

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Σχολή Γεωπονικών Επιστημών

Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος  
Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος



Πτυχιακή εργασία με τίτλο:

Ανάπτυξη Προσομοιώματος του Συστήματος Δροσισμού με  
Ανεμιστήρα και Βρεγμένη Παρειά σε Θερμοκήπιο της Περιοχής  
Βελεστίνου

Κοντές Θανάσης



Βόλος Αύγουστος 2003



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 2594/1  
Ημερ. Εισ.: 19-09-2003  
Δωρεά: \_\_\_\_\_  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΦΠΑΠ  
2003  
KON

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000070482

**Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**  
**Σχολή Γεωπονικών Επιστημών**  
**Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος**  
**Εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος**

Πτυχιακή εργασία με τίτλο:

*"Ανάπτυξη Προσομοιώματος του Συστήματος Άρροσιμού με  
Ανεμιστήρα και Βρεγμένη Πάρειά σε Θερμοκήπιο της Περιοχής  
Βελεστίνου"*

**Επιβλέπων Καθηγητής:**

Κίττας Κωνσταντίνος, Καθηγητής

**Εξεταστική Επιτροπή**

Δαλέζιος Νικόλαος, Καθηγητής

Γέμτος Θεοφάνης, Αν. Καθηγητής

Βόλος Αύγουστος 2003

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κο Κωνσταντίνο Κίττα, Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με το γνωστικό αντικείμενο των θερμοκηπίων καθώς και για την βοήθεια και την καθοδήγηση που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Κο Νικόλαο Δαλέζιο, Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας Ζωικής Παραγωγής και Υδάτινου Περιβάλλοντος, καθώς επίσης και τον Κο Θεοφάνη Γέμτο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κο Θωμά Μπαρτζάνα, υποψήφιο διδάκτορα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος, για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά την διεξαγωγή του πειράματος.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> “Το θερμοκήπιο”.....	2
1.1 Το θερμοκήπιο. ....	2
1.2 Ο ρόλος του θερμοκηπίου.....	4
Κεφάλαιο 2. “Το κλίμα του θερμοκηπίου” .....	6
2.1 Οι επικρατούσες συνθήκες και ανάγκες σε ψύξη .....	6
2.2 Ψύξη των θερμοκηπίων.....	6
2.2.1 Σύστημα φυσικού αερισμού. ....	6
2.2.2. Σύστημα δυναμικού αερισμού.....	7
2.2.3. Συστήματα σκίασης.....	8
2.2.4. Συστήματα δροσισμού.....	10
Κεφαλαίο 3 <sup>ο</sup> “Περιγραφή του συστήματος ψύξης μέσω εξάτμισης” .....	13
3.1 Βασικοί ορισμοί ψυχομετρίας.....	13
3.1.1 Αισθητή και Λανθάνουσα θερμότητα .....	13
3.1.2 Ψυχομετρικός χάρτης .....	13
3.2 Περιγραφή του συστήματος ψύξης στο θερμοκήπιο με υγρή παρειά.....	18
3.2.1 Τύποι υγρών τοιχωμάτων. ....	18
3.2.2 Σύστημα διαβροχής της παρειάς.....	20
3.2.3 Κίνηση του αέρα στο θερμοκήπιο. Επιλογή και εγκατάσταση ανεμιστήρων. ....	22
3.3 Αρχές λειτουργία του συστήματος δροσισμού με υγρή παρειά.....	24
3.3.1 Αποτελεσματικότητα του συστήματος .....	24
3.3.2. Πλεονεκτήματα και αδυναμίες του συστήματος.....	26
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> “Πειραματικό μέρος” .....	27
4.1 Σκοπός του πειράματος.....	27
4.2 Υλικά και μέθοδοι.....	28
4.3. Περιγραφή του μοντέλου υγρασίας και θερμοκρασίας .....	29
4.4 Αποτελέσματα.....	32
4.4.1 Απόδοση συστήματος .....	32
4.4.2 Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας .....	32
4.4.3 Διακύμανση θερμοκρασίας.....	33
4.4.4 Σύγκριση θερμοκρασίας αέρα και φυλλώματος. Διαπνοή της καλλιέργειας.....	35
4.4.5 Μεταβολή της απόλυτης υγρασία του αέρα.....	37

4.4.6 Διακύμανση του ελλείμματος κορεσμού της ατμόσφαιρας (VPD) .....	38
4.4.7 Βαθμονόμηση των μοντέλων υπολογισμού Θερμοκρασίας και Υγρασίας. ....	40
Συμπεράσματα .....	45
Βιβλιογραφία .....	46

## Περίληψη

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες στην Ελλάδα είναι η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά την θερμή περίοδο του έτους (τέλος άνοιξης με αρχές φθινοπώρου) κάνοντας σε πολλές περιπτώσεις απαγορευτική την συνέχιση της καλλιέργειας. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διάφορα συστήματα για την μείωση και την διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλά επίπεδα, όπως αερισμός και σκίαση, αλλά αυτά με την μεγαλύτερη απόδοση είναι τα συστήματα ψύξης με εξάτμιση. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η λειτουργία και η απόδοση ενός συστήματος δυναμικού αερισμού με υγρή παρειά σε συνδυασμό με προοδευτική σκίαση του θερμοκηπίου. Επίσης έγινε βαθμονόμηση δύο αναλυτικών μοντέλων για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε το καλοκαίρι του 2001 σε ένα εμπορικό θερμοκήπιο παραγωγής τριαντάφυλλων. Από την επεξεργασία και την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι το σύστημα είχε μεγάλη αποδοτικότητα (85%) και είχε την ικανότητα να κρατά την θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου σε χαμηλά επίπεδα ακόμα και τις πολύ ζεστές μέρες. Τέλος τα μοντέλα μετά την βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου με πολύ μεγάλη ακρίβεια, και επομένως είναι δυνατόν να αξιοποιηθούν για την αποτελεσματικότερη διαχείριση του συστήματος.

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> “Το θερμοκήπιο”

## 1.1 Το θερμοκήπιο.

Οι πρώτες αναφορές που έχουμε για την ύπαρξη θερμοκηπίων είναι από τον 5<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ. από τον Πλάτωνα, ο οποίος αναφέρει ότι σε ειδικές λατρευτικές εκδηλώσεις που αναφέρονται ως “Κήποι του Άδωνη”, αναπτύσσονταν φυτά με ταχύτετους ρυθμούς μέσα σε ειδικούς χώρους. Στην Πομπηία βρέθηκαν μεγάλες κατασκευές οι οποίες όπως φαίνεται καλύπτονταν από ένα ειδώς πρωτόγονου γυαλιού. Εκεί τοποθετούνταν τα δοχεία με τα φυτά πάνω σε τραπέζια τα οποία ήταν διάτρητα, και από την κάτω μεριά τους υπήρχε η δυνατότητα να τοποθετηθούν αναμμένα κάρβουνα έτσι ώστε να ζεσταθούν τα φυτά.

Κατά την διάρκεια του μεσαιώνα το θερμοκήπια φαίνεται να είναι άγνωστα, και εμφανίζονται ως καλλιεργητικό εργαλείο στις αρχές του 16<sup>ου</sup> αιώνα, όταν οι σχέσεις που συνάφθηκαν ανάμεσα σε Ευρώπη και τροπικές χώρες οδήγησαν στην κατασκευή “χειμωνιάτικων κήπων” στα σπίτια των ευπόρων. Ο σκοπός αυτών των “χειμωνιάτικων κήπων” ήταν η προσαρμογή των φυτών που προέρχονταν από τις τροπικές χώρες, τα οποία πέρα από το βοτανικό και φαρμακευτικό ενδιαφέρον που παρουσίαζαν άρχισαν να χρησιμοποιούνται από τους αριστοκράτες της Βόρειας Ευρώπης και ως φυτά διακόσμησης αλλά και παραγωγής. Κατά τον 17<sup>ο</sup> αιώνα η μόδα του “χειμωνιάτικου κήπου” εξαπλώθηκε σε πολλές χώρες της Ευρώπης και κύρια στην Γαλλία.

Οι εξελίξεις στον “χειμωνιάτικο κήπο” μέχρι τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα ήταν μικρές συγκρινόμενες με την αλματώδη πρόοδο που συντελέστηκε κατά την διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Ιδιαίτερη πρόοδος παρουσιάστηκε στα θερμοκήπια με την ανάπτυξη της βιομηχανίας γυαλιού. Τότε εμφανίστηκαν τα μικρά γυάλινα πλαίσια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν από τους παραγωγούς των μεγάλων πόλεων της Βόρειας Ευρώπης σαν μέσο για την επιμήκυνση της περιόδου παραγωγής και τροφοδοσίας της αγοράς.

Με την πάροδο του χρόνου παρουσιάστηκε περαιτέρω ανάπτυξη των θερμοκηπίων, και από τα μικρά αυτά πλαίσια με βάση από ξύλινα κουτιά, περάσαμε στην δημιουργία πιο ψηλών γυάλινων κατασκευών που αποτέλεσαν τους προδρόμους των σύγχρονων θερμοκηπίων. Σημαντική ώθηση στην εξέλιξη των θερμοκηπίων έδωσε η χρησιμοποίηση νέων υλικών για την κατασκευή του σκελετού όπως το γαλβανισμένο σίδηρο και το αλουμίνιο. Η επαναστατική αλλαγή όμως έγινε στα υλικά κάλυψης όπου εκτός από το γυαλί χρησιμοποιούνται τα σκληρά αλλά και τα εύκαμπτα φύλλα πλαστικού.



Τα θερμοκήπια στην αρχή της εμφάνισής τους, χρησιμοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο στις βόρειες χώρες και γενικά σε περιοχές με χαμηλές θερμοκρασίες. Για τον λόγο αυτό στα μέσα της δεκαετίας του πενήντα άρχισε να χρησιμοποιείται και η θέρμανση των θερμοκηπίων ως καλλιεργητική τεχνική.

Το κλίμα και η λογική που είχε αναπτυχθεί γύρο από την χρήση του θερμοκηπίου, ήταν αυτό που εμπόδιζε την εξάπλωσή του και στις νοτιότερες, πιο θερμές μεσογειακές χώρες. Έτσι μόνο τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια τα θερμοκήπια και οι καλλιέργειες υπό κάλυψη άρχισαν να κερδίζουν έδαφος και στις μεσογειακές χώρες όπως η Ελλάδα, Ιταλία, Ισπανία και Νότια Γαλλία .

Κύριος λόγος για αυτή την εξέλιξη είναι ότι οι ανάγκες σε θέρμανση των θερμοκηπίων στην Μεσογειακή λεκάνη είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με την βόρεια Ευρώπη, λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών. Έτσι η αλματώδης αύξηση του κόστους παραγωγής είχε μικρότερο αντίκτυπο στους παραγωγούς της Μεσογείου. Επιπλέον η κατασκευή των θερμοκηπίων από πλαστικά φύλλα πολυαιθυλενίου (PE) , που είναι πιο ελαφρά και ευκολόχρηστα, οι καλύτερες συνθήκες φωτισμού που επικρατούν στις νότιες περιοχές και τα φτηνά εργατικά χέρια είναι από τους βασικότερους παράγοντες που έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην αναπροσαρμογή των εκτάσεων υπό κάλυψη στον βορά και στον νότο.

Το κύριο μέλημα στην εξέλιξη του θερμοκηπίου ήταν η μείωση του κόστους κατασκευής έτσι ώστε να αντισταθμιστεί το αυξανόμενο κόστος για την παραγωγή ενέργειας. Έτσι, από την μία μεριά άρχισαν να κατασκευάζονται θερμοκήπια πολύ πιο ελαφριά και με πολύ μειωμένο κόστος παραγωγής, ενώ από την άλλη δεν είχε υπάρξει ενδιαφέρον, ούτε είχε γίνει κάποια μελέτη για της απώλειες ενέργειας που παρουσιάζανε με αποτέλεσμα να αυξηθεί το κόστος λειτουργίας τους. Το κυριότερο πρόβλημα που παρουσιάστηκε ήταν η έλλειψη στεγανότητας των κατασκευών, οι οποίες οδηγούσαν σε απώλειες θερμότητας και κατ' επέκταση σε άσκοπη κατανάλωση ενέργειας από τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης, στην προσπάθειά τους να διατηρήσουν στα επιθυμητά επίπεδα τις συνθήκες που επικρατούσαν μέσα στο θερμοκήπιο.

Τα πρώτα μέτρα που πάρθηκαν για την αντιμετώπιση του προβλήματος ήταν η βελτίωση της στεγανότητας των κατασκευών και των αγωγών προσαγωγής, και η ρύθμιση των καυστήρων. Γρήγορα όμως φάνηκε πως αυτές οι ενέργειες δεν ήταν ικανές να λύσουν το πρόβλημα του υψηλού κόστους λειτουργίας του θερμοκηπίου και έπρεπε να ληφθούν πιο δραστικά μέτρα, όπως (Κίττας, Κ., 2000):

1. Να βελτιωθούν κατά τα τρόπο ουσιαστικό οι υπάρχουσες τεχνικές θέρμανσης και θερμικής μόνωσης, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρηθεί το μικροκλίμα του θερμοκηπίου, σε ευνοϊκά επίπεδα για την ανάπτυξη των καλλιεργειών.

2. Χρησιμοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας και κυρίως της ηλιακής
3. Προσαρμογή των καλλιεργητικών τεχνικών και των αμειψισπορών σε καινούρια συστήματα, προερχόμενα από μια ορθολογική προσέγγιση των δημιουργούμενων προβλημάτων.
4. Ανάπτυξη και δημιουργία ποικιλιών προσαρμοσμένες στις ιδιαιτερότητες του κλίματος του θερμοκηπίου.

### 1.2 Ο ρόλος του θερμοκηπίου.

Το θερμοκήπιο είναι μία κατασκευή η οποία καλύπτεται με διάφανο υλικό, ώστε να εισέρχεται σε αυτό όσο το δυνατόν περισσότερος φυσικός φωτισμός, κάτι που είναι απαραίτητο για την σωστή ανάπτυξη των φυτών. Η διαφορά του από άλλες παρόμοιες κατασκευές, όπως χαμηλά σκέπαστρα, σπορεία και θερμοσπορεία, βρίσκεται στο γεγονός ότι είναι αρκετά ψηλά για μπορεί να εργαστεί ο άνθρωπος μέσα σε αυτά.

Το θερμοκήπιο είναι ένα μέσο για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος *άνθρωπος-υλικά μέσα-έδαφος-φυτό-κλίμα* και ένα μέσο που επιτρέπει την αύξηση των αποδόσεων ανά μονάδα εδάφους-χρόνου, σε επίπεδα πολύ υψηλότερα από τον ελεύθερο αγρό. Το θερμοκήπιο, θεωρούμενο αρχικά ως μια κατασκευή που επιτρέπει τον περιορισμό ενός καλλιεργούμενου τμήματος με την βοήθεια ενός διαφανούς υλικού κάλυψης, είναι εκ κατασκευής ένα μέσο διαμόρφωσης του κλίματος. Λόγο των διαταραχών που δημιουργεί το υλικό κάλυψης στα φαινόμενα ακτινοβολίας και μεταφοράς ενέργειας, δημιουργείται στο θερμοκήπιο ένα “αυθόρμητο κλίμα”, του οποίου τα χαρακτηριστικά δεν είναι πάντα ευνοϊκά για την καλλιέργεια. Με τον όρο “αυθόρμητο κλίμα” εννοούμε τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στο θερμοκήπιο όταν αυτό δεν είναι εφοδιασμένο με κανένα μηχανισμό κλιματισμού, και το μοναδικό μέσο τροποποίησης του κλίματός σε σχέση με τον ελεύθερο αγρό είναι το τοίχωμά του (Κ. Κίττας, 2000). Φυσικά με αυτό τον τρόπο απομονώνεται το θερμοκήπιο από ορισμένες δυσμενείς κλιματολογικές συνθήκες όπως χαμηλές θερμοκρασίες, βροχές και άνεμοι. Χάρη σε αυτά τα πλεονεκτήματα του θερμοκηπίου είναι δυνατή η βελτίωση της παραγωγικότητας.

Βέβαια το αυθόρμητο κλίμα του θερμοκηπίου δεν είναι ανεξάρτητο από το εξωτερικό κλίμα, αφού λαμβάνουν χώρα ενεργειακές μεταβολές μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Παρόλα αυτά οι συνθήκες που δημιουργούνται μέσα στο θερμοκήπιο δεν είναι πάντα ευνοϊκές, και μάλιστα μπορεί να απέχουν πολύ από τις ιδανικές συνθήκες ανάπτυξης των καλλιεργειών. Γίνετε λοιπόν κατανοητό πως είναι απαραίτητη η

ύπαρξη στο θερμοκήπιο τεχνικών για την τροποποίηση του αυθόρμητου κλίματος που επικρατεί.

## Κεφάλαιο 2. “Το κλίμα του θερμοκηπίου”

### 2.1 Οι επικρατούσες συνθήκες και ανάγκες σε ψύξη

Όπως ήδη αναφέρθηκε το θερμοκήπιο είναι ένα αγροτικό κτήριο το οποίο επιτρέπει την απομόνωση μίας καλλιεργούμενης έκτασης από το εξωτερικό περιβάλλον. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη του θερμοκηπίου, κάνουν το θερμοκήπιο να λειτουργεί σαν συλλέκτης ηλιακής ενέργειας με αποτέλεσμα την άνοδο της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του. Επιπλέον το γεγονός ότι η Ελλάδα είναι μία ζεστή χώρα, με μεγάλη ηλιοφάνεια, περιορίζει τις ανάγκες σε θέρμανση του θερμοκηπίου κατά την διάρκεια του χειμώνα, αυξάνει όμως τις ανάγκες δροσισμού του κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Δημιουργείται έτσι ανάγκη ελέγχου και τροποποίησης του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου (θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα αέρα), ανάλογα βέβαια με τις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και τις ανάγκες της κάθε καλλιέργειας.

Η ψύξη των θερμοκηπίων είναι αρκετά δύσκολη και πολύπλοκη διαδικασία, και μάλιστα πιο δύσκολη από την θέρμανση, καθόσον οι συνήθεις τεχνικές ψύξης που χρησιμοποιούνται σε άλλα κτήρια, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα θερμοκήπια λόγω του ψηλού κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας που έχουν. Η καθαρή ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται το θερμοκήπιο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες είναι της τάξης των  $500-600 \text{ Wm}^{-2}$ . Από αυτή την ενέργεια πρέπει να αφαιρεθούν  $200-250 \text{ Wm}^{-2}$  έτσι ώστε η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου να είναι στα ίδια επίπεδα με αυτή που επικρατεί στο εξωτερικό του (Κίττας, Κ. κ.α., 1999).

### 2.2 Ψύξη των θερμοκηπίων

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στα μεσογειακά θερμοκήπια για την μείωση της θερμοκρασίας είναι τα *συστήματα αερισμού*, τα *συστήματα σκίασης* και τα *συστήματα δροσισμού*. Παρακάτω περιγράφονται τα διάφορα συστήματα ψύξης των θερμοκηπίων.

#### 2.2.1 Σύστημα φυσικού αερισμού.

Με την μέθοδο αυτή επιτυγχάνουμε κίνηση του εξωτερικού αέρα δια μέσου του θερμοκηπίου. Έτσι επιδρούμε στην θερμοκρασία, στην υγρασία αλλά και στην συγκέντρωση του  $\text{CO}_2$  και άλλων αερίων στο θερμοκήπιο.

Η κίνηση του αέρα σε ένα θερμοκήπιο το οποίο διαθέτει πλαϊνά ανοίγματα (εικ. 1) και ανοίγματα οροφής προκαλείται από τις διαφορές πίεσης που δημιουργούνται α) λόγω των δυνάμεων άνωσης που οφείλονται σε διαφορές θερμοκρασίας (φαινόμενο καμινάδας) και β)



**Εικόνα 1.** Σύστημα Φυσικού αερισμού.

λόγω της ταχύτητας του ανέμου. Η κίνηση του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο, χαρακτηρίζεται από τον ρυθμό (N) ωριαίας ανανέωσης, δηλαδή πόσες φορές ανανεώνεται ο αέρας του θερμοκηπίου σε μία ώρα ( $h^{-1}$ ) (Κ. Κίττας, 2000).

Είναι όμως κατανοητό πως με την μέθοδο αυτή η δυνατότητα μείωσης της θερμοκρασίας είναι αρκετά περιορισμένη, τόσο σε ένταση μείωσης της θερμοκρασίας όσο και χρονική διάρκεια. Έτσι λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην μεσογειακή λεκάνη, φαίνεται πως η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέχρι τα μέσα τις άνοιξης (Κίττας, Κ. κ.α., 1999).

### 2.2.2. Σύστημα δυναμικού αερισμού.



**Εικόνα 2.** Σύστημα δυναμικού αερισμού.

Με τον δυναμικό αερισμό επιτυγχάνετε κίνηση αέρα λόγω τεχνητής διαφοράς πίεσης με την χρήση ανεμιστήρων (εικ. 2). Οι ανεμιστήρες βρίσκονται συνήθως στην έξοδο του αέρα. Έτσι αναρροφούν τον εσωτερικό αέρα και τον εξάγουν, ενώ την θέση του παίρνει εξωτερικός αέρας ο οποίος εισέρχεται από κατάλληλα ανοίγματα που βρίσκονται στην απέναντι πλευρά του θερμοκηπίου.

Όσο περισσότερα είναι τα ανοίγματα από τα οποία εισέρχεται αέρας, τόσο πιο ομοιογενής είναι ο αερισμός. Αυτό συμβάλει στην ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας,

υγρασίας και CO<sub>2</sub> μέσα στο θερμοκήπιο. Επίσης επηρεάζει και την ταχύτητα με την οποία κινείται ο αέρας μέσα στο φύλλωμα της καλλιέργειας, γεγονός που βοηθάει στην άμυνα των φυτών κατά των κρυπτογαμικών ασθενειών, επειδή εμποδίζεται η υπερβολική αύξηση της υγρασίας.

Το πλεονέκτημα του δυναμικού αερισμού είναι ότι μπορούμε να επιτύχουμε ρυθμούς ανανέωσης του αέρα πάνω από 50 h<sup>-1</sup> (Κίττας, Κ. κ.α.,1999), κάτι που είναι αδύνατο με τον φυσικό αερισμό. Θα πρέπει επίσης να σημειώσουμε ότι ανάλογα με το μέγεθος του θερμοκηπίου οι ανεμιστήρες τοποθετούνται στην μικρή πλευρά ,για θερμοκήπια μέχρι 40 m, και στην μεγάλη πλευρά, για θερμοκήπια πάνω από 40 m (Κ. Κίττας, 2000). Σε κάθε περίπτωση τα ανοίγματα τοποθετούνται στην απέναντι πλευρά από τους ανεμιστήρες.

Κάποιες επιπρόσθετες αρχές οι οποίες θα πρέπει να τηρούνται είναι οι εξής (Γ. Μαυρογιαννόπουλος,1990):

- Στην έξοδο του αέρα από τον ανεμιστήρα, δεν θα πρέπει να υπάρχει κάποιο εμπόδιο σε απόσταση μικρότερη από 1,5 φορές την διάμετρο του ανεμιστήρα.
- Οι ανεμιστήρες θα πρέπει να αναπτύσσουν ισχύ γύρω στα 25 Pa στατικής πίεσης.
- Αν είναι δυνατόν οι ανεμιστήρες θα πρέπει να τοποθετούνται στην υπήνεμη πλευρά του θερμοκηπίου.
- Το παράθυρο εισόδου του αέρα που βρίσκεται απέναντι από τον ανεμιστήρα, θα πρέπει να έχει εμβαδό τουλάχιστον ίσο με 1,25 φορές το εμβαδό του ανεμιστήρα.
- Η ταχύτητα του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 1,5 m/sec γιατί προκαλείται υπερβολική πτώση πίεσης και μειώνεται η απόδοση των ανεμιστήρων
- Τα πετάσματα των ανεμιστήρων θα πρέπει να κλείνουν αυτόματα όταν αυτοί σταματάν να λειτουργούν.

### 2.2.3. Συστήματα σκίασης.

i) *Η μόνιμη σκίαση.* Περιλαμβάνει την λεύκανση των τοιχωμάτων και την τοποθέτηση μόνιμων σκιάστρων σε σταθερή θέση.

ii) *Η προσωρινή σκίαση.* Γίνεται με ένα ύφασμα το οποίο είναι εγκατεστημένο στο θερμοκήπιο και ανάλογα με τις συνθήκες ηλιοφάνειας και θερμοκρασίας που επικρατούν το ξεδιπλώνουμε ή όχι. Η διαδικασία αυτή γίνεται μηχανικά ή χειροκίνητα.

Η λεύκανση (εικ. 3) είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται κυρίως, λόγω του χαμηλού κόστους εγκατάστασης που έχει. Η αποδοτικότητα της μεθόδου στην μείωση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι ικανοποιητική, αφού η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου πλησιάζει στα επίπεδα της εξωτερικής θερμοκρασίας (Κίττας *et al.*,1999). Το επίστρωμα όμως που χρησιμοποιείται δεν είναι εκλεκτικό στην ακτινοβολία



**Εικόνα 3.** Σκίαση με λεύκανση.

με αποτέλεσμα εκτός από την μείωση της θερμοκρασίας να έχουμε μείωση και της φωτοσυνθετικά ενεργής ηλιακής ακτινοβολίας (PAR) και κατ' επέκταση και της φωτοσύνθεσης (Κίττας *et al.*,1999).

Πέρα από την μέθοδο της λεύκανσης χρησιμοποιούνται και διάφορα σκίαστρα τα οποία τοποθετούνται μόνιμα στο θερμοκήπιο(εικ. 4). Την τελευταία δεκαετία εμφανίστηκε μεγάλος αριθμός τέτοιων υλικών από ακρυλικό, πολυπροπυλένιο, πολυεστέρα, πολυαμίδιο και άλλα. Αυτή η ποικιλία των υλικών κάλυψης δίνει την δυνατότητα επιλογής στον παραγωγό, ανάμεσα σε διαφορετικές τιμές διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία. Επιπλέον διατίθενται στην αγορά και σκίαστρα με ένα λεπτό στρώμα αλουμινίου, τα οποία ανακλούν ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας στο εξωτερικό περιβάλλον, και τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν θερμομονωτικές κουρτίνες κατά την διάρκεια του χειμώνα και να μειώσουμε έτσι την κατανάλωση καυσίμου για την θέρμανση του χώρου (Κίττας *et al.*,1999). Αυτά τοποθετούνται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.



**Εικόνα 4.** Μόνιμη σκίαση με δόχτι.

Θα πρέπει όμως να τονίσουμε ότι η χρήση της σκίασης ως μέσου ψύξης του θερμοκηπίου, πρέπει να χρησιμοποιείται ως έσχατη λύση. Ο κύριος λόγος, όπως αναφέραμε και παραπάνω, είναι ότι εκτός από την μείωση της ηλιακής ενέργειας, έχουμε και μείωση της φωτοσυνθετικά

ενεργής ηλιακής ακτινοβολίας (PAR). Αυτή η μείωση της PAR μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της παραγωγής και τελικά να έχουμε ζημώση του παραγωγού. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει, όσο είναι δυνατό, να ελέγξουμε την θερμοκρασία με άλλα μέσα (αερισμό, δροσισμό) καθώς ο πλήρης φωτισμός της καλλιέργειας είναι στις περισσότερες περιπτώσεις επιθυμητός για την καλύτερη ανάπτυξή της.

#### 2.2.4. Συστήματα δροσισμού.

Ένας άλλος τρόπος για την ψύξη των θερμοκηπίων είναι η μέθοδος του δροσισμού. Η μέθοδος αυτή είναι ίσως η σημαντικότερη από αυτές που έχουν αναφερθεί γιατί έχει τα καλύτερα αποτελέσματα στην μείωση της θερμοκρασίας χωρίς να επηρεάζει την εισερχόμενη ακτινοβολία και κατ' επέκταση την φωτοσύνθεση. Τα συστήματα που χρησιμοποιούνται είναι τα παρακάτω.

##### *i) Σύστημα ψύξης με υγρή παρειά και δυναμικό αερισμό (Evaporative Cooling System).*

Η αρχή αυτού του συστήματος βασίζεται κυρίως στην ψύξη λόγω κορεσμού σε υγρασία του εισερχόμενου αέρα στο θερμοκήπιο. Το σύστημα αυτό αποτελείται από την υγρή παρειά και τους ανεμιστήρες. Συνήθως λειτουργεί με υποπίεση, δηλαδή ο ανεμιστήρας και η παρειά τοποθετούνται σε απέναντι πλευρές του θερμοκηπίου. Έτσι ο ανεμιστήρας βγάζει αέρα έξω από το θερμοκήπιο ο οποίος στην συνέχεια αναπληρώνεται από αέρα που μπαίνει στο θερμοκήπιο μέσω της υγρής παρειάς. Καθώς ο αέρας διέρχεται με χαμηλή ταχύτητα μέσα από την υγρή παρειά, ένα μέρος της θερμότητας του αέρα χρησιμοποιείται για την εξάτμιση μιας ποσότητας νερού από αυτό που κυκλοφορεί στην παρειά. Έτσι ο αέρας που εισέρχεται στο θερμοκήπιο έχει χαμηλότερη θερμοκρασία και υψηλότερη υγρασία από τον εξωτερικό αέρα με αποτέλεσμα τον δροσισμό του χώρου του θερμοκηπίου. Ένα από τα βασικότερα προβλήματα που παρουσιάζει αυτό το σύστημα είναι ότι δεν έχουμε ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλο το μήκος του θερμοκηπίου, κυρίως σε θερμοκήπια με μήκος μεγαλύτερο από 40 m.

Για να έχει υψηλή αποδοτικότητα αυτό το σύστημα θα πρέπει να τηρούνται κάποιες προϋποθέσεις (Θερμοκήπια '96):

- Ο προσανατολισμός του θερμοκηπίου θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να αξιοποιούνται οι επικρατούντες άνεμοι. Είναι προτιμότερο η υγρή παρειά να τοποθετείται από την μεριά του επικρατούντος ανέμου και οι εξαεριστήρες από την αντίθετη.
- Η στεγανότητα του θερμοκηπίου πρέπει να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη, ειδικότερα σε περιοχές με ισχυρούς ανέμους και πολύ σκόνη.



- Η παρειά θα πρέπει να είναι κατασκευασμένη από ειδικό υλικό έτσι ώστε να έχει καλή αποδοτικότητα για μακρύ χρονικό διάστημα και να είναι ανθεκτική στην χρήση υφάλμυρου νερού.
- Σε περίπτωση που το ύψος των φυτών είναι μεγαλύτερο από το σημείο τοποθέτησης της παρειάς, θα πρέπει το ρεύμα αέρα να οδηγείται με μια μικρή παρέκκλιση πάνω από τα φυτά για να μην προκληθούν ζημιές σε αυτά.
- Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της υγρής παρειάς και του εξαεριστήρα να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Σε ένα αποτελεσματικό σύστημα κυμαίνεται μεταξύ 3-5 °C, ανάλογα βέβαια με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν καθώς και το μέγεθος του θερμοκηπίου, όσο πιο μεγάλο τόσο μεγαλύτερη διαφορά (Γ. Μαυρογιαννόπουλος,1990).
- Το νερό που συλλέγεται από την υγρή παρειά θα πρέπει να συντηρείται για λίγο σε μία δεξαμενή, έτσι ώστε όταν θα ξαναχρησιμοποιηθεί να έχει αρκετά χαμηλότερη θερμοκρασία.
- Να υγραίνεται ομοιόμορφα η παρειά σε όλη την διάρκεια λειτουργίας της.

#### ii) Σύστημα ψύξης με υδρονέφωση ή ομίχλη (Fog System)

Βασική αρχή στην οποία στηρίζεται το σύστημα είναι η μετατροπή της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας σε λανθάνουσα θερμότητα με εξάτμιση των σταγονιδίων που ψεκάζονται από συσκευές υδρονέφωσης

Οι συσκευές υδρονέφωσης (εικ. 5) διακρίνονται σε χαμηλής και υψηλής πίεσης. Και στα δύο συστήματα γίνεται χρήση ψεκαστήρων οι οποίοι απελευθερώνουν σταγονίδια στην ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου. Η διαφορά έγκειται στο μέγεθος των σταγονιδίων και στην πίεση με την οποία λειτουργεί το κάθε σύστημα. Έτσι έχουμε την υδρονέφωση η οποία λειτουργεί σε πιέσεις μικρότερες των 7atm. Τα σταγονίδια που παράγονται από τους ψεκαστήρες έχουν μέγεθος πάνω από 200 μm. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε μικρότερη αποτελεσματικότητα από τα συστήματα υψηλής πίεσης και επιπλέον



**Εικόνα 5.** Σύστημα υδρονέφωσης.

ένα μέρος των σταγονιδίων καταλήγει στα φυτά και στο έδαφος. Αυτό εγκυμονεί κινδύνους για την ανάπτυξη ασθενειών αλλά και πρόκληση εγκαυμάτων από το φαινόμενο του φακού των σταγονιδίων. Από την άλλη μεριά τα συστήματα υψηλής πίεσης, ή ομίχλης (fog system), έχουν πολύ καλή αποδοτικότητα (μπορούν να μειώσουν την θερμοκρασία ως και 15<sup>0</sup>C). Λειτουργούν σε πιέσεις 30–40 atm και από τους ψεκαστήρες δημιουργούνται σταγονίδια της τάξης μερικών δεκάδων μm. Ένα άλλο πλεονέκτημα του συστήματος είναι ότι τα σταγονίδια λόγω του μικρού τους μεγέθους αιωρούνται και εξατμίζονται πριν να προλάβουν να έρθουν σε επαφή με το φυτό ή το έδαφος.

Επειδή με τα συστήματα υδρονέφωσης έχουμε αύξηση της υγρασίας στην ατμόσφαιρα του θερμοκηπίου, θα πρέπει να γίνεται καλή διαχείριση του αερισμού με άνοιγμα των παραθύρων ή με χρήση ανεμιστήρων, έτσι ώστε να ελέγχεται η υγρασία στο χώρο του θερμοκηπίου. Επιπλέον θα πρέπει να χρησιμοποιούμε όσο το δυνατό καλύτερης ποιότητας νερό και απιονιστήρες νερού για αν αποφύγουμε την απόφραξη των μικροεκτοξευτήρων.

Οι αποδόσεις των συστημάτων δροσισμού είναι γενικά πολύ ικανοποιητικές εφόσον βέβαια τηρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις τις οποίες αναφέραμε, και κυμαίνονται στο 80% με 90% για το σύστημα ψύξης με υγρή παρειά και δυναμικό αερισμό, και στο 50 % με 80 % για τα συστήματα υδρονέφωσης (H. Ozturk, 2003). Γενικά θα πρέπει να τονιστεί ότι τα συστήματα δροσισμού λειτουργούν καλύτερα και έχουν υψηλές αποδόσεις όταν επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλή υγρασία.

## Κεφαλαίο 3<sup>ο</sup> “Περιγραφή του συστήματος ψύξης μέσω εξάτμισης”

### 3.1 Βασικοί ορισμοί ψυχομετρίας.

Το σύστημα της υγρής παρειάς και των ανεμιστήρων είναι από τα πιο βασικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για τον δροσισμό των θερμοκηπίων. Η ικανοποιητική απόδοση του συστήματος έχει άμεση σχέση με τις συνθήκες που επικρατούν εκτός και εντός του θερμοκηπίου. Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος, θεωρήθηκε σκόπιμο να αναφερθούν κάποιοι βασικοί ορισμοί της ψυχομετρίας και να περιγραφούν στον ψυχομετρικό χάρτη.

#### 3.1.1 Αισθητή και Λανθάνουσα θερμότητα

*Αισθητή Θερμότητα* είναι η ενέργεια που βρίσκεται στον αέρα λόγω της θερμοκρασίας του αέρα. Έτσι όταν ο αέρας έχει θερμοκρασία 30 °C και 50 % σχετική υγρασία έχει περισσότερη αισθητή θερμότητα από όταν ο αέρας έχει θερμοκρασία 25°C και 50 % σχετική υγρασία. Η μεταφορά αισθητής θερμότητας κατά μήκος του θερμοκηπίου υπολογίζεται από την σχέση

$$Q_s = \frac{V}{Ag} \rho C_p \Delta T \quad (\text{C. Kittas, 2001a})$$

*Λανθάνουσα Θερμότητα* είναι η ενέργεια η οποία βρίσκεται στον αέρα λόγω της υγρασίας που υπάρχει σε αυτόν. Έτσι όταν ο αέρας έχει θερμοκρασία 30°C και 80 % σχετική υγρασία έχει περισσότερη λανθάνουσα θερμότητα από όταν ο αέρας έχει 30°C και 60 % σχετική υγρασία. Η μεταφορά λανθάνουσας θερμότητας κατά μήκος του θερμοκηπίου υπολογίζεται

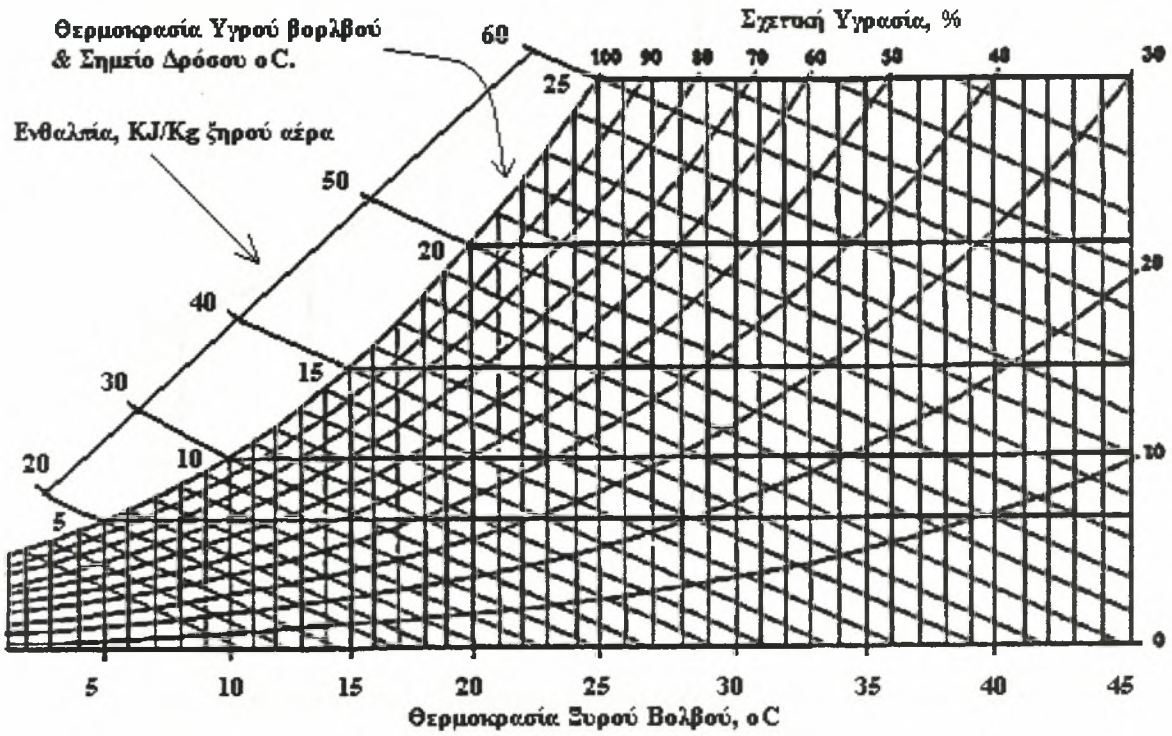
$$\text{από την σχέση } Q_l = \frac{V}{Ag} \rho h_{fg} \Delta w \quad (\text{C. Kittas, 2001a})$$

Στις παραπάνω σχέσεις έχουμε  $V$  ο ρυθμός εξαερισμού ( $\text{m}^3/\text{sec}$ ),  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C_p$  η ειδική θερμότητα του αέρα σε σταθερή πίεση ( $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $Ag$  το εμβαδόν της επιφάνειας που καλύπτει το θερμοκήπιο ( $\text{m}^2$ ),  $h_{fg}$  η λανθάνουσα θερμότητας εξάτμισης ( $\text{J}/\text{kg}$ ),  $\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας ( $^\circ\text{C}$ ) και  $\Delta w$  η διαφορά απόλυτης υγρασίας του αέρα ( $\text{g}/\text{kg}$  αέρα).

#### 3.1.2 Ψυχομετρικός χάρτης

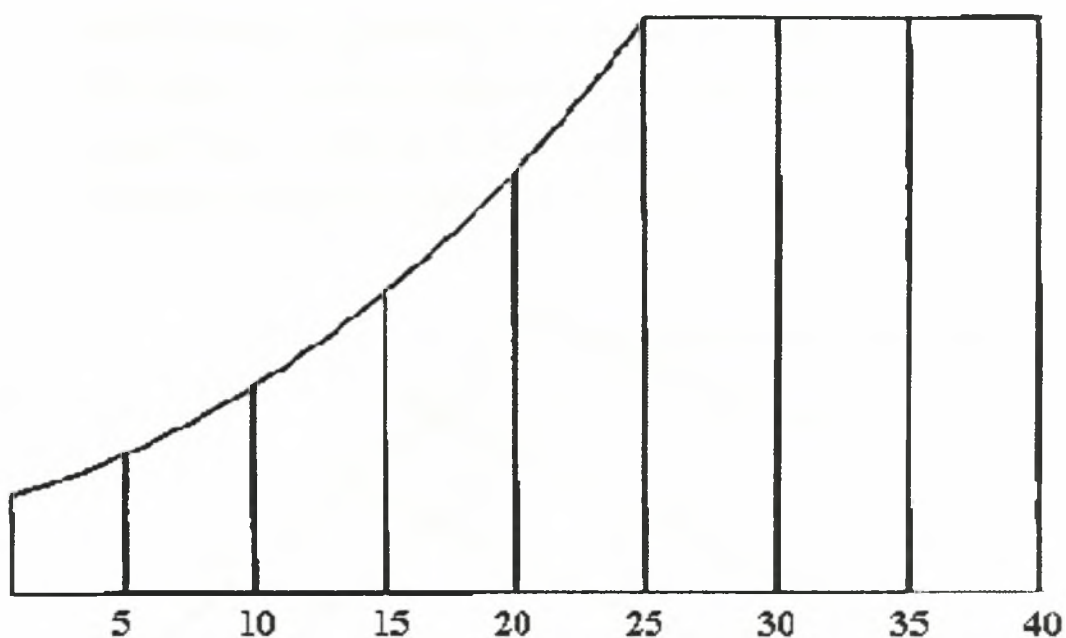
Στις αρχές του 20ου αιώνα ένας γερμανός μηχανικός, ο Ρίτσαρντ Μολιέ, εφηύρε ένα γραφικό τρόπο αναπαράστασης των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των διαφόρων μειγμάτων αέρα και υδρατμών της ατμόσφαιρας που ονομάστηκε ψυχομετρικός χάρτης. Πάνω στον

ψυχομετρικό χάρτη (εικ. 6) περιγράφονται κάποια χαρακτηριστικά του αέρα. Αυτά αναλύονται παρακάτω.



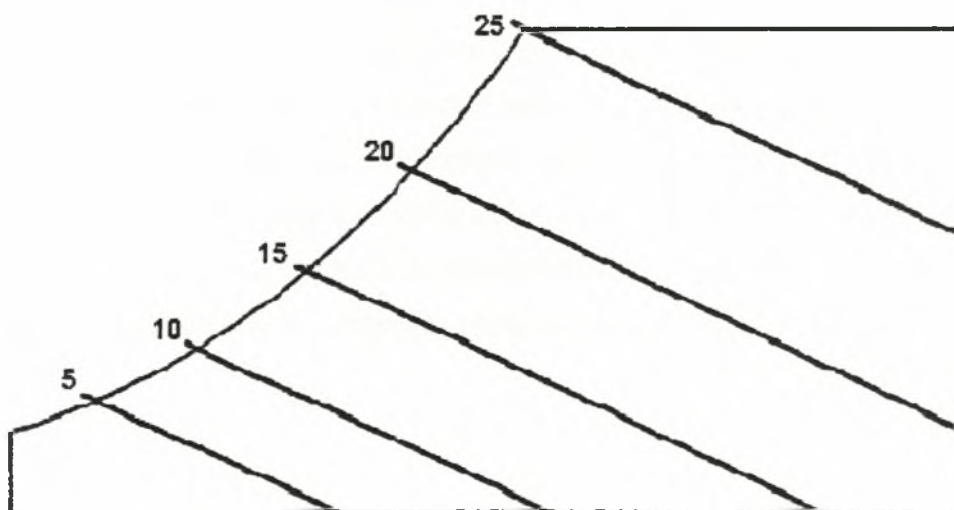
Εικόνα 6. Ψυχομετρικός Χάρτης

Θερμοκρασία Ξηρού Βολβού αέρα είναι η θερμοκρασία που μετράμε με ένα κλασικό θερμόμετρο σε °C. Είναι δηλαδή η θερμοκρασία που έχει ο αέρας, στις συγκεκριμένες συνθήκες που επικρατούνε στην ατμόσφαιρα εκείνη την στιγμή. Στον ψυχομετρικό χάρτη αυτή η τιμή φαίνεται στον οριζόντιο άξονα (εικ. 7).



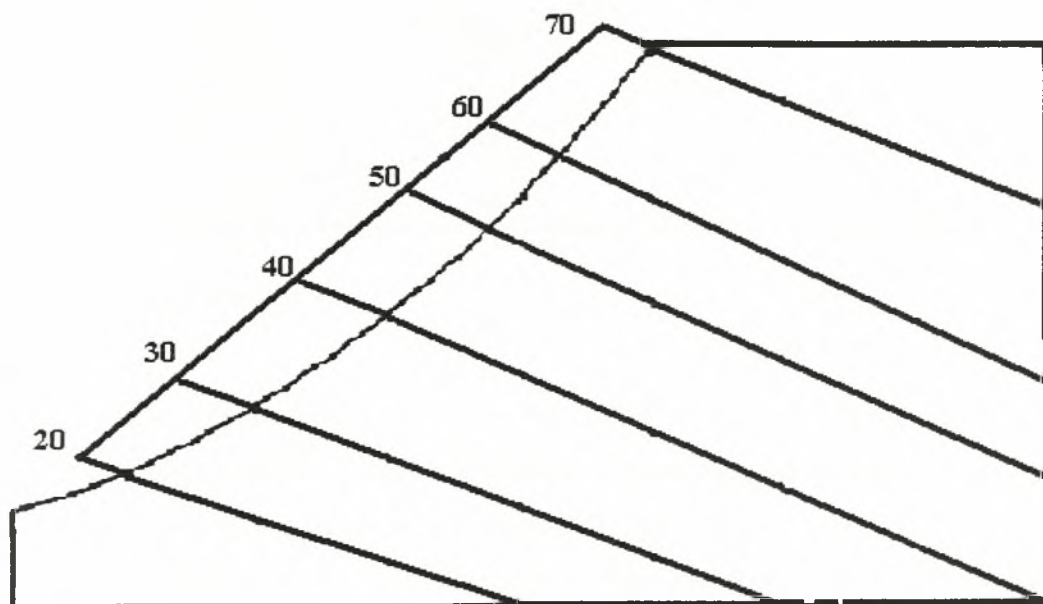
**Εικόνα 7.** Θερμοκρασία Ξηρού Βολβού, °C

Θερμοκρασία Υγρού Βολβού είναι η θερμοκρασία που μετράμε με ένα κλασικό θερμόμετρο στον βολβό του οποίου έχουμε τοποθετήσει ένα φυτίλι του οποίου η άλλη άκρη είναι βυθισμένη σε νερό. Η ένδειξη που δείχνει το θερμόμετρο, καθώς εξατμίζεται το νερό, είναι η υγρή θερμοκρασία του αέρα σε °C. Η υγρή θερμοκρασία είναι πάντα πιο μικρή από την ξηρή θερμοκρασία. Η μόνη περίπτωση που η ξηρή με την υγρή θερμοκρασία είναι ίσες είναι όταν ο αέρας βρίσκεται σε κορεσμό, δηλαδή έχει σχετική υγρασία 100% (εικ. 8).



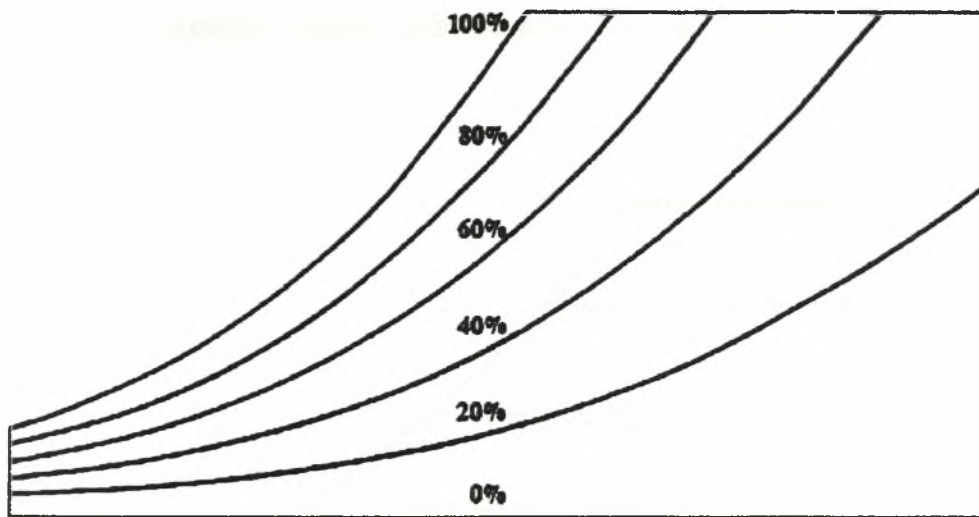
**Εικόνα 8.** Θερμοκρασία Υγρού Βολβού, °C

Ενθαλπία είναι το μέτρο της ενέργειας που βρίσκεται στον αέρα και μετράται σε kJ/kg ξηρού αέρα. Η ενέργεια στον αέρα βρίσκεται με την μορφή είτε της αισθητής είτε της λανθάνουσας θερμότητας. Η ενθαλπία στον ψυχομετρικό χάρτη φαίνεται στην γραμμική κλίμακα που βρίσκεται στην αριστερή μεριά του ψυχομετρικού χάρτη (εικ. 9).



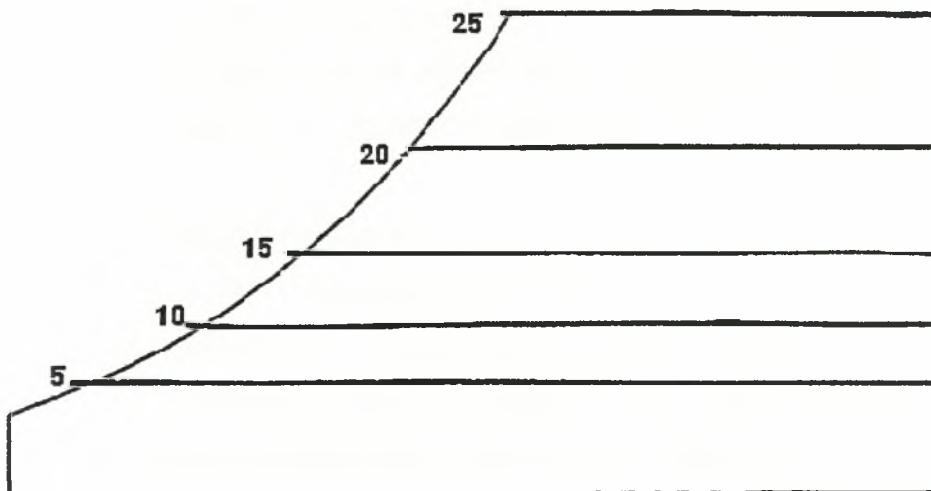
Εικόνα 9. Ενθαλπία, kJ/kg ξηρού αέρα

Σχετική Υγρασία είναι το ποσοστό υγρασίας που υπάρχει στον αέρα, σε σχέση με την μέγιστη υγρασία που μπορεί να συγκρατήσει. Η ποσότητα υγρασίας που μπορεί να συγκρατήσει ο αέρας εξαρτάται από την ξηρή του θερμοκρασία. Συγκεκριμένα όσο ανεβαίνει η θερμοκρασία του αυξάνει και η μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί να συγκρατήσει. Επίσης όταν αναφερόμαστε στην σχετική υγρασία του αέρα θα πρέπει να αναφέρουμε και την ξηρή θερμοκρασία του. Η σχετική υγρασία φαίνεται στον ψυχομετρικό χάρτη στις καμπύλες που ξεκινάνε από την κάτω αριστερή μεριά του και καταλήγουν στην πάνω δεξιά. Κάθε καμπύλη δείχνει και διαφορετική τιμή σχετικής υγρασίας αυξάνοντας από κάτω προς τα πάνω (εικ. 10).



**Εικόνα 10.** Σχετική υγρασία, %.

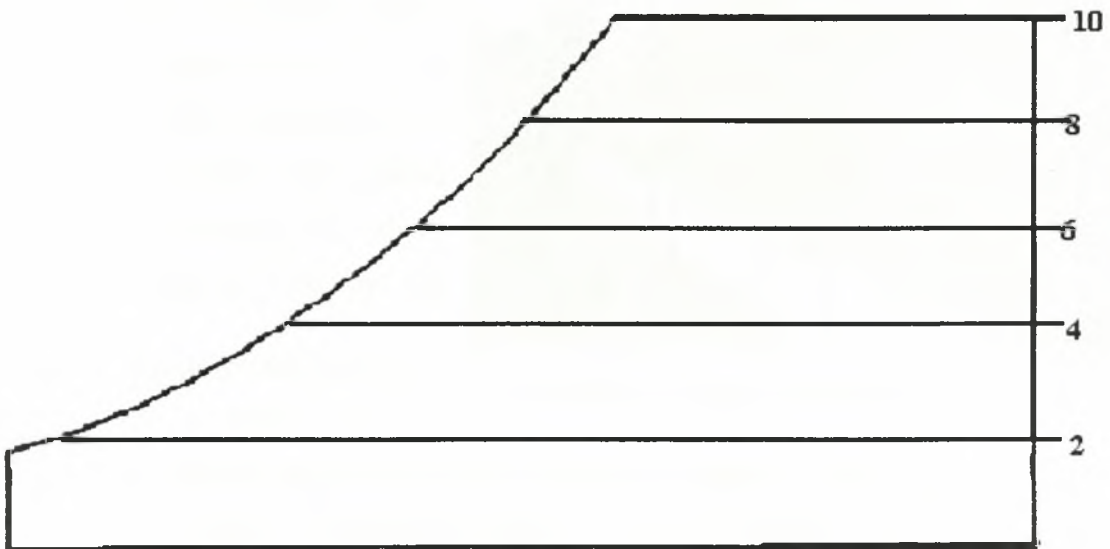
Σημείο Δρόσου είναι το σημείο εκείνο στο οποίο ο αέρας δεν μπορεί να κρατήσει άλλη ποσότητα υγρασίας, γίνεται δηλαδή κορεσμένος. Η πλεονάζουσα υγρασία θα συμπυκνωθεί και θα μετατραπεί σε νερό το οποίο θα εναποτεθεί σε κάποια επιφάνεια. Επίσης αν κάποια ποσότητα αέρα, στην οποία διατηρούμε σταθερή την ποσότητα υγρασίας που περιέχει, αρχίσουμε να μειώνουμε την θερμοκρασία θα φτάσουμε κάποια στιγμή στο σημείο δρόσου. Το σημείο δρόσου φαίνεται στον ψυχομετρικό χάρτη πάνω στην γραμμή κορεσμού (σχετική υγρασία 100%) (εικ. 11).



**Εικόνα 11.** Σημείο Δρόσου °C.

Απόλυτη Υγρασία είναι η ποσότητα του νερού που βρίσκεται εξατμισμένο την ατμόσφαιρα, εκφρασμένο σε g νερού/Kg αέρα. Είναι στην ουσία μία διαφορετική έκφραση του ποσού

υγρασίας που περιέχει ο αέρας. Στον ψυχομετρικό χάρτη φαίνεται στον κατακόρυφο άξονα (εικ. 12).



**Εικόνα 12.** Απόλυτη υγρασία του αέρα, g/Kg ξηρού αέρα.

### 3.2 Περιγραφή του συστήματος ψύξης στο θερμοκήπιο με υγρή παρειά.

Τα μέρη από τα οποία αποτελείται το σύστημα είναι η υγρή παρειά, το σύστημα τροφοδοσίας με νερό, η δεξαμενή συλλογής και αποθήκευσης του νερού και οι ανεμιστήρες. Κάθε ένα από αυτά πρέπει να πληρεί κάποιες προδιαγραφές έτσι ώστε το σύστημα να λειτουργεί κανονικά και να έχει ικανοποιητικές αποδόσεις.

#### 3.2.1 Τύποι υγρών τοιχωμάτων.

Η υγρή παρειά αποτελείται από ένα φίλτρο πάχους 5-30 cm, και είναι έτσι φτιαγμένη ώστε να έχει πολύ μεγάλη επιφάνεια εξάτμισης ανά τετραγωνικό μέτρο (40-60 m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>). Τοποθετείται συνήθως κάθετα προς το έδαφος, 60 cm πάνω από την επιφάνειά του και σε όλο το μήκος της πλευράς. Δύο είναι τα κύρια υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των υγρών τοιχωμάτων. Το ένα είναι η *κυτταρίνη* και το άλλο είναι οι *ίνες ζύλου*.



➤ *Παρειά από κυτταρίνη με κατακόρυφες αυλακώσεις.*

Αποτελείται συνήθως από πεπιεσμένο χαρτί με κυψελοειδή μορφή και έχει διάρκεια ζωής τουλάχιστον 10 χρόνια (εικ. 12). Οι διαστάσεις που είναι διαθέσιμες στην αγορά ποικίλουν. Το πάχος τους μπορεί να είναι 5, 10, 15, και 30 cm, ενώ το ύψος τους ξεκινάει από 30 cm και μπορεί να φτάσει μέχρι και 1,8 μέτρα ανάλογα και με το πάχος τους. Το



**Εικόνα 12.** Παρειά κυτταρίνης.

μήκος τους είναι σταθερό και ίσο με 30 cm. Η εκλογή του πάχους της παρειάς γίνεται με βάση το διαθέσιμο μήκος για να τοποθετηθεί παρειά. Έτσι για παράδειγμα θα προτιμήσουμε μία παρειά πάχους 15 cm η οποία θα έχει παροχή  $105 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$ , αντί μίας παρειάς πάχους 10 cm η οποία θα έχει παροχή  $75 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$ , όταν δεν έχουμε αρκετό χώρο.

Πολύ βασικό είναι να έχουμε ομοιόμορφη διαβροχή όλης της παρειάς, χωρίς να υπάρχουν στεγνά σημεία ή άλλα ανοίγματα στο θερμοκήπιο. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την είσοδο εξωτερικού αέρα χωρίς να έχει προηγουμένως ψυχθεί και άρα ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο και μείωση της απόδοσης του συστήματος. Συγκεκριμένα αν μία επιφάνεια μήκους A m δεν βρέχεται, τότε θα έχουμε την δημιουργία ενός κώνου μήκους  $8 \cdot A$  m που δεν ψύχεται (Γ. Μαυρογιαννόπουλος, 1990).

➤ *Παρειά από ίνες ξύλου.*

Η παρειά αυτού του τύπου έχει πάχος μόλις 2,5 cm, εμπεριέχεται σε συρματοπλέγμα για υποστήριξη και έχει περιορισμένη διάρκεια ζωής, γύρω στον ένα χρόνο. Το ξύλο από το οποίο μπορεί να προέρχεται είναι φλοιός πεύκου, άχυρο, ξύλινα νήματα λεύκης και αλλά. Η επιφάνεια εξάτμισης της παρειάς αυτής, σε σχέση με την παρειά από κυτταρίνη, είναι πολύ περιορισμένη. Κατά συνέπεια θα χρειαστούμε πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια με παρειά ινών ξύλου από ότι με παρειά από κυτταρίνη για να έχουμε την ίδια απόδοση.

Για τον λόγο αυτό κάποιες φορές η πλευρά του θερμοκηπίου όπου θα τοποθετηθεί η παρειά δεν επαρκεί και έτσι η παρειά τοποθετείται εκτός του θερμοκηπίου. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει η επιφάνεια του παραθύρου να είναι τουλάχιστον η μισή από την επιφάνεια που καταλαμβάνει η παρειά. Επίσης θα πρέπει η παρειά να είναι έτσι τοποθετημένη ώστε ίδια επιφάνεια να βρίσκεται πάνω και κάτω από το άνοιγμα, και επιπρόσθετα θα πρέπει να

συνδέεται με το θερμοκήπιο στην κορυφή και στα άκρα με ένα διαφανές κάλυμμα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι όλος ο αέρας που περνάει την παρειά θα καταλήξει μέσα στο θερμοκήπιο.

➤ *Άλλοι τύποι παρειάς.*

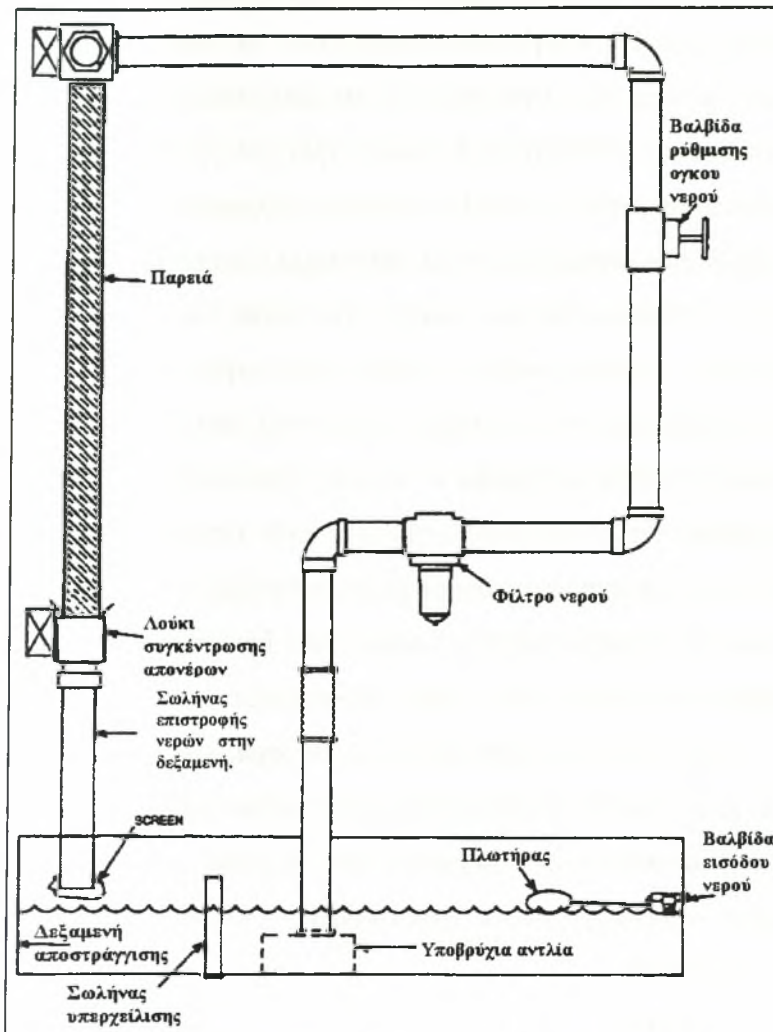
Πέρα από τα υλικά που αναφέρθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται και κάποια άλλα. Τα κυριότερα είναι ίνες αλουμινίου, ίνες γυαλιού, πλαστικό και τσιμέντο. Επίσης οι καλλιεργητές δοκιμάζουν και τις οριζόντιες υγρές παρειές οι οποίες τοποθετούνται εξωτερικά του θερμοκηπίου και αποτελούνται από διάφορα υλικά όπως χαλίκι, βερμικουλίτης ή ροκανίδια.

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουμε με την υγρή παρειά είναι ότι με την πάροδο του χρόνου, και ανάλογα με την αλατότητα του νερού που χρησιμοποιούμε, έχουμε σχηματισμό αλάτων στην παρειά με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσής της. Μπορούμε να επιβραδύνουμε την εμφάνιση του προβλήματος αν διαβρέχουμε την παρειά με περισσότερο νερό από αυτό που χρειάζεται και με ανανέωση ενός μέρους του νερού που χρησιμοποιεί το σύστημα. Ένα άλλο μέτρο για να επιμηκύνουμε την περίοδο χρήσης της παρειάς, είναι όταν έχουν εναποτεθεί κάποια άλατα να εμβαπτίσουμε την υγρή παρειά σε δεξαμενή με αραιό διάλυμα υδροχλωρίου.

Πέρα από τα άλατα μπορεί να δημιουργηθεί μούχλα στην παρειά η οποία θα φράξει τις διόδους της παρειάς και θα μειώσει την αποδοτικότητά της. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με χρήση διαλύματος 1% υποχλωριώδους νατρίου το οποίο διαλύεται στο νερό που κυκλοφορεί στο σύστημα και καταστρέφει την μούχλα.

### 3.2.2 Σύστημα διαβροχής της παρειάς.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι πολύ σημαντικό η παρειά να διαβρέχεται ομοιόμορφα. Η διαβροχή της γίνεται με ένα σωλήνα στον οποίο υπάρχουν οπές από τις οποίες εκτοξεύεται το νερό. Οι οπές είναι προσανατολισμένες προς τα επάνω και καθώς εκτοξεύεται το νερό προσκρούει σε μία κήλη επιφάνια (συνήθως είναι ένα κομμάτι ενός σωλήνα) και διασκορπίζεται. Έτσι το νερό καταλήγει στην παρειά την οποία διαβρέχει.



**Εικόνα 13.** Λειτουργία συστήματος διαβροχής παρειάς

Στο κάτω μέρος της παρειάς υπάρχει μία υδροροή στην οποία συλλέγονται τα νερά που δεν εξατμίστηκαν στην παρειά και οδηγούνται σε μία δεξαμενή. Εκεί παραμένουν για λίγο μέχρι να ψυχθούν, έτσι ώστε να έχουμε καλύτερη απόδοση, και μετά οδηγούνται πάλι για χρήση. Στην δεξαμενή υπάρχει και ένας πλωτήρας ο οποίος ελέγχει την στάθμη του νερού στην δεξαμενή, έτσι ώστε μία ζεστή μέρα όπου θα έχουμε μεγάλη εξάτμιση, μόλις η στάθμη του νερού στην δεξαμενή πέσει κάτω από ένα επίπεδο θα αναπληρωθεί το νερό που χάθηκε για να μπορέσει να συνεχίσει να λειτουργεί σωστά το σύστημα (εικ. 13).

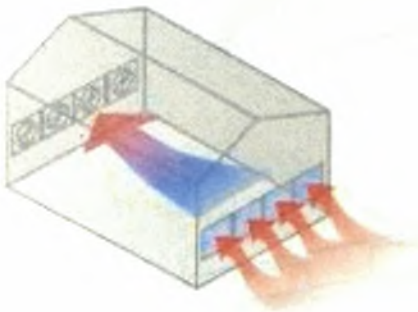
Η ποσότητα του νερού που πρέπει να κυκλοφορεί στην παρειά εξαρτάται από το είδος της παρειάς και τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν. Έτσι όσο πιο ζεστές είναι οι συνθήκες και όσο πιο παχιά η παρειά τόσο περισσότερο νερό έχει ανάγκη για να διατηρείται συνεχώς υγρή. Ο υπολογισμός της ποσότητας νερού που χρειάζεται ένα σύστημα για να λειτουργήσει γίνεται με βάση τις υψηλότερες απαιτήσεις του συστήματος, που παρουσιάζονται όταν η θερμοκρασία εξωτερικού αέρα είναι υψηλή.

Εδώ θα πρέπει να προσέξουμε έτσι ώστε η ποσότητα του νερού να είναι τέτοια έτσι ώστε να μην οδηγεί σε μείωση της επιφάνειας εξάτμισης, λόγω της φραγής ορισμένων πόρων της παρειάς. Από την άλλη θέλουμε να έχουμε ικανοποιητική ροή νερού έτσι ώστε να ξεπλένεται συνεχώς η παρειά από σκόνη και άλατα που μπορεί να συγκεντρωθούν.

### 3.2.3 Κίνηση του αέρα στο θερμοκήπιο. Επιλογή και εγκατάσταση ανεμιστήρων.

Σημαντικό είναι να γνωρίζουμε τον ρυθμό εναλλαγής του αέρα που θέλουμε να έχουμε. Ο ρυθμός αυτός εκφράζεται σε  $m^3$  αέρα ανά min ανά  $m^2$  επιφάνειας εδάφους θερμοκηπίου. Ρυθμός εναλλαγής της τάξης των  $2,5 m^3/(min \cdot m^2)$  θεωρείται ικανοποιητικός και οικονομικά συμφέρον (Γ. Μαυρογιαννόπουλος, 1990). Γίνεται κατανοητό ότι ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου εξαρτάται από το υψόμετρο, την ηλιακή ακτινοβολία και την άνοδο της θερμοκρασίας του αέρα κατά μήκος του θερμοκηπίου. Το υψόμετρο επηρεάζει τον ρυθμό ανανέωσης του αέρα γιατί καθώς ο αέρας κινείται κατά μήκος του θερμοκηπίου αφαιρεί θερμότητα από αυτό. Όσο όμως ανεβαίνουμε σε υψόμετρο τόσο πιο αραιός γίνεται ο αέρας και τόσο λιγότερη θερμότητα μπορεί να αφαιρέσει από το θερμοκήπιο. Έτσι, για παράδειγμα, για να αφαιρέσουμε την ίδια ποσότητα θερμότητας σε υψόμετρο 600 m, είναι απαραίτητο να αυξήσουμε τον ρυθμό ανανέωσης του αέρα σε σχέση με τον ρυθμό ανανέωσης στο επίπεδο της θάλασσας. Ο συνολικά απαιτούμενος χρόνος εξαερισμού από τη επιθυμητή θερμοκρασία, την θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα, την ηλιακή ακτινοβολία και τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας (Γ. Μαυρογιαννόπουλος, 1990).

Καθώς ο αέρας αφαιρεί θερμότητα από το θερμοκήπιο, αυξάνει την θερμοκρασία του, με αποτέλεσμα να υπάρχει μία διαφορά της θερμοκρασίας του αέρα μεταξύ παρειάς και εξαεριστήρα (Εικ. 14). Βέβαια στην άνοδο της θερμοκρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου



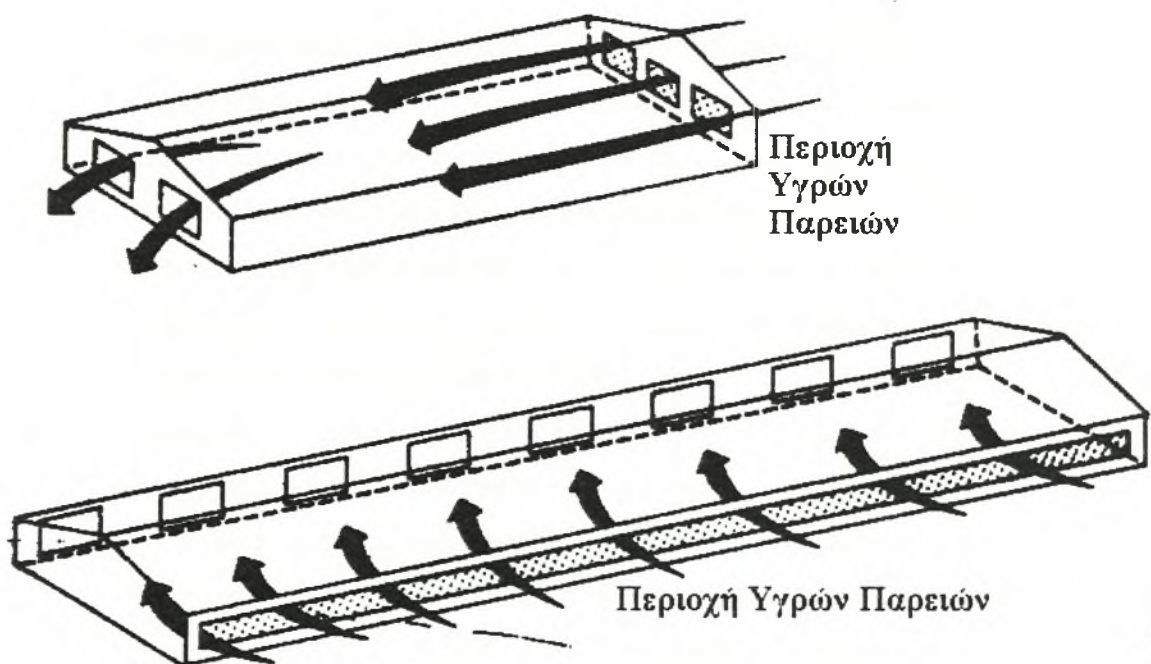
**Εικόνα 14.** Ανύψωση της θερμοκρασίας του εισερχόμενου αέρα κατά μήκος του θερμ/πιου

συμβάλει και ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει σε αυτό. Μία διαφορά της τάξης των  $3-5 ^\circ C$  κατά μήκος του θερμοκηπίου είναι ανεκτή. Όταν η διαφορά αυτή ξεπεράσει τους  $5 ^\circ C$  θα πρέπει να την μειώσουμε είτε αυξάνοντας την ταχύτητα του αέρα είτε μειώνοντας την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο θερμοκήπιο (Γ. Μαυρογιαννόπουλος, 1990).

Λόγο της αύξησης της θερμοκρασίας, της αντίστασης του φυλλώματος καθώς και των υλικών στήριξης των φυτών, το εισερχόμενο ρεύμα αέρα παρουσιάζει μία ανύψωση, η οποία έχει ως αποτέλεσμα ο ψυχρός αέρας να περνάει πάνω από τα φυτά, αφήνοντας ένα θύλακα ζεστού αέρα κάτω από αυτά. Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το πρόβλημα, τοποθετούμε διαφανή διαφράγματα από την οροφή του θερμοκηπίου έτσι ώστε να οδηγούμε τον αέρα να κινηθεί στην περιοχή των φυτών. Ένα ακόμα πρόβλημα που εμφανίζεται είναι στα φυτά που βρίσκονται ακριβώς μπροστά από την υγρή παρειά. Για τον λόγο αυτό θα πρέπει το ρεύμα του

εισερχόμενο αέρα να οδηγείται λίγο πάνω από τα φυτά, όταν το ύψος τους είναι μεγαλύτερο από το σημείο όπου ξεκινά η παρειά.

Όσον αφορά την τοποθέτηση των ανεμιστήρων στο θερμοκήπιο, υπάρχουν κάποιους κανόνες τους οποίους πρέπει να ακολουθούμε έτσι ώστε να έχουμε υψηλή απόδοση του συστήματος. Έτσι πέρα από τους κανόνες που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.2.2, θα πρέπει οι ανεμιστήρες να τοποθετούνται στην υπήνεμη πλευρά του θερμοκηπίου. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει η παροχή των ανεμιστήρων να αυξηθεί κατά 10% (Γ. Μαυρογιαννόπουλος, 1990). Για να έχουμε καλή λειτουργία του συστήματος θα πρέπει η απόσταση μεταξύ παρειάς και εξαεριστήρων να μην υπερβαίνει τα 40 m (Κ. Κίττας, 2000). Σε περίπτωση που το μήκος του θερμοκηπίου είναι μεγαλύτερο τότε τοποθετούνται οι ανεμιστήρες στην οροφή του θερμοκηπίου, στο μέσο του και δημιουργούμε δύο τοιχώματα με υγρή παρειά, ένα σε κάθε πλευρά. Η μέθοδος αυτή βέβαια προκαλεί σοβαρά προβλήματα σκίασης. Ένας άλλος τρόπος είναι να τοποθετήσουμε την παρειά και τους εξαεριστήρες στην μεγάλη πλευρά του θερμοκηπίου (εικ. 15).



**Εικόνα 15.** Τοποθέτηση των παρειών και των ανεμιστήρων ανάλογα με το μέγεθος του θερμοκηπίου

Κάτι άλλο το οποίο θα πρέπει να προσέχουμε είναι η απόσταση μεταξύ των ανεμιστήρων στην ίδια πλευρά να μην υπερβαίνει τα 7,5 m (Κ. Κίττας, 2000). Όλοι οι ανεμιστήρες θα πρέπει να βρίσκονται στο ίδιο ύψος, κατά προτίμηση στο επίπεδο των φυτών, έτσι ώστε να

εξασφαλίζεται μία ομοιόμορφη ροή αέρα ανάμεσα στα φυτά. Βασικό είναι να προσέξουμε ώστε στην έξοδο του ανεμιστήρα, να μην υπάρχει κάποιο εμπόδιο σε απόσταση μικρότερη από 1,5 φορές την διάμετρο του ανεμιστήρα. Επίσης σε συγκροτήματα θερμοκηπίων δεν θα πρέπει να στέλνει ο ένας εξαεριστήρας τον αέρα προς κάποιον άλλο, έκτος και αν βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από 10 m. Ακόμα δεν θα πρέπει να στέλνει τον ζεστό και υγρό αέρα προς κάποια υγρή παρειά απέναντι θερμοκηπίου, αν η απόσταση που χωρίζει τα δύο θερμοκήπια είναι μικρότερη από 15 m. Επίσης όταν σε ένα θερμοκήπιο έχουμε πάνω από 2 ανεμιστήρες θα ήταν καλό τουλάχιστον ο ένας να έχει δύο ταχύτητες για καλύτερη δυνατότητα ρύθμισης της παροχής αέρα (Γ. Μαυρογιαννόπουλος, 1990).

Τέλος θα πρέπει οι ανεμιστήρες να προστατεύονται από τα καιρικά φαινόμενα (ήλιο, βροχή, σκόνη χαλάζι κ.α.) με στέγαστρα, καθώς επίσης να έχουν προστατευτική σίτα για να αποφεύγονται τραυματισμοί.

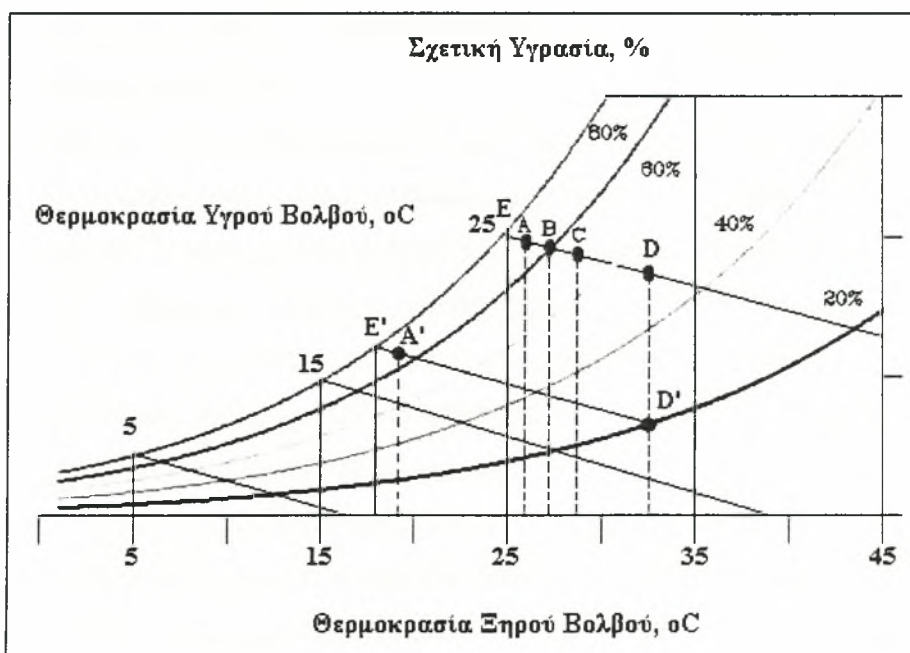
### 3.3 Αρχές λειτουργία του συστήματος δροσίμου με υγρή παρειά.

Η μείωση της θερμοκρασίας με την μέθοδο της υγρή παρειάς, στηρίζεται στην ψύξη του εισερχόμενου αέρα μέσω εξάτμισης. Η μέθοδος αυτή είναι μία αδιαβατική διαδικασία κορεσμού, δηλαδή θεωρούμε ότι το σύστημα εισερχόμενος αέρας-υγρή παρειά είναι θερμικά απομονωμένο και άρα δεν έχουμε μεταβολή του θερμικού φορτίου. Έτσι καθώς ο εξωτερικός αέρας περνάει από την υγρή παρειά και λόγω της διαφοράς υδατικού δυναμικού μεταξύ αέρα και υγρής παρειάς, έχουμε κίνηση νερού προς τον αέρα. Η κίνηση αυτή απαιτεί ενέργεια η οποία προέρχεται από την μετατροπή της αισθητής θερμότητας, του αέρα και του νερού, σε λανθάνουσα θερμότητα. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της θερμοκρασίας και η αύξηση της υγρασίας στον εισερχόμενο αέρα. Στην εικόνα 15 φαίνεται η διαδικασία ψύξης με εξάτμιση στον ψυχομετρικό χάρτη. Συγκεκριμένα φαίνεται πως όταν η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα είναι 33 °C (σημείο D), τότε ανάλογα με την απόδοση του συστήματος η θερμοκρασία του αέρα θα μειωθεί στους 29 °C (σημείο C), 27 °C (σημείο B), και 26 °C (σημείο A) για απόδοση του συστήματος 50%, 70% και 85% αντίστοιχα (Bucklin, R. A., *et all.*, 1993).

#### 3.3.1 Αποτελεσματικότητα του συστήματος

Η απόδοση του συστήματος μετριέται από την μείωση που προκαλείται στην θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα και δίνεται από την σχέση  $n = \frac{T_{dout} - T_{dpad}}{T_{dout} - T_{wout}}$ , όπου  $T_{dout}$  είναι η θερμοκρασία ξηρού βολβού του εξωτερικού αέρα,  $T_{dpad}$  είναι η θερμοκρασία ξηρού βολβού

του αέρα μόλις εξέρχεται από την υγρή παρειά και  $T_{wout}$  είναι η θερμοκρασία υγρού βολβού του εξωτερικού αέρα. Από αυτή φαίνεται ότι η απόδοση του συστήματος εξαρτάται από την θερμοκρασία ξηρού βολβού του εξωτερικού αέρα, από την θερμοκρασία που έχει ο αέρας μόλις βγαίνει από την παρειά και από την θερμοκρασία υγρού βολβού του εξωτερικού αέρα. Έστω στο προηγούμενο παράδειγμα (εικ. 16) ότι η απόδοση του συστήματος είναι 85%. Όπως φαίνεται όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  (σημείο D), και η υγρασία του 50%, τότε η θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα είναι  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (σημείο E) και η θερμοκρασία του αέρα που βγαίνει από την παρειά θα είναι  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$  (σημείο A) και η υγρασία του 90%. Αν όμως η θερμοκρασία του ήταν πάλι  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$  αλλά η υγρασία του 20% (σημείο D'), τότε η θερμοκρασία υγρού βολβού του αέρα είναι  $17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (σημείο E') και ο εισερχόμενος αέρας θα είχε θερμοκρασία  $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  και σχετική υγρασία 85% (σημείο A').



**Εικόνα 16.** Ψυχομετρικός χάρτης που δείχνει την επίδραση του συστήματος δροσισμού με υγρή παρειά στον εισερχόμενο αέρα

Βλέπουμε λοιπόν ότι περιοριστικός παράγοντας είναι η υγρή θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα και συγκεκριμένα όσο πιο ξηρός είναι ο εξωτερικός αέρας τόσο μικρότερη θα είναι η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα άρα μεγαλύτερη απόδοση του συστήματος. Έτσι κατά την διάρκεια του απογεύματος όπου η θερμοκρασία ξηρού βολβού είναι στα υψηλότερα επίπεδα της ημέρας, η διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας υγρού και ξηρού βολβού είναι και αυτή μέγιστη. Άρα και το μέγιστο δυναμικό ψύξης είναι εκείνη την ώρα, κατά την οποία και η ανάγκες του θερμοκηπίου σε δροσισμό είναι μέγιστες. Πάντως ο αέρας δεν μπορεί να ψυχθεί σε θερμοκρασία χαμηλότερη από την υγρή του θερμοκρασία. Γίνεται τέλος κατανοητό ότι η

χρήση του συστήματος ψύξης με ανεμιστήρες και υγρή παρειά ενδείκνυται μόνο σε περιοχές όπου επικρατούν ξηροθερμικές συνθήκες.

### 3.3.2. Πλεονεκτήματα και αδυναμίες του συστήματος.

Το σημαντικότερο ίσως πρόβλημα του συστήματος είναι η βαθμιαία αύξηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου. Η αύξηση αυτή δεν είναι επιθυμητή γιατί επηρεάζει την σωστή λειτουργία και ανάπτυξη του φυτού και κατ' επέκταση και την παραγωγή με οικονομικές συνέπειες. Οι κυριότερες συνέπειες από την αύξηση της θερμοκρασίας είναι η αύξηση της διαπνοής του φυτού σε μεγάλο βαθμό, μέχρι σημείου να στρεσαριστεί και να κλείσει τα στόματα με αποτέλεσμα την μείωση της φωτοσύνθεσης. Επίσης η αυξημένη υγρασία είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη γιατί μπορεί να έχουμε υγροποιήσεις και να ευνοηθεί έτσι η ανάπτυξη ασθενειών.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτό που γίνεται είναι να κρατάμε την ταχύτητα του αέρα σε όσο το δυνατόν υψηλότερα επίπεδα, χωρίς όμως να είναι αρνητικά για την καλλιέργεια, καθώς και η προοδευτική σκίαση του θερμοκηπίου έτσι ώστε να περιορίσουμε την εισερχόμενη ακτινοβολία με σκοπό την μείωση της αύξησης της θερμοκρασίας.

Μία άλλη ιδιαιτερότητα του συστήματος είναι ότι η υψηλή απόδοσή του επιτυγχάνεται μόνο σε ξηροθερμικές συνθήκες, περιορίζοντας την χρήση του σε περιοχές όπου επικρατούν αυτές οι συνθήκες, και αυτό γιατί, όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, η δυνατότητα που έχει το σύστημα για την μείωση της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία του και την σχετική του υγρασία (όσο πιο υψηλή θερμοκρασία και όσο πιο χαμηλή σχετική υγρασία τόσο μεγαλύτερη απόδοση).

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του συστήματος είναι η υψηλή του αποδοτικότητα (από 80-90%), το χαμηλό κόστος εγκατάστασης σε σχέση με ένα σύστημα υδρονέφωσης υψηλής πίεσης και το γεγονός ότι μπορεί να λειτουργεί με υψηλή απόδοση ακόμα και όταν η ποιότητα του νερού δεν είναι τόσο καλή σε αντίθεση με το σύστημα υδρονέφωσης όπου η καλή ποιότητα του νερού είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την καλή λειτουργία του συστήματος.



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> “Πειραματικό μέρος”

### 4.1 Σκοπός του πειράματος.

Το σημαντικότερο ίσως πρόβλημα των θερμοκηπιακών καλλιέργειών στην Ελλάδα είναι η μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας εντός του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με τη χαμηλή υγρασία, συνθήκες που εμφανίζονται κατά την θερμή περίοδο του έτους και κάνουν απαγορευτική την συνέχιση της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο ή όταν συνεχίζεται δεν επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι για την παραγωγή ποιοτικών προϊόντων, είναι απαραίτητος ένας καλός κλιματισμός κατά την θερινή περίοδο.

Δύο από τα πιο διαδεδομένα συστήματα που χρησιμοποιούνται για την μείωση της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο είναι η σκίαση και ο αερισμός. Εντούτοις τα σύστημα ψύξης με εξάτμιση είναι πιο αποτελεσματικά (Carpenter W. J. et al 1957), αν και στην Ελλάδα η εξάπλωσή τους είναι ακόμα περιορισμένη. Σε αυτά τα συστήματα η μείωση της θερμοκρασίας μπορεί να γίνει είτε ψεκάζοντας νερό σε φυσικά κινούμενους όγκους αέρα (συστήματα υδρονέφωσης χαμηλής και υψηλής πίεσης), είτε αναγκάζοντας τον αέρα να περάσει μέσα από μία υγρή παρειά πριν εισέλθει στο θερμοκήπιο.

Στο παρελθόν διάφοροι ερευνητές ασχολήθηκαν με την διερεύνηση των συστημάτων ψύξης (Montero et all 1981 και 1990, Giacomelli et all 1985). Η πλειοψηφία αυτών των εργασιών ανέλυσε την θερμοδυναμική συμπεριφορά του συστήματος καθώς και την επίδρασή του στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου. Οι Landsberg et al 1979, πρότειναν ένα θεωρητικό προσομοίωμα για την απόδοση ενός συστήματος υγρής παρειάς για διάφορες κλιματικές συνθήκες χωρίς να όμως να το επιβεβαιώσουν με πειραματικές μετρήσεις. Πιο πρόσφατα ο Willits 2000 πρότεινε ένα προσομοίωμα πρόβλεψης της θερμοκρασίας του αέρα και της καλλιέργειας συναρτήσει του ρυθμού ανανέωσης του αέρα και της εξωτερικής θερμοκρασίας. Τα συστήματα ψύξης με υγρή παρειά όταν χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα συνδυάζονται με προοδευτικά σκίαση του θερμοκηπίου (σε περίπτωση θερμοκηπίου μεγάλου μήκους) με σκοπό τον περιορισμό των θερμοβαθμίδων κατά μήκος του θερμοκηπίου. Για τα συστήματα αυτά δεν υπάρχει σχετική βιβλιογραφία

Ως εκ τούτου σκοπός του πειράματος ήταν η πειραματική διερεύνηση της κατανομής της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά μήκος ενός θερμοκηπίου εξοπλισμένο με σύστημα δυναμικού αερισμού και υγρή παρειάς και προοδευτικής σκίασης, καθώς και η παρουσίαση και

βαθμονόμηση ενός αναλυτικού μοντέλου για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου.

#### **4.2 Υλικά και μέθοδοι**

Το θερμοκήπιο στο οποίο έγινε το πείραμα ήταν πολλαπλό τροποποιημένο τοξωτό και χρησιμοποιούνταν για εμπορική καλλιέργεια τριαντάφυλλου. Κατασκευάστηκε το έτος 1990 και είχε συνολική έκταση 2,88 στρέμματα. Αποτελούνταν από 6 βάσεις με 8 μέτρα πλάτος η κάθε μία. Το μήκος του ήταν 60 μέτρα και το πλάτος του 48 μέτρα. Ο ορθοστάτης του θερμοκηπίου είχε 2,5 μέτρα ύψος και ο κορφίας 4 μέτρα.

Το θερμοκήπιο ήταν καλυμμένο στην οροφή με διπλό πολυαιθυλένιο πάχος 180μm, ενώ στα πλάγια ήταν καλυμμένο με πολυκαρβονικά φύλλα. Ο σκελετός του θερμοκηπίου ήταν κατασκευασμένος από γαλβανισμένο χάλυβα. Το θερμοκήπιο ήταν εξοπλισμένο με σύστημα προοδευτικής σκίασης, με μεγαλύτερη σκίαση στα τελευταία τριάντα μέτρα προς την μεριά των ανεμιστήρων. Η σκίαση επιτυγχανόταν με το ασβέστωμα του υλικού κάλυψης στο δεύτερο μισό του θερμοκηπίου.

Ο αερισμός του θερμοκηπίου κατά τις πρωινές ώρες γινόταν με φυσικό αερισμό με ανοίγματα στην οροφή του θερμοκηπίου. Αργότερα όταν η θερμοκρασία ανέβαινε και οι απαιτήσεις σε αερισμό δεν μπορούσαν να καλυφθούν από τον φυσικό αερισμό, ο αερισμός γινόταν με την χρήση 9 ανεμιστήρων τοποθετημένων στην μικρή πλευρά του θερμοκηπίου. Η παροχή μπροστά από κάθε ανεμιστήρα μετρήθηκε με ένα φορητό ανεμόμετρο θερμού αέρα (SWA31, SwemaAir 300, Farsta, Sweden) και βρέθηκε ίση με 9,3 m<sup>3</sup>/sec. Η είσοδος του αέρα γινόταν από την απέναντι πλευρά από αυτή που βρίσκονταν οι ανεμιστήρες όπου υπήρχε η υγρή παρειά η οποία είχε επιφάνεια 61 m<sup>2</sup>, 10 cm πάχος και 50 m μήκος. Ο αέρας διαπερνούσε την υγρή παρειά κυτταρίνης, η οποία είχε ειδική επιφάνεια ανταλλαγής 200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

Οι μετρήσεις του πειράματος έγιναν το καλοκαίρι του 2001 κατά την περίοδο από 12-8-2001 έως 24-9-2001, και αφορούσαν στην θερμοκρασία αέρα, ξηρού και υγρού βολβού, στην θερμοκρασία του εδάφους και του φυλλώματος, στην διαπνοή και στην ηλιακή ακτινοβολία. Η θερμοκρασία του αέρα μετρήθηκε έξω από το θερμοκήπιο, αμέσως μετά την υγρή παρειά, σε απόσταση 15 και 45 m από την υγρή παρειά και λίγο πριν τους ανεμιστήρες και για την μέτρηση χρησιμοποιήθηκαν αεριζόμενα ψυχρόμετρα. Η θερμοκρασία του φυλλώματος και του εδάφους μετρήθηκε στην μέση των δύο μισών του θερμοκηπίου (15 και 45 m από την υγρή παρειά). Για την μέτρηση χρησιμοποιήθηκαν θερμοζεύγη χαλκού-κωνσταντάνης τύπου T. Η ηλιακή ακτινοβολία μετρήθηκε έξω από το θερμοκήπιο και στην μέση των δύο μισών του

θερμοκηπίου με την χρήση πυρανομέτρων (CM-6, Kipp and Zonen, Delft, Holland). Τέλος η διαπνοή μετρήθηκε στα δύο μισά του θερμοκηπίου με την χρήση ζυγού ακριβείας ο οποίος με κατάλληλες διατάξεις λειτουργούσε ως λυσήμετρο.

Όλες οι τιμές αποθηκευόντουσαν σε ένα σύστημα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων , data logger (DL300, Delta-T Devices, Cambridge, UK), το οποίο κατέγραφε για κάθε παράμετρο την τιμή της κάθε 10 sec και στην συνέχεια υπολόγιζε το μέσο όρο για κάθε 10 λεπτά.

Μέσα στο θερμοκήπιο όπου έγινε το πείραμα καλλιεργούνταν τριαντάφυλλα της ποικιλίας *First Red* σε εμπορική κλίμακα για την παραγωγή δρεπτόν ανθέων. Τα φυτά καλλιεργούνταν σε βαθύ έδαφος καλυμμένο με άχυρο και γινόταν υδρολίπανση με στάγδην άρδευση. Ήταν φυτεμένα σε απλές γραμμές, παράλληλα προς το ρεύμα του αέρα, με απόσταση μεταξύ των γραμμών 1,5 m και στηρίζονταν σε σύρμα που βρίσκονταν κατά μήκος του θερμοκηπίου στα πλάγια των φυτών.

#### 4.3. Περιγραφή του μοντέλου υγρασίας και θερμοκρασίας

Σκοπός του πειράματος ήταν η βαθμονόμηση για τις ελληνικές συνθήκες, δύο αναλυτικών μοντέλων τα οποία υπολογίζουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου.

Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την θερμοκρασία μέσα στο θερμοκήπιο είναι:

- Ο ρυθμός εξαερισμού
- Η διαπνοή της καλλιέργειας (η εξάτμιση του εδάφους δεν λαμβάνεται υπόψη)
- Η μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της σκίασης.
- Η εξάτμιση νερού μέσα στο θερμοκήπιο (σύστημα δροσισμού)
- Ο συντελεστής απωλειών θερμότητας του καλύμματος

Αυτοί οι πέντε παράγοντες συνδέονται στην εξίσωση του ισοζυγίου της ενέργειας, η οποία επιτρέπει την πρόβλεψη της κατανομής της θερμοκρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου. Το ισοζύγιο θερμότητας, κατά μήκος του θερμοκηπίου και για μήκος  $dx$  δίνει η εξίσωση (1) για τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου  $T_{in}$  (C. Kittas, 2001a):

$$V\rho C_p dT_{in} = [\tau (1-\alpha) R_g - \beta e_{ws,in}] Ldx - K_c L[T_{in}(x)-T_{out}]dx \quad (1)$$

Όπου

$V$  ο ρυθμός εξαερισμού ( $m^3 sec^{-1}$ ),

$\rho$  η πυκνότητα του αέρα ( $kg m^{-3}$ ),

$C_p$  η ειδική θερμότητα του αέρα σε σταθερή πίεση ( $J kg^{-1} °C^{-1}$ )

$\tau$  η διαπερατότητα του υλικού κάλυψης

$L$  είναι πλάτος του θερμοκηπίου (m)

$L$  είναι η περίμετρος της οροφής που αντιστοιχεί σε αυτό το πλάτος (m)

$R_g$  η εξωτερική ολική ακτινοβολία ( $W m^{-2}$ )

$e_{ws}$  είναι η μερική πίεση της τάσης ατμών στον κορεσμό (Pa),

$K_c$  είναι ο ολικός συντελεστής απωλειών θερμότητας του καλύμματος του θερμοκηπίου ( $W m^{-2} °C^{-1}$ )

$T$  η θερμοκρασία ( $°C$ ) και

$\beta$  και  $\alpha$  είναι χαρακτηριστικοί συντελεστές της καλλιέργειας.

Ο όρος  $\alpha$  περιγράφει το κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα.

Ο όρος  $\beta$  αναφέρεται στην διαπνοή των φυτών λόγω του ελλείμματος κορεσμού του αέρα.

Η εξίσωση (1) μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$Ad\theta/dx + B\theta(x) = C \quad (2)$$

Όπου  $\theta = T_{in} - T_{out}$ , ενώ τα  $A, B, C$  είναι σταθεροί συντελεστές οι οποίοι ορίζονται ως εξής:

$$A = V\rho C_p,$$

$$B = K_c L \text{ και}$$

$$C = [\tau (1-\alpha) R_g - \beta e_{ws,in}] L$$

Η επίλυση της εξίσωσης (2) μπορεί να εκφραστεί ως

$$\theta(x) = \theta_0 \exp(-Bx/A) + C/B \quad (3)$$

όπου

$$\theta_0 = (T_{pad} - T_{out} - C/B) \quad (4)$$

και αναλυτικά

$$\theta(x) = (T_{pad} - T_{out} - C/B)\exp(-Bx/A) + C/B \quad (5)$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου αυξάνει καθώς η απόσταση  $x$  από το PAD προς τους ανεμιστήρες μεγαλώνει και γίνεται ασυμπτωτική για

μεγάλες τιμές του  $x$ . Η τιμή του  $x$  για την οποία γίνεται ασυμπτωτική η θερμοκρασία εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και τον συντελεστή απωλειών θερμότητας του καλύμματος.

Η σχέση (6) περιγράφει την μεταβολή της υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου:

$$V\rho dw_{in} = L ETR dx \quad (6)$$

όπου

$$ETR = \alpha R_{in} + \beta D_{sat,in} \quad (7)$$

και

$$D_{sat,in} = e_{ws,in} - e_{in} = (w_{sat,in} - w_{in})/\gamma \quad (8)$$

όπου

**ETR** ο ρυθμός εξατμισωδιαπνοή της καλλιέργειας ( $g H_2O/m^2/sec$ )

**w** η απόλυτη υγρασία του αέρα ( $g/kg$  αέρα)

**w<sub>sat</sub>** η απόλυτη υγρασία του αέρα στον κορεσμό ( $g/kg$  αέρα)

**R<sub>in</sub>** η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ( $W/m^2$ )

**D<sub>sat</sub>** το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (Pa)

**e<sub>ws</sub>** είναι η μερική πίεση της τάσης ατμών στον κορεσμό (Pa),

**e<sub>in</sub>** είναι η μερική πίεση της τάσης ατμών (Pa),

**γ** ψυχομετρική σταθερά

Η σχέση (6) μπορεί να εκφραστεί με τις παρακάτω μορφές:

$$V\rho dw_{in} = L[\alpha R_{in} + \beta(w_{sat,in} - w_{in})/\gamma]dx \quad (9)$$

ή

$$Ad(w_{sat,in} - w_{in})/dx + B(w_{sat,in} - w_{in}) = C \quad (10)$$

Λύνοντας την εξίσωση (10) με τον ίδιο τρόπο όπως και αυτή της θερμοκρασίας προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$w_{in} = w_{sat,in} + (w_{pad} - w_{in} - C/B) \exp(-Bx/A) + C/B \quad (11)$$

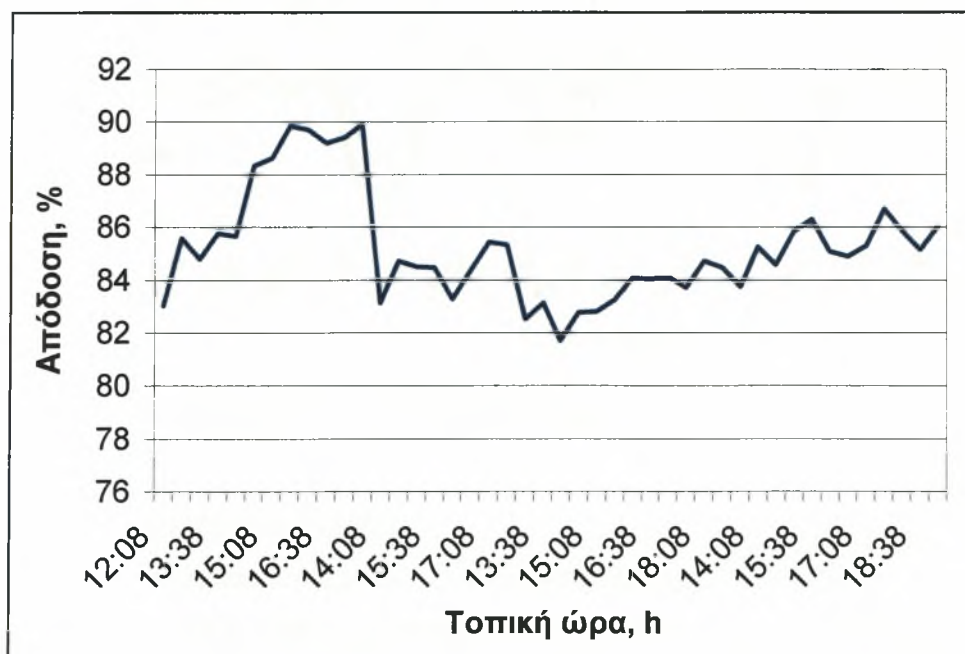
Για την επίλυση των μοντέλων θερμοκρασίας και υγρασίας είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τους συντελεστές **α** και **β**, τους οποίους στην συνέχεια θα προσδιορίσουμε στατιστικά.

#### 4.4 Αποτελέσματα

Το αποτελέσματα τα οποία παρατίθενται πιο κάτω είναι ενδεικτικά και προέρχονται από τέσσερις ημέρες (12,14,15 και 16 – 8 – 2001) κατά την διάρκεια λειτουργίας του συστήματος δροσισμού. Η επιλογή των ημερών έγινε με βάση την σωστή λειτουργία του συστήματος καθώς και των οργάνων μέτρησης.

##### 4.4.1 Απόδοση συστήματος

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος. Η δυνατότητα του δηλαδή να μειώνει την θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα και την φέρνει όσο το δυνατόν πιο κοντά στην θερμοκρασία υγρού βολβού του εξωτερικού αέρα. Όπως φαίνεται η απόδοση του συστήματος κινήθηκε σε υψηλά επίπεδα με μία μέση απόδοση γύρω στο 85%. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις ξηροθερμικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή κατά την περίοδο των μετρήσεων.

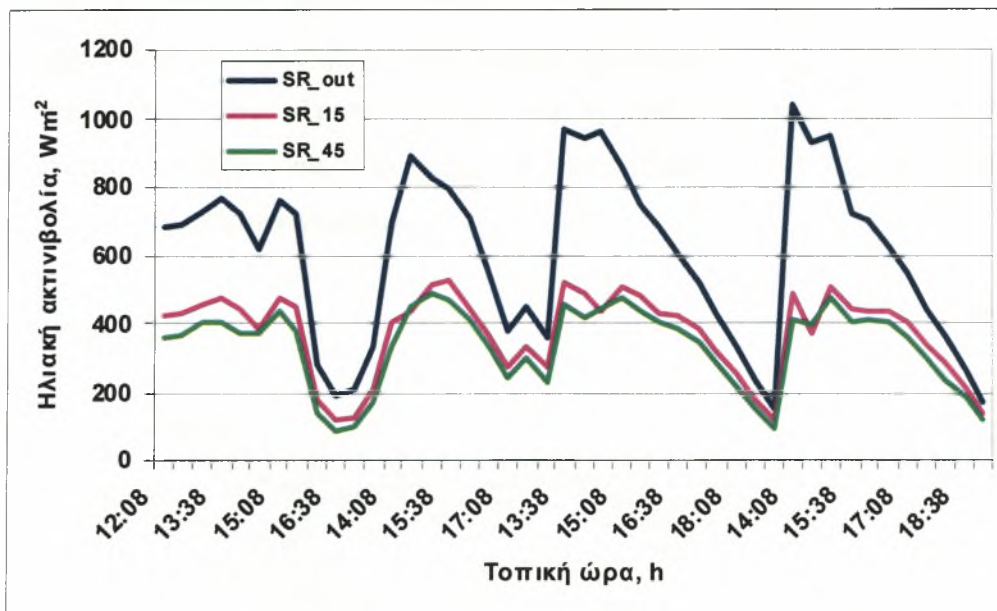


Γράφημα 1. Απόδοση του συστήματος.

##### 4.4.2 Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας

Στο γράφημα 2, παρουσιάζεται η διακύμανση της ακτινοβολίας έξω και μέσα στο θερμοκήπιο. Όπως φαίνεται η ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μειώνεται και μάλιστα στο δεύτερο μισό ήταν μικρότερη από ότι στο πρώτο. Αυτό οφείλεται στην προοδευτική σκίαση του θερμοκηπίου η οποία επιτυγχανόταν με το ασβέστωμα του υλικού

κάλυψης στο δεύτερο μισό του. Η διαφορά της διαπερατότητας του υλικού κάλυψης στο πρώτο και δεύτερο μισό δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη και από τις μετρήσεις βρέθηκε ότι η διαπερατότητα στο πρώτο μισό ήταν 51% ενώ στο δεύτερο μισό 46%. Όπως φαίνεται πως η διαπερατότητα στα δύο τμήματα του θερμοκηπίου δεν διαφέρει σημαντικά, τουλάχιστον σε τέτοιο βαθμό που να δικαιολογείται η ύπαρξη σκίασης στο δεύτερο μισό. Η μικρή αυτή διαφορά στην διαπερατότητα των δύο μισών του θερμοκηπίου οφείλεται στην παλαιότητα της κατασκευής (ηλικία 4 έτη) και στην επίδραση των περιβαλλοντικών φαινομένων (ηλιακή ακτινοβολία, βροχή, σκόνη) στο υλικό κάλυψης, με αποτέλεσμα να επηρεαστεί η διαπερατότητα του και να εμφανίζεται η πολύ μικρή διαφορά που μετρήθηκε μεταξύ πρώτου και δεύτερου μισού.

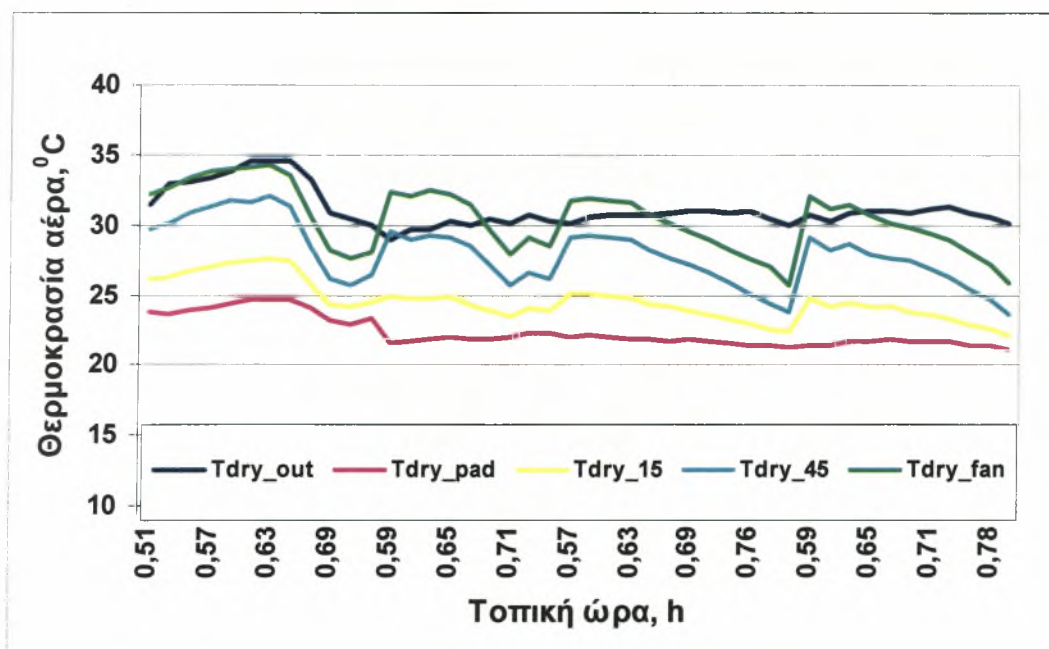


Γράφημα 2. Διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας.

#### 4.4.3 Διακύμανση θερμοκρασίας

Στο γράφημα 3, παρουσιάζεται η διακύμανση της θερμοκρασίας έξω από το θερμοκήπιο και μέσα στο θερμοκήπιο αμέσως μετά την παρειά, σε απόσταση 15 και 45 m από την παρειά και λίγο πριν τους ανεμιστήρες. Είναι εμφανής η δυνατότητα του συστήματος να μειώνει την θερμοκρασία σε επίπεδα όπου δεν είναι απαγορευτική η ανάπτυξη της τριανταφυλλιάς, μιας και η άριστη θερμοκρασία για την καλλιέργεια της τριανταφυλλιάς κυμαίνεται από 20-24 °C ενώ σε θερμοκρασίες πάνω από 30 °C επιταχύνεται η ανάπτυξη της καλλιέργειας με μικρή όμως υποβάθμιση της ποιότητας (Σύρος, Θ., 2001). Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του αέρα στην παρειά είναι σχεδόν σταθερή σε όλη την διάρκεια της ημέρας, και μάλιστα όσο πιο μεγάλη είναι η εξωτερική θερμοκρασία τόσο πιο μικρή (οριακά) είναι και η θερμοκρασία στην

υγρή παρειά. Αυτό οφείλεται στο ότι καθώς αυξάνει η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα, μειώνεται η σχετική του υγρασία και κατά συνέπεια έχει χαμηλότερη θερμοκρασία υγρού βολβού και άρα μεγαλύτερη δυνατότητα μείωσης της θερμοκρασία από το σύστημα.. Χάρη στην υψηλή απόδοση του συστήματος και τις ξηροθερμικές συνθήκες που επικρατούσαν η μείωση της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα έφτανε και τους 10 °C. Τέλος παρατηρούμε ότι καθώς κινούμαστε προς τους ανεμιστήρες η θερμοκρασία αυξάνει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την κίνηση του αέρα κατά μήκος του θερμοκηπίου, υπάρχει μία συνεχής ροή αισθητής θερμότητας από τα φυτά προς τον αέρα, με αποτέλεσμα την προοδευτική αύξησης της θερμοκρασίας του αέρα από την παρειά προς τους ανεμιστήρες. Το γεγονός ότι η θερμοκρασία στους ανεμιστήρες για κάποιες ώρες ξεπέρασε την θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα καταδεικνύει το πρόβλημα που αντιμετωπίζει το σύστημα της υγρής παρειά σε θερμοκήπια με μεγάλο μήκος (>40m). Ένας άλλος παράγοντας που κάνει ίσως πιο έντονη αυτή την αύξηση είναι η παλαιότητα του υλικού κάλυψης και η μικρή διαφορά που εμφανίζεται στην διαπερατότητα στο πρώτο και το δεύτερο μισό με αποτέλεσμα να μην έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα η προοδευτική σκίαση.



Γράφημα 3. Διακόμανση θερμοκρασίας.

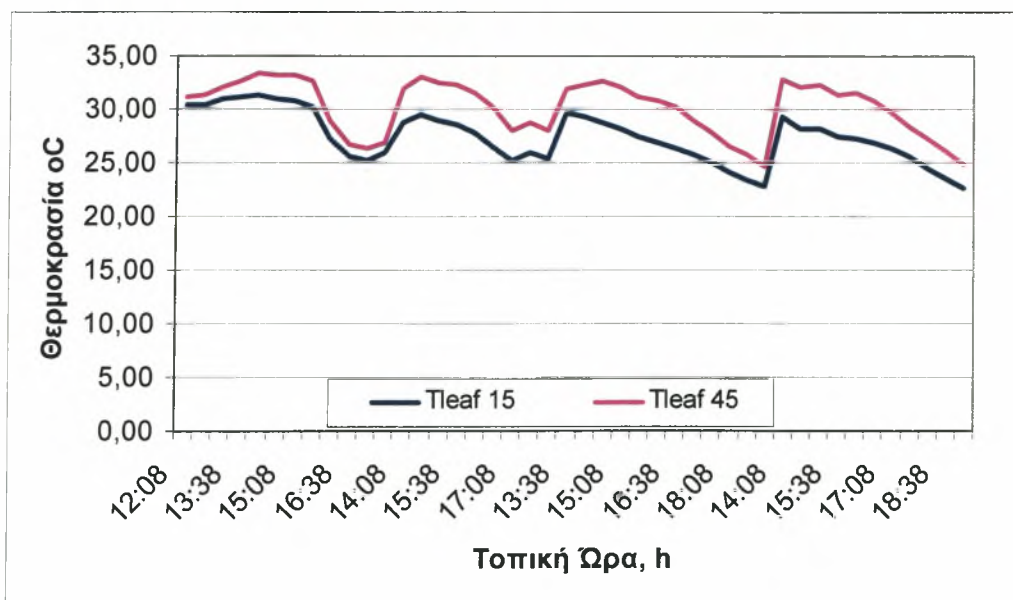
Στο γράφημα φαίνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας είναι μέγιστη μεταξύ των δύο μισών του θερμοκηπίου (από 15 m έως 45 m), ενώ στα πρώτα 15 m και στα τελευταία 15 m η αύξηση είναι μικρότερη. Η μεγαλύτερη αύξηση που παρατηρείται στο μεσαίο κομμάτι του θερμοκηπίου και αυτό γιατί η απόσταση που διένυσε ο αέρας μεταξύ των δύο σημείων όπου



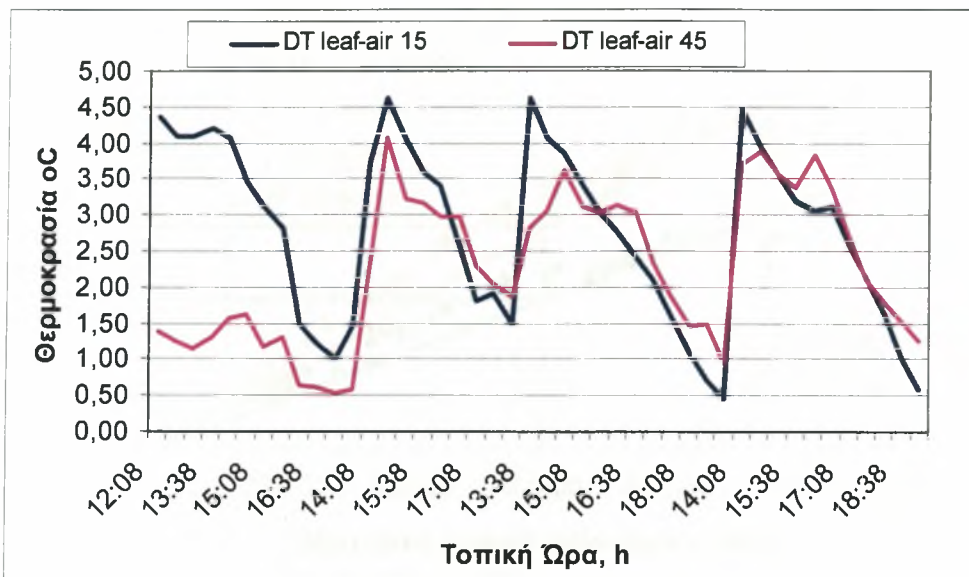
έγιναν οι μετρήσεις είναι διπλάσια (30m) από αυτή στο πρώτο (15m) και το τελευταίο (15m) μισό. Αν όμως ανάγουμε την αύξηση της θερμοκρασίας που είχαμε στο μεσαίο κομμάτι σε πόση αύξηση της θερμοκρασίας θα αναλογούσε σε απόσταση 15 m θα δούμε ότι είναι μικρότερη από αυτή στα πρώτα και στα τελευταία 15 m. Έτσι ενώ στα πρώτα και στα τελευταία 15 m η μέση αύξηση της θερμοκρασίας είναι 2,27 °C και 2,52 °C αντίστοιχα, η αύξηση στο τμήμα από 15 έως 30 m και από 30 έως 45 m είναι 1.65 °C.

#### 4.4.4 Σύγκριση θερμοκρασίας αέρα και φυλλώματος. Διαπνοή της καλλιέργειας.

Στο γράφημα 4 παρουσιάζεται η διακύμανση της θερμοκρασίας φυλλώματος στο πρώτο και το δεύτερο μισό του θερμοκηπίου. Όπως φαίνεται η θερμοκρασία του φυλλώματος είναι μεγαλύτερη στο δεύτερο μισό του θερμοκηπίου σε σχέση με το πρώτο. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε καταπόνηση των φυτών στο δεύτερο μισό και κατ' επέκταση σε μείωση της διαπνοής σε εκείνο το τμήμα του θερμοκηπίου. Παρόλα αυτά όπως φαίνεται στο γράφημα 5, όπου παρουσιάζεται η διακύμανση της διαφοράς της θερμοκρασίας φυλλώματος-αέρα στο πρώτο και το δεύτερο μισό του θερμοκηπίου, η διαφορά είναι μεγαλύτερη και με μεγαλύτερη διακύμανση στο πρώτο μισό σε σχέση με το δεύτερο μισό όπου η διαφορά είναι μικρότερη όπως και η διακύμανση της. Αυτό δείχνει ότι η ροή αισθητής θερμότητας είναι μικρότερη στο δεύτερο από ότι στο πρώτο μισό και κατ' επέκταση μεγαλύτερο μέρος της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε λανθάνουσα στο δεύτερο μισό, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο καταπόνησης των φυτών στο δεύτερο μισό.

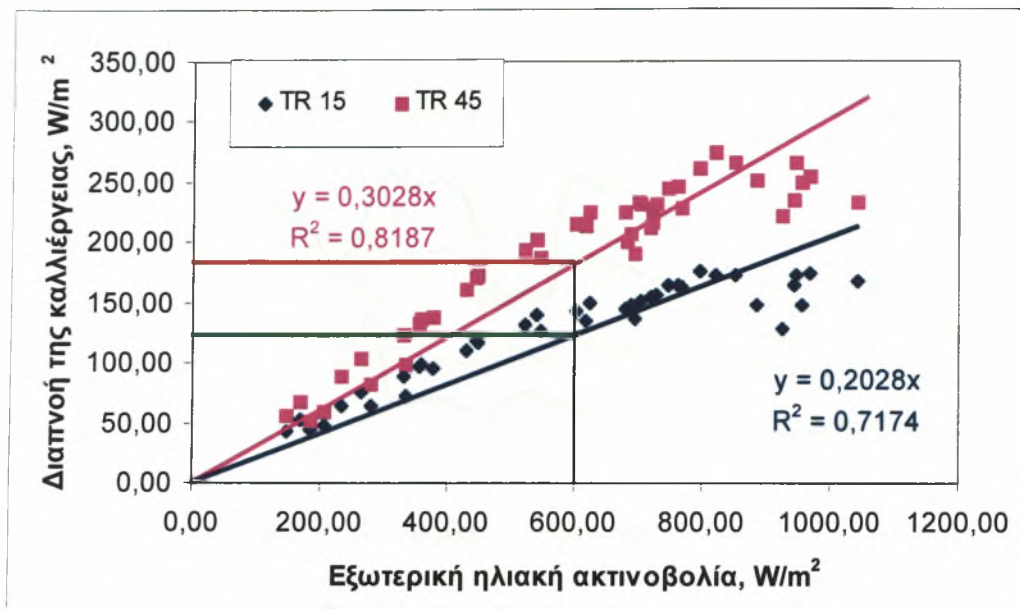


**Γράφημα 4** Θερμοκρασία φυλλώματος στο πρώτο και το δεύτερο μισό του θερμοκηπίου.



**Γράφημα 5.** Διαφορά θερμοκρασίας φυλλώματος - αέρα στο πρώτο και το δεύτερο μισό του θερμοκηπίου.

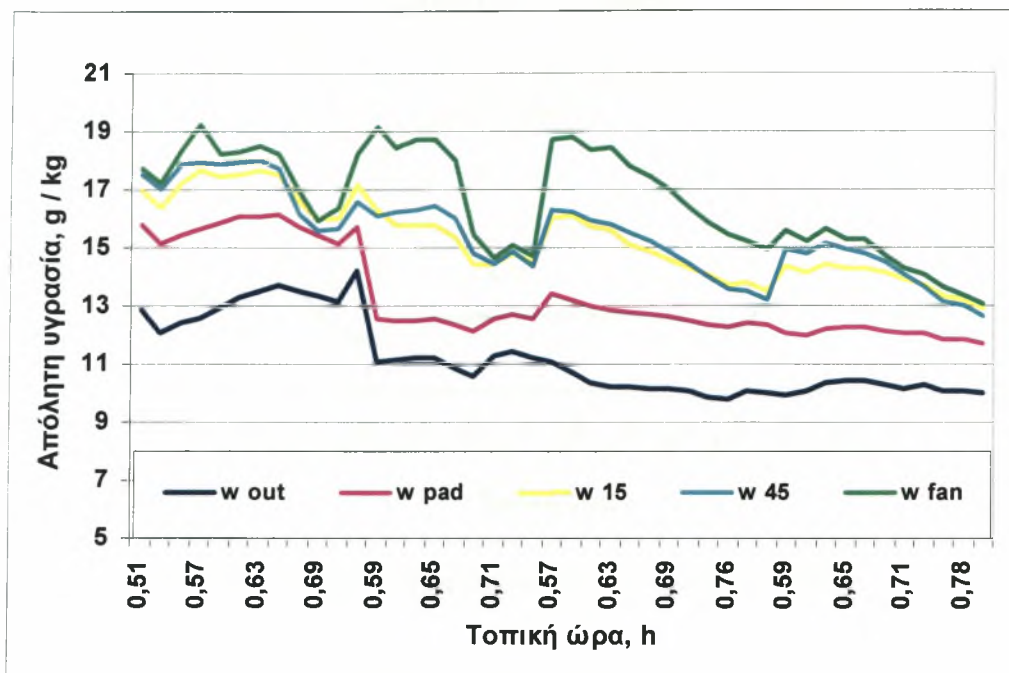
Αυτό επιβεβαιώνεται και πειραματικά από τη σύγκριση της διαπνοής της καλλιέργειας στο πρώτο και στο δεύτερο μισό. Αυτή η σύγκριση φαίνεται στο γράφημα 6 όπου παρουσιάζεται η διαπνοή στο πρώτο και στο δεύτερο μισό του θερμοκηπίου σε σχέση με την εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία. Στο γράφημα φαίνεται ότι η διαπνοή στο δεύτερο μισό του θερμοκηπίου είναι μεγαλύτερη από ότι στο πρώτο μισό, παρά το γεγονός ότι η θερμοκρασία του φυλλώματος είναι μεγαλύτερη στο δεύτερο μισό και το γεγονός ότι η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο δεύτερο μισό είναι μικρότερη από ότι στο πρώτο μισό. Έτσι για παράδειγμα για τιμή εξωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας  $600 \text{ W/m}^2$  η διαπνοή στο πρώτο μισό είναι  $125 \text{ W/m}^2$  (πράσινη γραμμή) ενώ στο δεύτερο  $190 \text{ W/m}^2$  (κόκκινη γραμμή). Το γεγονός αυτό, όπως θα εξηγήσουμε και παρακάτω οφείλεται στο μεγαλύτερο έλλειμμα κορεσμού που υπάρχει στο δεύτερο μισό του θερμοκηπίου.



**Γράφημα 6.** Η διαπνοή σε σχέση με την εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία.

#### 4.4.5 Μεταβολή της απόλυτης υγρασία του αέρα.

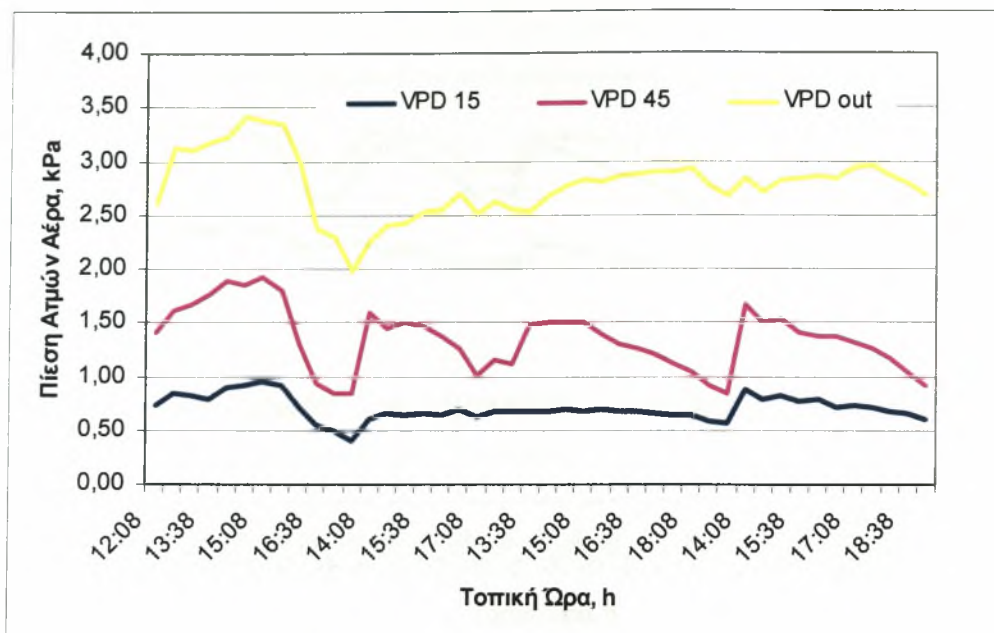
Στο γράφημα 7 παρουσιάζεται η μεταβολή της απόλυτης υγρασίας του αέρα στο πρώτο και στο δεύτερο μισό του θερμοκηπίου. Όπως φαίνεται η υγρασία αυξάνεται σταδιακά καθώς κινούμαστε από το εξωτερικό του θερμοκηπίου, στο pad και μέχρι τους ανεμιστήρες. Παρατηρούμε ότι περνώντας από την παρειά η υγρασία παρουσιάζει σημαντική αύξηση. Αυτό οφείλεται στο ότι η παρειά είναι κορεσμένη με υγρασία με αποτέλεσμα καθώς περνάει ο εξωτερικός αέρας να μεταφέρεται και ποσότητα νερού μαζί του. Σημαντική επίσης αύξηση παρατηρείται και από την παρειά μέχρι τα πρώτα 15 m καθώς επίσης και στα τελευταία 15 m. Αντίθετα από τα 15m έως τα 45m η αύξηση της υγρασίας είναι σχεδόν μηδενική. Επειδή η αύξηση της απόλυτης υγρασίας του αέρα οφείλεται στην διαπνοή των φυτών, το γεγονός ότι στο τμήμα του θερμοκηπίου από 15m έως 45m δεν παρατηρήθηκε αύξηση της υγρασίας σημαίνει ότι η διαπνοή σε εκείνο το κομμάτι ήταν περιορισμένη.



Γράφημα 7. Διακύμανση απόλυτης υγρασίας του αέρα.

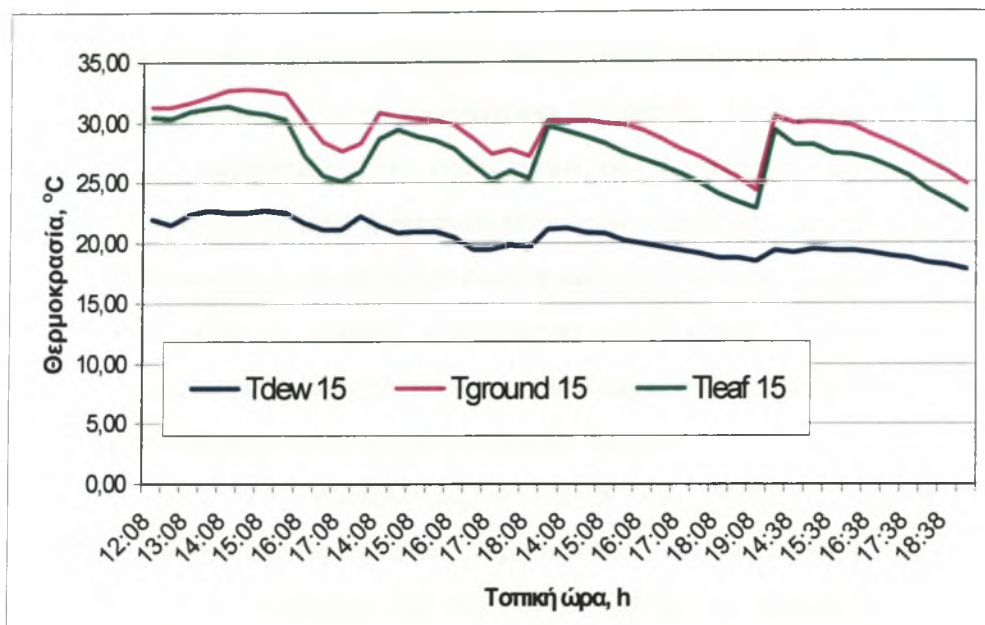
#### 4.4.6 Διακύμανση του ελλείμματος κορεσμού της ατμόσφαιρας (VPD)

Στο γράφημα 8, φαίνεται η μεταβολή του ελλείμματος κορεσμού της ατμόσφαιρας στο εξωτερικό του θερμοκηπίου καθώς και στο εσωτερικό του, στο πρώτο και το δεύτερο μισό. Όπως φαίνεται καθώς ο εξωτερικός αέρας εισέρχεται στο θερμοκήπιο το έλλειμμα κορεσμού μειώνεται απότομα και μάλιστα παίρνει χαμηλές τιμές, κάτω από την μονάδα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς ο αέρας περνά από την υγρή παρειά και ψύχεται, εξέρχεται από αυτή σχεδόν κορεσμένος σε υγρασία. Καθώς όμως κινούμαστε προς το δεύτερο μισό το έλλειμμα κορεσμού είναι μεγαλύτερο από ότι στο πρώτο. Συγκεκριμένα υπολογίσαμε τον μέσο όρο του ελλείμματος κορεσμού στο πρώτο και δεύτερο μισό του θερμοκηπίου και βρήκαμε ότι είναι 0,7 και 1,35 στο πρώτο και δεύτερο μισό αντίστοιχα. Βλέπουμε δηλαδή ότι σχεδόν διπλασιάστηκε στο δεύτερο μισό. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας το αέρα καθώς κινείται από το pad στους ανεμιστήρες.



**Γράφημα 8.** Διακύμανση του ελλείμματος κορεσμού του αέρα (VPD).

Λόγου του γεγονότος ότι στο πρώτο μισό το έλλειμμα κορεσμού του αέρα είναι πολύ μικρό και πολλές φορές πολύ κοντά στην τιμή των 0,5 Kpa, τιμή η οποία είναι κρίσιμη για την δημιουργία συμπυκνώσεων. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να ελέγξουμε την πιθανότητα υγροποιήσεων σε εκείνο το κομμάτι του θερμοκηπίου. Έτσι υπολογίσαμε την θερμοκρασία σημείου δρόσου του αέρα στα 15m από την παρειά (Tdew15) και την συγκρίναμε με την θερμοκρασία του φυλλώματος (Tleaf15) και την θερμοκρασία του εδάφους (Tground15) στα 15 m. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω γράφημα η θερμοκρασία του φυλλώματος και του εδάφους ήταν πολύ μεγαλύτερη από την θερμοκρασία του σημείου δρόσου του αέρα. Έτσι αποκλείστηκε το ενδεχόμενο υγροποιήσεων.



**Γράφημα 9.** Σύγκριση θερμοκρασίας σημείου δρόσου αέρα με θερμοκρασία φυλλώματος και εδάφους.

#### 4.4.7 Βαθμονόμηση των μοντέλων υπολογισμού Θερμοκρασίας και Υγρασίας.

Για την βαθμονόμηση των μοντέλων (5) και (11) είναι απαραίτητο να υπολογίσουμε τους συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$ . Ο υπολογισμός τους έγινε στατιστικά από την σχέση (7) η οποία περιγράφει την εξατμοδιαπνοή της καλλιέργειας σε συνάρτηση με την ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και το έλλειμμα κορεσμού σε αυτό όπως δίνεται στην παράγραφο 4.3:  $ETR = \alpha R_{in} + \beta D_{sat,in}$ . Έτσι χρησιμοποιώντας το στατιστικό πακέτο SPSS υπολογίσαμε με την μέθοδο της γραμμικής συμμεταβολής τους συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$ . Το μέγεθος του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των συντελεστών ήταν  $N=230$  και προέκυψε ότι οι τιμές των  $\alpha$  και  $\beta$  είναι:

<u>Πρώτο μισό</u>	<u>Δεύτερο μισό</u>
$\alpha = 0,33 \pm 0,008$	$\alpha = 0,58 \pm 0,01$
$\beta = 13,8 \pm 3$	$\beta = 4,92 \pm 4,2$
$R^2 = 0,88$	$R^2 = 0,77$

Η σχέση (7) παίρνει την παρακάτω μορφή για το πρώτο και το δεύτερο μισό του θερμοκηπίου αντίστοιχα:

$$ETR_{15} = 0.33 * R_{15} + 13,8 * D_{sat,15} \quad (12)$$

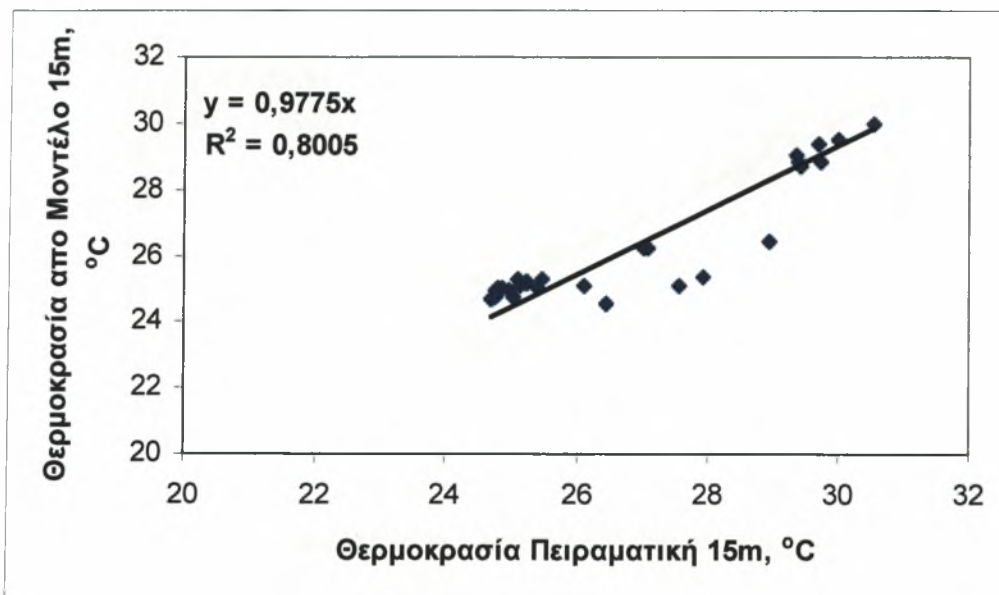
$$ETR_{45} = 0.58 * R_{45} + 4,92 * D_{sat,45} \quad (13)$$

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως ο συντελεστής  $\alpha$  περιγράφει το κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε λανθάνουσα θερμότητα. Το γεγονός ότι είναι μεγαλύτερος στο δεύτερο μισό επιβεβαιώνει και μαθηματικά την παρατήρηση που έγινε προηγουμένως (παράγραφος 4.4.4) ότι δηλαδή η διαπνοή είναι μεγαλύτερη στο δεύτερο μισό και μικρότερη στο πρώτο. Παρόλο που η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι μικρότερη στο δεύτερο μισό του θερμοκηπίου, λόγω της σκίασης, εντούτοις τα φυτά διαπνέουν περισσότερο. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο χαμηλό έλλειμμα κορεσμού του αέρα στο πρώτο μισό του θερμοκηπίου το οποίο πιθανώς να οδήγησε τα φυτά σε κατάσταση “stress”.

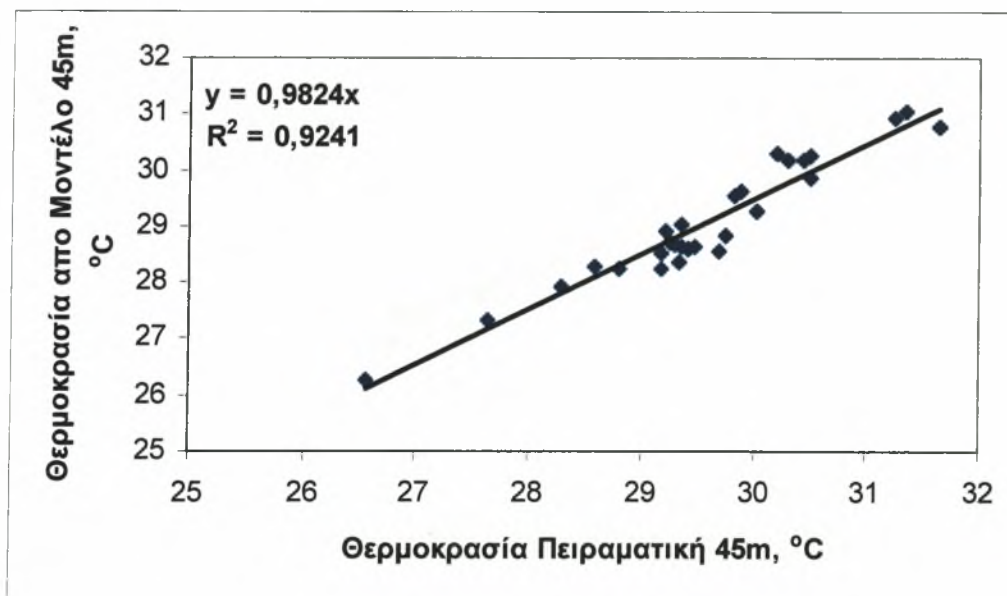
Χρησιμοποιώντας τους συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$  που βρήκαμε για κάθε κομμάτι του θερμοκηπίου υπολογίσαμε τις τιμές της θερμοκρασίας και της υγρασίας με την βοήθεια των σχέσεων (5) και (11) αντίστοιχα, και τις συγκρίναμε με τις πειραματικές τιμές. Παρακάτω αναφέρονται οι τιμές των σταθερών παραγόντων των εξισώσεων. Έτσι έχουμε  $V=83 \text{ m}^3/\text{sec}$ ,  $\rho=1,2 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p=1000 \text{ J/(kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ ,  $L=50 \text{ m}$ ,  $L=61 \text{ m}$  και  $K_c=4,5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ .

Η σύγκριση έγινε για τέσσερις μέρες οι οποίες επιλέχτηκαν από το σύνολο των ημερών για τις οποίες έχουμε δεδομένα ( 18/8, 22/8, 23/8 και 24/8). Από την σύγκριση αυτή προέκυψαν τα παρακάτω γραφήματα τόσο για την θερμοκρασία όσο και για την υγρασία:

*ι) Σύγκριση πειραματικών και υπολογισμένων τιμών Θερμοκρασίας*



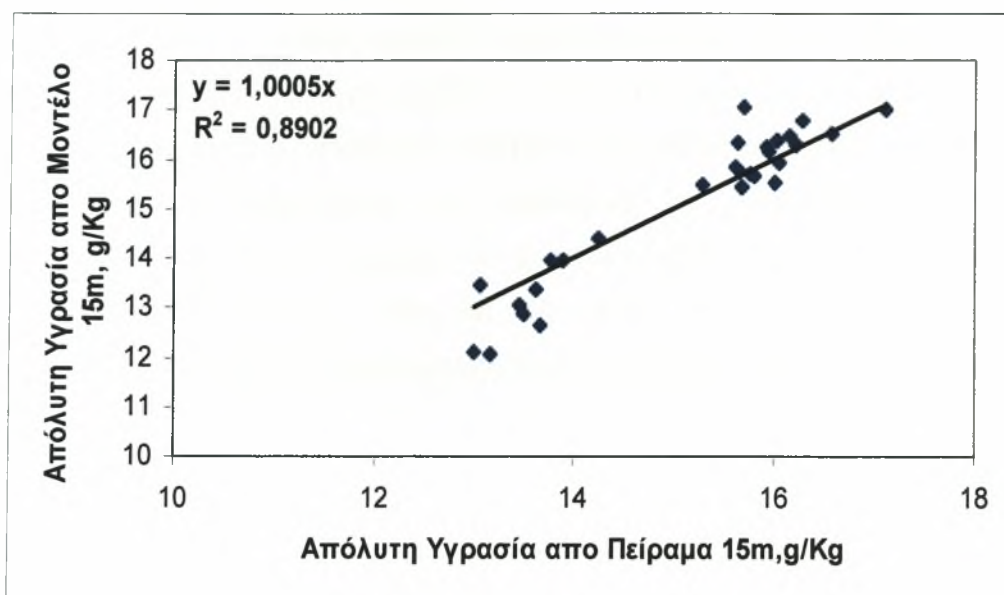
**Γράφημα 10.** Σύγκριση πειραματικών και υπολογισμένων τιμών θερμοκρασίας στο πρώτο μισό



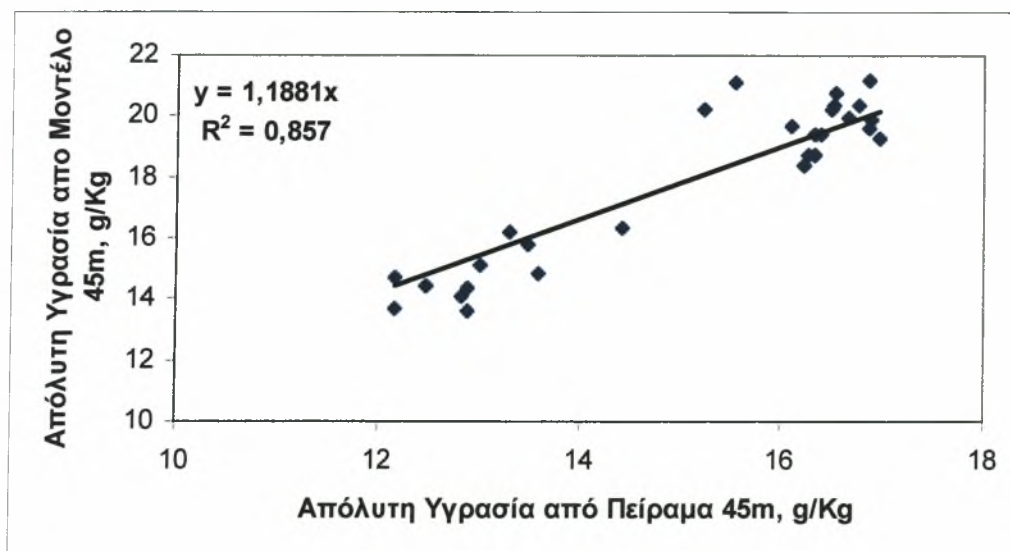
**Γράφημα 11** Σύγκριση πειραματικών και υπολογισμένων τιμών θερμοκρασίας, στο δεύτερο μισό



*ι) Σύγκριση πειραματικών και υπολογισμένων τιμών Υγρασίας.*



**Γράφημα 12** Σύγκριση πειραματικών και υπολογισμένων τιμών υγρασίας. στο πρώτο μισό



**Γράφημα 13** Σύγκριση πειραματικών και υπολογισμένων τιμών υγρασίας. στο δεύτερο μισό

Όπως φαίνεται από τα γραφήματα η ικανότητα των μοντέλων για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας και της υγρασίας τόσο στο πρώτο όσο και στο δεύτερο μισό είναι ικανοποιητική. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι οι τιμές που υπολογίστηκαν με τα μοντέλα σχεδόν συμπίπτουν με τις τιμές που μετρήθηκαν στο θερμοκήπιο. Φαίνεται λοιπόν πως τα μοντέλα

έχουν την ικανότητα να προβλέψουν τόσο την θερμοκρασία όσο και την υγρασία κατά μήκος του θερμοκηπίου σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό, δηλαδή με πολύ μικρές αποκλίσεις από την πραγματική τιμή της θερμοκρασίας. Για τον λόγο αυτό τα μοντέλα για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας και της υγρασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την καλύτερη διαχείριση του συστήματος δροσισμού με υγρή παρειά και δυναμικό αερισμό, έτσι ώστε να λειτουργεί το σύστημα τις ώρες κατά τις οποίες είναι πραγματικά απαραίτητο, καθώς επίσης και να έχουμε τη δυνατότητα να προβλέψουμε την διαβάθμιση της θερμοκρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου. Είναι δυνατόν επίσης να χρησιμοποιηθούν και για τον υπολογισμό των απαραίτητων ανανεώσεων του αέρα, δηλαδή για την διαστασιολόγηση των ανεμιστήρων, προκειμένου αν μην έχουμε υπερθέρμανση και επίπεδα ελλείμματος κορεσμού του αέρα κάτω του επιτρεπτού.

## Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας πειραματικής εργασίας ήταν η μελέτη της κατανομής θερμοκρασίας και υγρασίας κατά μήκος ενός θερμοκηπίου εξοπλισμένο με σύστημα δυναμικού αερισμού και υγρής παρειάς και προοδευτική σκίαση. Έγινε επίσης και βαθμονόμηση δύο αναλυτικών μοντέλων, ένα για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας και ένα για τον υπολογισμό της υγρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου.

Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:

- ✓ Η απόδοση του συστήματος ήταν υψηλή ( 85%) κάτι που οφείλεται κατά κύριο λόγο στις ξηροθερμικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή.
- ✓ Η υψηλή απόδοση του συστήματος είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα μέχρι και 10 °C.
- ✓ Το σύστημα δυναμικού αερισμού και υγρής παρειά είχε την δυνατότητα να κρατήσει την θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου σε χαμηλά επίπεδα και σχεδόν πάντα κάτω από τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα. Παρ' όλα αυτά όμως επιβεβαιώθηκε και το πρόβλημα που αντιμετωπίζει το σύστημα της υγρής παρειάς σε θερμοκήπια των οποίων το μήκος ξεπερνά τα 40m, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις η θερμοκρασία στους ανεμιστήρες ξεπέρασε την θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα για λίγες ώρες. Την αύξηση αυτή δεν κατόρθωσε να περιορίσει η μεγαλύτερη σκίαση στο δεύτερο μισό του θερμοκηπίου λόγω της παλαιότητας του υλικού κάλυψης.
- ✓ Το πολύ μικρό έλλειμμα κορεσμού που εμφανίστηκε στο πρώτο μισό του θερμοκηπίου δεν δημιούργησε υγροποιήσεις αλλά περιορίσε την διαπνοή της καλλιέργειας χωρίς ωστόσο να στρεσαριστεί η καλλιέργεια.
- ✓ Το υψηλό έλλειμμα κορεσμού που εμφανίστηκε στο δεύτερο μισό του θερμοκηπίου δεν δημιούργησε πρόβλημα στην καλλιέργεια λόγω στρεσαρίσματος αλλά οδήγησε σε αύξηση της διαπνοής.
- ✓ Όσον αφορά το μοντέλο για την πρόβλεψη της θερμοκρασίας και υγρασίας, μετά την βαθμονόμηση του είχε την δυνατότητα να προβλέπει την θερμοκρασία και την υγρασία σε όλο το μήκος του θερμοκηπίου με πολύ μεγάλη ακρίβεια, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτελεσματικότερη διαστασιολόγηση και διαχείριση του συστήματος.



## Βιβλιογραφία

### Ελληνική Βιβλιογραφία

- **Θερμοκήπια '96.** Αφιέρωμα στα θερμοκήπια. Εκδόσεις Γεωργική Τεχνολογία. pp 96-99.
- **Κίττας, Κ., 2000.** Γεωργικές Κατασκευές & Έλεγχος Περιβάλλοντος Μονάδων Φυτικής Και Ζωικής Παραγωγής, Ι Θερμοκήπια. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, pp 2-22, 67-92.
- **Κίττας, Κ., Γ. Παπαδακης & Θ. Μπαρτζανα, Νοέμβριος, 1999.** Ψύξη Θερμοκηπίων. Γεωργία κτηνοτροφία, τεύχος 9, Αφιέρωμα Θερμοκήπια. pp 90-99.
- **Μαυρογιαννόπουλος, Γ. Ν., 1990.** Θερμοκήπια, Περιβάλλον Υλικά Κατασκευή Εξοπλισμός. Εκδόσεις Α. Σταμούλης.
- **Σύρος, Θ., Χατζηλαζάρου, Σ., 2001.** Πανεπιστημιακές παραδόσεις “Ανθοκομία-Αρχιτεκτονική Τοπίου”. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Θεσσαλίας, Βόλος, pp 9-21.

### Ξένη Βιβλιογραφία

- **Bailey, B. J., 1990,** The Environment in Evaporatively Cooled Greenhouses, Acta Horticulturae 287, Protected Cultivation of vegetables. pp 59-66.
- **Boulard, T. & A. Baille 1993.** A Simple Greenhouse Climate Control Model Incorporating Effects of Ventilation and Evaporative Cooling. Agricultural and Forest Meteorology, 65, pp 145-157.
- **Bucklin, R. A., R. W. Henley & D. B. McConnell, December 1993.** Fan and Pad Greenhouse Evaporative Cooling Systems. University of Florida, Circular 1135.
- **Carpenter, W. J., Willis, W. W. 1957.** Comparison of low-pressure mist atomised fog and evaporative pad and fan systems for greenhouse cooling and plant response. Journal of American Society for horticulture science, 70, pp 490-500.
- **Giacomelli, G. A., Ginigers, M. S., Krass, A. E., Mears, D. R. 1985.** Improved methods of greenhouse evaporative cooling. Acta Horticulturae, 174, pp 49-55.
- **Hanan, J. J., Holley, W. L., Goldberry, K. L. 1978.** Greenhouse management. Advances series in agricultural sciences 5. Springer-Verlag, Berlin.
- **Jaffrin, A., 1999.** Analytical Model for the Internal Climate of a Greenhouse with Cooling Pads and Two Step Progressive Shading,



- **Kittas, C., T.Bartzanas & A. Jaffrin 2001 a.** Greenhouse evaporative cooling: Measurements and Data analysis. American Society of Agricultural Engineering, Transactions of the ASAE. Vol 44(3), pp 683-689.
- **Kittas, C., Ktasoulas, N., Baille, A., 2001 b.** Influence of greenhouse ventilation regime on the microclimate and energy proportion of a rose canopy during summer condition. J. Agr. Eng. Res, 79(3), pp349-360.
- **Kittas, C., T.Bartzanas & A. Jaffrin 2001 c.** Temperature gradients in a partially shaded greenhouse equipped with evaporative cooling pads. Bioscience Engineering (2003) 85 (1), pp 87-94
- **Landsberg, J. L., White, B., Thrope, M., R.1979.** computer analysis of the efficiency of evaporative cooling for glasshouses in high-energy environments. J. Agr. Eng. Res, 24, pp 29-39
- **Montero, J. L., Short, T., Curry, R. B., Bauerle, W. L. 1981.** Influence of evaporative cooling systems on greenhouse environment. ASAE paper no 81-4027.
- **Montero, J. L., Anton, A., Biel, C., Franquet, A. 1990.** Cooling of greenhouse with compressed air fogging nozzles. Acta Horticulturae, 281, pp 199-209.
- **Ozturk, H. H. 2003.** Cooling Efficiency of a Fogging System For a Greenhouse. Tubitak, Turk J. Agric. For., 27 (2003) pp 49-57
- **Singh, A. K., S. P. Singh & R.L. Sawhney.** Thermal Modeling of an Evaporatively Cooled Greenhouse,
- **Willits, D. H., 2000.** Constrains and Limitation in Greenhouse Cooling: Challenges for the Next Decay. Acta Hort. 534, pp 57-66

### Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

http<sup>1</sup> <http://www.micromist.com/theory/vspads.html>

http<sup>2</sup> <http://www.ianr.unl.edu/pubs/generalag/g626.htm>

http<sup>3</sup> [http://edis.ifas.ufl.edu/BODY\\_AE069#TABLE\\_1](http://edis.ifas.ufl.edu/BODY_AE069#TABLE_1)

http<sup>4</sup> <http://www.techtrol.com>

http<sup>5</sup> <http://www.vvnoordland.com/pages/forcedair.htm>

http<sup>6</sup> <http://arch.hku.hk/~cmhui/teach/65156-7e.htm>

http<sup>7</sup> <http://www.coolbreeze.co.za/psygen.htm>

