αρχική τιμή της αγωγιμότητας στις 9:00 το πρωί της 16^{ης} Ιουλίου ήταν μεγαλύτερη (5 mm s^{-1}), ενώ άγγιξε και συνέχισε να κινείται στο όριο των 6 mm s^{-1} το απόγευμα, παρουσιάζοντας έτσι παρόμοια πορεία με αυτή της 8^{ης} Ιουλίου.



Σχήμα 5.9. Ημερήσια πορεία της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας g_c (mm s^{-1}), πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).

5.1.6 Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας

Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας I_{CWS} , ο οποίος υπολογίστηκε όπως και στην παράγραφο 4.1.4. Από το Σχήμα 5.10, μπορούμε να πούμε ότι η καλλιέργεια καταπονούνταν σημαντικά στις 28 Ιουνίου, πριν το άσπρισμα του θερμοκηπίου, με τιμές για το δείκτη υδατικής καταπόνησης κοντά ή και μεγαλύτερες από 0.9, κατά τη διάρκεια του πρωινού και μικρότερες, κοντά στο 0.7, κατά τη διάρκεια του απογεύματος. Οι τιμές του δείκτη υδατικής καταπόνησης ήταν μικρότερες την ημέρα μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου άλλα σχετικά υψηλές, με μέση τιμή του I_{CWS} περίπου 0.65. Η μείωση στο δείκτη υδατικής καταπόνησης ήταν περισσότερο σημαντική με το δείκτη να παίρνει τιμές από 0.4 έως 0.5 μία εβδομάδα μετά το άσπρισμα.



Σχήμα 5.10. Ημερήσια πορεία του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας I_{CWS} , πριν το άσπρισμα, 28 Ιουνίου 1999 (- - -), αμέσως μετά, 8 Ιουλίου 1999 (—) και 9 ημέρες μετά, 16 Ιουλίου 1999 (— — —).

5.2 Συζήτηση

5.2.1 Αλλαγές στο μικροκλίμα

Με το άσπρισμα του θερμοκηπίου, ένα παχύ σχετικά στρώμα ασβέστη εφαρμόστηκε στην εξωτερική επιφάνεια του θερμοκηπίου, προκαλώντας μείωση της ηλιακής και της καθαρής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο περίπου κατά 50% (Πίνακας 5.2). Η δραστική αυτή μείωση στο φορτίο ακτινοβολίας του θερμοκηπίου οδήγησε σε έμμεσες τροποποιήσεις των άλλων μικροκλιματικών παραμέτρων του θερμοκηπίου, όπως της θερμοκρασίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου, μέσα από τις αλληλεπιδράσεις της καλλιέργειας με το κλίμα. Οι διαφορές στην κατανομή της ενέργειας και στην αντίδραση της καλλιέργειας που προκλήθηκαν από την τροποποίηση του φορτίου της ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο, επηρέασαν θετικά τη θερμοκρασία και την υγρασία, οι τιμές των οποίων ήταν κοντά σε αυτές του εξωτερικού κλίματος. Οι ακραίες τιμές θερμοκρασίας και ελλείμματος κορεσμού του αέρα που παρατηρήθηκαν σε ύψος 1.8 m ($\approx 40^{\circ}\text{C}$ και ≈ 6 kPa) πριν το άσπρισμα του θερμοκηπίου (Σχήμα 5.2 και Σχήμα 5.3) μειώθηκαν σημαντικά μετά το άσπρισμα.

5.2.2 Επίδραση του άσπρισματος στον καταμερισμό της ενέργειας στο θερμοκήπιο

Πριν το άσπρισμα του θερμοκηπίου, ο ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας ήταν χαμηλός, περίπου το 60% της καθαρής ακτινοβολίας που απορροφούσε η καλλιέργεια. Για το λόγο αυτό, η αισθητή ενέργεια και κατά συνέπεια και ο λόγος Bowen, είχαν θετικές και σχετικά υψηλές τιμές (Σχήμα 5.7 και Σχήμα 5.8). Η καλλιέργεια δεν είχε τη δυνατότητα να μετατρέψει όλη την εισερχόμενη ακτινοβολία σε λανθάνουσα, απελευθέρωνε αισθητή ενέργεια στον αέρα του θερμοκηπίου και κατά συνέπεια συνέβαλε στη θέρμανσή του, όπως άλλωστε αποδεικνύεται και από τις υψηλές θετικές τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα (Σχήμα 5.4).

Μετά το άσπρισμα, ο ρυθμός διαπνοής ξεπερνούσε την απορροφούμενη καθαρή ακτινοβολία, οδηγώντας έτσι τη διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα, την αισθητή ενέργεια και το λόγο Bowen σε αρνητικές τιμές. Στην περίπτωση αυτή η

διαπνοή της καλλιέργειας συνέβαλε σημαντικά στην ψύξη του αέρα θερμοκηπίου, κάτι το οποίο εξηγεί την πτώση της θερμοκρασίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου.

Αγνοώντας τη ροή ενέργειας από και προς το έδαφος και υποθέτοντας ότι η αισθητή ενέργεια που απελευθερώνεται από το ακάλυπτο με καλλιέργεια έδαφος (H_g) είναι ίση με την καθαρή ακτινοβολία πάνω από την καλλιέργεια ($R_{n,a}$), εφαρμόστηκε ένα απλό ενεργειακό ισοζύγιο του αέρα του θερμοκηπίου, προκειμένου να υπολογισθεί το ποσό της αισθητής ενέργειας (H_v) που εξερχόταν διαμέσου των παράθυρων του θερμοκηπίου (Seginer 1994):

$$H_v = p H_c + (1 - p) H_g \quad (5.1)$$

Για τους υπολογισμούς, ο λόγος του ακάλυπτου προς το καλυμμένο έδαφος p θεωρήθηκε ίσος με 0.5. Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται οι υπολογισμένες τιμές διαφόρων παραμέτρων, το μεσημέρι της 28^{ης} Ιουνίου και 16^{ης} Ιουλίου, χρησιμοποιώντας μετρήσεις των ΔT_{i-o} , $R_{n,a}$, και λE_c (μέσες ωριαίες τιμές), για το ίδιο διάστημα.

Η αισθητή ενέργεια που υπολογίστηκε με αυτό τον τρόπο ήταν 242 W m^{-2} πριν από το άσπρισμα του θερμοκηπίου και μειώθηκε στα 47 W m^{-2} μετά από αυτό, κάτι που αντιστοιχεί σε μείωση της αισθητής ενέργειας που ελευθερωνόταν στο θερμοκήπιο κατά ένα συντελεστή 5.1. Παράλληλα, η διαφορά θερμοκρασίας του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα ήταν 6.1°C και μειώθηκε στους 0.9°C αντίστοιχα πριν και μετά το άσπρισμα, δίνοντας έτσι μείωση κατά ένα συντελεστή 6.8. Για το λόγο αυτό η αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου g_v (m s^{-1}), που υπολογίστηκε από τη σχέση:

$$g_v = \frac{H_v}{\rho C_p \Delta T_{i-o}} \quad (5.2)$$

είχε ανάλογα μεγέθη για τις δύο περιόδους: 31 mm s^{-1} στις 28 Ιουνίου, για μια ταχύτητα ανέμου έξω από το θερμοκήπιο $u = 3.7 \text{ m s}^{-1}$ και 42 mm s^{-1} στις 16 Ιουλίου, για μια ταχύτητα ανέμου $u = 2.1 \text{ m s}^{-1}$. Υπολογίζοντας τις ανανεώσεις του αέρα του θερμοκηπίου ανά ώρα N (= αριθμός αλλαγών του όγκου του αέρα του θερμοκηπίου

ανά ώρα, h^{-1}) από τη σχέση (2.12), με την g_v σε $m s^{-1}$, και το λόγο $V/A_g = 690 m^3/200 m^2$, οι τιμές του N βρέθηκαν να είναι $32 h^{-1}$ και $44 h^{-1}$ για την περίοδο πριν και μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι λογικές τιμές ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου για τα επίπεδα της ταχύτητας του ανέμου που επικρατούσαν και για 100% άνοιγμα του παραθύρου του θερμοκηπίου.

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία έξω από το θερμοκήπιο έφθανε τα $925 W m^{-2}$ (μέση ωριαία τιμή) το μεσημέρι. Ο Kittas *et al.* (1987) παρατήρησαν, ότι ο απαραίτητος ρυθμός ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου προκειμένου να διατηρηθεί μια διαφορά θερμοκρασίας εξωτερικού-εσωτερικού αέρα $5^{\circ}C$, για τέτοιες τιμές της ακτινοβολίας και με την υπόθεση ότι η μισή ενέργεια από την ακτινοβολία μετατρέπεται σε λανθάνουσα, είναι περίπου $50 h^{-1}$. Για την ίδια υπόθεση όσον αφορά τη λανθάνουσα ενέργεια ο απαραίτητος ρυθμός ανανέωσης του αέρα, προκειμένου να διατηρηθεί μια διαφορά $1^{\circ}C$, είναι $260 h^{-1}$.

Οι παραπάνω υπολογισμοί αποδεικνύουν ότι ο αερισμός από μόνος του δεν μπορεί να ανακουφίσει το θερμοκήπιο από το πλεονάζον θερμικό φορτίο, ιδιαίτερα όταν η διαπνοή της καλλιέργειας περιορίζεται σε ένα μικρό ποσοστό του φορτίου της ακτινοβολίας.

Πίνακας 5.3. Υπολογισμός της αισθητής ενέργειας που χανόταν από το θερμοκήπιο με αερισμό και διαφυγές H_v ($W m^{-2}$), της αεροδυναμικής αγωγιμότητας του θερμοκηπίου g_v ($mm s^{-1}$) και του ρυθμού ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου N (h^{-1}).

	G_o	G_a	$R_{n,a}$	$R_{n,int}$	λE_c	H_c	ΔT_{i-o}	H_v	g_v	N
	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$W m^{-2}$	$^{\circ}C$	$W m^{-2}$	$mm s^{-1}$	h^{-1}
28/6	925	647	332	388	236	152	6.3	242	31	32
16/7	930	322	227	164	298	-134	0.9	47	42	44

G_o = ηλιακή ακτινοβολία έξω από το θερμοκήπιο ($W m^{-2}$), G_a = εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ($W m^{-2}$), $R_{n,a}$ = καθαρή ακτινοβολία πάνω από την καλλιέργεια ($W m^{-2}$), $R_{n,int}$ = καθαρή ακτινοβολία απορροφούμενη από την καλλιέργεια ($W m^{-2}$), λE_c , λανθάνουσα ενέργεια ($W m^{-2}$), H_c = αισθητή ενέργεια καλλιέργειας-αέρα ($W m^{-2}$), ΔT_{i-o} = διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού-εξωτερικού αέρα ($^{\circ}C$). Με πλάγια γραφή παρουσιάζονται οι μετρημένες τιμές κοντά στο ηλιακό μεσημέρι.

5.2.3 Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας

Ο ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας (Σχήμα 5.6) δεν επηρεάστηκε από την εφαρμογή του ασπρίσματος του θερμοκηπίου τόσο, όσο οι άλλες μεταβλητές - ροές (π.χ. καθαρή ακτινοβολία, αισθητή ενέργεια). Η διαφορά στη λανθάνουσα ενέργεια πριν και μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου, που υπολογίστηκε - ολοκληρώθηκε για όλη τη διάρκεια της ημέρας, ήταν σχετικά μικρή. Έτσι, παρά το γεγονός ότι η εισερχόμενη στο θερμοκήπιο ακτινοβολία μειώθηκε σημαντικά μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου, η λανθάνουσα ενέργεια αυξήθηκε περίπου κατά 18%. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τις τιμές που έπαιρνε η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας (Σχήμα 5.9), η οποία ήταν περίπου διπλάσια, μετά το άσπρισμα του θερμοκηπίου. Κατά συνέπεια, καθώς το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας αέρα D_c ήταν περίπου στο μισό της τιμής του πριν το άσπρισμα (Σχήμα 5.5), ο ρυθμός διαπνοής δεν επηρεάστηκε σημαντικά. Παρατηρήθηκε έτσι μια εξισορρόπηση μεταξύ του ελλείμματος κορεσμού καλλιέργειας-αέρα και της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας η οποία επέτρεψε στην καλλιέργεια να διατηρήσει παρόμοια επίπεδα ρυθμού διαπνοής.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, κατά την περίοδο μετά το ασβέστωμα του θερμοκηπίου μέσα σε οκτώ ημέρες, η στοματική αγωγιμότητα αυξήθηκε από τα 5 στα 6 mm s^{-1} . Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την άμεση αντίδραση-ανάκαμψη της καλλιέργειας αμέσως μετά το άσπρισμα, ανάκαμψη η οποία ακολούθησε μετά από μια περίοδο υψηλής υδατικής και θερμικής καταπόνησης – όπως παρουσιάζεται για την 28^η Ιουνίου – όταν η καλλιέργεια είχε πρακτικά σταματήσει να αναπτύσσεται. Η άμεση έκπτυξη νέων φύλλων, σε συνάρτηση με την ανάκαμψη των είδη υπαρχόντων ώριμων φύλλων, κάτω από τις νέες βελτιωμένες συνθήκες του περιβάλλοντος, φαίνεται πως βελτίωσε τη λειτουργία των στομάτων στο επίπεδο της καλλιέργειας.

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο το οποίο, αν και δεν εμπίπτει στους στόχους της παρούσης εργασίας, αξίζει να σημειωθεί, είναι ο μακροχρόνιος εγκλιματισμός της καλλιέργειας της τριανταφυλλιάς σε εντελώς διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Έχει παρατηρηθεί πως η τριανταφυλλιά προσαρμόζει τις συγκεντρώσεις των ιόντων που απορροφά συναρτήσει του επιπέδου της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής της (González-Real and Baille 2000). Είναι λοιπόν πιθανό το άσπρισμα του θερμοκηπίου να έχει και μία μακροχρόνια (εποχιακή) επίδραση στη

φωτοσυνθετική ικανότητα και την παραγωγικότητα της καλλιέργειας καθώς και την ποιότητα των παραγομένων προϊόντων.

5.2.4 Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας

Η διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού του αέρα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης της υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας. Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας I_{CWS} αντιπροσωπεύει μια μέτρηση του μεγέθους της διαφοράς $1 - E_c/E_{c,p}$, όπου $E_{c,p}$ είναι η δυναμική διαπνοή μιας καλά αρδευόμενης καλλιέργειας (Jones 1992). Ο δείκτης αυτός είναι ευαίσθητος στην ηλιακή ακτινοβολία [σχέσεις (4.5) και (4.6)] και για το λόγο αυτό, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10, επηρεάστηκε σημαντικά από την εφαρμογή του ασβεστώματος στο θερμοκήπιο. Το ασβέστωμα του θερμοκηπίου μείωσε σημαντικά τα επίπεδα της υδατικής και θερμικής καταπόνησης στο θερμοκήπιο και βελτίωσε τη συμπεριφορά της καλλιέργειας συμβάλλοντας μία εβδομάδα αργότερα στην πτώση του δείκτη από το 0.65 στο 0.45. Αυτό επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα που βρέθηκαν και για την περίπτωση της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας όπου παρατηρήθηκε ανάλογη, σταδιακή βελτίωση (αύξηση), μετά το ασβέστωμα του θερμοκηπίου.

Από την πλευρά των παραγωγών, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζονται, όταν χρησιμοποιείται το άσπρισμα για τη μείωση του θερμικού φορτίου στο θερμοκήπιο, αφορά στον καθορισμό του χρόνου εφαρμογής του ασπρίσματος, καθώς επίσης και στην ένταση της σκίασης που απαιτείται. Στην περίπτωσή μας το άσπρισμα θα έπρεπε να είχε γίνει νωρίτερα διότι η καλλιέργεια ήταν ήδη υπό συνθήκες καταπόνησης, δέκα ημέρες πριν την εφαρμογή του ασπρίσματος. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν εδώ, μπορούμε να πούμε ότι ο δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο, προκειμένου να αποφασιστεί ο χρόνος ασπρίσματος του θερμοκηπίου. Η πυκνότητα του διαλύματος, από την άλλη πλευρά, που χρησιμοποιήθηκε για το ασβέστωμα του θερμοκηπίου, ήταν προφανώς επαρκής, παρά το γεγονός ότι η ένταση της σκίασης που επιτεύχθηκε ήταν της τάξης του 50 %. Αν το άσπρισμα του θερμοκηπίου γινόταν νωρίτερα δηλαδή πριν τον Ιούλιο, πιθανόν να

ήταν επιθυμητό ένα μικρότερης έντασης ασβέστωμα. Μερικοί παραγωγοί προτιμούν να ασβεστώνουν νωρίτερα αλλά με μικρότερη ένταση. Προσομοιώματα που συνυπολογίζουν τους διάφορους φυσικούς και φυσιολογικούς μηχανισμούς και τις αλληλεπιδράσεις τους στο σύστημα θερμοκήπιο (Aubinet *et al.* 1989, González-Real and Baille 2001), θα μπορούσαν ίσως να προσφέρουν περισσότερη γνώση, όσον αφορά στη μελέτη της επίδρασης της έντασης του ασβεστώματος του θερμοκηπίου και της περιόδου εφαρμογής του στην παραγωγή των θερμοκηπιακών προϊόντων.

5.3 Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα που παρουσιάσθηκαν στην ενότητα αυτή υποδηλώνουν εμφανώς το κέρδος από το ασβέστωμα του καλύμματος (γυαλιού) του θερμοκηπίου τόσο στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, όσο και στην καλλιέργεια. Οι συνθήκες υψηλής υδατικής και θερμικής καταπόνησης, στις οποίες εκτίθονταν η καλλιέργεια κατά τη διάρκεια της περιόδου πριν από το άσπρισμα του θερμοκηπίου, δεν παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια της ημέρας μετά το ασβέστωμα του θερμοκηπίου, καθώς το σύστημα καλλιέργεια-μικροκλίμα αντέδρασε άμεσα στην απότομη μεταβολή των συνθηκών ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο. Η αντίδραση αυτή του συστήματος ακολουθήθηκε από μια σταδιακή βελτίωση της φυσιολογικής κατάστασης της καλλιέργειας, όπως παρατηρήθηκε και από την αύξηση στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας και τη μείωση του δείκτη υδατικής καταπόνησης, μία εβδομάδα μετά την εφαρμογή του ασβεστώματος.

Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό, διότι υποδηλώνει ότι η καλλιέργεια της τριανταφυλλιάς έχει την ικανότητα να αντέχει σε συνθήκες καταπόνησης για σχετικά μεγάλες περιόδους και ότι μπορεί να επανέρχεται και να λειτουργεί φυσιολογικά μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα.

**Κεφάλαιο 6. Μελέτη της επίδρασης του δροσισμού στο
μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια**

6.1 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή αφορούν δύο διαδοχικές περιόδους τριών ημερών κατά τη διάρκεια του Αυγούστου του 1998 και συγκεκριμένα:

- τρεις ηλιόλουστες ημέρες χωρίς το σύστημα δροσισμού σε λειτουργία (19, 20, 21 Αυγούστου), με ασπρισμένο θερμοκήπιο και
- τρεις ηλιόλουστες ημέρες με το σύστημα δροσισμού σε λειτουργία (25, 26, 27 Αυγούστου), με ασπρισμένο θερμοκήπιο.

Τα δεδομένα καλύπτουν το διάστημα από 8:00 έως 19:00 και είναι μέσες τιμές 30 λεπτών. Το ηλιακό μεσημέρι αντιστοιχούσε περίπου στις 13:00.

6.1.1 Εξωτερικές συνθήκες

Τα χαρακτηριστικά του εξωτερικού κλίματος (μέσες τιμές για το διάστημα 8:00 έως 19:00) κατά τη διάρκεια των δύο περιόδων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στις εξωτερικές συνθήκες μεταξύ των δύο περιόδων.

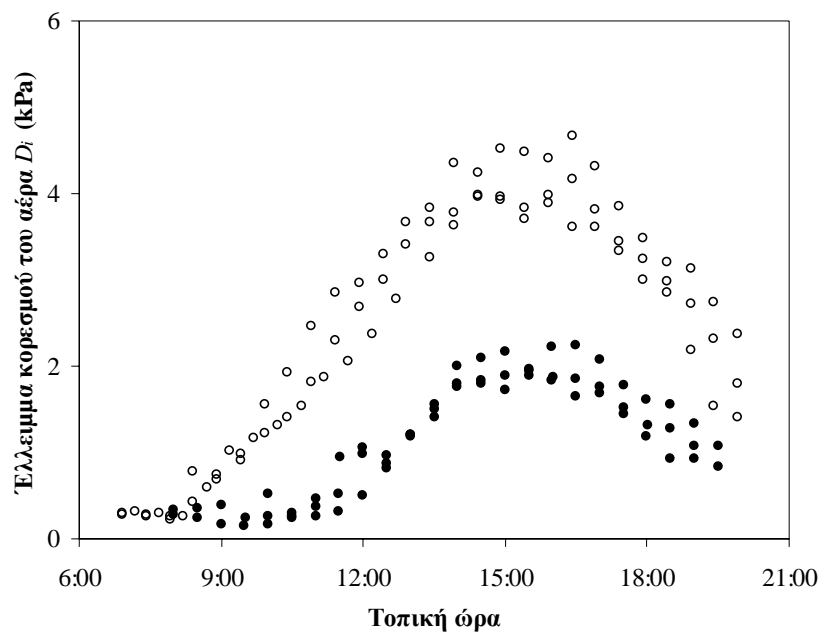
Πίνακας 6.1. Μέσες τιμές (για το διάστημα 8:00 έως 19:00) των παραμέτρων του εξωτερικού κλίματος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων χωρίς το σύστημα δροσισμού, 19-20-21 Αυγούστου 1998 και με το σύστημα δροσισμού 25-26-27 Αυγούστου 1998.

Περίοδος	G_o W m ⁻²	T_o °C	D_o kPa	e_o kPa
19-20-21 Αυγούστου	541	29.3	2.07	2.02
25-26-27 Αυγούστου	513	29.2	1.80	2.26

G_o = ηλιακή ακτινοβολία (W m⁻²), T_o = θερμοκρασία αέρα (°C), D_o = έλλειμμα κορεσμού του αέρα (kPa), e_o = πίεση ατμών του αέρα (kPa).

6.1.2 Εσωτερικό μικροκλίμα

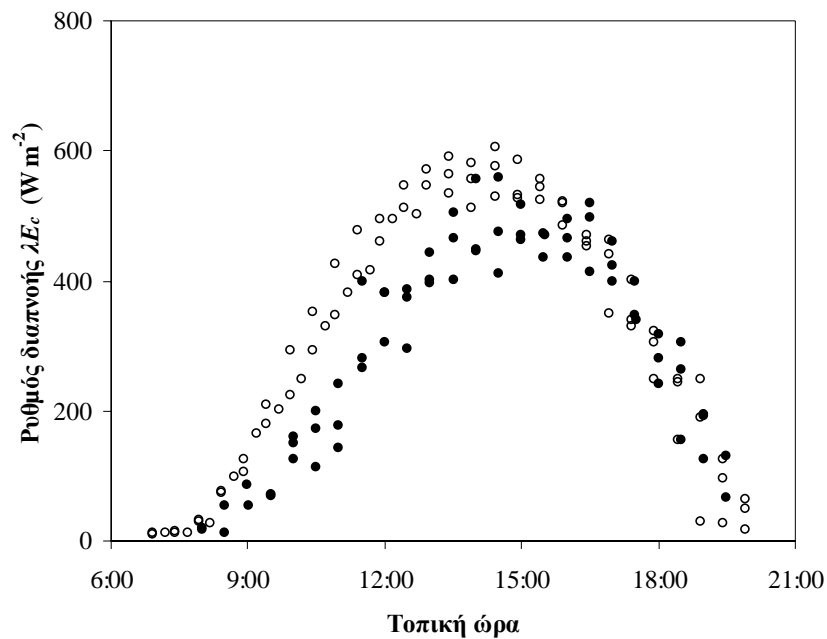
Η ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στο θερμοκήπιο κατά το διάστημα 8:00 έως 19:00 ήταν περίπου 32°C, χωρίς το σύστημα δροσισμού και 29.6°C, όταν το σύστημα δροσισμού βρισκόταν σε λειτουργία. Η μέση τιμή του ελλείμματος κορεσμού του αέρα για το ίδιο διάστημα ήταν περίπου 2.7 και 1.1 kPa αντίστοιχα.



Σχήμα 6.1. Πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα D_i (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (o) 19-20-21 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 25-26-27 Αυγούστου, με δροσισμό.

6.1.3 Ρυθμός διαπνοής

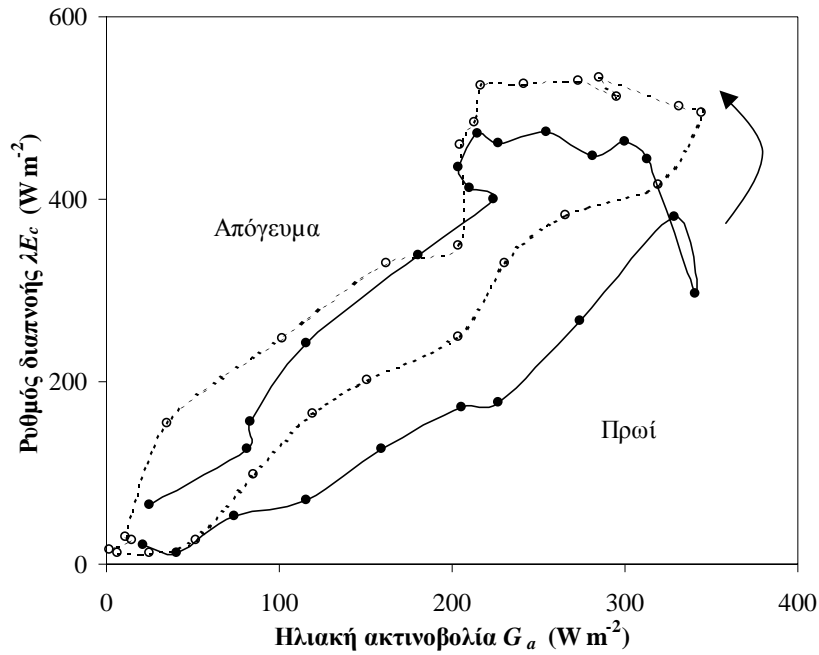
Η ημερήσια πορεία της διαπνοής παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η διαπνοή ήταν μικρότερη όταν λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού, αλλά η διαφορά ήταν σχετικά μικρή, φθάνοντας περίπου το 10 έως 15 % σε ημερήσια βάση. Η μεγαλύτερη διαφορά παρουσιαζόταν κυρίως κατά τις πρωινές ώρες.



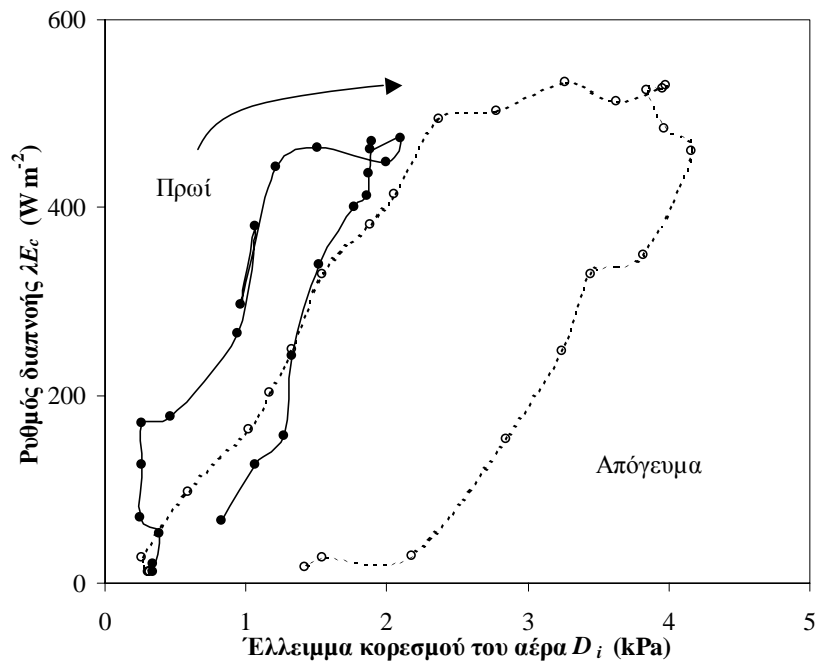
Σχήμα 6.2. Ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας λE_c ($W m^{-2}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (ο) 19-20-21 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 25-26-27 Αυγούστου, με δροσισμό.

Η σχέση της διαπνοής με την ηλιακή ακτινοβολία και το έλλειμμα κορεσμού παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.3.α και 6.3.β αντίστοιχα.

Και στις δύο περιπτώσεις παρουσιάζεται υστέρηση στην καμπύλη της διαπνοής, αντίθετη από την πορεία των δεικτών του ρολογιού, στην περίπτωση της διαπνοής με την ακτινοβολία και σύμφωνη με την πορεία των δεικτών του ρολογιού, στην περίπτωση της διαπνοής με το έλλειμμα κορεσμού του αέρα.



(α)

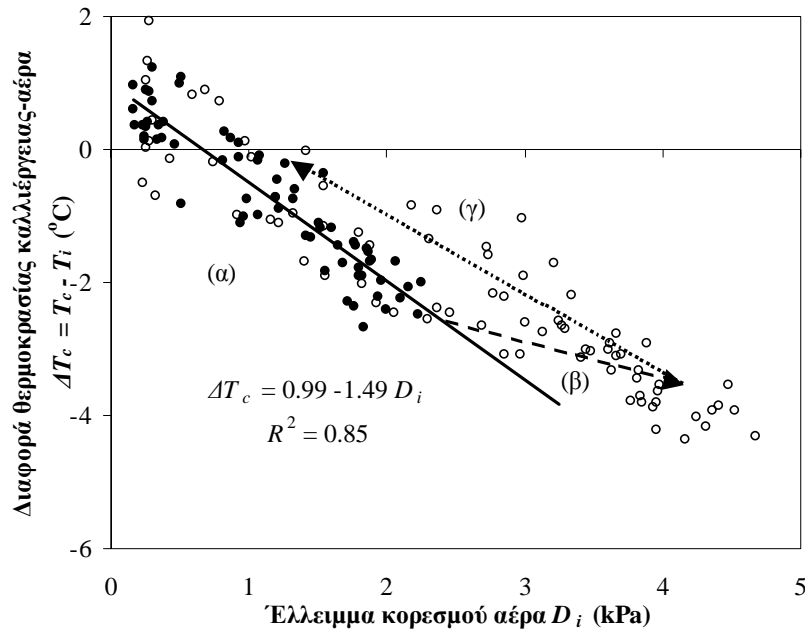


(β)

Σχήμα 6.3. (α) Ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας λE_c ($W m^{-2}$) συναρτήσσει της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω από την καλλιέργεια G_a ($W m^{-2}$). (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό. (β) Ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας λE_c ($W m^{-2}$) συναρτήσσει του ελλείμματος κορεσμού του αέρα D_i (kPa). (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό.

6.1.4 Διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα

Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζεται η μεταβολή της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας αέρα συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού του αέρα.



Σχήμα 6.4. Διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ΔT_c ($^{\circ}\text{C}$) συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού του αέρα D_i (kPa). Οι μετρήσεις έγιναν κατά το διάστημα 8:00 έως 19:00. (—) με δροσισμό (27 Αυγούστου) και χωρίς δροσισμό μέχρι τις 10:00 στις 19 Αυγούστου, (- - -) χωρίς δροσισμό 10:00 έως 17:00 (19 Αυγούστου), (•••) χωρίς δροσισμό 17:00 έως 19:00 (19 Αυγούστου). (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό.

Όταν λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού, τα δεδομένα εμφανίζονταν να παρουσιάζουν την ίδια τάση, η οποία έδινε μία ευθεία γραμμή. Η γραμμική παλινδρόμηση για όλα τα σημεία ($n = 67$, όπου n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων), όταν λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού, έδωσε τη σχέση:

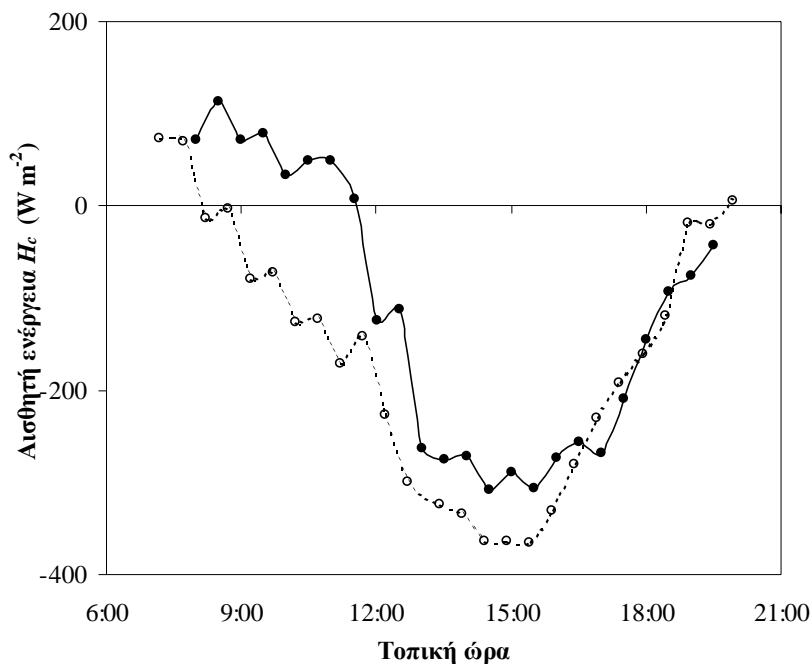
$$\Delta T_c = 0.99 - 1.49 D_i \quad (6.1)$$

με συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.85$.

Όταν δε λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού, μπορούμε να διακρίνουμε διαφορετικές τάσεις, ανάλογα με την περίοδο της ημέρας (Σχήμα 6.4): (α) κατά τις πρωινές ώρες, μέχρι τις 10:00, τα σημεία ήταν κοντά στη γραμμή παλινδρόμησης των σημείων με το σύστημα δροσισμού, (β) από τις 10:00 έως τις 17:00, η διαφορά θερμοκρασίας συνέχιζε να αυξάνεται αρνητικά, αλλά με μικρότερο ρυθμό και (γ) αργά το απόγευμα, η διαφορά θερμοκρασίας άρχισε να μικραίνει, παίρνοντας τελικά θετικές τιμές κατά τη δύση του ήλιου.

6.1.5 Η Αισθητή ενέργεια και ο λόγος Bowen

Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία της αισθητής ενέργειας για τις ημέρες: 19 Αυγούστου (χωρίς το σύστημα δροσισμού) και 27 Αυγούστου (με το σύστημα δροσισμού).

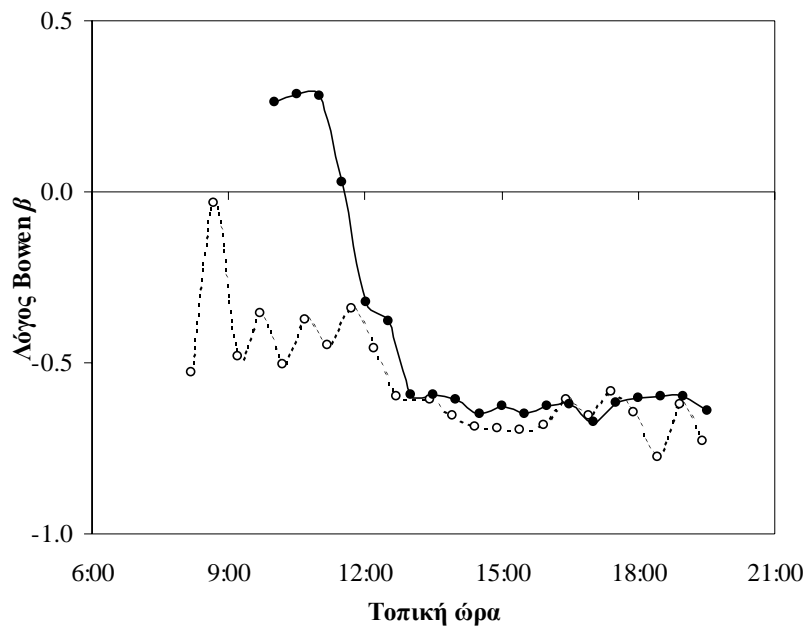


Σχήμα 6.5. Ροή αισθητής ενέργειας H_c ($W m^{-2}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η αισθητή ενέργεια έπαιρνε ισχυρά αρνητικές τιμές με τις μέγιστες (αρνητικές) τιμές να φθάνουν περίπου στα $-360 W m^{-2}$ και -300

$W m^{-2}$ για συνθήκες χωρίς το σύστημα δροσισμού και με το σύστημα δροσισμού σε λειτουργία, αντίστοιχα. Η αισθητή ενέργεια ήταν κατά μέσο όρο μικρότερη κατά $100 W m^{-2}$, όταν το σύστημα δροσισμού βρισκόταν σε λειτουργία, με τη διαφορά να είναι μεγαλύτερη κατά τις πρώτες πρωινές ώρες.

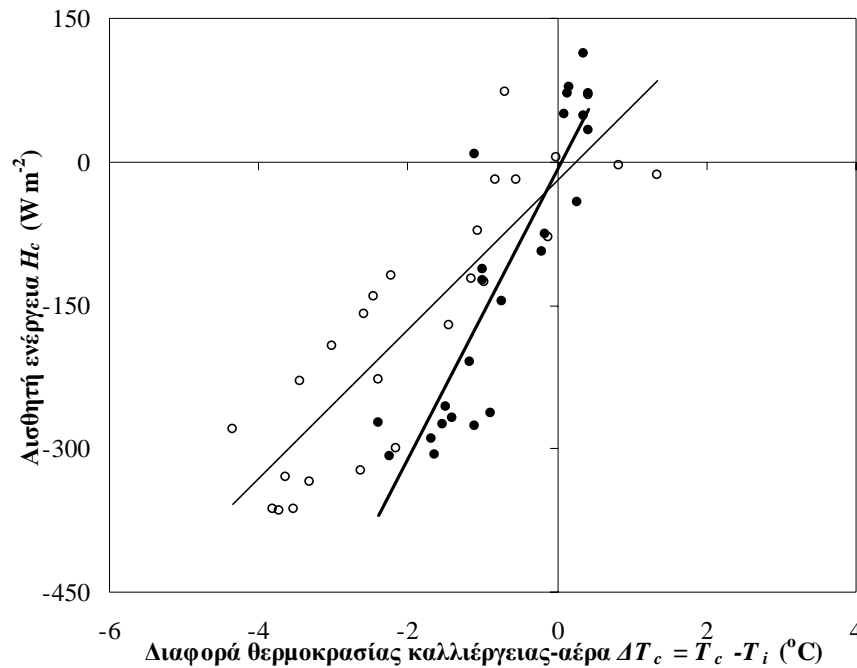
Η ημερήσια πορεία του λόγου Bowen (Σχήμα 6.6) ήταν παρόμοια και στις δύο περιπτώσεις μετά τις 12:00. Εκτός από τις πρωινές ώρες, ο λόγος Bowen β είχε αρνητικές και σχετικά σταθερές τιμές κατά τη διάρκεια της ημέρας ($\beta \approx -0.6$ έως 0.7).



Σχήμα 6.6. Λόγος Bowen β κατά τη διάρκεια της ημέρας. (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό.

6.1.6 Αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας

Η σχέση της αισθητής ενέργειας με τη διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα φαίνεται στο Σχήμα 6.7, για τις ημέρες 19 και 27 Αυγούστου.



Σχήμα 6.7. Ροή αισθητής ενέργειας H_c ($W m^{-2}$) συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ΔT_c ($^{\circ}C$). Οι ευθείες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις γραμμές γραμμικής παλινδρόμησης των πειραματικών δεδομένων. (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό.

Η σχέση της αισθητής ενέργειας με τη διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ήταν γραμμική. Από τη σχέση αυτή για τις δύο περιπτώσεις (χωρίς και με το σύστημα δροσισμού) προέκυψαν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$H_c = 78.0 \Delta T_c - 19.2 \quad (6.2)$$

για την περίπτωση χωρίς το σύστημα δροσισμού, με συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.77$ και

$$H_c = 150.1 \Delta T_c - 7.5 \quad (6.3)$$

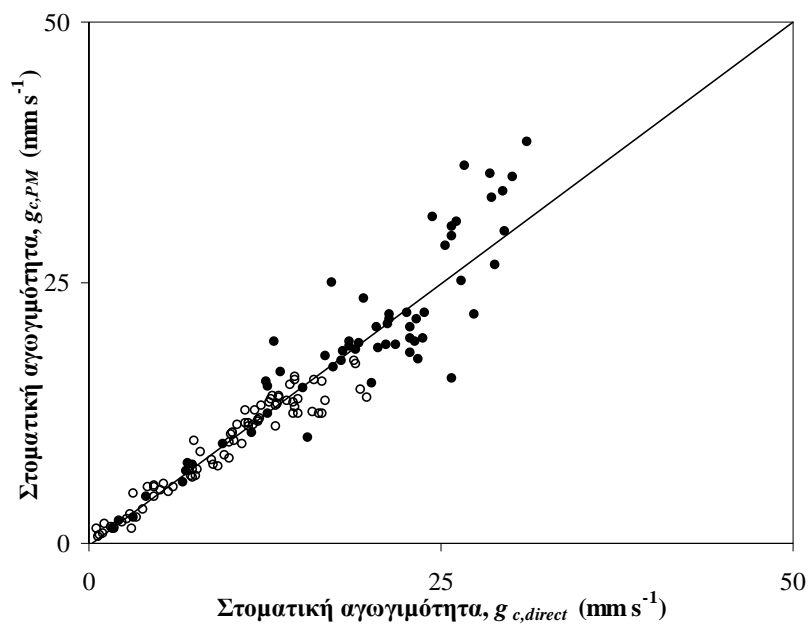
για την περίπτωση με το σύστημα δροσισμού, με συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.79$

Η κλίση της καμπύλης παλινδρόμησης έδωσε τη δυνατότητα υπολογισμού της μέσης αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, με $g_a = 62 \text{ mm s}^{-1}$ και 120 mm

s^{-1} , για συνθήκες μη δροσισμού και δροσισμού αντίστοιχα. Παρόμοιες τάσεις βρέθηκαν και για τις υπόλοιπες ημέρες, με μικρές μόνο μεταβολές στην κλίση και το σταθερό όρο. Μία μέση τιμή για την αεροδυναμική αγωγιμότητα βρέθηκε με τον ίδιο τρόπο και για τις υπόλοιπες ημέρες και χρησιμοποιήθηκε κατόπιν για τον υπολογισμό της στοματικής αγωγιμότητας.

6.1.7 Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας

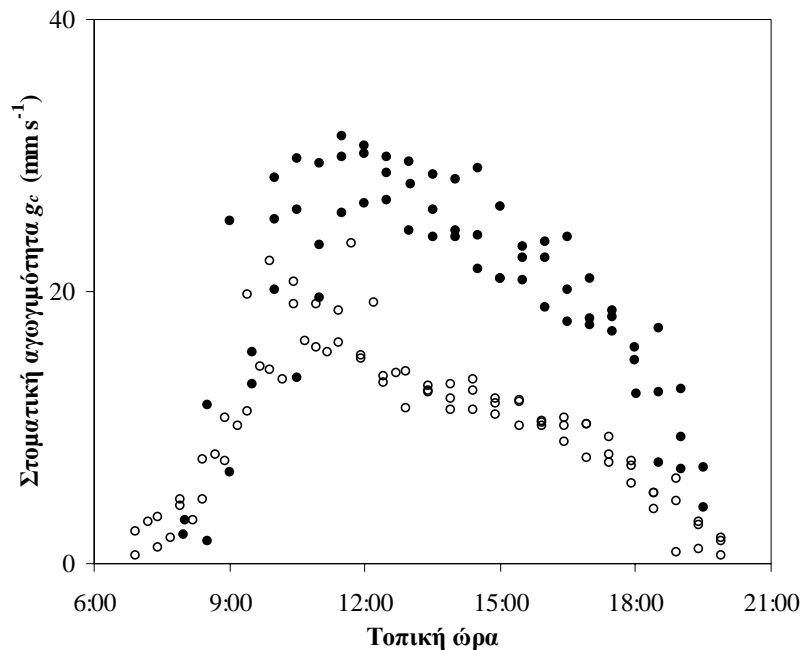
Η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας υπολογίστηκε από τις σχέσεις (2.26) και (2.29). Οι δύο τρόποι υπολογισμού της στοματικής αγωγιμότητας έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα και στις δύο περιπτώσεις (Σχήμα 6.8), με κλίση κοντά στο ένα και συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.96$ για 147 παρατηρήσεις.



Σχήμα 6.8. Σύγκριση της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση των Penman-Monteith $g_{c,PM}$ ($mm s^{-1}$), με τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, όπως υπολογίστηκε από την σχέση (2.29) $g_{c,direct}$ ($mm s^{-1}$). (ο) 19-20-21 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 25-26-27 Αυγούστου, με δροσισμό.

Παρακάτω, προκειμένου να υπολογιστεί η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, χρησιμοποιήθηκε η σχέση (2.29), η οποία εκτιμά τη στοματική αγωγιμότητα συναρτήσει της διαπνοής.

Η ημερήσια μεταβολή της στοματικής αγωγιμότητας υπό συνθήκες δροσισμού και μη, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.9.



Σχήμα 6.9. Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_c (mm s^{-1}) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (ο) 19-20-21 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 25-26-27 Αυγούστου, με δροσισμό.

Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρήθηκε μια απότομη αύξηση της αγωγιμότητας στην αρχή της ημέρας, ακολουθούμενη από μια περισσότερο προοδευτική μείωση το απόγευμα. Η μέγιστη στοματική αγωγιμότητα υπό συνθήκες δροσισμού ήταν περίπου 30 mm s^{-1} (ή 7.5 mm s^{-1} , αν αναφερόμαστε ανά μονάδα φύλλου) και παρατηρούνταν περίπου στις 13:00, ενώ, υπό συνθήκες μη δροσισμού, η μέγιστη αγωγιμότητα ήταν περίπου 15 mm s^{-1} (ή 3.8 mm s^{-1} , αν αναφερόμαστε ανά μονάδα φύλλου) και παρατηρούνταν νωρίτερα, περίπου στις 11:00. Μέχρι τις 10:00 το πρωί, η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας ήταν περίπου η ίδια και στις δύο περιπτώσεις, με ή χωρίς το σύστημα δροσισμού σε λειτουργία.

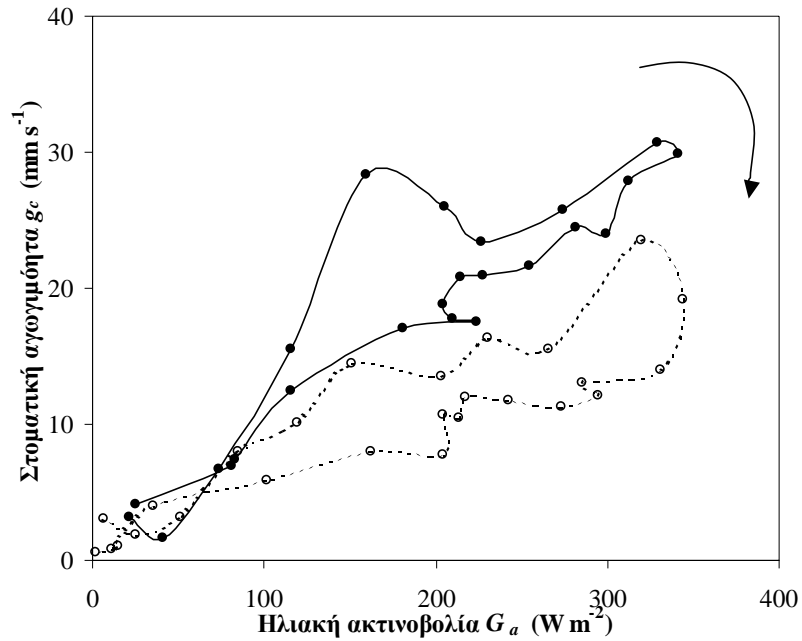
Η μεταβολή της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.10.α και 6.10.β αντίστοιχα.

Όπως και στην περίπτωση της διαπνοής, παρατηρήθηκε υστέρηση μεταξύ της αγωγιμότητας και της ηλιακής ακτινοβολίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα. Η καμπύλη της υστέρησης είχε φορά, σύμφωνη με την πορεία των δεικτών του ρολογιού και στις δύο περιπτώσεις. Μπορούμε να δούμε ότι για την ίδια τιμή της ακτινοβολίας ή του ελλείμματος κορεσμού του αέρα, η αγωγιμότητα ήταν σημαντικά μεγαλύτερη το πρωί παρά το απόγευμα.

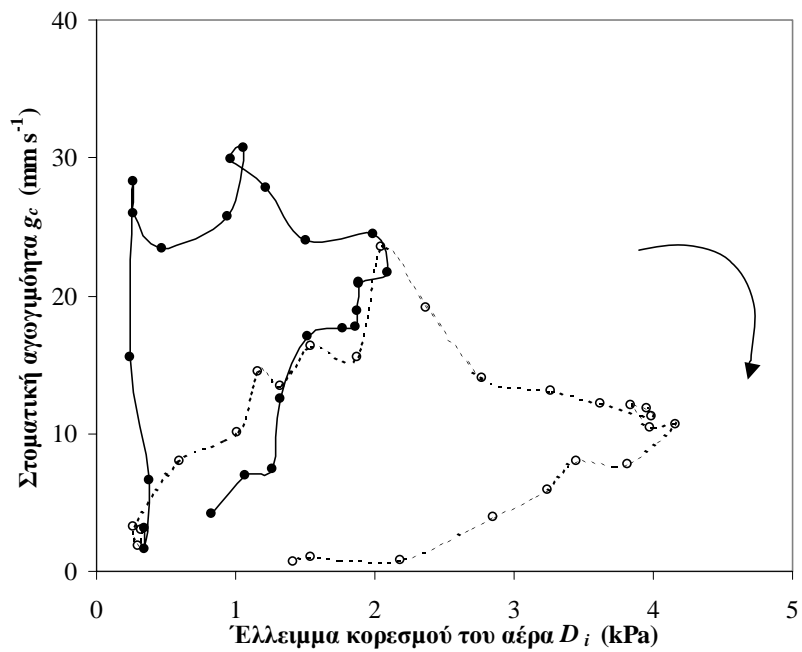
6.1.8 Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας

Η ημερήσια μεταβολή του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας, ο οποίος υπολογίστηκε όπως και στην παράγραφο 4.1.4, με τιμή για τη μέγιστη στοματική αγωγιμότητα $g_M = 30 \text{ mm s}^{-1}$, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11.

Οι μεγαλύτερες τιμές του δείκτη νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα, οφείλονται στη χαμηλή ηλιακή ακτινοβολία και δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην αξιολόγηση του επιπέδου της υδατικής ή θερμικής καταπόνησης. Σύμφωνα με το δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας, η καλλιέργεια δε βρισκόταν υπό συνθήκες καταπόνησης όταν λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού (I_{CWS} κοντά στο 0). Αντίθετα, βρισκόταν σε συνθήκες χαμηλής υδατικής καταπόνησης, με το δείκτη να παίρνει τιμές κοντά στο 0.15 νωρίς το πρωί και να αυξάνεται ελαφρά έως την τιμή του 0.25 αργά το απόγευμα, όταν δε λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού.

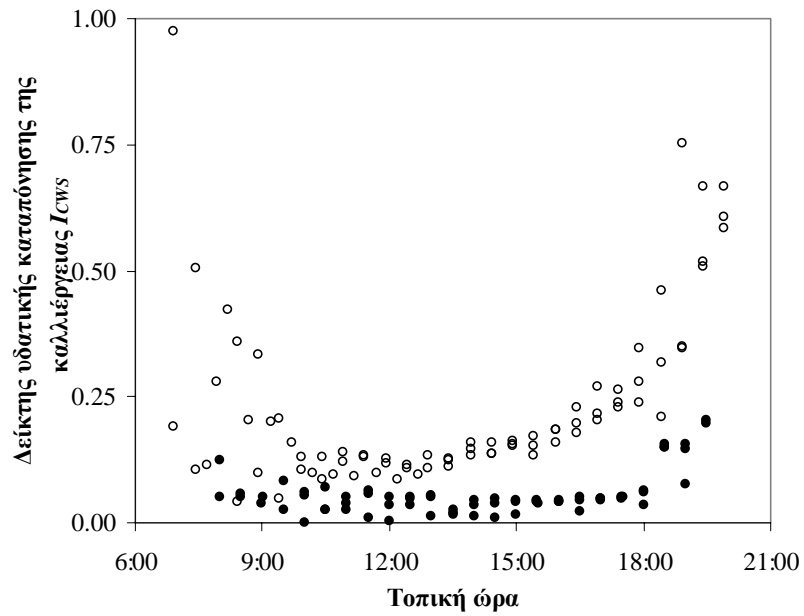


(α)



(β)

Σχήμα 6.10. (α) Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_c (mm s⁻¹) συναρτήσει της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας G_a (W m⁻²). (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό. (β) Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_c (mm s⁻¹) συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού του αέρα D_i (kPa). (ο) 19 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 27 Αυγούστου, με δροσισμό.



Σχήμα 6.11. Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας I_{CWS} κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας υπολογίστηκε με τιμή για την $g_M = 30 \text{ mm s}^{-1}$. (ο) 19-20-21 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 25-26-27 Αυγούστου, με δροσισμό.

6.2 Συζήτηση

6.2.1 Αλλαγές στο μικροκλίμα

Όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 6.1, το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, διατηρώντας τιμές κάτω από τα 2 kPa, επηρεάστηκε σημαντικά από τη χρήση του συστήματος δροσισμού. Αντίθετα, υπό συνθήκες μη δροσισμού, η μέγιστη τιμή του ελλείμματος κορεσμού που παρατηρήθηκε, ήταν περίπου 5 kPa. Η θερμοκρασία του αέρα μειώθηκε επίσης σημαντικά όταν χρησιμοποιήθηκε το σύστημα δροσισμού (τα αποτελέσματα δεν παρουσιάζονται). Οι αντίθετες αυτές τάσεις για τη θερμοκρασία και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα, οι οποίες εξάλλου αναμενόταν, επιβεβαίωσαν ότι η ψύξη με εξάτμιση είναι αποτελεσματική στη μείωση της θερμοκρασίας και του ελλείμματος κορεσμού ταυτόχρονα.

6.2.2 Κατανομή της ενέργειας

Ο ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας που παρατηρήθηκε κατά την περίοδο των μετρήσεων ήταν πολύ υψηλός (πάνω από 600 W m^{-2} , Σχήμα 6.2). Η αισθητή ενέργεια ήταν επίσης σε υψηλά επίπεδα (Σχήμα 6.5), ενώ ο λόγος Bowen κατά τη διάρκεια της ημέρας είχε τιμές κοντά στο - 0.6 (Σχήμα 6.6).

Τέτοιες υψηλές τιμές της λανθάνουσας και αισθητής θερμότητας οι οποίες ξεπερνούν την ηλιακή ακτινοβολία κατά ένα παράγοντα 2, ή ακόμη και περισσότερο στην περίπτωση της λανθάνουσας ενέργειας, μπορούν να εξηγηθούν από το φαινόμενο της 'όασης', το οποίο δημιουργείται από την παρουσία μεγάλου ποσοστού ($p = 0.5$) εδάφους ακάλυπτου με φυτά και κατά το οποίο ο αέρας γύρω από την καλλιέργεια είναι θερμότερος από αυτή, προσφέροντας έτσι επιπλέον ενέργεια στην καλλιέργεια (Jones 1992, Seginer 1994). Ένα μεγάλο μέρος της καθαρής ακτινοβολίας, απορροφούνταν από το ακάλυπτο έδαφος, μετατρέπονταν σε αισθητή ενέργεια και συνεισέφερε στην αύξηση της διαπνοής της καλλιέργειας. Υποθέτοντας, με έναν πρώτο υπολογισμό, ότι η αισθητή θερμότητα του ακάλυπτου εδάφους ήταν ίση με την καθαρή ακτινοβολία $R_{n,a}$, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η καλλιέργεια είχε να μετατρέψει σε λανθάνουσα ενέργεια ποσό ίσο περίπου με το διπλάσιο της

καθαρής ακτινοβολίας ($2 \times R_{n,a}$), το οποίο αντιστοιχεί χονδρικά στο ποσό της διαπνοής που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Οι διαφορές στην αισθητή θερμότητα, μεταξύ των περιόδων δροσισμού και μη, ήταν περίπου 100 W m^{-2} (Σχήμα 6.5). Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα δροσισμού συνέβαλε στην ανακούφιση από το υψηλό θερμικό φορτίο του θερμοκηπίου σε ποσό ίσο με 100 W m^{-2} . Όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 3.2.1.2, αν όλο το νερό που ψεκαζόταν από το σύστημα δροσισμού εξατμιζόταν, η ισοδύναμη αισθητή ενέργεια που θα χρειαζόταν ή η δυναμικότητα του συστήματος δροσισμού, θα ήταν περίπου 245 W m^{-2} . Έτσι, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι μόνο ένα μέρος (περίπου 40 έως 50%) του ψεκαζόμενου νερού συνέβαλε στην ψύξη του θερμοκηπίου. Παρατηρείται λοιπόν ότι: (α) ένα σημαντικό ποσοστό του ψεκαζόμενου νερού μεταφερόταν μέσω του ανοίγματος του παραθύρου κατευθείαν έξω από το θερμοκήπιο και (β) η συνεισφορά του συστήματος δροσισμού στην ψύξη του θερμοκηπίου ήταν μόνο ένα μικρό κομμάτι (περίπου 0.15 - 0.25), συγκρινόμενο με τη συνεισφορά της διαπνοής στο δροσισμό του θερμοκηπίου.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, όταν λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού, η μέση αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας ήταν διπλάσια (120 mm s^{-1}), συγκρινόμενη με την αγωγιμότητα υπό συνθήκες μη δροσισμού (περίπου 60 mm s^{-1}). Αυτό οφείλονταν στην επίδραση των ανεμιστήρων του συστήματος δροσισμού, οι οποίοι συνέβαλαν στην ανάμειξη του αέρα και στη μετατροπή της ροής του αέρα στο θερμοκήπιο σε τυρβώδη.

6.2.3 Αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας

Ο ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας (Σχήμα 6.2) δεν επηρεάστηκε από το σύστημα δροσισμού σε τέτοιο βαθμό, όσο το έλλειμμα κορεσμού του αέρα. Παρόλο που η διαπνοή ήταν μικρότερη υπό συνθήκες δροσισμού, οι διαφορές με τη διαπνοή υπό συνθήκες μη δροσισμού ήταν περιορισμένες. Οι μέγιστες τιμές της διαπνοής που επιτεύχθηκαν κατά τη διάρκεια των δύο περιόδων ήταν σχετικά κοντά και επιτυγχάνονταν την ίδια ώρα. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τις τιμές της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, η οποία ήταν σχεδόν διπλάσια υπό συνθήκες δροσισμού. Έτσι, καθώς το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα ακολουθούσε την

τάση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα, έχοντας σχεδόν τη μισή τιμή υπό συνθήκες δροσισμού, ο ρυθμός διαπνοής δεν επηρεάστηκε σημαντικά. Στην πραγματικότητα, υπήρχε ένας κύκλος ανάδρασης μεταξύ του ελλείμματος κορεσμού του αέρα και της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, ο οποίος επέτρεπε στην καλλιέργεια να κρατήσει παρόμοια επίπεδα διαπνοής.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, κατά την περίοδο χωρίς το σύστημα δροσισμού, η μείωση στην στοματική αγωγιμότητα άρχιζε όταν το έλλειμμα κορεσμού είχε τιμή περίπου 2 kPa (Σχήμα 6.10.β), τιμή η οποία εμφανιζόταν κοντά στις 10:00. Κατά τη διάρκεια των ημερών, κατά των οποίων το σύστημα δροσισμού βρισκόταν σε λειτουργία, η μέγιστη τιμή της αγωγιμότητας επιτυγχανόταν κοντά στις 13:00-14:00, όταν το έλλειμμα κορεσμού του αέρα είχε τιμές επίσης κοντά στα 2 kPa. Όταν το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ξεπερνούσε τα 2 kPa, η αγωγιμότητα μειωνόταν όπως και στην περίπτωση που το σύστημα δροσισμού δε βρισκόταν σε λειτουργία. Η κρίσιμη τιμή των 2 kPa είχε σημειωθεί νωρίτερα από τους Baille *et al.* (1994a) ως τιμή αναφοράς για την ενεργοποίηση του συστήματος δροσισμού, προκειμένου να αποφευχθεί το κλείσιμο των στομάτων.

6.2.4 Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.11 δείχνουν ότι η καλλιέργεια, όταν δε λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού, καταπονούνταν υδατικά περισσότερο. Στο Σχήμα 6.4 παρουσιάζονται τρεις φάσεις στην πορεία της σχέσης που συνδέει τη διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα με το έλλειμμα κορεσμού του αέρα. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης (μέχρι τις 10:00-11:00), η σχέση ήταν περίπου ίδια και στις δύο περιπτώσεις (με δροσισμό και χωρίς δροσισμό). Η γραμμή που προκύπτει από τη σχέση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως η κατώτερη γραμμή ή η γραμμή με την μεγαλύτερη κλίση, η οποία αντιστοιχεί σε συνθήκες μηδενικής υδατικής καταπόνησης (Idso 1982). Στη δεύτερη φάση (11:00-17:00), υπό συνθήκες μη δροσισμού, η διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα συνέχιζε να μειώνεται με την αύξηση του ελλείμματος κορεσμού αλλά η κλίση της γραμμής συσχέτισης ήταν μικρότερη, προκαλώντας με τον τρόπο αυτό μια αύξηση στο δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας. Η τρίτη φάση (μετά τις 17:00), αντιστοιχεί στο στάδιο κατά το οποίο

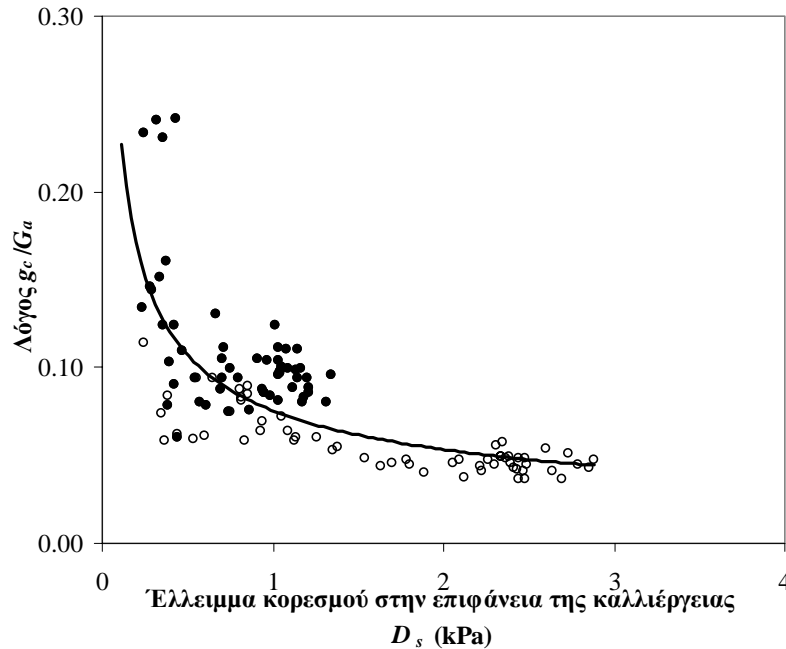
γίνεται εμφανής η σταδιακή αντίδραση των στομάτων στη μείωση της ακτινοβολίας, ενώ η σταδιακή πτώση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα δε φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν σύμφωνα με την πορεία της αγωγιμότητας της καλλιέργειας, κατά τη διάρκεια της ημέρας, υπό συνθήκες δροσισμού και μη (Σχήμα 6.8).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας υπό συνθήκες δροσισμού ήταν πολύ χαμηλές (μεταξύ 0 και 0.05), ενώ υπό συνθήκες μη δροσισμού ήταν μεν υψηλότερες, αλλά όχι πολύ υψηλές (μέγιστη τιμή του δείκτη περίπου 0.25 αργά το απόγευμα). Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι ο υψηλός δείκτης φυλλικής επιφάνειας σε συνάρτηση με την καλή τροφοδοσία με νερό, ήταν αρκετά ώστε να προκαλέσουν την αποφυγή υψηλής καταπόνησης της καλλιέργειας, σε συνθήκες θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ακόμα και όταν δε λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού. Η επίδραση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας εξετάζεται αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.

6.2.5 Ανάλυση και ερμηνεία των φαινομένων υστέρησης

Η υστέρηση της διαπνοής συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα (Σχήμα 6.3.α και β) είχε αναφερθεί προηγουμένως σε θερμοκηπιακή καλλιέργεια τριανταφυλλιάς (Baille *et al.* 1994a). Η υστέρηση της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας είχε επισημανθεί προγενέστερα και σε άλλα είδη υπό συνθήκες ελεύθερου αγρού, π.χ. από τους Gutierrez *et al.* (1994), οι οποίοι ανέφεραν παρόμοιες τάσεις στη διαπνοή και την αγωγιμότητα φυτείας καφέ, καθώς και από τους Takagi *et al.* (1998), για φυτά που καλλιεργούνται σε βαλτώδεις περιοχές. Οι παραπάνω ερευνητές απέδωσαν την ημερήσια υστέρηση στην επίδραση της συμμεταβολής της ακτινοβολίας και του ελλείμματος κορεσμού στη συμπεριφορά των στομάτων. Η απομάκρυνση της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας μετακίνησε την υστέρηση και εμφάνισε την αντίδραση των στομάτων στην υγρασία, δείχνοντας έτσι μία εκθετική μείωση της ομαλοποιημένης αγωγιμότητας g_c^* ($= g_c/G_a$) σε συνάρτηση με την αύξηση των απαιτήσεων για εξάτμιση. Στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζεται η σχέση της

ομαλοποιημένης αγωγιμότητας με το έλλειμμα κορεσμού στην επιφάνεια της καλλιέργειας D_s , για συνθήκες δροσισμού και μη.



Σχήμα 6.12. Ομαλοποιημένη αγωγιμότητα, g_c^* ($= g_c/R_{s,a}$) συναρτήσεως του ελλείματος κορεσμού στην επιφάνεια της καλλιέργειας D_s (kPa). (o) 19-20-21 Αυγούστου, χωρίς δροσισμό, (●) 25-26-27 Αυγούστου, με δροσισμό. Η καμπύλη είναι προσαρμοσμένη σε όλα τα δεδομένα ($g_c^* = 0.0756 D_s^{-0.504}$, $R^2 = 0.62$).

Η μεταβλητή D_s επιλέχθηκε, διότι χρησιμοποιείται συχνά ως μεταβλητή αναφοράς του ελλείματος κορεσμού σε εργασίες που μελετούν την αντίδραση των στομάτων στην υγρασία (Aphalo and Jarvis 1993). Όταν όλα τα σημεία (με και χωρίς δροσισμό) συγκεντρώθηκαν, προέκυψε μια σχέση μεταξύ της ομαλοποιημένης αγωγιμότητας και του ελλείματος κορεσμού (Σχήμα 6.12).

6.3 Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή, χαρακτηρίστηκαν, υπό συνθήκες δροσισμού και μη, οι καμπύλες υστέρησης που βρέθηκαν στη διαπνοή και τη στοματική αγωγιμότητα, συναρτήσει της ηλιακής ακτινοβολίας και του ελλείμματος κορεσμού. Παράλληλα, παρουσιάστηκε και σχολιάστηκε η επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στις καμπύλες υστέρησης.

Υπό τις συνθήκες που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων (καλοκαιρινές ηλιόλουστες ημέρες, υψηλός I_{LA}), η χρήση του συστήματος τεχνητής ομίχλης για το δροσισμό του θερμοκηπίου, όταν συγκρίθηκε με συνθήκες μη δροσισμού, έδειξε ότι:

- η θερμοκρασία και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα μειώθηκαν σημαντικά, ενώ διατηρήθηκε ένας σχετικά υψηλός ρυθμός διαπνοής. Τα χαμηλά επίπεδα του ελλείμματος κορεσμού επέτρεψαν στην καλλιέργεια να διατηρήσει υψηλή στοματική αγωγιμότητα, κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας,
- η φυσιολογική κατάσταση της καλλιέργειας βελτιώθηκε, όπως παρουσιάστηκε από την υψηλή στοματική αγωγιμότητα και το χαμηλό δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας.

Επίσης, βρέθηκε ότι ο υψηλός δείκτης φυλλικής επιφάνειας σε συνδυασμό με την επαρκή τροφοδοσία με νερό ήταν καταλυτικά για την αποφυγή της καταπόνησης της καλλιέργειας (υδατικής και θερμικής) σε καλοκαιρινές θερμοκηπιακές συνθήκες, ακόμα και όταν δε λειτουργούσε το σύστημα δροσισμού.

Τέλος, τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα αυτή υποδηλώνουν, ότι προκειμένου να προβλεφθούν ακριβέστερα οι βραχυχρόνιες μεταβολές της διαπνοής και της αγωγιμότητας της καλλιέργειας, μέσω των παραμέτρων του κλίματος του θερμοκηπίου, πρέπει να συνυπολογισθεί το μέγεθος και η χρονική πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για το λόγο αυτό, μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο του ελλείμματος κορεσμού στο θερμοκήπιο φαίνεται πως είναι προϋπόθεση για τη βελτίωση αλγορίθμων ελέγχου της άρδευσης και του κλίματος του θερμοκηπίου, οι οποίοι βασίζονται σε σχέσεις που προβλέπουν τη διαπνοή της καλλιέργειας.

Κεφάλαιο 7. Μελέτη της επίδρασης του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια

7.1 Αποτελέσματα

Τα δεδομένα που επιλέχθηκε να αναλυθούν και να παρουσιαστούν στην ενότητα αυτή αντιστοιχούν σε τρεις ηλιόλουστες ημέρες, με παρόμοιες εξωτερικές κλιματικές συνθήκες, δηλαδή:

- την 14^η Ιουλίου 1998, με ασπρισμένο θερμοκήπιο, καλλιέργεια με δείκτη φυλλικής επιφάνειας $I_{LA,c}$ περίπου 4 και δυναμικό αερισμό,
- την 13^η Αυγούστου 1999, με ασπρισμένο θερμοκήπιο, καλλιέργεια με δείκτη φυλλικής επιφάνειας $I_{LA,c}$ περίπου 2 και δυναμικό αερισμό και τέλος
- την 28^η Ιουνίου 1998, με μη ασπρισμένο θερμοκήπιο, δείκτη φυλλικής επιφάνειας $I_{LA,c}$ περίπου 2 και φυσικό αερισμό (παράθυρα ανοιχτά στο μέγιστο, κατά τη διάρκεια της ημέρας).

Οι δύο πρώτες ημέρες, οι οποίες αντιστοιχούν σε ασπρισμένο θερμοκήπιο, θα χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της επίδρασης του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στο ενεργειακό ισοζύγιο της καλλιέργειας. Η τρίτη ημέρα θα χρησιμοποιηθεί σε συνάρτηση με τις άλλες δύο για την ανάλυση της επίδρασης του θερμικού-ενεργειακού φορτίου στο συντελεστή εξάτμισης.

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται είναι οι μέσες τιμές ανά 30 λεπτά και καλύπτουν το διάστημα από 8:00 έως 19:00.

7.1.1 Εξωτερικές κλιματικές συνθήκες

Τα χαρακτηριστικά του εξωτερικού κλίματος (μέσες τιμές για το διάστημα 8:00 έως 19:00) κατά τη διάρκεια των τριών ημερών παρουσιάζονται στον *Πίνακα 7.1*, όπου παρατηρείται ότι δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές στις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες κατά τη διάρκεια των ημερών αυτών.

Πίνακας 7.1. Μέσες τιμές (διάστημα 8:00 - 19:00) των εξωτερικών κλιματικών παραμέτρων κατά τη διάρκεια των τριών ημερών.

Ημέρα	G_o W m ⁻²	T_o °C	e_o kPa	D_o kPa	u m s ⁻¹
14/7/1998	627	33.0	1.8	3.2	1.6
13/8/1999	625	34.0	1.5	3.8	2.0
28/6/1999	680	31.5	2.0	2.6	2.4

G_o = ηλιακή ακτινοβολία (W m⁻²), T_o = θερμοκρασία αέρα (°C), e_o = πίεση ατμών του αέρα (kPa), D_o = έλλειμμα κορεσμού του αέρα (kPa), u = ταχύτητα ανέμου (m s⁻¹).

7.1.2 Φορτίο ακτινοβολίας

Οι μέσες τιμές (8:00-19:00) της ολικής και καθαρής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια των τριών ημερών παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2. Ο λόγος της απορροφούμενης καθαρής ακτινοβολίας προς την καθαρή ακτινοβολία πάνω από την καλλιέργεια $R_{n,inf}/R_{n,a}$, ο οποίος αντιπροσωπεύει το ποσοστό της ενέργειας που απορροφάται από την καλλιέργεια, ήταν σχεδόν σταθερός κατά τη διάρκεια της ημέρας, με τιμή περίπου 90% στις 14 Ιουλίου 1998 (υψηλός I_{LA}) και περίπου 60% στις 28 Ιουνίου και 13 Αυγούστου 1999 (χαμηλός I_{LA}).

Η ημερήσια πορεία του ελλείμματος κορεσμού του αέρα D_i και του ελλείμματος κορεσμού καλλιέργειας-αέρα D_c παρουσιάζεται στα Σχήματα 7.1.α και 7.1.β. Η μέση τιμή του ελλείμματος κορεσμού της καλλιέργειας για το διάστημα από 8:00 έως 19:00 ήταν 2.6 kPa στις 14 Ιουλίου 1998 (ασπρισμένο θερμοκήπιο, υψηλός I_{LA}), και 3.4 kPa στις 13 Αυγούστου 1999 (ασπρισμένο θερμοκήπιο, χαμηλός I_{LA}).

Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ΔT_c κατά τη διάρκεια των δυο ημερών (14 Ιουνίου 1998 και 13 Αυγούστου 1999). Παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές στις τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας ΔT_c μεταξύ των δύο ημερών, κυρίως κατά το διάστημα μετά τις 11:00, όπου οι τιμές της ΔT_c ήταν περισσότερο αρνητικές κατά την ημέρα με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια.

Πίνακας 7.2. Μέσες τιμές (διάστημα 8:00-19:00) των μεταβλητών της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια των τριών ημερών.

Day	G_a $W m^{-2}$	$R_{n,a}$ $W m^{-2}$	$R_{n,int}$ $W m^{-2}$	$R_{n,int}/R_{n,a}$ $W m^{-2}$
14/7/1998	223	115	103	0.90
13/8/1999	183	130	80	0.61
28/6/1999	522	310	217	0.70

G_a = εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία πάνω από την καλλιέργεια ($W m^{-2}$), $R_{n,a}$ = καθαρή ακτινοβολία πάνω από την καλλιέργεια ($W m^{-2}$), $R_{n,int} = (R_{n,a} - R_{n,b})$ απορροφούμενη καθαρή ακτινοβολία από την καλλιέργεια ($W m^{-2}$), $R_{n,int} / R_{n,a}$ = λόγος της απορροφούμενης ακτινοβολίας από την καλλιέργεια προς την καθαρή ακτινοβολία πάνω από την καλλιέργεια.

Η μέση τιμή της ΔT_c ήταν $-2.3^{\circ}C$ για την περίοδο με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια και $-1.3^{\circ}C$ για την περίοδο με τη μικρή φυλλική επιφάνεια, ενώ οι μέγιστες αρνητικές τιμές της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ήταν $-4.1^{\circ}C$ και $-2.3^{\circ}C$ αντίστοιχα.

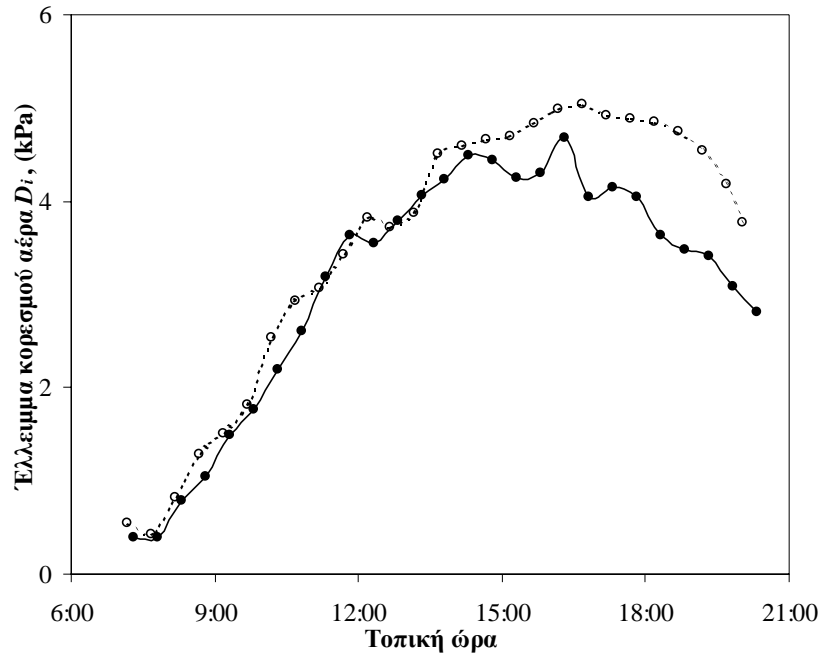
Η σχέση μεταξύ της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα βρέθηκε να είναι αρκετά καλή στην περίπτωση της καλλιέργειας με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια. Η γραμμή συσχέτισης μεταξύ των δύο παραπάνω μεταβλητών για την περίπτωση αυτή ήταν:

$$\Delta T_c = 0.61 - 0.87 D_i \quad (7.1)$$

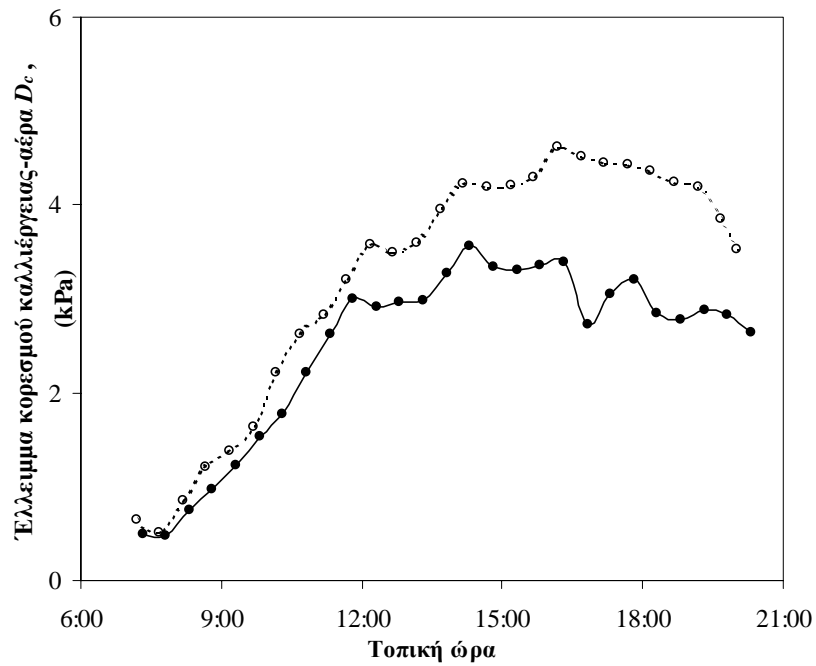
με τιμή $R^2 = 0.82$ για το συντελεστή προσδιορισμού. Στην περίπτωση της καλλιέργειας με τη μικρή φυλλική επιφάνεια η συσχέτιση ήταν λιγότερο ισχυρή:

$$\Delta T_c = 0.35 - 0.43 D_i \quad (7.2)$$

με τιμή για το συντελεστή προσδιορισμού $R^2 = 0.72$.

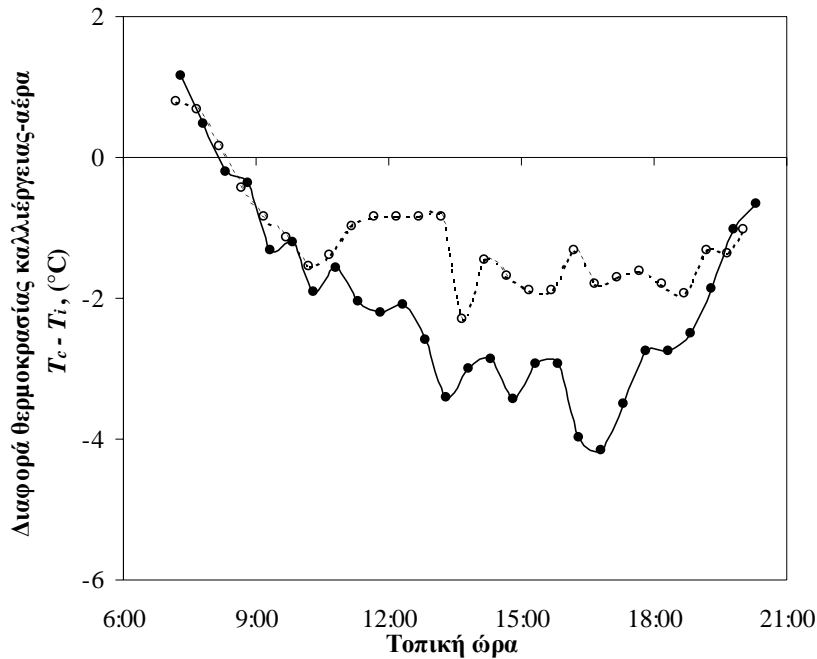


(α)



(β)

Σχήμα 7.1. (α) Έλλειμμα κορεσμού του αέρα D_i (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (○), 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA} . (β) Έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα D_c (kPa) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (○), 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA} .



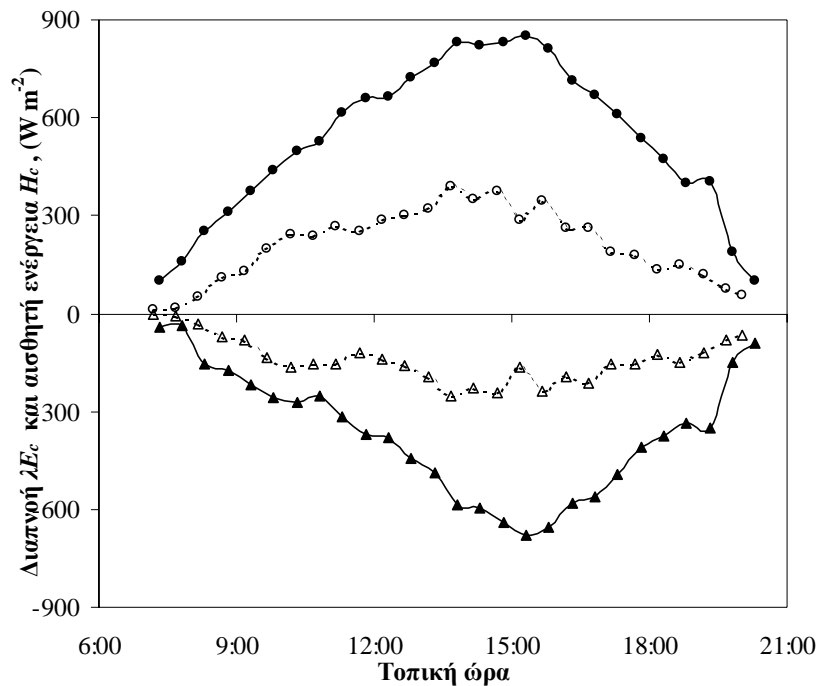
Σχήμα 7.2. Διαφορά θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα $\Delta T_c (= T_c - T_i)$ ($^{\circ}\text{C}$) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (○), 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA} .

7.1.3 Διαπνοή και αισθητή ενέργεια

Η ημερήσια πορεία του ρυθμού διαπνοής της καλλιέργειας λE_c και της αισθητής ενέργειας της καλλιέργειας H_c υπό συνθήκες ασπρισμένου θερμοκηπίου κατά τις δυο περιόδους (14 Ιουνίου 1998 και 13 Αυγούστου 1999) με διαφορετική φυλλική επιφάνεια παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.3.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι, κατά το μεγαλύτερο μέρος της ημέρας, ο ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας με τη μικρή φυλλική επιφάνεια ήταν μόνο το 40% του ρυθμού διαπνοής της καλλιέργειας με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια. Για την τελευταία, ο ρυθμός διαπνοής άγγιζε πολύ υψηλές τιμές με μέγιστη κοντά στα 850 W m^{-2} . Η ροή αισθητής ενέργειας H_c , όπως υπολογίστηκε από τις μετρήσεις της διαπνοής λE_c και της απορροφούμενης καθαρής ακτινοβολίας $R_{n,int}$ [σχέση (2.5)], άγγιζε επίσης υψηλές τιμές στην περίπτωση της καλλιέργειας με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια (Σχήμα 7.3), με μέγιστη τιμή κοντά στα 680 W m^{-2} , ενώ στην περίπτωση της καλλιέργειας με τη μικρή φυλλική επιφάνεια ήταν περίπου 300 W m^{-2} . Κατά μέσο

όρο, η αισθητή ενέργεια H_c ήταν περίπου 300 W m^{-2} χαμηλότερη υπό συνθήκες χαμηλού I_{LA} από ότι υπό συνθήκες υψηλού I_{LA} . Παρόλο που η H_c και η λE_c διέφεραν κατά τη διάρκεια των δύο ημερών, ο λόγος Bowen β , υπολογισμένος ως ο λόγος της αισθητής προς τη λανθάνουσα ενέργεια ($H_c/\lambda E_c$), ήταν παρόμοιος και σχετικά σταθερός κατά τη διάρκεια των δύο ημερών ($\beta \approx -0.70$).



Σχήμα 7.3. Ρυθμός διαπνοής λE_c (W m^{-2}) και ροή αισθητής ενέργειας H_c (W m^{-2}) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), λE_c 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (○), λE_c 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA} , (▲), H_c 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (Δ), H_c 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA} .

7.1.4 Αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας

Η σχέση μεταξύ της αισθητής ενέργειας H_c και της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα ΔT_c κατά τη διάρκεια των δύο ημερών με το θερμοκήπιο ασπρισμένο παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.4. Βρέθηκε μια σχετικά καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Η κλίση της γραμμής συσχέτισης μεταξύ των δύο

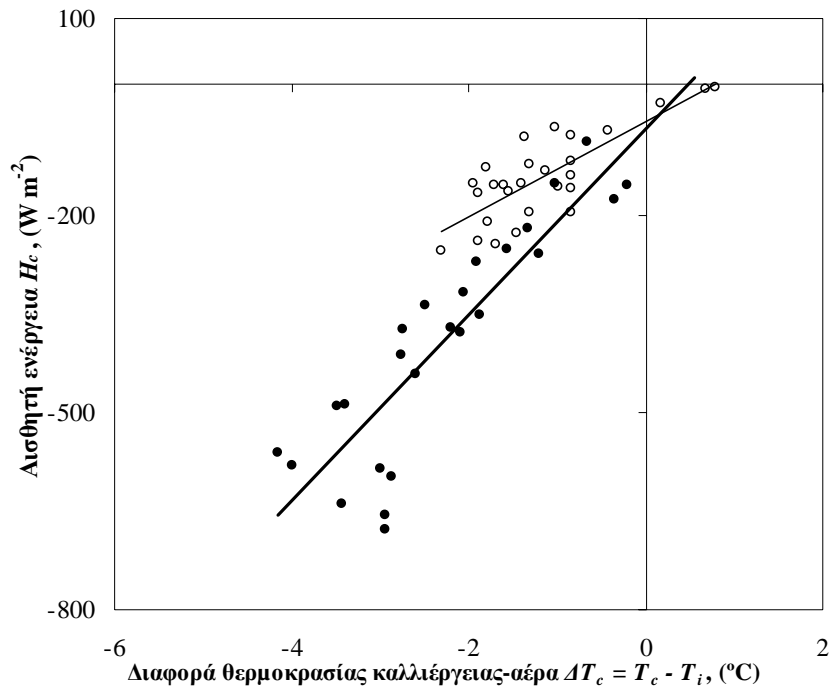
μεταβλητών αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή της αεροδυναμικής αγωγιμότητας g_a [σχέση (2.27)]. Η γραμμή συσχέτισης για την 14^η Ιουλίου 1998 (υψηλός I_{LA}) ήταν:

$$H_c = 142 \Delta T_c - 68 \quad (7.3)$$

με τιμή $R^2 = 0.78$ για το συντελεστή προσδιορισμού, ενώ για την 13^η Αυγούστου 1999 (χαμηλός I_{LA}) ήταν:

$$H_c = 72 \Delta T_c - 57 \quad (7.4)$$

με τιμή $R^2 = 0.65$ για το συντελεστή προσδιορισμού.



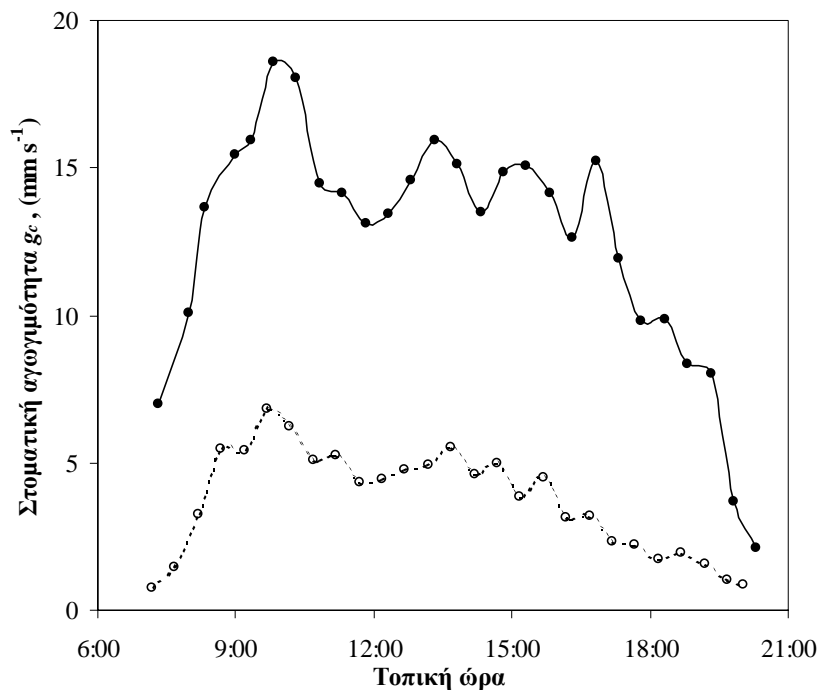
Σχήμα 7.4. Ροή αισθητής ενέργειας H_c ($W m^{-2}$) συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας καλλιέργειας-αέρα $\Delta T_c (= T_c - T_i)$ ($^{\circ}C$). (●), 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (○), 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA} .

Σύμφωνα με τη σχέση (2.27), οι τιμές της αεροδυναμικής αγωγιμότητας που προκύπτουν από την κλίση των εξισώσεων (7.3) και (7.4) είναι 114 mm s^{-1} και 57.4

mm s^{-1} για την περίπτωση της καλλιέργειας με το μεγάλο και το μικρό I_{LA} αντίστοιχα. Έτσι, η αεροδυναμική αγωγιμότητα ανά μονάδα φυλλικής επιφάνειας $g_{l,a}$, υπολογίστηκε ίση με 14.2 mm s^{-1} και 14.3 mm s^{-1} , αντίστοιχα.

7.1.5 Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας

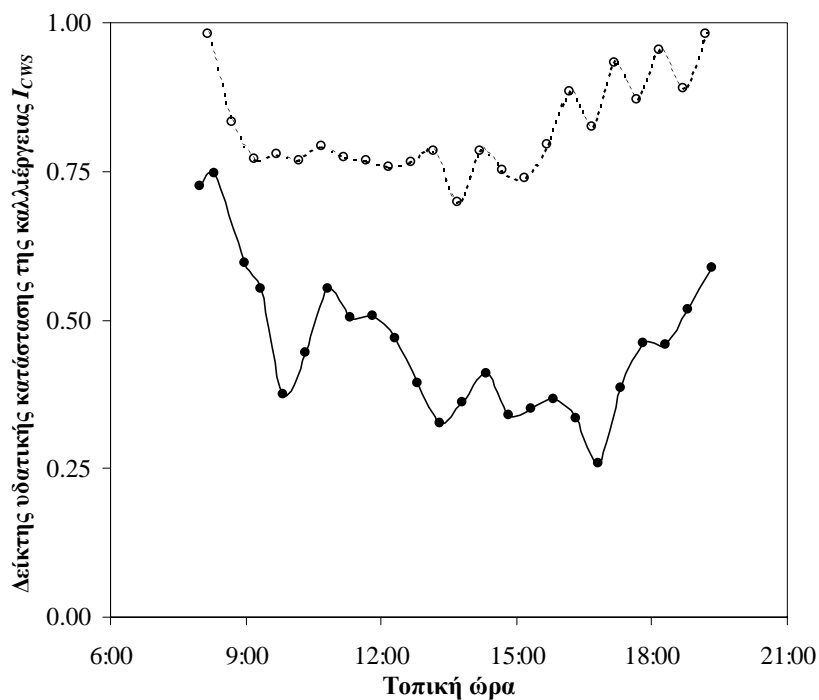
Η ημερήσια πορεία της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας g_c , υπό συνθήκες ασπρισμένου θερμοκηπίου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.5. Και στις δύο περιπτώσεις, η g_c αυξανόταν το πρωί, φτάνοντας στη μέγιστη τιμή της περίπου στις 10:00, όταν το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ήταν κοντά στα 2 kPa και μειωνόταν κατά τη διάρκεια του απογεύματος. Η μέγιστη στοματική αγωγιμότητα, ήταν περίπου 21 mm s^{-1} (ή 2.6 mm s^{-1} αν αναφερόμαστε στη μονάδα φυλλικής επιφάνειας) όταν ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας ήταν υψηλός ενώ, η μέγιστη τιμή της g_c ήταν περίπου 8 mm s^{-1} (ή 2 mm s^{-1} αν αναφερόμαστε στη μονάδα φυλλικής επιφάνειας) όταν ο I_{LA} ήταν χαμηλός.



Σχήμα 7.5. Στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας g_c (mm s^{-1}) κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (○), 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA} .

7.1.6 Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας

Στο Σχήμα 7.6 παρουσιάζεται η ημερήσια πορεία του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας I_{CWS} και υποδεικνύει καθαρά τις συνθήκες υδατικής καταπόνησης που επικρατούσαν κατά την περίοδο με το χαμηλό I_{LA} . Ο I_{CWS} υπολογίστηκε με τιμή για τη μέγιστη στοματική αγωγιμότητα 30 mm s^{-1} , για την 14^η Ιουλίου 1998 ($I_{LA,c}$ 4) και 15 mm s^{-1} , για την 13^η Αυγούστου 1999 ($I_{LA,c}$ 2). Οι παραπάνω τιμές της g_M τέθηκαν με βάση τα αποτελέσματα στο Κεφάλαιο 6. Οι μεγάλες τιμές του I_{CWS} νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα οφείλονται στα χαμηλά επίπεδα της ακτινοβολίας και δεν πρέπει να ληφθούν υπόψη στην εκτίμηση του επιπέδου της θερμικής ή υδατικής καταπόνησης.



Σχήμα 7.6. Δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας I_{CWS} κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , (○), 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA} .

7.1.7 Συντελεστής εξάτμισης

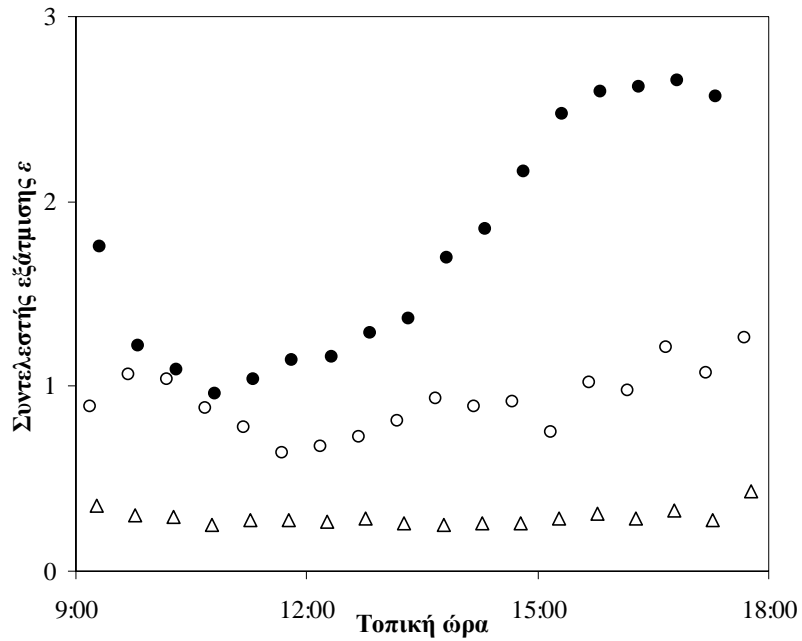
Το ενεργειακό ισοζύγιο του θερμοκηπίου, σύμφωνα με το ASAE (ASAE 1999), μπορεί να δοθεί από την ακόλουθη απλή σχέση:

$$(1-\varepsilon) G_a = U_r (T_i - T_o) + \rho C_p Q_v (T_e - T_o) \quad (7.5)$$

όπου ε είναι ο συντελεστής 'εξάτμισης' (ASAE 1999), ο οποίος αντιπροσωπεύει, το λόγο της λανθάνουσας ενέργειας που ελευθερώνεται από την καλλιέργεια και το έδαφος, προς το φορτίο ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο. Ως φορτίο ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο λαμβάνεται γενικά η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο G_a , επειδή η καθαρή ακτινοβολία, η οποία αποτελεί καλύτερη εκτίμηση του φορτίου θερμότητας, δεν είναι συνήθως διαθέσιμη. Στη συνέχεια, το θερμικό φορτίο στο θερμοκήπιο θα θεωρείται ισοδύναμο με την καθαρή ακτινοβολία που μετρήθηκε πάνω από την καλλιέργεια $R_{n,a}$. Επιπλέον, στη σχέση (7.5) U_r (W m^{-2}) είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας από το κάλυμμα του θερμοκηπίου, T_e ($^{\circ}\text{C}$) είναι η θερμοκρασία του αέρα που βγαίνει από το θερμοκήπιο και Q_v (m^3 [αέρα] m^{-2} [εδάφους]) η ροή αέρα στο θερμοκήπιο. Η εξάτμιση από το έδαφος (τσιμέντο) και το υπόστρωμα θεωρούνται αμελητέα, οπότε ο συντελεστής εξάτμισης δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon = \lambda E / R_{n,a} \quad (7.6)$$

Η ημερήσια πορεία (9:00-18:00) του συντελεστή εξάτμισης ε , όπως αυτός υπολογίστηκε από τη σχέση (7.6) με μετρημένες τιμές των λE και $R_{n,a}$, παρουσιάζεται για τις τρεις ημέρες (14 Ιουλίου 1998, 28 Ιουνίου 1999 και 13 Αυγούστου 1999) στο Σχήμα 7.7. Οι τιμές του συντελεστή ε , κατά το διάστημα με το μέγιστο θερμικό φορτίο, κυμαίνονταν από 0.25 έως 1.15, με την μικρότερη τιμή να παρατηρείται στην περίπτωση της καλλιέργειας με το χαμηλό I_{LA} και μη ασπρισμένο θερμοκήπιο και τη μεγαλύτερη τιμή στην περίπτωση της καλλιέργειας με το μεγάλο I_{LA} και ασπρισμένο θερμοκήπιο.



Σχήμα 7.7. Συντελεστής εξάτμισης ε κατά τη διάρκεια της ημέρας. (●), 14 Ιουλίου 1998, ασπρισμένο θερμοκήπιο, υψηλός I_{LA} , (○), 13 Αυγούστου 1999, ασπρισμένο θερμοκήπιο, χαμηλός I_{LA} , (Δ), 28 Ιουνίου 1999, μη ασπρισμένο θερμοκήπιο, χαμηλός, I_{LA} .

7.2 Συζήτηση

7.2.1 Επίδραση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στον καταμερισμό ενέργειας και τη φυσιολογική κατάσταση της καλλιέργειας

Η επίδραση του ασπρίσματος του θερμοκηπίου στη διαπνοή και τη φυσιολογική κατάσταση της καλλιέργειας, για ένα συγκεκριμένο I_{LA} παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, δείχνοντας ξεκάθαρα τη βελτίωση της κατάστασης της καλλιέργειας μετά το άσπρισμα. Στη συνέχεια θα συζητηθεί η επίδραση του I_{LA} , χρησιμοποιώντας δεδομένα υπό συνθήκες ασπρισμένου θερμοκηπίου (14 Ιουλίου 1998, υψηλός I_{LA} , και 13 Αυγούστου 1999, χαμηλός I_{LA}).

7.2.1.1 Επίδραση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στο ρυθμό διαπνοής και τη στοματική αγωγιμότητα

Στην περίπτωση της περιόδου με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια, ο μέγιστος ρυθμός διαπνοής που επιτεύχθηκε από την καλλιέργεια ήταν πολύ υψηλός, περίπου 850 W m^{-2} κοντά στο μεσημέρι (Σχήμα 7.3). Στην περίπτωση της καλλιέργειας με τη μικρή φυλλική επιφάνεια, ο μέγιστος ρυθμός διαπνοής ήταν περίπου 300 W m^{-2} , τιμή η οποία ήταν μικρότερη από τη μισή της τιμής που επιτεύχθηκε για την περίπτωση με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια. Σε ημερήσια κλίμακα, η μέση τιμή του ρυθμού διαπνοής της καλλιέργειας με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια ήταν περίπου 350 W m^{-2} , μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή για την καλλιέργεια με τη μικρή φυλλική επιφάνεια. Ακόμη και όταν ο ρυθμός διαπνοής αναφερόταν στη μονάδα φυλλικής επιφάνειας, η μέση τιμή ήταν σημαντικά μεγαλύτερη (περίπου 25%) στην περίπτωση της καλλιέργειας με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια. Η αισθητή ενέργεια της καλλιέργειας έφθανε επίσης σε παρόμοια με τη διαπνοή επίπεδα, κάτι το οποίο οδήγησε σε παρόμοιες τιμές του λόγου Bowen, όχι μακριά από τη μονάδα και για τις δύο περιπτώσεις ($\beta \approx -0.70$). Τέτοια υψηλά επίπεδα διαπνοής και αισθητής ενέργειας μπορούν να εξηγηθούν με το φαινόμενο της 'όασης', το οποίο δημιουργείται λόγω της παρουσίας μεγάλου ποσοστού ($p = 0.5$) ακάλυπτου με καλλιέργεια εδάφους (Jones 1992, Seginer 1994).

Η καλλιέργεια που είχε μεγάλη φυλλική επιφάνεια απορροφούσε περισσότερη ακτινοβολία: περίπου 90% της εισερχόμενης καθαρής ακτινοβολίας σε αντίθεση με το 60% για την καλλιέργεια με το μικρό I_{LA} (Πίνακας 7.2), όπως ήταν αναμενόμενο. Για το λόγο αυτό, η συνιστώσα της ακτινοβολίας στο ρυθμό διαπνοής, η οποία αντιπροσωπεύεται από το πρώτο μέρος της εξίσωσης των Penman-Monteith:

$$\lambda E_c = \frac{\delta R_{n, \text{int}}}{\delta + \gamma(1 + g_a/g_c)} + \frac{\rho C_p D_i g_a}{\delta + \gamma(1 + g_a/g_c)} \quad (7.7)$$

αυξάνεται περίπου 30% αν λάβουμε υπόψη την αύξηση στην $R_{n, \text{int}}$. Συγκρινόμενη με την 250% αύξηση στο ρυθμό διαπνοής όταν διπλασιάστηκε η φυλλική επιφάνεια, η αύξηση στη συνιστώσα της ακτινοβολίας αντιπροσωπεύει μια σχετικά μικρή συνεισφορά στη συνολική αύξηση. Επομένως, η μεγαλύτερη αύξηση οφείλεται στην αύξηση του δευτέρου μέρους της σχέσης (7.7). Δεν θα μπορούσε να αποδοθεί στο έλλειμμα κορεσμού του αέρα D_i , το οποίο ήταν χαμηλότερο κατά την περίοδο με τον υψηλό I_{LA} και επομένως δρούσε εναντίον της παρατηρούμενης αύξησης της διαπνοής. Οι μεγάλες τιμές στο ρυθμό διαπνοής της καλλιέργειας με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια μπορούν να εξηγηθούν από την αύξηση της g_c σε συνάρτηση με:

- τη μεγαλύτερη φυλλική επιφάνεια και
- τη βελτίωση της φυσιολογικής κατάστασης της καλλιέργειας, πιθανόν λόγω των υψηλότερων επιπέδων υγρασίας, όπως αυτά διαμορφώθηκαν από τον υψηλότερο ρυθμό διαπνοής.

Το συμπέρασμα αυτό εξήχθη:

- από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της g_c τα οποία παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 7.5. Η μέγιστη τιμή της αγωγιμότητας ήταν 21 mm s^{-1} , για την περίπτωση με τον υψηλό I_{LA} , δηλαδή κάτι περισσότερο από το διπλάσιο της μέγιστης τιμής (8 mm s^{-1}) που παρατηρήθηκε στην περίπτωση με το χαμηλό I_{LA} . Αναφερόμενοι στη μονάδα φυλλικής επιφάνειας, οι αντίστοιχες τιμές της αγωγιμότητας ήταν 2.6 mm s^{-1} και 2.0 mm s^{-1} υπό συνθήκες υψηλού και χαμηλού I_{LA} αντίστοιχα, υποδεικνύοντας ξεκάθαρα ένα κέρδος της τάξης του 30% στην τιμή της αγωγιμότητας και την καλύτερη φυσιολογική της κατάσταση. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν επίσης

την ύπαρξη του κύκλου ανάδρασης μεταξύ της καλλιέργειας και του μικροκλίματος του θερμοκηπίου, όπως άλλωστε παρατηρήθηκε και στις προηγούμενες ενότητες, χρησιμοποιώντας άλλα μέσα επίδρασης στο ρυθμό διαπνοής της καλλιέργειας: αερισμός (Κεφάλαιο 4), άσπρισμα του καλύμματος (Κεφάλαιο 5) και δροσισμός (Κεφάλαιο 6).

- από την ανάλυση του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας (Σχήμα 7.6), ο οποίος υποδηλώνει ότι η καλλιέργεια με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια ήταν πρακτικά εκτός συνθηκών καταπόνησης (μέση τιμή I_{CWS} περίπου 0.4 και 0.8, για την καλλιέργεια με το μεγάλο και μικρό I_{LA} αντίστοιχα).

7.2.1.2 Επίδραση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στην αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας

Οι τιμές της αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας g_a , οι οποίες υπολογίστηκαν από τη σχέση (2.27) στηρίζουν την υπόθεση ότι η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη του δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Η μέση τιμή της g_a , η οποία παρατηρήθηκε για την καλλιέργεια με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια, ήταν περίπου διπλάσια από αυτή που παρατηρήθηκε για την καλλιέργεια με τη μικρή φυλλική επιφάνεια. Μπορούμε, θεωρώντας το φύλλο ως μία οριζόντια επιφάνεια, να συγκρίνουμε τις τιμές αυτές της g_a με τιμές της αεροδυναμικής αγωγιμότητας, όπως αυτή υπολογίζεται από εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας. Υπό συνθήκες εξαναγκασμένης συναγωγής, η αεροδυναμική αγωγιμότητα του φύλλου $g_{l,a}$, δίδεται από τη σχέση (Monteith 1973):

$$g_{l,a} = 6.62 \left(\frac{\nu}{d} \right)^{0.5} \quad (7.8)$$

όπου ν (m s^{-1}) είναι η μέση ταχύτητα του ανέμου κοντά στο φύλλο και d (m) είναι το χαρακτηριστικό μήκος ενός φύλλου τριανταφυλλιάς. Θέτοντας στη σχέση (7.6) $g_{l,a} = 14.2$ και 14.3 mm s^{-1} και $d = 0.03 \text{ m}$ παίρνουμε και για τις δύο περιπτώσεις μία τιμή $\nu = 0.14 \text{ m s}^{-1}$ περίπου, η οποία φαίνεται να είναι λογική εκτίμηση της ταχύτητας του

ανέμου κοντά στο επίπεδο της καλλιέργειας ενός καλά αεριζόμενου θερμοκηπίου (Wang *et al.* 1999).

Η ταχύτητα του ανέμου θα μπορούσε να υπολογιστεί επίσης και από το ρυθμό ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου. Ο ρυθμός παροχής των τεσσάρων ανεμιστήρων ήταν περίπου $16000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, δηλαδή $4.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ και η κατακόρυφη τομή του θερμοκηπίου ήταν 28 m^2 . Θεωρώντας μία σταθερή ταχύτητα στο κατακόρυφο επίπεδο, παίρνουμε $v = 4.4/28 = 0.16 \text{ m s}^{-1}$, τιμή η οποία είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτή που υπολογίστηκε από την αεροδυναμική αγωγιμότητα g_a .

Το κύριο μέρος των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω φανερώνουν τη σημαντικότητα της καλύτερης γνώσης και του χαρακτηρισμού της στοματικής και αεροδυναμικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, καθώς επίσης και της σχετικής τους σημαντικότητας (λόγος g_a/g_c). Διπλασιάζοντας το δείκτη φυλλικής επιφάνειας, διπλασιάστηκε σχεδόν και η αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Φαίνεται όμως ότι η στοματική αγωγιμότητα, λόγω της σχέσης της με την υγρασία στο θερμοκήπιο, υπέρ-διπλασιάστηκε, οδηγώντας έτσι σε μείωση του λόγου g_a/g_c . Ο λόγος αυτός ο οποίος χαρακτηρίζεται από τον παράγοντα Ω (Jarvis 1985), όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 2, καθορίζει το βαθμό σύζευξης ανάμεσα στην καλλιέργεια και το περιβάλλον του θερμοκηπίου.

7.2.2 Επίδραση του δείκτη φυλλικής επιφάνειας στις απαιτήσεις του θερμοκηπίου για ψύξη

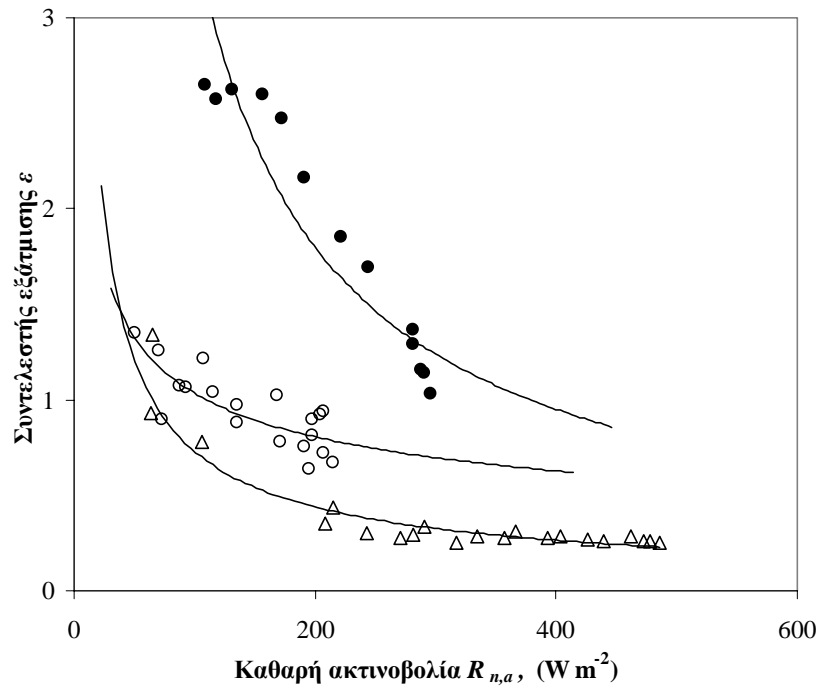
Οι υπολογισμένες τιμές του συντελεστή εξάτμισης ε (Σχήμα 7.7) φανερώνουν μία μεγάλη σχετικά μεταβολή του συντελεστή. Η ελάχιστη ημερήσια τιμή του συντελεστή εμφανιζόταν κοντά στο μεσημέρι και κυμαινόταν από 0.25 (χαμηλός I_{LA} , μη-ασπρισμένο θερμοκήπιο) έως 1.10 (υψηλός I_{LA} , ασπρισμένο θερμοκήπιο). Ο Seginer (1997) υπέθεσε ότι ο συντελεστής αυτός μεταβάλλεται μεταξύ 0 και 1, προτείνοντας τιμές 1, για περιπτώσεις με πλούσια βλάστηση σε ξηρές περιοχές. Τιμές του ε , που υπολογίστηκαν από τα δεδομένα του Baille *et al.* (1994a) για υδροπονική καλλιέργεια τριανταφυλλιάς στη νότια Γαλλία κυμαίνονταν μεταξύ 0.50-0.75. Παρόμοιες τιμές μεταξύ 0.6-0.7, υπολογίστηκαν από δεδομένα θερμοκηπιακής καλλιέργειας τομάτας

στην ίδια περιοχή (Boulard *et al.* 1991). Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν κατά προσέγγιση στην περίπτωση του ασπρισμένου θερμοκηπίου με $I_{LA} \approx 1$, όπου η τιμή του ε ήταν περίπου 0.65 γύρω στο μεσημέρι.

Οι δύο ακραίες τιμές του συντελεστή ε που παρουσιάστηκαν εδώ αφορούν δύο τελειώς διαφορετικούς τύπους διαχείρισης του θερμοκηπίου. Οι χαμηλότερες τιμές του ε (≈ 0.25) αντιστοιχούν σε υψηλά φορτία ακτινοβολίας ($G_a \approx 700 \text{ W m}^{-2}$) τα οποία δεν μπορούν να απορροφηθούν, να καταναλωθούν και να εξουδετερωθούν από τη διαπνοή της καλλιέργειας, λόγω του χαμηλού δείκτη φυλλικής επιφάνειας και των συνθηκών καταπόνησης, που προκαλούνται από το δημιουργούμενο μικροκλίμα. Αυτές είναι ξεκάθαρα οι συνθήκες που θα πρέπει να αποφευχθούν κατά τη διάρκεια μιας καλοκαιρινής καλλιέργειας. Στην περίπτωση αυτή, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα δροσισμού με εξάτμιση (π.χ.: υγρή παρειά, τεχνητή ομίχλη) το οποίο θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο για μικρές τιμές ε , έτσι ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί στις ανάγκες του θερμοκηπίου. Η μεγαλύτερη τιμή του ε (≈ 1.15), η οποία αντιστοιχεί στο ασπρισμένο θερμοκήπιο και την καλλιέργεια με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια, καταδεικνύει πως δεν υπάρχει ανάγκη για χρήση άλλου συστήματος δροσισμού-ψύξης του θερμοκηπίου, εκτός από τον αερισμό. Η διαπνοή της καλλιέργειας είναι αρκετά ικανοποιητική, ώστε να μπορεί να εξουδετερώσει το θερμικό φορτίο και να διατηρήσει ικανοποιητικά επίπεδα υγρασίας για μια βέλτιστη φυσιολογική κατάσταση.

Στο Σχήμα 7.8 παρουσιάζεται η μεταβολή του ε συναρτήσει της καθαρής ακτινοβολίας, $R_{n,a}$.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι και στις τρεις περιπτώσεις ο συντελεστής ε μειωνόταν όταν αυξανόταν η ακτινοβολία, λαμβάνοντας ασύμπτωτες τιμές για μεγάλες τιμές της $R_{n,a}$. Το σχήμα αυτό επιτρέπει να διακρίνουμε ξεκάθαρα τη σχετική επίδραση της ακτινοβολίας και της φυλλικής επιφάνειας στο συντελεστή εξάτμισης. Για ένα θερμικό φορτίο $R_{n,a}$ περίπου 400 W m^{-2} , οι τιμές του ε είναι περίπου 0.2, 0.6 και 1 για μη-ασπρισμένο θερμοκήπιο - μικρή φυλλική επιφάνεια, ασπρισμένο θερμοκήπιο - μικρή φυλλική επιφάνεια και ασπρισμένο θερμοκήπιο - μεγάλη φυλλική επιφάνεια αντίστοιχα.



Σχήμα 7.8. Συντελεστής εξάτμισης ε συναρτήσει του θερμικού φορτίου $R_{n,a}$ ($W m^{-2}$). (●), 14 Ιουλίου 1998, ασπρισμένο θερμοκήπιο, υψηλός I_{LA} , (○), 13 Αυγούστου 1999, ασπρισμένο θερμοκήπιο, χαμηλός I_{LA} , (Δ), 28 Ιουνίου 1999, μη ασπρισμένο θερμοκήπιο, χαμηλός, I_{LA} .

7.3 Συμπεράσματα

Όσον αφορά στην επίδραση της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας στη λειτουργία της τελευταίας, τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω εμφανώς παρουσιάζουν τη θετική επίδραση του υψηλού δείκτη φυλλικής επιφάνειας στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου και τη φυσιολογική κατάσταση της καλλιέργειας, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού σε θερμές χώρες. Τα υψηλά επίπεδα διαπνοής που επιτεύχθηκαν από την καλλιέργεια κατά τη διάρκεια της περιόδου με υψηλό I_{LA} αύξησαν τη διαδικασία της ψύξης στο θερμοκήπιο, μειώνοντας σημαντικά τη διαφορά θερμοκρασίας και το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα. Ο υπολογισμός της στοματικής αγωγιμότητας και του δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας δηλώνουν εμμέσως την καλύτερη φυσιολογική της κατάσταση υπό συνθήκες υψηλού I_{LA} , ακόμη και κατά το θερμότερο μέρος της ημέρας. Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω μαρτυρούν ότι ο υψηλός I_{LA} , συνοδευόμενος με επαρκή τροφοδοσία της καλλιέργειας με νερό, είναι αποτελεσματικό μέσο αποφυγής θερμικής και υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας, ακόμη και όταν η ψύξη με τεχνητά μέσα δεν είναι διαθέσιμη. Για το λόγο αυτό, συνιστάται η υποστήριξη της ανάπτυξης υψηλού I_{LA} στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες των Μεσογειακών και ξηρών περιοχών.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα σχετικά με το σχεδιασμό του θερμοκηπίου, γίνεται φανερό ότι ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας επηρεάζει δραστικά την τιμή του συντελεστή εξάτμισης. Ο τελευταίος είναι στοιχείο-παράμετρος που αφορά το σχεδιασμό του θερμοκηπίου και πρέπει να επιλεγεί με προσοχή, διότι η τιμή του σχετίζεται με το υπόλοιπο του θερμικού φορτίου, που θα πρέπει να μετακινηθεί από το θερμοκήπιο με άλλα μέσα εκτός της διαπνοής. Από τα παραπάνω προκύπτει πώς τα ανωτέρω αποτελέσματα προσφέρουν κάποια βασικά στοιχεία τα οποία ίσως βοηθήσουν στη βελτίωση του σχεδιασμού των συστημάτων ψύξης του θερμοκηπίου, όπως το σύστημα αερισμού και δροσισμού με υγρή παρειά ή τεχνητή ομίχλη.

Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα

Συμπεράσματα

Στην αρχή της εργασίας αυτής διατυπώθηκε ότι προκειμένου να επιτευχθεί ο βέλτιστος έλεγχος του θερμοκηπιακού μικροκλίματος είναι απαραίτητο να ορισθεί το κριτήριο που θα χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση, να γίνουν παρατηρήσεις και ποιοτική περιγραφή των μηχανισμών που επηρεάζουν τα κριτήρια και να γίνουν μετρήσεις για την ποσοτική περιγραφή των μηχανισμών. Επιπλέον, έγινε προφανές ότι είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε με ακρίβεια την επίδραση του μικροκλίματος και των μεταβολών του στη φυσιολογική συμπεριφορά και αντίδραση της καλλιέργειας και ιδιαίτερα στη διαπνοή, προκειμένου να καταστεί δυνατό να προταθεί ποιο σύστημα κλιματισμού των θερμοκηπίων ή ποιος συνδυασμός τους θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να επιτευχθούν στο θερμοκήπιο οι βέλτιστες συνθήκες ανάπτυξης της καλλιέργειας.

Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή ως κύριοι δείκτες για το χαρακτηρισμό της κατάστασης του συστήματος θερμοκήπιο-καλλιέργεια ήταν ο δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας και η στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Ο δείκτης υδατικής καταπόνησης επιλέχθηκε διότι παρουσιάζει τη θερμική και υδατική καταπόνηση που υφίσταται η καλλιέργεια, ενώ η στοματική αγωγιμότητα επιλέχθηκε γιατί παίζει σημαντικό ρόλο στον καταμερισμό της ενέργειας ενώ παράλληλα, σε συνάρτηση με την αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, εμπλέκονται και αντικατοπτρίζουν τη δυνατότητα και ικανότητα της καλλιέργειας να ανταλλάσσει ενέργεια και μάζα με το περιβάλλον της.

Όσον αφορά την επίδραση του αερισμού, της σκίασης, του δροσισμού και της μεταβολής της φυλλικής επιφάνειας στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου παρατηρήθηκε ότι:

- Ο φυσικός αερισμός από μόνος του δεν ήταν επαρκής για την ψύξη του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού αφού κατά τη διάρκεια των περιόδων που χρησιμοποιήθηκε στο θερμοκήπιο επικρατούσαν υψηλές τιμές θερμοκρασίας και χαμηλές τιμές υγρασίας.
- Η σκίαση μείωσε το φορτίο ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο και σε συνδυασμό με το φυσικό αερισμό οδήγησε σε μείωση της θερμοκρασίας και του

ελλείμματος κορεσμού του αέρα. Σε αυτό συνέβαλαν και οι αλληλεπιδράσεις της καλλιέργειας με το μικροκλίμα.

- Η χρήση διαφορετικού τύπου αερισμού (φυσικός-δυναμικός) προκαλεί σημαντικές διαφορές στο μικροκλίμα αφού ο δυναμικός αερισμός είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός περισσότερο ομογενούς κλίματος σε κατακόρυφο επίπεδο ενώ επιπλέον, σε αντίθεση με το φυσικό αερισμό, ήταν δυνατό να προκαλεί αρκετά καλή ανάμιξη του αέρα στο θερμοκήπιο. Από την άλλη πλευρά, ο αέρας που περιέβαλε το κατώτερο στρώμα της καλλιέργειας ήταν ψυχρότερος και περισσότερο υγρός υπό συνθήκες φυσικού αερισμού.
- Ο δροσισμός του θερμοκηπίου με σύστημα τεχνητής ομίχλης προκάλεσε ταυτόχρονη σημαντική πτώση της θερμοκρασίας και του ελλείμματος κορεσμού του αέρα.

Συγκριτικά, ο αποτελεσματικότερος συνδυασμός για τη μείωση των ακραίων συνθηκών στο θερμοκήπιο ήταν το σύστημα δροσισμού σε συνδυασμό με τη σκίαση και την καλλιέργεια με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια, ενώ ακολουθούν ο φυσικός αερισμός σε συνδυασμό με τη σκίαση και την καλλιέργεια με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια και ο δυναμικός αερισμός σε συνδυασμό με τη σκίαση και την καλλιέργεια με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια.

Παράλληλα, έγινε φανερό ότι ένας υψηλός ρυθμός αερισμού δεν είναι και υποχρεωτικά η καλύτερη λύση για την ανακούφιση του θερμοκηπίου και της καλλιέργειας από τις συνθήκες καταπόνησης κατά τη διάρκεια καλοκαιρινών συνθηκών. Ο φυσικός αερισμός, όταν δεν περιορίζεται εξαιτίας των πολύ χαμηλών ταχυτήτων του εξωτερικού ανέμου, ίσως είναι περισσότερο κατάλληλος για την αποφυγή συνθηκών καταπόνησης, καθόσον δημιουργεί ένα περισσότερο υγρό και ψυχρό περιβάλλον γύρω από την καλλιέργεια. Επιπλέον, φαίνεται πως υπάρχει μια βέλτιστη τιμή του ρυθμού ανανέωσης του αέρα, η οποία βασίζεται σε φυσιολογικά κριτήρια και η οποία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως οι συνθήκες ταχύτητας ανέμου έξω από το θερμοκήπιο, η θερμοκρασία και υγρασία, τα χαρακτηριστικά της ροής του ανέμου μέσα στο θερμοκήπιο (τα οποία εξαρτώνται από τον τύπο του αερισμού), η αεροδυναμική αγωγιμότητα και η ιδιαίτερη αντίδραση των διαφόρων ειδών στην υγρασία. Επομένως, όταν γίνεται έρευνα για την εύρεση της

βέλτιστης (και χρονικά μεταβαλλόμενης) τιμής του ρυθμού ανανέωσης του αέρα θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και να συνεκτιμηθούν όλες οι παραπάνω παράμετροι.

Όσον αφορά στην επίδραση του αερισμού, της σκίασης, του δροσισμού και της φυλλικής επιφάνειας, στο δείκτη υδατικής καταπόνησης και στη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας, παρατηρήθηκε ότι:

- Η χρήση του συστήματος τεχνητής ομίχλης μείωσε δραστικά το δείκτη υδατικής καταπόνησης και αύξησε σημαντικά τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη αγωγιμότητα παρατηρήθηκε κατά την περίοδο με τη σκίαση και το σύστημα δροσισμού σε λειτουργία.
- Η χρήση διαφορετικού τύπου αερισμού δεν προκάλεσε μεταβολή στο δείκτη υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας αλλά ο υψηλός ρυθμός ανανέωσης του αέρα (δυναμικός αερισμός) συνετέλεσε στη μείωση της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας.
- Η σκίαση του θερμοκηπίου και η μεγάλη φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας μέσα από τις αλληλεπιδράσεις της καλλιέργειας με το μικροκλίμα, οδήγησαν σε μείωση του δείκτη υδατικής καταπόνησης και αύξηση της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας.

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω στοιχεία, σε συνάρτηση με το συντελεστή εξάτμισης, για τη συγκριτική αξιολόγηση των μεταχειρίσεων που έγιναν ως προς την αποτελεσματικότητα ψύξης του θερμοκηπίου και την ανακούφιση της καλλιέργειας από τις συνθήκες καταπόνησης, μπορούμε να πούμε ότι ο καλύτερος συνδυασμός ήταν αυτός με το σύστημα δροσισμού, τη σκίαση και την καλλιέργεια με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια, ενώ ακολουθούν ο φυσικός αερισμός σε συνδυασμό με τη σκίαση και την καλλιέργεια με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια και ο δυναμικός αερισμός σε συνδυασμό με τη σκίαση και την καλλιέργεια με τη μεγάλη φυλλική επιφάνεια.

Επιπλέον, η μεγάλη φυλλική επιφάνεια, συνοδευόμενη με επαρκή τροφοδοσία της καλλιέργειας με νερό, φάνηκε πως ήταν αποτελεσματικό μέσο αποφυγής θερμικής και υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας ακόμη και όταν η ψύξη με τεχνητά μέσα δεν ήταν διαθέσιμη. Για το λόγο αυτό, συνιστάται η υποστήριξη της ανάπτυξης υψηλού δείκτη φυλλικής επιφάνειας στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες των Μεσογειακών και ξηρών περιοχών. Ο φυσικός αερισμός από την άλλη πλευρά, όταν δεν συνδυάστηκε

με κανένα άλλο σύστημα κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, προκάλεσε τη δημιουργία συνθηκών που οδήγησαν την καλλιέργεια σε κατάσταση θερμικής και υδατικής καταπόνησης και συντέλεσε στον περιορισμό των ανταλλαγών ενέργειας και μάζας της καλλιέργειας με το περιβάλλον της.

Παράλληλα, έγινε φανερό ότι η χρήση διαφορετικού τύπου αερισμού (φυσικός-δυναμικός) προκαλεί σημαντικές διαφορές στην αεροδυναμική αγωγιμότητα της καλλιέργειας. Οι μεταβολές αυτές δεν επηρέασαν τον καταμερισμό της ενέργειας στο επίπεδο της καλλιέργειας αφού ο δυναμικός αερισμός για παράδειγμα, μπορεί να προκάλεσε αύξηση της αεροδυναμικής αγωγιμότητας αλλά ταυτόχρονα οδήγησε σε μείωση της στοματικής αγωγιμότητας, λόγω της αλληλεπίδρασης και ανάδρασης μεταξύ του ελλείμματος κορεσμού καλλιέργειας-αέρα και της στοματικής αγωγιμότητας, επιτρέποντας έτσι στην καλλιέργεια να διατηρήσει παρόμοια επίπεδα διαπνοής. Επιπλέον, η χρήση του συστήματος δροσισμού προκάλεσε μείωση του ελλείμματος κορεσμού στο θερμοκήπιο κάτι όμως που οδήγησε σε σημαντική αύξηση της στοματικής αγωγιμότητας της καλλιέργειας, επιτρέποντας έτσι και σε αυτή την περίπτωση στη διαπνοή να παραμείνει σε παρόμοια επίπεδα. Αντίθετα, η σκίαση του θερμοκηπίου και η μεγάλη φυλλική επιφάνεια οδήγησαν μέσα από τις αλληλεπιδράσεις της καλλιέργειας με το μικροκλίμα σε αύξηση του ρυθμού διαπνοής της καλλιέργειας αυξάνοντας έτσι τη διαδικασία της ψύξης στο θερμοκήπιο.

Τέλος, από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην εργασία αυτή έγινε φανερή η σημαντικότητα του δείκτη φυλλικής επιφάνειας, τόσο στον έλεγχο του μικροκλίματος όσο και στο σχεδιασμό των συστημάτων ψύξης των θερμοκηπίων. Για το λόγο αυτό ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας θα πρέπει να λαμβάνεται ως μία βασική παράμετρος τόσο στους αλγορίθμους για τον έλεγχο του μικροκλίματος όσο και στη διαδικασία του σχεδιασμού των συστημάτων ψύξης των θερμοκηπίων. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι η απόφαση για τη χρήση του δροσισμού της σκίασης ή του αερισμού για παράδειγμα εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την τιμή του δείκτη φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας. Επιπλέον, έγινε φανερό ότι ο δείκτης υδατικής καταπόνησης της καλλιέργειας ο οποίος βασίζεται στη θερμοκρασία της καλλιέργειας, αποτελεί ένα χρήσιμο και αξιόπιστο εργαλείο το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον έλεγχο του κλίματος στο θερμοκήπιο.

Οι απαραίτητες ποιοτικές παρατηρήσεις και μετρήσεις για την ποσοτική περιγραφή των μηχανισμών που επηρεάζουν και καθορίζουν τα κριτήρια για τη βελτιστοποίηση του μικροκλίματος του θερμοκηπίου έγιναν. Η ενσωμάτωση όλων των παραπάνω πληροφοριών σε ένα προσομοίωμα για τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση του μικροκλίματος του θερμοκηπίου αποτελεί το επόμενο βήμα της παρούσης εργασίας.

Βιβλιογραφία



- 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
- Aikman, D. P., Houter, G., 1990. Influence of radiation and humidity on transpiration: Implications for calcium levels in tomato leaves. *Journal of Horticultural Science*, 65(3): 245-253
- Alados, I., Alados-Arboledas, L., 1999. Direct and diffuse photosynthetically active radiation: measurements and modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93: 27-38
- Aphalo, P. J., Jarvis, P. G., 1981. Do stomata respond to relative humidity? *Plant, Cell and Environment*, 14: 127-132
- Aphalo, P. J., Jarvis, P. G., 1993. The boundary layer and the apparent responses of stomatal conductance to wind speed and to the mole fractions of CO₂ and water vapour in the air. *Plant, Cell and Environment*, 16: 771-783
- Arbel, A., Yekutieli, O., Barak, M., 1999. Performance of a fog system for cooling greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72: 129-136
- ASAE, 1999. Heating, ventilating and cooling greenhouses. ANSI/ASAE standard EP406.3. *ASAE Standards 1999*: 679-686
- ASHRAE, 1983. Air conditioning and Heating. In: *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. New York: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineering Inc
- Aubinet, M., Deltour, J., De Halleux, D., 1989. Stomatal regulation in greenhouse crops: Analysis and simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 48: 21-44
- Avissar, R., Avissar P., Mahrer, Y., Bravdo, B. A., 1985. A model to simulate response of plant stomata to environmental conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 34: 21-29
- Bailey, B. J., 1985. Microclimate, physical processes and greenhouse technology. *Acta Horticulturae*, 174: 35-42
- Baille, A., 1993. Specific objectives and constraints in irrigation management of greenhouse crops under Mediterranean conditions. *Workshop on Sound Water Management of Protected Agriculture under Mediterranean and Arid Climates*, CIHEAM, Bari, Italy

-
- Baille, A., 1996. Overview of greenhouse climate control in the Mediterranean regions. *Mediterranean Colloquium on Protected Cultivation*, Agadir, Morocco.
- Baille, A., 1999. Greenhouse structure and equipment for improving crop production in mild winter climates. *Acta Horticulturae*, 491: 37-47
- Baille, M., Baille, A., Delmon, D., 1994a. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71: 83-97
- Baille, M., Baille, A., Laury, J. C., 1994b. Canopy surface resistance to water vapour transfer for nine ornamental pot plants crops. *Scientia Horticulturae*, 57: 143-155.
- Baille, M., Baille, A., Laury, J. C., 1994c. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species versus climate factors and leaf area. *Scientia Horticulturae*, 59: 217-232
- Baille, M., Mermier, M., Laury, J. C., Delmon, D., 1980. Le point sur les systèmes d'ombrage sous serre. *Internal Report M/801*. INRA, Station de Bioclimatologie d'Avignon, Montfavet, France
- Bakker, J. C., 1991. Leaf conductance of four glasshouse vegetable crops as affected by air humidity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 55: 23-36
- Baldocchi, D. D., Hicks, B. B., Camara, P., 1987. A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces. *Atmospheric Environment*, 21: 91-101
- Ball, J. T., Woodrow, I. E., Berry, J. A., 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In: Biggings, J., (Editor). *Proceedings of the 7th international congress in 'Progress in photosynthesis research'*. Dordrecht, Martinus Nijhoff Publishers, 221-224
- Baptista, F. J., Bailey, B. J., Randall, J. M., Meneses, J. F., 1999. Greenhouse ventilation rate: Theory and measurement with tracer gas techniques. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72: 363-374
- Bot, G. P. A., 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. *Ph D Thesis*, Landbouwhogeschool, Wageningen, The Netherlands, 240 pp
- Boulard, T., 1996. Caractérisation et modélisation du climat des serres. Application à la climatisation estivale. *Ph D Thesis*, ENSA Montpellier, France, 121 pp
- Boulard, T., Baille, A., 1987. Analysis of thermal performances of greenhouse as solar collector. *Energy in Agriculture*, 5: 175-84

- Boulard, T., Baille, A., 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of aeration and evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65: 145-57
- Boulard, T., Baille, A., 1995. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61(1): 37-48
- 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
- Boulard, T., Draoui, B., 1995. Natural ventilation of greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61: 27-36
- Boulard, T., Feuilloley, P., Kittas, C., 1997. Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67: 249-266
- Boulard, T., Jemaa, R., 1992. Greenhouse tomato crops transpiration, application to irrigation control. *Acta Horticulturae*, 335: 381 – 387
- Boulard, T., Jemaa, R., Baille, A., 1996. Validation of a greenhouse tomato crop transpiration model in Mediterranean conditions. *Acta Horticulturae*, 449: 551-559
- Boulard, T., Wang, S., 2000. Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100: 25-34
- Boulard, T., Meneses, J. F., Mermier, M., Papadakis, G., 1995. The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 79: 61-77
- Brun, R., Lagier, J., 1985. A new greenhouse structure adapted to the Mediterranean growing conditions. *Acta Horticulturae*, 170: 34-46
- Bunce, J. A., 1985. Effect of boundary layer conductance on the response of stomata to humidity. *Plant, Cell and Environment*, 8: 55-57
- Chalabi, Z. S., Bailey, B. J., 1989. Simulation of the energy balance in a greenhouse. *Divisional Note*, DN. 1516, AFRC Institute of Agricultural Engineering Research, Silsoe, UK
- Challa, H., Bot, G. P. A., Nederhoff, E. M., van de Braak, N. J., 1988. Greenhouse climate control in the nineties. *Acta Horticulturae*, 230: 459-70

-
- Chen, J., 1984. Mathematical analysis and simulation of crop micrometeorology. *Ph D Thesis*, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 116 pp
- Choudhury, B. J., Idso, S. B., 1985. An empirical model for stomatal resistance of field-grown wheat. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36: 65-82
- Choudhury, B., 1983. Simulating the effects of weather variables and soil water potential on a corn canopy temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 29: 169-182
- Choudury, B. J., Monteith, J. L., 1986. Implications of stomatal responses to saturation deficit for the heat-balance of vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36: 215-225
- Cockshull, K. E., Graves, C. J., Cave, C. R. J., 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, 67: 1-24
- Cohen, Y., Stanhill, G., Fuchs, M., 1983. An experimental comparison of evaporative cooling in a naturally ventilated greenhouse due to wetting the outer roof and inner crop soil surfaces. *Agricultural Meteorology* 28: 239-251
- Collatz, G. J., Ball, J. T., Grivet, C., Berry, J. A., 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
- 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
- De Graaf, R., van den Ende, J., 1981. Transpiration and evapotranspiration of the glasshouse crops. *Acta Horticulturae*, 119: 147-158
- De Jong, T., Stanghellini, C., 1996. A model of greenhouse humidity suitable for control of crop processes. *Acta Horticulturae*, 406: 125-132
- De Villèle, O., 1972. Besoins en eau des cultures sous serres - Essai de conduite des arrosages en fonction de l'enseillement. *Acta Horticulturae* 35: 123-135
- Dwyer, L. M., Stewart, D. W., 1984. Indicators of plant stress in corn (*Zea mais* L.). *Canadian Journal of Plant Science*, 64: 537-546
- El Sharkawy, M. A., Cock, J. H., 1986. The humidity factor in stomatal control and its effect on crop productivity. In: Marcelle, R., Clijsters, H., van Poucke, M.,

- (Editors), *Biological Control of Photosynthesis*. Martinus Nijhoff, Dordrecht, 187-198
- El Gizawy, A. M., Abdallah, M. M. F., Gomaa, H. M., Mohamed, S. S., 1993a. Effect of different shading levels on tomato plants. 2. Yield and fruit quality. *Acta Horticulturae* 323: 349-354
- El Gizawy, A. M., Gomaa, H. M., El Habbasha, K. M., Mohamed, S. S., 1993b. Effect of different shading levels on tomato plants 1. Growth, flowering and chemical composition. *Acta Horticulturae*, 323: 341-348
- FAO, 1977. Crop water requirements. *FAO irrigation and drainage*, Paper No. 24: 15-44
- Farquhar, G. D., 1978. Feedforward response of stomata to humidity. *Australian Journal of Plant Physiology*, 5: 787-800
- Farquhar, G. D., Sharkey, T. D., 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 33: 317-345
- Fernandez, J. E., Bailey, B. J., 1992. Measurement and prediction of greenhouse ventilation rates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 229-45
- Fernandez, J. E., Bailey, B. J., 1994. The influence of fans on environmental conditions in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 58: 201-210
- 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
- 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
- Fuchs, M., 1990. Effect of transpiration on greenhouse cooling. In: Segal, I., (Editor) *Proceedings of the international Seminar and British – Israel Workshop on Greenhouse Technology*. Agricultural Research Organization, Bet Dagan, Israel, 155 – 181
- Fuchs, M., 1993. Transpiration and foliage temperature in a greenhouse. In: Fuchs, M., (Editor), *Proceedings of the International Workshop on Cooling Systems for Greenhouses*, Tel Aviv, Israel, 89 – 98

-
- Fuchs, M., Dayan, E., Shmuel, D., Zipori, I., 1997. Effects of ventilation on the energy balance of a greenhouse with bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86: 273-282
- Garzoli, K. V., Blackwell, J., 1973. The response of a glasshouse to high solar radiation and ambient temperature. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 18: 205-216
- Gautier, H., Tchamitchian, M., Guichard, S., 1999. Effects of decreasing VPD by misting on leaf area and leaf inclination in tomato and estimation of consequences on light absorption. *Acta Horticulturae*, 507: 77-84
- Giacomelli, G. A., Giniger, M. S., Krauss, A. E., Hears, D. R., 1985. Improved methods of greenhouse evaporative cooling. *Acta Horticulturae*, 174: 49-55
- González-Real, M. M., 1995. Estudio y modelización de intercambios gaseosos en cultivos de rosas bajo invernadero. *Ph D Thesis*, Universidad Politecnica de Valencia, Spain, 192 pp
- González-Real, M. M., Baille, A., 2000. Changes in leaf photosynthetic parameters with leaf position and nitrogen content within a rose plant canopy (*Rosa hybrida*). *Plant, Cell and Environment*, 23: 351-363
- González-Real, M., Baille, A., 2001. Simulating the behaviour of a greenhouse rose crop by means of a model including physical and physiological feedback loops. *Acta Horticulturae*, 559: 441-448
- Grantz, D. A., Zeiger, E., 1986. Stomatal responses to light and leaf – air water vapour pressure difference show similar kinetics in sugarcane and soybean. *Plant Physiology*, 81: 865-868
- Gutierrez, M. V., Meinzer, F. C., Grantz, D. A., 1994. Regulation of transpiration in coffee hedgerows: covariation of environmental variables and apparent responses of stomata to wind and humidity. *Plant, Cell and Environment*, 17: 1305-1313
- Haxaire, R., 1999. Caractérisation et modélisation des écoulements d'air dans une serre. *Thèse*, Université de Nice, Sophia Antipolis, France, 149 pp
- Haxaire, R., Boulard, T., Mermier, M., 1999. Greenhouse natural ventilation by wind forces. *Acta Horticulturae*, 534: 31-40
- Idso, S. B., 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural and Forest Meteorology*, 27: 59-70

- Idso, S. B., Pinter, P. J., Reginato, R. J., 1990. Non-water-stressed baselines: the importance of site selection for air temperature and air vapour pressure deficit measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 53: 73-80
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., Pinter, J. R., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17: 1133-1138
- Jarvis, P. G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London, B*, 273: 593-610
- Jarvis, P. G., 1985. Coupling of transpiration to the atmosphere in horticultural crops: the omega factor. *Acta Horticulturae*, 171: 187-205
- Jarvis, P. G., McNaughton, K. G., 1986. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*, 15: 3-50
- Javoy, M., Letard, M., Pelletier, B., 1990. Le concombre en culture hors sol. Les éléments de conduite. *Infos CTIFL Hos série Cultures légumières sur substrats*, 53-68
- Jolliet, O., 1994. HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57: 23-37
- Jolliet, O., 1999. The water cycle. In: Stanhill, G., Zvi Encoch, H., (Editors) *Ecosystems of the world - 20 - Greenhouse ecosystems*, 423 pp
- Jolliet, O., Bailey, B. J., 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58: 43-62
- Jones, H. G., 1992. *Plants and Microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 428 pp
- Karica, M., Short, T. H., Stowell, R. P., 1998. A CFD evaluation of naturally ventilated multi-span, sawtooth greenhouses. *Transactions of the ASAE*, 41(3): 833-836
- Katerji, N., Perrier, A., 1985. Détermination de la résistance globale d'un couvert végétal a la diffusion de vapeur d'eau et des ses différentes composantes. Approche théorique et vérification expérimentale sur une culture de luzerne. *Agricultural and Forest Meteorology*, 34: 105-120

-
- Katsoulas, N., Kittas, C., Baille, A., 1999. Estimating transpiration rate and canopy resistance of a rose crop in a fan-ventilated greenhouse. *Acta Horticulturae*, 548: 303-309
- Kaufmann, M. R., 1982. Leaf conductance as a function of photosynthetic photon flux density and absolute humidity difference from leaf to air. *Plant Physiology*, 69: 1018-1022
- Kimball, S. A., 1986. A modular energy balance program including subroutines for greenhouses and the other latent heat devices. United States Department of Agriculture. *Agricultural Research Service, ARS-33*, Phenix, USA, 360 pp
- Kittas, C., Baille, A., Giaglaras, P., 1999a. Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73: 341-351
- Kittas, C., Baille, A., Katsoulas, N., 1999b. Transpiration and canopy resistance of greenhouse soilless roses in Greece. Measurements and modelling. *Acta Horticulturae*, 507: 61-68
- Kittas, C., Baille, A., Katsoulas, N., 2001. Transpiration and energy balance of a greenhouse rose crop in Mediterranean summer conditions. *Acta Horticulturae*, 559: 395-400
- Kittas, C., Boulard, T., Mermier, M., Papadakis, G., 1996. Wind induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 65: 37-49
- Kittas, C., Boulard, T., Papadakis, G., 1997. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the ASAE*, 40(2): 415-425
- Kittas, C., Chiapale, J. P., de Villèle, O., Aries, F., 1987. Paramètres significatifs du déterminisme de la température de l'air de la serre. *Agricultural and Forest Meteorology*, 40: 265-277
- 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
- Kool, M. T., van de Pol, P. A., 1996. Long-term flower production of a rose crop. I. The influence of planting system and rootstock clone. *Horticultural Science*, 71(3): 435-443

- Landsberg, J. J., White, B., Thorpe, M. R., 1979. Computer analysis of the efficiency of evaporative cooling for glasshouse in high energy environments. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 24: 29-39
- Lange, O. L., Lösch, R., Schulze, E. D., Kappen, L., 1971. Response of stomata to changes in humidity. *Planta Berlin*, 100: 76-86
- Leuning, R., 1995. A critical appraisal of a combined stomatal photosynthesis model for C3 plants. *Plant, Cell and Environment*, 18: 339-355
- Lindroth, A., 1985. Canopy conductance of coniferous forests related to climate. *Water Resource Research*, 21: 297-304
- Lorenzo, P., Medrano, E., García, M., 1993. Irrigation management in perlite. *Acta Horticulturae*, 335: 429-434
- Miguel, A. F., Braak, N. J., van de Silva, A. M., Bot, G. P. A., 1998. Physical modelling of natural ventilation through screens and windows in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70: 165-176
- Miguel, A. F., Silva, A. M., Rosa, R., 1994. Solar irradiation inside a single span greenhouse with shading screens. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 59: 61-72
- Mistriotis, A., Bot, G. P. A., Picuno, P., Scarascia-Mugnozza, G., 1997. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 85: 217-228
- Monteith, J. L., 1973. *Principles of environmental Physics*. Contemporary Biology, Edward Arnold, London, UK, 241 pp
- Monteith, J. L., 1981. Coupling of plants to the atmosphere. In: Grace, J., Ford, E. D., Jarvis, P. G. (Editors) *Plants and their Atmospheric Environment*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK, 1-29
- Monteith, J. L., 1995. A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant, Cell and Environment*, 18: 357-364
- Montero, J. I., Antón, A., 1994. Greenhouse cooling during warm periods. *Acta Horticulturae*, 357: 49-61
- Montero, J. I., Antón, A., Beil, C., Franquet, A., 1990. Cooling of greenhouses with compressed air fogging nozzles. *Acta Horticulturae*, 281: 199-209

-
- Montero, J. I., Antón, A., Muñoz, P., Lorenzo, P., 2001. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107: 323-332
- Montero, J. I., Segal, I., 1993. Evaporative cooling of greenhouses by fogging combined with natural ventilation and shading In: M. Fuchs (Editor), *Proceedings of the International Workshop on Cooling Systems for Greenhouses*, Tel Aviv, Israel, 89-99
- Morris, L. G., Neale, F. E., Postlethwaite, J. D., 1957. The transpiration of glasshouse crops and its relationship to the incoming solar radiation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2(2): 111-122
- Munoz, P., Montero, J. I., Antón, A., Giuffrida, F., 1999. Effect of insect-proof screens and roof openings on greenhouse ventilation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73: 171-178
- Munro, D. S., 1989. Stomatal conductances and surface conductance modelling in mixed wet-land forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 48: 235-249
- 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
- Nederhoff, E., Vegter, J. G., 1994. Canopy photosynthesis of tomato, cucumber and sweet pepper in greenhouses: measurements compared to models. *Annals of Botany*, 73(4): 421-427
- Neilson, R. E., Jarvis, P. G., 1975. Photosynthesis in Sitka Spruce. VI. Response of stomata to temperature. *Journal of Applied Ecology*, 12: 721-745
- Nisen, A., Coutisse, S., 1981. Modern concept of greenhouse shading. *Plasticulture*, 49: 9-26
- Okuya, A., Okuya, T., 1988. The transpiration of greenhouse tomato plants in rockwool culture and its relationship to climatic factors. *Acta Horticulturae*, 230: 307-311
- Papadakis, G., Frangoudakis, A., Kyritsis, S., 1994a. Experimental investigation and modelling of heat mass transfer between a tomato crop and greenhouse environment. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57: 217-227

- Papadakis, G., Mermier, M., Meneses, J. F., Boulard, T., 1994b. Measurements and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63: 219-227
- Papadakis, G., Mermier, M., Meneses, J. F., Boulard, T., 1996. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63: 219-28
- Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society, London, A*, 193: 120-145
- Plaut, Z., Zieslin N., 1977. The effect of canopy wetting on plant water status, CO₂ fixation, ion content and growth rate of 'Baccara' roses. *Physiologia Plantarum*, 39: 317-322
- Plaut, Z., Zieslin, N., Grawa, A., Gazit, M., 1979. The response of rose plants to evaporative cooling: flower production and quality. *Scientia Horticulturae*, 11: 183-190
- Schulze, E. D., 1986. Carbon dioxide and water vapour exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Annual Review of Plant Physiology*, 37: 247-274
- Seginer, I., 1984. On the night transpiration of greenhouse roses under glass or plastic cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 30: 257-68
- Seginer, I., 1994. Transpirational cooling of a greenhouse crop with partial ground cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71: 265-281
- Seginer, I., 1997. Alternative design formulae for the ventilation rate of greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 68(4): 355-365
- Seginer, I., Kantz, D., 1986. In-situ determination of transfer coefficients for heat and water vapour in a small greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 35: 39-54
- Short, T. H., Duyne, G. V., 1990. Multi-span sawtooth greenhouses for the Mediterranean basin. *ASAE*, Paper No. 90-4535
- Simpson, J. R., Fritshen, L. J., Walker, R. B., 1985. Estimating stomatal diffusion resistance for Douglas-Fir, Lodgepole Pine and White Oak under light saturated conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 33: 299-313
- Smith, I. E., Savage, M. J., Mills, P. 1984. Shading effects on greenhouse tomatoes and cucumbers. *Acta Horticulturae*, 148: 491-500

-
- Spoelstra, P. A., 1975. Comparative measurements of fan and pad cooling and plant watering. *Acta Horticulturae*, 46: 23-31
- Stanghellini, C., 1983. Evaporation of a greenhouse crop and its relationship to the supply of heat. *Research report 83-6*, IMAG, Wageningen, The Netherlands, 31 pp
- Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops: an aid to climate management. *PhD Thesis*, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, 150 pp
- Stanghellini, C., 1993. Mixed convection above greenhouse crop canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 66: 111-117
- Stanghellini, C., 1995. Response to comments on 'Thermal and aerodynamic conditions in greenhouses in relation to estimation of heat flux and evapotranspiration'. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77: 137-138
- Stanghellini, C., de Jong, T., 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76: 129-148
- Takagi, K., Tsuboya, T., Takahashi, H., 1998. Diurnal hystereses of stomatal and bulk surface conductances in relation to vapour pressure deficit in a cool-temperate wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91: 177-191
- Takami, S., Uchijima, Z., 1977. A model for the greenhouse environment as affected by the mass and energy exchange of a crop. *Agricultural Meteorology*, 33: 117-127
- Teitel, M., Tanny, J., 1999. Natural ventilation of greenhouses: experiments and model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96: 59-70
- Turner, N. C., 1974. Stomatal behaviour and water status of maize, sorghum, and tobacco under field conditions. *Plant Physiology*, 53: 360-365
- Urban, I., Brun, R., Urban, L., 1995. Influence of electrical conductivity, relative humidity and seasonal variations on the behaviour of cut roses produced in soilless culture. *Acta Horticulturae*, 408: 101-108
- Van Bavel, C. H. M., 1974. Soil water potential and plant behaviour: a case modelling study with sunflowers. *Ecologia Plantarum*, 9: 89-109
- Van Bavel, C. H. M., Damagnez, J., Sadler, E. J., 1981. The fluid-roof solar greenhouse: energy budget analysis by simulation. *Agricultural Meteorology*, 23: 61-76
- Van der Post, C. J., van Schie, J. J., de Graaf, R., 1974. Energy balance and water supply in glasshouses in the West-Netherlands. *Acta Horticulturae*, 35: 13-22

- Van Meurs, W. T. M., Stanghellini, C., 1989. A transpiration-based climate control algorithm. *Acta Horticulturae*, 245: 476-482
- Verloot, H., Triki, J., Ennabli, N., 1984. Influence of different aeration systems on the climate and the fruit-set of muskmelon under PE greenhouse. *Acta Horticulturae*, 154: 281-289
- Wang, S., 1998. Measurement and modeling of natural ventilation in a large Venlo-type greenhouse. *PhD Thesis*, Gembloux Agricultural Faculty, Belgium, 194 pp
- Wang, S., Deltour, J., 1996. An experimental ventilation function for large greenhouses based on a dynamic energy balance model. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 5(3&4): 103-112
- Wang, S, Boulard, T., Haxaire, R., 1999. Air speed profiles in a naturally ventilated greenhouse with a tomato crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96(4): 181-188
- White, R. A. J., 1975. Effect of ventilation on maximum air temperatures in twelve identical glasshouses. *Acta Horticulturae*, 46: 63-70
- 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
- Yang, X., 1995. Comments on 'Thermal and aerodynamic conditions in greenhouses in relation to estimation of heat flux and evapotranspiration'. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77: 131-136
- Yang, X., Short, T. H., Fox, R. D., Bauerle, W. L., 1989. The microclimate and transpiration of a greenhouse cucumber crop. *American Society of Agricultural Engineers*, 32(6): 2143-2150
- Yang, X., Short, T. H., Robert, D. F., Bauerle, W. L., 1990. Transpiration, leaf temperature and stomatal resistance of a cucumber crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51:197-209
- Zeiger, E., 1983. The biology of stomatal guard cells. *Annual Review of Plant Physiology*, 34: 441-475
- Zhang, L., Lemeur, R., 1992. Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58: 209-228

-
- Zhang, Y., Mahrer, Y., Margolin, M., 1997. Predicting the microclimate inside a greenhouse: an application of a one-dimensional numerical model in an unheated greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86: 291-297
- Κατσούλας, Ν., Λύκας, Χ., Γιαγλάρας, Π., Κίττας, Κ., 2000. Διαχείριση θρεπτικού διαλύματος σε κλειστό υδροπονικό σύστημα με καλλιέργεια τριανταφυλλιάς στη Μαγνησία. *Γεωργία και Κτηνοτροφία*, 6: 42-50
- Κίττας, Κ., Καραμάνης, Μ., Κατσούλας, Ν., 1999. Διερεύνηση των παραγόντων που καθορίζουν την θερμοκρασία του αέρα ενός δυναμικά αεριζόμενου πλαστικού θερμοκηπίου τριανταφυλλιάς. *Πρακτικά 6^{ου} Εθνικού Συνεδρίου Ινστιτούτου Ηλιακής Τεχνικής*, Β: 35-42
- Παπαδάκης, Γ., 1989. Πειραματική ανάλυση και δυναμική προσομοίωση του μικροκλίματος στο θερμοκήπιο. *Διδακτορική διατριβή*, Γεωργικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 166 pp

Summary



INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL VARIABLES ON GREENHOUSE ROSE CROP TRANSPIRATION

During summer heat and water stress of the crop is one of the most important problems that greenhouse production faces. Climate control systems-techniques such as ventilation, shading and cooling are used in order to obtain favourable climatic conditions for crop growth and production. These systems aim to control the incoming solar radiation, greenhouse air temperature and vapour pressure deficit, factors that have a direct effect on crop transpiration.

The objective of this study was the comparative analysis of the performances of different methods used for cooling the greenhouse environment during summer conditions. At this aim, data on environmental and crop variables were collected during summer periods and analysed in order to evaluate the performances of four cooling techniques that are commonly used by growers, namely ventilation, forced ventilation, roof whitening and misting. Special attention was also devoted to the influence of leaf area index on canopy energy partitioning, since the crop contributes naturally by transpiration to the greenhouse cooling.

Focus was put on the following aspects related to climate and crop processes: (a) analysis of energy partitioning at the canopy scale through the characterisation of transpiration rate, sensible heat flux and stomatal conductance of the canopy, (b) characterisation of the bulk aerodynamic and stomatal conductance of the canopy and their possible links with the air renewal rate, and (c) to the modifications induced by the above climate control systems to the crop water stress index.

The main indices-criteria selected in this study to characterise the system greenhouse-crop was the crop water stress index and stomatal conductance. The crop water stress index was selected because it shows the heat and water stress that the crop goes through while the stomatal conductance was selected because it is important in the energy partitioning and, in relation to the aerodynamic conductance indicates the ability of the crop to exchange heat and mass and characterises the extent to which canopy conductance controls transpiration and CO₂ assimilation.

Concerning the influence of greenhouse ventilation, shading, misting and leaf area index variations on greenhouse microclimate, it was found that:

-
- Natural ventilation was not sufficient for greenhouse cooling during summer since it induced extreme temperature and humidity conditions.
 - Greenhouse shading reduced radiation load and in combination with natural ventilation lead to temperature and vapour pressure deficit reduction.
 - The use of different type of ventilation regimes created significant differences in the greenhouse microclimate since forced ventilation for example induced a more homogeneous vertical field of temperature and humidity compared with natural ventilation, by providing more intensive mixing of the inside atmosphere. On the other hand, the air surrounding the lower part of the canopy was cooler and more humid under natural ventilation than under forced ventilation.
 - The use of mist system significantly reduced temperature and vapour pressure deficit.

It was shown that a high rate of ventilation is not a priori the best solution for alleviating crop stress in greenhouse during summer conditions. When not limited by low external wind speed, natural ventilation may be more appropriate as it creates a more humid and cooler environment, although less homogeneous, around the canopy. Therefore, it appears that a physiologically-based optimal value for the air exchange rate exists, and that this value depends on several factors: the outside conditions of wind, temperature and humidity, the internal air flow characteristics (which depends on the type of ventilation), the aerodynamic conductance and the specific stomatal response of the species to humidity. All these factors have to be taken into account when searching for the optimal (and time-variable) value of ventilation rate.

As far as it concerns the influence of greenhouse ventilation, shading, misting and leaf area index variations on crop water stress index and crop stomatal conductance, it was found that:

- The use of mist system significantly reduced crop water stress index and lead to an important increase of canopy stomatal conductance. It has to be noticed that the highest canopy stomatal conductance was observed during the period that the mist system was used.

- The use of different ventilation system did not influence the value of crop water stress index but the high ventilation rate contributed to the decrease of canopy stomatal conductance.
- Greenhouse shading in combination with high leaf area index resulted in lower values of the crop water stress index and in significant increase of canopy stomatal conductance, due to the feedback between canopy-to-air vapour pressure deficit and stomatal conductance.

It was also found that high leaf area index associated with an adequate water supply was quite effective in avoiding strong canopy stress in greenhouse summer conditions, even when artificial evaporative cooling was not available. Therefore the development of high leaf area is favourable and could be recommended during summer cropping in greenhouses of Mediterranean and arid countries.

Furthermore, it was found that the use of different ventilation systems caused significant changes in the bulk aerodynamic conductance. However, these changes did not appear to modify the energy partitioning at the canopy level since, forced ventilation for example, increased the canopy aerodynamic conductance but simultaneously caused a decrease in canopy stomatal conductance, due to the feedback between canopy-to-air vapour pressure deficit and stomatal conductance, allowing in that way the canopy to maintain similar levels for transpiration rate. In addition, the use of mist system increased stomatal conductance, through the decrease in vapour pressure deficit, allowing the crop to maintain similar levels for transpiration rate. In contrast, greenhouse shading and high leaf area index lead to increase of transpiration rate enhancing in that way the greenhouse cooling process through the interactions of crop with the microclimate.

The body of results obtained in this study stress the fundamental importance of canopy leaf area index in greenhouse climate management as well as in the design of cooling systems. Therefore, it has to be incorporated as a basic input parameter in climate control algorithms as well as in design processes. In this way, it could be concluded that the interest of using mist systems or whitening would depend strongly on the value of the canopy leaf area index. Also, the management of the ventilation system will be influenced by this parameter. In particular, it was shown that a crop

water stress index based on leaf temperature is a valuable indicator for assessing the physiological response of the crop to environmental variables. Therefore, it could be recommended as a performance criterion to be used in the development of advanced algorithms for greenhouse climate control. To summarise, the incorporation of information and data about the physiological status and characteristics of the canopy into greenhouse climate controllers appears to be of primary importance in the optimisation of greenhouse climate management, and would logically constitute the continuation of the present work.

Keywords: Ventilation, shading, misting, leaf area index, stomatal conductance, aerodynamic conductance, crop water stress index, energy partitioning, sensible heat, heat and mass transfer, transpiration.

Résumé

INFLUENCE DES VARIABLES DE L'ENVIRONNEMENT SUR LA TRANSPIRACIÓN DE CULTURES DE ROSE SOUS SERRE

L'objectif de ce travail est l'analyse comparative des performances de différents systèmes de refroidissement en cultures sous serre durant la période estivale. Dans ce but, des mesures de variables climatiques comme de variables liées à l'activité physiologique de la culture ont été réalisées durant deux étés consécutifs. Cet ensemble de données a été analysé afin d'évaluer les performances respectives de quatre méthodes de refroidissement couramment pratiquées par les serristes, à savoir la ventilation statique, la ventilation forcée, le blanchiment et la brumisation. Une attention particulière a été portée sur l'effet de de l'indice foliaire sur le bilan d'énergie de la culture, puisque la culture contribue de manière naturelle à refroidir la serre par sa transpiration.

Pour cette raison, l'analyse des données a porté en priorité sur les interactions entre le climat et la culture, notamment sur les aspects suivants: (a) analyse de la partition de l'énergie à l'échelle du couvert, à travers la caractérisation des flux de transpiration et de chaleur sensible; (b) caractérisation des conductances du couvert (aérodynamique et stomatique) et de leur possible relation avec le taux de renouvellement de la serre et (c) les modifications induites par les systèmes de contrôle sur l'indice de stress hydrique.

Les résultats montrent qu'un taux de ventilation élevé n'est pas *a priori* la meilleure solution pour atténuer les conditions de stress dans la serre pendant la période estivale. L'utilisation de différents systèmes de ventilation (naturelle ou forcée) modifie significativement la conductance aérodynamique, mais celle-ci n'apparaît pas avoir un effet important sur la partition de l'énergie au niveau du couvert. L'utilisation d'un système de brumisation augmente la conductance du couvert, du fait de la diminution du déficit de pression de vapeur d'eau dans la serre, ce qui permet à la culture de maintenir un niveau de transpiration similaire. Le blanchiment de la serre apparaît comme un moyen efficace de diminuer les conditions de stress quand l'indice foliaire est faible. La conductance stomatique du couvert augmente de manière importante après le blanchiment, ce qui permet de diminuer significativement l'indice de stress hydrique par rapport aux valeurs observées avant le blanchiment. Un indice

foliaire élevé induit une augmentation du flux de transpiration, permettant ainsi une plus grande contribution du refroidissement évaporatif naturel de la serre.

L'ensemble des résultats obtenus dans cette thèse souligne le rôle fondamental de l'indice foliaire de la culture dans la gestion du climat sous serre et dans le dimensionnement des systèmes de refroidissement. Par conséquent, cette caractéristique du couvert végétal doit être considérée comme un paramètre d'entrée dans les algorithmes de contrôle du climat comme dans les méthodes de calcul et de dimensionnement de la climatisation.

Dans cette optique, on peut conclure que l'intérêt d'utiliser un système de brumisation ou la technique de blanchiment va dépendre principalement de la valeur de l'indice foliaire. De même, la gestion de la ventilation dépendra de ce paramètre. Enfin, il a été démontré que l'indice de stress hydrique basé sur la température de surface représente un indicateur pertinent pour évaluer l'état physiologique de la culture et sa réponse à un stress hydrique ou thermique. Cet indice peut donc être utilisé comme critère de performance dans le développement d'algorithmes avancés de contrôle du climat sous serre. En résumé, l'incorporation d'informations et de données sur le comportement physiologique et les caractéristiques de la culture apparaît de première importance dans l'optimisation de la gestion du climat sous serre, et devrait constituer la suite logique du travail présenté dans cette thèse.

Mots-clés: Ventilation, ombrage, indice foliaire, conductance aérodynamique, conductance stomatique, indice de stress, bilan d'énergie, chaleur sensible, transpiration, rayonnement.

Resumen

INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DEL MEDIO AMBIENTE EN LA TRANSPIRACIÓN DE CULTIVOS DE ROSA BAJO INVERNADERO

El objetivo de este trabajo es el análisis comparativo de diferentes sistemas de refrigeración de invernaderos. A este fin, medidas de variables climáticas y de variables relacionadas con la actividad fisiológica del cultivo han sido llevadas a cabo durante dos veranos consecutivos. El conjunto de datos ha sido analizado para evaluar las ventajas y inconvenientes de 4 métodos de enfriamiento corrientemente utilizados por los productores, a saber: la ventilación estática, la ventilación forzada, el blanqueo y la nebulización. Una atención especial ha sido dedicada a los efectos del índice de superficie foliar sobre el balance de energía del dosel vegetal, ya que el cultivo contribuye de manera natural a enfriar el invernadero por medio de su tasa de transpiración.

Por esta razón, el análisis de los datos se ha centrado en prioridad sobre las interacciones entre el clima y el cultivo, principalmente en los aspectos siguientes: (a) análisis de la partición de energía a escala del dosel, a través de la caracterización de la tasa de transpiración y de calor sensible (b) caracterización de las conductancias del dosel (aerodinámica y estómatica) y de sus posibles relaciones con la tasa de renovación de aire del invernadero y (c) las modificaciones inducidas por los sistemas de refrigeración sobre el índice de estrés hídrico. Los resultados muestran que una tasa de ventilación elevada no es a priori la mejor solución para atenuar las condiciones de estrés en el invernadero durante el periodo estival. El uso de diferentes sistemas de ventilación (natural y forzada) modifica significativamente la conductancia aerodinámica del dosel, pero este último no parece tener un efecto importante en la partición de la energía a escala del dosel. La utilización de un sistema de nebulización aumenta la conductancia del dosel, debido a la disminución del déficit de presión de vapor de agua, lo que permite que el dosel mantiene un nivel de transpiración comparable. El blanqueo del invernadero aparece como un medio eficiente de disminuir los efectos del estrés sobre todo cuando el índice foliar es bajo. La conductancia estómatica del dosel aumenta de forma significativa después del blanqueo, lo que permite disminuir significativamente el índice de estrés con respecto a los valores observados antes del blanqueo. Un índice foliar elevado induce un

aumento del flujo de transpiración del dosel, permitiendo así una contribución más importante del cultivo en el enfriamiento evaporativo del invernadero.

El conjunto de resultados obtenidos en esta tesis subraya el papel fundamental del índice foliar del dosel en la gestión del clima bajo invernadero, y en el diseño de los sistemas de refrigeración.

Por consiguiente, esta característica del dosel vegetal debe de considerarse como parámetro de entrada en los algoritmos de control de clima como en los métodos de diseño de la climatización. En este sentido, se puede concluir que el interés de adoptar un sistema de nebulización o de sombreado va a depender principalmente del valor del índice foliar del cultivo. También el manejo de la ventilación dependerá de este parámetro. En fin, se ha demostrado que el índice de estrés basado en la temperatura de hoja representa un indicador pertinente para evaluar el estado fisiológico del cultivo, Este índice podría entonces ser utilizado como criterio de performance en el desarrollo de algoritmos avanzados de control del clima bajo invernadero.

En resumen, la incorporación de información y datos sobre las características y el comportamiento fisiológico aparece de primera importancia en la optimización del clima bajo invernadero, y debería constituir la continuación lógica de este trabajo.

Palabras llave: Ventilación, sombreado, índice foliar, conductancia aerodinámica, conductancia estomática, índice de estrés, balance de energía, calor sensible, transpiración, radiación.