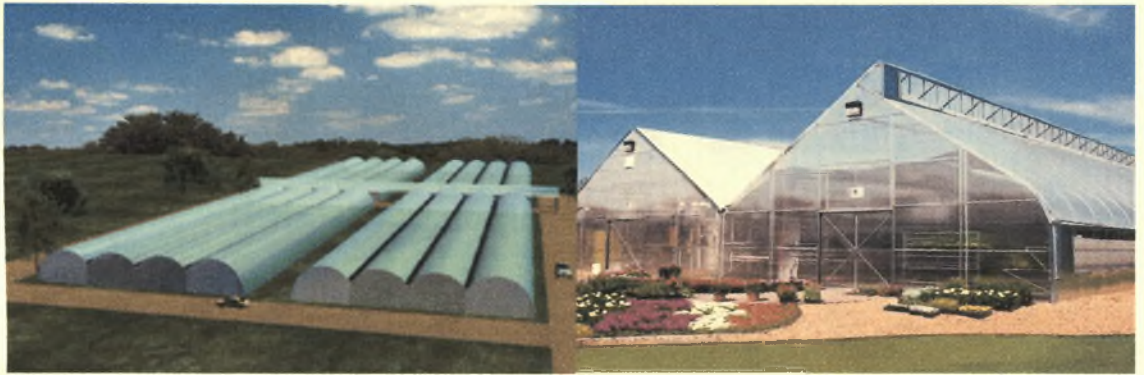


ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΕΛΕΓΧΟΥ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



«Μελέτη της ομοιομορφίας του αερισμού απλού  
τροποποιημένου τοξωτού θερμοκηπίου»

Πτυχιακή Διατριβή  
Ζαχαρούλη Ευαγγελία

Επιβλέπον Καθηγητής  
Κωνσταντίνος Κίττας

Νέα Ιωνία, 2007



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 3958/1  
Ημερ. Εισ.: 22-01-2008  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΦΠΑΠ  
2007  
ZAX

**Μελέτη της ομοιομορφίας του αερισμού απλού  
τροποποιημένου τοξωτού θερμοκηπίου**

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

Κ. Κίττας (Επιβλέπων)  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Καθηγητής  
Γεωργικές Κατασκευές

Μ. Σακελλαρίου – Μακραντωνάκη (Μέλος)  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Καθηγήτρια  
Γεωργικής Υδραυλικής

Θ. Γέμτος (Μέλος)  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Καθηγητής  
Γεωργικής Μηχανολογίας

## Περίληψη

Πραγματοποιήθηκε μια μελέτη, προκειμένου να διερευνηθεί η ομοιομορφία του αερισμού στο εσωτερικό απλού τροποποιημένου τοξωτού θερμοκηπίου. Μελετήθηκε η πτώση της συγκέντρωσης του αερίου στα διάφορα σημεία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου για τον υπολογισμό του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα. Αρχικά, γίνεται μια ανασκόπηση για την επίδραση συστήματος αερισμού στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Στη συνέχεια περιγράφεται το πείραμα που έγινε στη περιοχή του Βελεστίνου, στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση της πτώσης της συγκέντρωσης του αερίου στα διάφορα σημεία στο ρυθμό ανανεώσεων του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα απλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο. Κατά τη διάρκεια του πειράματος (καλοκαίρι 2005) μετρήθηκαν η θερμοκρασία, η διεύθυνση και η ταχύτητα του αέρα στο εξωτερικό του θερμοκηπίου καθώς και η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανανεώσεως του αέρα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της φθίνουσας συγκέντρωσης αερίου δείκτη ( $N_2O$ ).

Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος και την επεξεργασία των στοιχείων, παρατηρήθηκαν τα εξής: Η θερμοκρασία κατά μήκος του θερμοκηπίου ήταν σχετικά ομοιόμορφη στη Βόρεια πλευρά του θερμοκηπίου. Οι μεγαλύτερες τιμές του αερισμού παρατηρήθηκαν όταν η διεύθυνση του αέρα ήταν σχεδόν κάθετη στα ανοίγματα αερισμού ενώ οι μικρότερες τιμές αερισμού παρατηρήθηκαν όταν η διεύθυνση του ήταν παράλληλη στα ανοίγματα αερισμού. Και τέλος, ο αερισμός στο εσωτερικό του θερμοκηπίου δεν ήταν ομοιόμορφος όσον αφορά την επίδραση της θέσης στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος και Διευθυντή του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος της Σχολής Γεωπονικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κ. Κίττα Κωνσταντίνο για την ανάθεση αυτού του θέματος και την εμπιστοσύνη του από την αρχή αυτής της συνεργασίας.

Επίσης θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κατσούλα Νικόλαο, Λέκτορα του Τμήματος Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος για το ενδιαφέρον του, τις χρήσιμες υποδείξεις του καθώς και διορθώσεις αυτής της ερευνητικής εργασίας.

Την εκτίμηση μου και τις ευχαριστίες μου θα ήθελα να εκφράσω στην Καθηγήτρια Γεωργικής Υδραυλικής κ. Μ. Σακελλαρίου- Μακραντωνάκη, και στον Καθηγητή Γεωργικής Μηχανολογίας κ. Θ. Γέμτο για τη συμμετοχή τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή και τη διόρθωση αυτής της πτυχιακής διατριβής.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Δημόκα Γεώργιο για τη πολύτιμη βοήθεια του κατά τη διάρκεια των μετρήσεων μου στο θερμοκήπιο του αγροκτήματος και στο εργαστήριο, τις χρήσιμες προτάσεις του καθώς επίσης και για την υπομονή και συμπαράστασή του όλο το διάστημα διεξαγωγής του πειράματός μου.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να εκφράσω επίσης στη οικογένεια μου για την πολύτιμη ηθική και υλική υποστήριξη και όχι μόνο, που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου έτσι ώστε να περατωθούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

*Στους γονείς μου*

## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> . Γενική Εισαγωγή.....	9
1.1. Τα θερμοκήπια.....	10
1.2 Ο κλάδος των θερμοκηπίων στην Ελλάδα .....	10
1.3 Καλλιεργούμενα λαχανικά στα θερμοκήπια .....	13
1.4 Προβλήματα των θερμοκηπίων που οφείλονται στον αερισμό. ....	14
1.4.1. Σύστημα αερισμού.....	14
1.5 Σκοπός της εργασίας .....	17
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> . Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	18
2.1 Αερισμός.....	19
2.1.1 Αερισμός του χειμώνα.....	19
2.1.2 Αερισμός θέρους .....	20
2.1.3 Αερισμός άνοιξης και φθινοπώρου .....	20
2.2 Κυκλοφορία του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο .....	21
2.3 Αερισμός των θερμοκηπίων.....	22
2.3.1 Φυσικός αερισμός.....	22
2.3.1.1 Πειραματικές μέθοδοι .....	24
2.3.1.2 Μέθοδος της φθίνουσας συγκέντρωσης.....	24
2.3.1.3 Μέθοδος της φθίνουσας συγκέντρωσης αερίου δείκτη .....	26
2.3.1.4 Μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα.....	27
2.3.1.5 Εκτίμηση Φυσικού Αερισμού.....	27
2.3.1.6 Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανανέωσης του αέρα .....	30
2.3.1.7 Ισοζύγιο Θερμότητας.....	33
2.3.1.8 Ισοζύγιο Μάζας.....	33
2.3.1.9 Μοντέλα Αερισμού .....	34
2.3.1.10 Καθορισμός των παραμέτρων των μοντέλων .....	37
2.3.1.11 Ανοίγματα αερισμού.....	39
2.3.1.12 Μηχανισμοί των ανοιγμάτων εξαερισμού.....	40
2.3.1.13 Κατανομή και έκταση των ανοιγμάτων αερισμού .....	41
2.4. Φυσικός Αερισμός .....	43
2.4.1.Επίδραση στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου.....	43
2.4.2.Επίδραση στην καλλιέργεια .....	47
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> . Υλικά & Μέθοδοι.....	51
3.1 Η τοποθεσία.....	52
3.2 Το θερμοκήπιο .....	52
3.3. Αερισμός - Θέρμανση .....	53
3.4. Η καλλιέργεια.....	53
3.5. Περιγραφή των οργάνων μέτρησης .....	55
3.6. Περιγραφή της επεξεργασίας .....	55
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα.....	57
4.1. Αποτελέσματα .....	58
4.2. Επίδραση της διεύθυνσης του εξωτερικού ανέμου στο ρυθμό ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου.....	58
4.3. Επίδραση της θέσης στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο ρυθμό ανανέωσης του αέρα .....	63
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> . Συμπεράσματα.....	66
5.1. Συμπεράσματα .....	67
Βιβλιογραφία.....	68





## **Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>. Γενική Εισαγωγή**

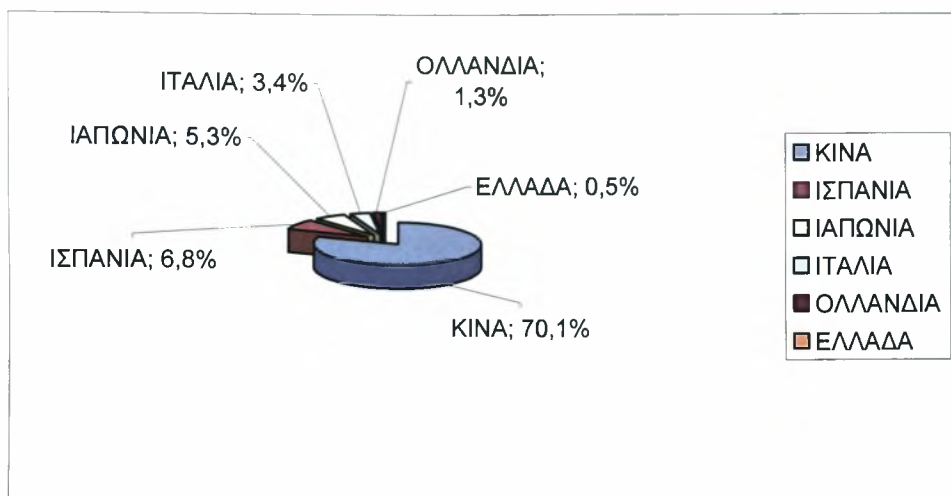
## **1.1. Τα θερμοκήπια**

Τα θερμοκήπια παρέχουν την δυνατότητα παραγωγής προϊόντων ποιότητας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με ταυτόχρονη μείωση των εισροών σε νερό, ενέργεια, λιπάσματα και φυτοφάρμακα. Στη σημερινή εποχή όπου παρατηρείται μια συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση λαχανικών σε αντιδιαστολή με τον περιορισμό της καλλιεργήσιμης γης, η τεχνολογία των θερμοκηπίων αποτελεί τη καλύτερη εναλλακτική λύση για την αποτελεσματικότερη χρήση γης και των συναφών πόρων (Mahagan and Singh, 2006). Τα θερμοκήπια θεωρούνται ένα σύστημα καλλιέργειας και χρησιμοποιούνται ευρύτατα γιατί συμβάλλουν στον έλεγχο του περιβάλλοντος με συνέπεια τη βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας που οδηγεί σε υψηλά κέρδη (Harmanto et al, 2005).

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένα αυξανόμενο εμπορικό ενδιαφέρον για εναλλακτικές προς τις παραδοσιακές μεθόδους καλλιέργειας στην παραγωγή λαχανικών στα θερμοκήπια (Abbott et al, 1986). Μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων παραγωγής στα θερμοκήπια συγκαταλέγεται η υδροπονία, η οποία είναι καλλιέργεια εκτός εδάφους. Πρόκειται δηλαδή για μια τεχνική καλλιέργειας όπου τα φυτά αναπτύσσονται σε ένα οργανικό ή ανόργανο μέσο, όπου η θρέψη των φυτών βασίζεται στη χρήση θρεπτικού διαλύματος (Lizarraga et al, 2003).

## **1.2 Ο κλάδος των θερμοκηπίων στην Ελλάδα**

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. Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες αποτελούν την πιο δυναμική μορφή της πρωτογενούς παραγωγής. Το 2001 η παγκόσμια έκταση των θερμοκηπίων ήταν 8.500.000 στρέμματα. Από αυτά τα 6.000.000 στρ. ή το 70.1% ήταν στην Κίνα, τα 575.000 στρ. ή το 6.8% ήταν στην Ισπανία, τα 450.000 στρ. ή το 5.3% ήταν στην Ιαπωνία, τα 285.000 στρ. ή το 3.4% ήταν στην Ιταλία, τα 110.00 στρ. ή το 1.3% στην Ολλανδία ενώ η Ελλάδα κατέχει μόλις το 0.5% της παγκόσμιας έκτασης.



**Γράφημα 1.1** Παγκόσμια κατανομή θερμοκηπίων το 2001 (Πηγή:ICAP)

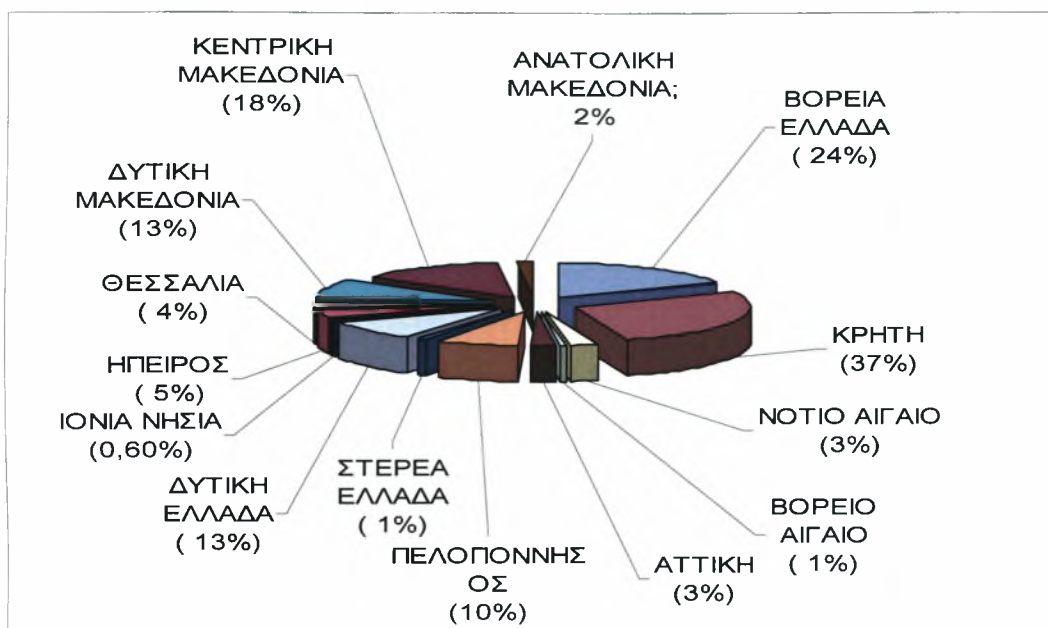
Στην Ελλάδα οι πρώτες συστηματικές εγκαταστάσεις θερμοκηπίων ξεκίνησαν το 1955 και εξαπλώθηκαν ραγδαία μετά το 1961, με τη χρήση του πολυαιθυλενίου ως υλικού κάλυψης, φτάνοντας τα 49.000 στρέμματα το 2004. Το 65% των θερμοκηπίων αυτών είναι συγκεντρωμένα στην Κρήτη, Πελοπόννησο και στα νησιά του νοτίου Αιγαίου, δηλαδή σε περιοχές χωρίς χαμηλές θερμοκρασίες με έντονη ηλιοφάνεια.

Η γεωγραφική κατανομή των θερμοκηπίων στην Ελλάδα ακολουθεί κατά κανόνα την κλιματική διαφοροποίηση των επί μέρους περιοχών. Περισσότερες εκτάσεις θερμοκηπίων συναντώνται στις πλέον ευνοϊκές από πλευράς κλίματος (ήπιοι χειμώνες, απουσία παγετών κ.λπ.) περιοχές. Τα τελευταία όμως χρόνια, τα διαρθρωτικά προβλήματα της ελληνικής γεωργίας ώθησαν αρκετούς αγρότες από άλλες περιοχές της Ελλάδας (π.χ. Θεσσαλία) στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες, αυξάνοντας έτσι το ποσοστό των θερμοκηπιακών εκτάσεων. Υψίστης σημασίας είναι η παραγωγή θερμοκηπιακών προϊόντων χωρίς ή με ελάχιστη ανάγκη πρόσθετης θέρμανσης (Ολύμπιος, 2001).

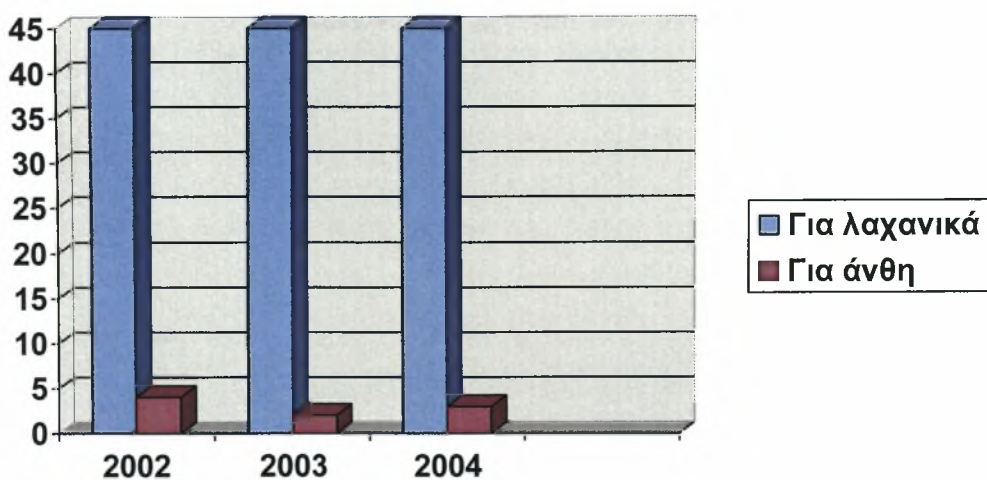
Τα κυριότερα είδη που καλλιεργούνται στο θερμοκήπιο είναι η τομάτα και το αγγούρι από τα λαχανοκομικά, τα γαστρικά φυτά, τα γαρίφαλα και τα τριαντάφυλλα από τα δρεπτά.

Παρόλο που ο μεγαλύτερος όγκος των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα δε βρίσκεται τεχνολογικά σε υψηλό επίπεδο, η περαιτέρω ανάπτυξη των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων μπορεί να συγκρατήσει τον πληθυσμό στην ύπαιθρο, να μειώσει την ανεργία και να δώσει λύσεις στα διορθωτικά προβλήματα της ελληνικής γεωργίας.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.2, στην Κρήτη (Ιεράπετρα, Τυμπάκι, Παλαιοχώρα) συναντάται σχεδόν το μισό των θερμοκηπιακών εκτάσεων σε ποσοστό 37%, λόγω ευνοϊκού κλίματος και έπεται η Βόρεια Ελλάδα με ποσοστό 24%. Επίσης, περιοχές με σημαντική έκταση θερμοκηπίων, όπως παρουσιάζεται και στην παρακάτω εικόνα, είναι η Δυτική Ελλάδα με 13% και η Πελοπόννησος με 10%.



**Γράφημα 1.2.** Θερμοκηπιακές εκτάσεις της Ελλάδας  
(Πηγή: Απογραφή Γεωργίας – Κτηνοτροφίας έτους 1999/2000)



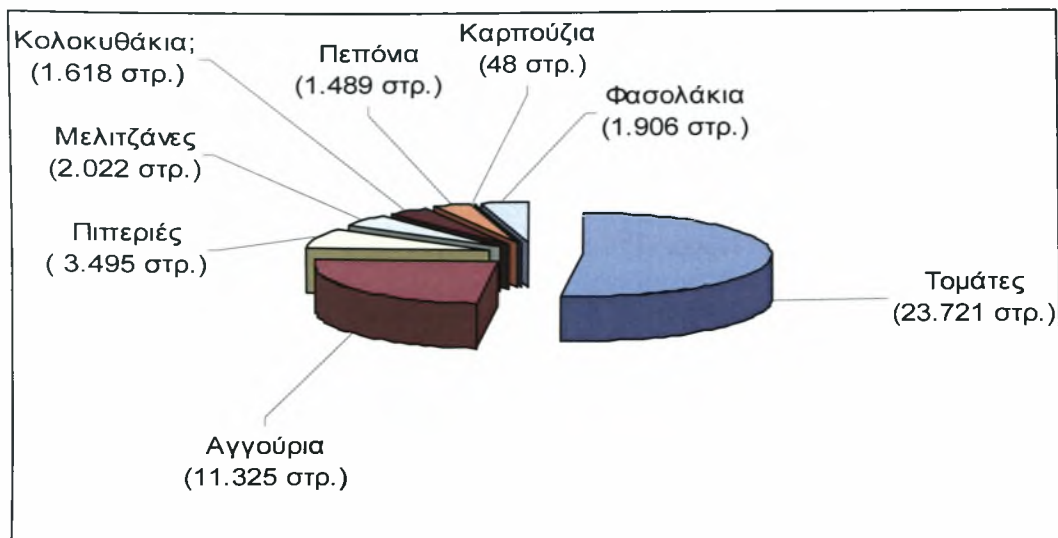
**Γράφημα 1.3.** Εκτάσεις που καλλιεργούνται με λαχανοκομικές και ανθοκομικές καλλιέργειες στην Ελλάδα κατά την περίοδο 2002-2004. (Πηγή Υπουργείο Γεωργίας)

### 1.3 Καλλιεργούμενα λαχανικά στα θερμοκήπια

Ένας σημαντικός αριθμός λαχανικών θερμής εποχής, (με εξαίρεση το μαρούλι) καλλιεργείται στα θερμοκήπια για παραγωγή προϊόντων εκτός εποχής τους χειμερινούς μήνες. Τα πλέον σημαντικά λαχανικά είναι η τομάτα και το αγγούρι, τα οποία καταλαμβάνουν το 75 % της συνολικής έκτασης θερμοκηπίων (τομάτες το 50% και αγγούρι 25%). Οι εκτάσεις σε στρέμματα που καταλαμβάνουν τα διάφορα είδη λαχανικών που καλλιεργούνται στα θερμοκήπια ως κύρια και δευτερεύοντα καλλιέργεια και η παραγωγή σε τόνους κατά το 1997-98 δίνονται στις εικόνες 1.2 και 1.3 (Ολύμπιος, 2001).



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



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

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

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

## 1.4 Προβλήματα των θερμοκηπίων που οφείλονται στον αερισμό.

### 1.4.1. Σύστημα αερισμού

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. Βασικός στόχος της λειτουργίας των συστημάτων αερισμού είναι η μείωση της υψηλής θερμοκρασίας, που επικρατεί στο εσωτερικό του θερμοκηπίου λόγω της προσθήκης ενέργειας από την ηλιακή ακτινοβολία.



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. Η κίνηση του αέρα σε ένα θερμοκήπιο το οποίο διαθέτει ανοίγματα οροφής και πλαϊνά, προκαλείται από τον συνδυασμό των διαφόρων πιέσεων που δημιουργούνται α) λόγω των δυνάμεων άνωσης που οφείλονται σε διαφορά θερμοκρασίας (φαινόμενο καμινάδας) και β) λόγω της ταχύτητας του ανέμου. Η κίνηση του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο χαρακτηρίζεται από το ρυθμό (N) ωριαίας ανανέωσης, δηλαδή πόσες φορές ανανεώνεται ο αέρας του θερμοκηπίου σε μια ώρα ( $h^{-1}$ ) (Κίττας 2000). Με τη μέθοδο αυτή όμως υπάρχει περιορισμένη δυνατότητα μείωσης της θερμοκρασίας τόσο σε ένταση όσο και σε χρονική διάρκεια. Λαμβάνοντας υπόψη τις κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στη μεσογειακή λεκάνη, φαίνεται πως η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τα μέσα της άνοιξης (Kittas et al., 1997).

Οι περιορισμένες δυνατότητες του φυσικού αερισμού οδηγεί τους παραγωγούς σε χρήση δυναμικού αερισμού ο οποίος γίνεται με τη χρήση ανεμιστήρων. Δύο είναι τα συστήματα δυναμικού εξαερισμού που έχουν βρει εφαρμογή στα θερμοκήπια:

α) Το πρώτο είναι το σύστημα υποπίεσης στο οποίο ο ανεμιστήρας τοποθετείται συνήθως στη μικρή πλαϊνή πλευρά και καθώς εξάγει από το θερμοκήπιο αέρα, δημιουργεί υποπίεση με συνέπεια ο εξωτερικός αέρας αναγκάζεται να μπει από τα ανοίγματα που βρίσκονται στην αντικρινή πλευρά. Το σύστημα αυτό μπορεί εύκολα να συνδυαστεί με εξάτμιση νερού που προκύπτει από τη διέλευση του αέρα μέσω υγρού παραπετάσματος η οποία προκαλεί ψύξη του θερμοκηπίου.

β) Το δεύτερο σύστημα δυναμικού αερισμού των θερμοκηπίων είναι το σύστημα υπερπίεσης. Σύμφωνα με αυτό, ο αέρας του περιβάλλοντος εισάγεται με πίεση μέσα στο θερμοκήπιο, οπότε ο θερμότερος και υγρότερος αέρας του θερμοκηπίου βγαίνει από ειδικά ανοίγματα. Το σύστημα αυτό μπορεί να συνδυαστεί με ύγρανση, θέρμανση, ψύξη ή και φιλτράρισμα του αέρα που μπαίνει στο θερμοκήπιο.

Το κυριότερο μειονέκτημα του δυναμικού αερισμού όταν συγκρίνεται με το φυσικό, 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 μπορούμε να επιτύχουμε ρυθμούς ανανέωσης αέρα πάνω από  $50 h^{-1}$  (Kittas et al., 1999) κάτι που είναι αδύνατο με τον φυσικό αερισμό. Επίσης μπορεί να συνδυαστεί με συστήματα υγρής παρειάς.

Η ροή του αέρα επιδρά άμεσα τόσο στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία, το έλλειμμα κορεσμού του αέρα και τη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub>, όσο και στην καλλιέργεια όσον αφορά την επίδραση στην αεροδυναμική αγωγιμότητα, αλλά και άμεσα στις υπόλοιπες μεταβλητές και τις φυσιολογικές της λειτουργίες (θερμοκρασία, έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα, στοματική αγωγιμότητα, διαπνοή).

Τα μεσογειακά θερμοκήπια είναι υποτυπωδώς εξοπλισμένα και ο φυσικός εξαερισμός είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται πιο συχνά για θερμοκήπιο που δροσίζει και που διατηρεί τους καταλληλότερους όρους για την αύξηση φυτών (Boulard et al., 1997 Luo et al., 2005). Η χωρική ετερογένεια της ροής του αέρα, της θερμοκρασίας του αέρα και της υγρασίας είναι σημειωμένη σε αυτές τις δομές, κυρίως λόγω του κακού εξαερισμού. Η διανομή των μεταβλητών μικροκλίματος μέσα στο θερμοκήπιο προκαλεί την ανομοιόμορφη παραγωγή και ποιότητα και παράγει επίσης τα προβλήματα με τα παράσιτα και τις ασθένειες. Οι περίπλοκες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί πρόσφατα για την απεικόνιση και τον προσδιορισμό της ποσότητας των ροών του αέρα που δημιουργούνται από το φυσικό εξαερισμό, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης των ηχητικών ανεμόμετρων (Teitel et al., 2005) και των προτύπων θερμοκηπίων στις σήραγγες αέρα (Lee et al., 2003).

Εντούτοις η πλειοψηφία των μελετών, που εξετάζει το φυσικό εξαερισμό θερμοκηπίων, υποθέτει την πλήρη ομοιογένεια των μεταβλητών που καθορίζει το κλίμα θερμοκηπίων. Μια μοναδική θερμοκρασία αέρα και ταχύτητα αέρα που εξετάστηκαν, συνήθως στο κέντρο του θερμοκηπίου, για ολόκληρο τον όγκο θερμοκηπίων και ο θόλος παρουσιάστηκε γενικά ως «μεγάλο φύλλο». Στην πράξη καμία κλιματολογική μεταβλητή δεν είναι ομοιογενής σε ένα θερμοκήπιο. Αντ' αυτού υπάρχουν πολυάριθμες διαδικασίες ανταλλαγής που εμφανίζονται στις επιφάνειες των φυτών, που γυαλίζουν τις επιφάνειες και που θερμαίνουν τους σωλήνες που διέπονται από τα τοπικά περιβάλλοντα και τις φυσικές καταστάσεις των επιφανειών. Η χωρική ετερογένεια της ροής του αέρα, της θερμοκρασίας αέρα και της υγρασίας είναι σημειωμένη σε αυτές τις δομές, κυρίως λόγω του κακού εξαερισμού. Η διανομή των μεταβλητών μικροκλίματος μέσα στο θερμοκήπιο προκαλεί την ανομοιόμορφη παραγωγή και ποιότητα και παράγει επίσης τα προβλήματα με τα παράσιτα και τις ασθένειες.

Ενώ έχει πραγματοποιηθεί μια μεγάλη έρευνα για τα θερμοκήπια που αερίζονται από παράθυρα οροφής μόνο, φαίνεται ότι λιγότερα έχουν αναφερθεί



σχετικά με μικρά θερμοκήπια που αερίζονται και από παράθυρα οροφής και από πλαϊνά παράθυρα (Kittas et al., 1997 και Papadakis et al., 1996). Ο Montero et al (2001) ερεύνησε και σύγκρινε τέσσερις διαφορετικές διαμορφώσεις παραθύρων στα ποσοστά εξαερισμού θερμοκηπίων που χρησιμοποιούν τις εγκαταστάσεις σηράγγων αέρα, οδηγήθηκε στο αποτέλεσμα ότι τα παράθυρα οροφής και τα πλαϊνά παράθυρα ήταν η αποδοτικότερη διαμόρφωση. Ο Perez Parra et al., (2004) ερεύνησε πειραματικά την επίδραση των διαφορετικών παραθύρων οροφής και πλαϊνών παραθύρων στο ποσοστό εξαερισμού και ανέφερε ότι το υψηλότερο ποσοστό εξαερισμού με οποιαδήποτε ταχύτητα αέρα λήφθηκε όταν άνοιξαν ταυτόχρονα και τα πλαϊνά και τα παράθυρα οροφής. Ο Kacira et al., (2004) ερεύνησε αριθμητικά (χρησιμοποιώντας έναν κώδικα CFD) τα αποτελέσματα της ταχύτητας του αέρα, των πλαϊνών εξαεριστήρων και των αριθμών έκτασης στο φυσικό εξαερισμό ενός θερμοκηπίου πολύ-έκτασης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μέγιστο ποσοστό εξαερισμού θερμοκηπίων επιτεύχθηκε όταν χρησιμοποιήθηκαν τα πλαϊνά παράθυρα και τα παράθυρα οροφής.

## **1.5 Σκοπός της εργασίας**

Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν η πειραματική μελέτη της ομοιομορφίας του αερισμού σε ένα τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο και η διερεύνηση της επίδρασης της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου καθώς και του ανοίγματος των παραθύρων στο ρυθμό ανανέωσης του αέρα σε διάφορα σημεία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Για τη μελέτη των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του αερίου δείκτη η οποία περιγράφεται σε επόμενη ενότητα.

## **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση**

## 2.1 Αερισμός

Με τον γενικό όρο «αερισμός» του θερμοκηπίου εννοούμε δύο διαφορετικές τεχνικές :

1. την ανάδευση του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου και
2. την ανταλλαγή του θερμού αέρα του θερμοκηπίου με τον εξωτερικό αέρα, που ονομάζεται ειδικότερα εξαερισμός.

Με την ανάδευση του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου επιδιώκεται η δημιουργία ομοιόμορφων συνθηκών περιβάλλοντος σ' όλο το χώρο του.

Με τον εξαερισμό (εξάγεται ο αέρας του θερμοκηπίου και εισάγεται φρέσκος από τον εξωτερικό χώρο) επιδιώκεται ο περιορισμός της αύξησης της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο πέρα από το επιθυμητό και η διόρθωση της αναλογίας των διαφόρων συστατικών του αέρα, όπως της συγκέντρωσης των υδρατμών, του CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων. Στις ελληνικές κλιματικές συνθήκες, οι ανάγκες για εξαερισμό γίνονται πολύ μεγάλες από νωρίς την άνοιξη μέχρι και αργά το φθινόπωρο.

Ο ρυθμός και ο τρόπος του αερισμού ενός θερμοκηπίου εξαρτάται από την εποχή. Έτσι, διακρίνουμε τον αερισμό του χειμώνα, του θέρους και της άνοιξης-φθινοπώρου.

### 2.1.1 Αερισμός του χειμώνα

Το χειμώνα ο βασικός στόχος του αερισμού είναι η ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο των φυτών, με ανάδευση του αέρα του θερμοκηπίου. Συχνά, όμως ιδιαίτερα στις νότιες περιοχές της χώρας μας, κατά τις μεσημβρινές ώρες απαιτείται και εξαερισμός για τη μείωση της θερμοκρασίας. Στις περιπτώσεις αυτές, το σύστημα εξαερισμού πρέπει να μπορεί να εισάγει μικρές ποσότητες αέρα, πολύ μικρότερες από τη μέγιστη ικανότητα του. Ο ψυχρός αέρας που εισέρχεται το χειμώνα στο θερμοκήπιο πρέπει να υφίσταται ανάμιξη με τον εσωτερικό ζεστότερο αέρα πριν να έλθει σε επαφή με τα φυτά, ειδάλλως θα δημιουργηθούν προβλήματα κακής ανάπτυξης. Για το λόγο αυτό, στα θερμοκήπια εξαερίζονται με παθητικά συστήματα, το χειμώνα πρέπει να λειτουργούν μόνο τα παράθυρα οροφής, ενώ σ' αυτά που έχουν δυναμικά συστήματα η είσοδος του εξωτερικού αέρα πρέπει να γίνεται από τα ανοίγματα που βρίσκονται στα υψηλότερα σημεία του θερμοκηπίου.

### 2.1.2 Αερισμός θέρους

Το θέρος, ο βασικός στόχος είναι η μείωση της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται μέσα στο χώρο από την αυξημένη ακτινοβολία του ηλίου. Η ταχύτητα του αέρα στην κόμη των φυτών δεν μπορεί να προκαλέσει έντονη διαπνοή, με αποτέλεσμα πρόσκαιρη μάρανση, πρέπει όμως ο αέρας να μετακινείται μέσα από τα για να μπορεί να τα ψύχει. Στα παθητικά συστήματα εξαερισμού, για τον εξαερισμό αυτή την εποχή χρησιμοποιούνται τα παράθυρα οροφής και τα πλευρικά, ενώ στα δυναμικά συστήματα χρησιμοποιείται το συνεχόμενο άνοιγμα που βρίσκεται στην πλευρά απέναντι από τους εξαεριστήρες, στο μέλλον περίπου του ύψους του θερμοκηπίου.

### 2.1.3 Αερισμός άνοιξης και φθινοπώρου

Η άνοιξη και το φθινόπωρο χαρακτηρίζονται από συνεχείς εναλλαγές περιόδων με υψηλές θερμοκρασίες (κατά συνέπεια μεγάλες απαιτήσεις σε εξαερισμό) και περιόδων με σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (και κατά συνέπεια με απαιτήσεις σε ανάδευση του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο και λιγότερο εξαερισμό).

Στον παθητικό εξαερισμό χρησιμοποιούνται στην αρχή της ημέρας τα παράθυρα οροφής και αργότερα προστίθενται τα πλευρικά. Στο δυναμικό εξαερισμό στην αρχή της ημέρας λειτουργεί ένα μέρος μόνο των εξαεριστήρων στην πρώτη βαθμίδα λειτουργίας τους και η είσοδος του αέρα γίνεται από ψηλά. Αργότερα η λειτουργία των ανεμιστήρων εξαρτάται από το θερμικό φορτίο και η είσοδος του αέρα γίνεται από το συνεχόμενο άνοιγμα.

Γενικά, σε ένα θερμοκήπιο με παθητικό εξαερισμό, η σειρά με την οποία ανοίγουν τα παράθυρα, σε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα εξαερισμού, είναι :i)αρχικά ανοίγουν τα παράθυρα οροφής της υπήνεμης πλευράς, ii)έπειτα εάν δεν επαρκεί ο εξαερισμός ανοίγουν τα παράθυρα οροφής της προσήνεμης πλευράς, iii)στη συνέχεια και αν ακόμη δεν επαρκεί ο εξαερισμός ανοίγουν τα πλευρικά παράθυρα της υπήνεμης πλευράς και iv)τέλος, όταν υπάρχει μέγιστη απαίτηση για εξαερισμό ανοίγουν και τα πλευρικά παράθυρα της προσήνεμης πλευράς.

## 2.2 Κυκλοφορία του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο

Για τη μεγιστοποίηση της φυτικής παραγωγής στο θερμοκήπιο, πρέπει στην επιφάνεια των φύλλων των φυτών να πετύχουμε συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης διοξειδίου του άνθρακος όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο άριστο επίπεδο.

Η δημιουργία αυτών των συνθηκών επηρεάζεται από μια σειρά παραγόντων :

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, τα φύλλα των φυτών θερμαίνονται από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και αποκτούν θερμοκρασία υψηλότερη αυτής του αέρα, προσθέτουν με τη διαπνοή υγρασία στο χώρο αυξάνοντας έτσι τη σχετική υγρασία και καταναλώνουν CO<sub>2</sub> με τη φωτοσύνθεση μειώνοντας έτσι τη συγκέντρωση CO<sub>2</sub> γύρω τους.

Κατά τη διάρκεια της νύχτας οι απώλειες θερμότητας με ακτινοβολία, της επιφάνειας των φύλλων, η οποία μπορεί να λάβει τιμή μικρότερη αυτής του περιβάλλοντος του αέρα. Δημιουργείται επίσης στρωματοποίηση των θερμοκρασιών μέσα στο θερμοκήπιο, που οφείλεται στη μικρότερη πυκνότητα του ζεστού αέρα που έτσι ανεβαίνει και τη μεγαλύτερη πυκνότητα του ψυχρού αέρα που κατεβαίνει στα χαμηλότερα επίπεδα. Η κίνηση του αέρα συμβαίνει γιατί ο ζεστός, υγρός αέρας είναι ελαφρότερος από τον κρύο ξηρό αέρα. Στο θερμοκήπιο ο υγρός αέρας που βρίσκεται στην περιοχή των φυτών ανέρχεται με φυσικό τρόπο και αντικαθίσταται από τον ξηρότερο αέρα. 1m<sup>3</sup> αέρας θερμοκρασίας 20 °C έχει βάρος 1,2kg ενώ 1m<sup>3</sup> αέρας θερμοκρασίας 35 °C έχει βάρος 1,14kg . Έτσι ο αέρας που έρχεται σε επαφή με μια θερμή επιφάνεια λόγω διαφοράς βάρους ανέρχεται και αντικαθίσταται από αέρα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά θερμοκρασίας τόσο και η ροή είναι η μεγαλύτερη, για τις συνθήκες όμως θερμοκρασίες του θερμοκηπίου ο ρυθμός αυτός είναι σχετικά μικρός.

Από πειραματικές μελέτες γνωρίζουμε ότι, μέσα σ' ένα θερμοκήπιο που θερμαίνεται, με ένα σύστημα θέρμανσης, και παράλληλα αναδεύεται συνεχώς ο αέρας του με δυναμικά μέσα, στο επίπεδο των φυτών, διατηρούνται θερμοκρασίες πιο ομοιόμορφες, και το σύστημα θέρμανσης καταναλίσκει λιγότερη ενέργεια. Επίσης η σχετική υγρασία του χώρου είναι μικρότερη (όταν η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα είναι χαμηλή), απ' ό,τι μέσα σ' ένα θερμοκήπιο που θερμαίνεται μόνο, χωρίς δυναμική κίνηση του αέρα.

Σε χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες, η αναγκαστική κίνηση του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο αυξάνει τη συμπύκνωση υγρασίας επάνω στις ψυχρές επιφάνειες του καλύμματος με αποτέλεσμα τη μείωση της σχετικής υγρασίας του χώρου.

Η ευνοϊκότερη ταχύτητα του κινούμενου αέρα, στην περίπτωση της ανάδευσης του αέρα, είναι περίπου  $0,2 \text{ m s}^{-1}$ . μια τέτοια ταχύτητα προκαλεί ελαφρά κίνηση των φύλλων φυτών της τομάτας.

## 2.3 Αερισμός των θερμοκηπίων

Ο αερισμός είναι μια από τις σπουδαιότερες λειτουργίες των θερμοκηπίων καθώς συνεισφέρει σημαντικά στη διαμόρφωση του εσωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου περιορίζοντας την ανύψωση της θερμοκρασίας, καθώς συμμετέχει στο ενεργειακό ισοζύγιο του θερμοκηπίου. Αυτά επιτυγχάνονται με την αντικατάσταση του εσωτερικού θερμού και υγρού αέρα με κρύο αέρα από το εσωτερικό περιβάλλον.

Ο αερισμός του θερμοκηπίου μπορεί να είναι :

- a) Φυσικός αερισμός όταν οι διαφορές πίεσης μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού χώρου, που προκαλούν τη ροή του αέρα, οφείλονται στη διαφορά θερμοκρασίας και στην ταχύτητα του ανέμου.
- b) Δυναμικός, όταν οι διαφορές πιέσεων μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού χώρου, που προκαλούν τη ροή του αέρα, δημιουργούνται με μηχανικά μέσα.

Η ροή του αέρα επιδρά άμεσα στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία, το έλλειμμα κορεσμού και τη συγκέντρωση του  $\text{CO}_2$  στον αέρα, όσο και στην καλλιέργεια όσον αφορά την επίδραση στην αεροδυναμική αγωγιμότητα, αλλά και έμμεσα στις υπόλοιπες μεταβλητές και τις φυσιολογικές λειτουργίες όπως, θερμοκρασία, έλλειμμα κορεσμού καλλιέργεια-αέρα, στοματική αγωγιμότητα, διαπνοή (Κατσούλας, 2002).

### 2.3.1 Φυσικός αερισμός

Ο φυσικός αερισμός γίνεται από ανοίγματα (παράθυρα) στην οροφή και τις πλευρές του θερμοκηπίου. Οι επικρατέστεροι μηχανισμοί που επιδρούν στον φυσικό

αερισμό ενός θερμοκηπίου εφοδιασμένου με πλαϊνά ανοίγματα και ανοίγματα οροφής είναι τα παρακάτω :

- i. Το «φαινόμενο της καμινάδας» (Chimney effect ), το οποίο οφείλεται στις δυνάμεις θερμικής άνωσης, οι οποίες προκαλούν μια κατακόρυφη κατανομή πιέσεων μεταξύ των ανοιγμάτων οροφής και των πλαϊνών ανοιγμάτων.
- ii. Η στατική πίεση λόγω της μέσης συνιστώσας της ταχύτητας του αέρα, η οποία και δημιουργεί ένα πεδίο πιέσεων πάνω στο κέλυφος του θερμοκηπίου.
- iii. Η τυρβώδης κίνηση του ανέμου, η οποία οφείλεται στις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου κατά μήκος των ανοιγμάτων και προκαλεί εισροή και εκροή από το ίδιο άνοιγμα.

Η στατική πίεση προκαλεί μια κατακόρυφη κατανομή πιέσεων μεταξύ του πλαϊνού ανοίγματος και του ανοίγματος οροφής (Bruce, 1978) και ταυτόχρονα μια οριζόντια κατανομή πιέσεων μεταξύ των προσήνεμων και των υπήνεμων τμημάτων του θερμοκηπίου, (Honey and Moran, 1991). Το τελευταίο φαινόμενο περιγράφεται από πολλούς ερευνητές ως το «φαινόμενο του ακραίου τοίχου» (side wall effect ) (Boullard *et al.*, 1995).

Δύο κύριες ροές αερισμού δημιουργούνται από τα παρακάτω φαινόμενα:

- Μια κατακόρυφη ροή, η οποία οφείλεται στο «φαινόμενο καμινάδας» και προκαλούμενη από τον άνεμο κατακόρυφη κατανομή στατικής πίεσης.
- Μια οριζόντια ροή, η οποία οφείλεται στο «φαινόμενο του ακραίου τοίχου» και στην τυρβώδη κίνηση του ανέμου.

Στις περιπτώσεις που η ταχύτητα του εξωτερικού αέρα είναι μεγαλύτερη από 1 με  $1,5 \text{ m s}^{-1}$  η επίδραση του «φαινομένου της καμινάδας» θεωρείται αμελητέα ( de Jong, 1990 ) και η παροχή αέρα διαμέσου ενός ανοίγματος αερισμού του θερμοκηπίου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση ( Kittas *et al.*, 1997):

$$G=S/2 C_D C_W^{0,5} u \quad (2.1)$$

Όπου:

G= Η ροή του αερισμού (  $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$  )

S= Η επιφάνεια των ανοιγμάτων (  $\text{m}^2$  )

$C_D$ = Ο συντελεστής αποφόρτισης ( αδιάστατος )

$C_W$ = Ο συντελεστής ανεμοπίεσης ( αδιάστατος )

U= Η ταχύτητα του ανέμου (  $\text{m s}^{-1}$  )



Μεταξύ του συντελεστή ανεμοπίεσης  $C_w$  και της πτώσης πίεσης των διχτύων  $\Delta P$  ισχύει η ακόλουθη σχέση :

$$\Delta P = 0,5 C_w u^2 \quad (2.2)$$

Μέχρι πρόσφατα η μελέτη και προσομοίωση του φυσικού αερισμού στηριζόταν στον προσδιορισμό των συνολικών εναλλαγών αέρα (παροχή αερισμού), χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις (Kittas et al. 1996 ). Η πρόσφατη πρόοδος στη προσομοίωση των ροών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με τη βοήθεια υπολογιστικών μεθόδων (υπολογισμός της ροής αερισμού με τη χρησιμοποίηση ενός εμπορικού κώδικα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, (Bartzanas et al., 2003) καθώς και με τη χρήση τρισδιάστατων ηχητικών ανεμόμετρων (Wang 1998, Boulard et al., 2000) επέτρεψε την καλύτερη διερεύνηση των μηχανισμών του φυσικού αερισμού και των συνθηκών που δημιουργούνται στο μικροπεριβάλλον των φυτών και των φύλλων αλλά και την εκτέλεση συγκρίσεων με υπάρχοντα πειραματικά στοιχεία.

### **2.3.1.1 Πειραματικές μέθοδοι**

Οι πειραματικοί μέθοδοι είναι χρήσιμοι για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε τις εναλλαγές αέρα μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού του θερμοκηπίου, αλλά και για να επιβεβαιώσουμε τα αποτελέσματα από τους θεωρητικούς υπολογισμούς. Ο πειραματικός προσδιορισμός των εναλλαγών αέρα πραγματοποιείται με διάφορες μεθόδους από τις οποίες οι κυριότερες είναι : η μέθοδος της «φθίνουσας συγκέντρωσης», η μέθοδος του «ισοζυγίου των υδρατμών», και οι μετρήσεις της διαφοράς πιέσεων και ταχύτητας του αέρα. Οι βασικές αρχές, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου παρουσιάζονται παρακάτω.

### **2.3.1.2 Μέθοδος της φθίνουσας συγκέντρωσης**

Μια από τις σημαντικότερες μεθόδους υπολογισμού της παροχής αερισμού είναι της φθίνουσας συγκέντρωσης η οποία απαιτεί ελάχιστο μηχανικό εξοπλισμό και έχει χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές (Bot, 1983, De Jong < 1990, Fernandez and Bailey, 1992, Boulard and Draoui, 1995, Kittas et al, 1995).



Η φθίνουσα συγκέντρωση βασίζεται στο ισοζύγιο της μάζας ενός τροχοδεικτικού αερίου στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Υποθέτοντας μια ομοιόμορφη έγχυση του τροχοδεικτικού αερίου στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και μια τέλεια ανάμειξη του με τον εσωτερικό αέρα μπορούμε να παρακολουθήσουμε την εξέλιξη του, η οποία περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$V_{ol} \cdot (dC_g/dt) = - G(t)[C_i(t) - C_0(t)] + F_g(t) \quad (2.3)$$

όπου:

$C_i(t)$ = Συγκέντρωση του τροχοδεικτικού αερίου τη στιγμή  $t$  εντός του θερμοκηπίου (ppm).

$C_0(t)$ = Συγκέντρωση του τροχοδεικτικού αερίου τη στιγμή  $t$  στο εξωτερικό του θερμοκηπίου (ppm).

$F_i(t)$ = Ροή του τροχοδεικτικού αερίου που εισήχθη εντός το θερμοκηπίου ( $mg^3s^{-1}$ )

$V_{ol}$ = Ο όγκος του θερμοκηπίου ( $m^3$ )

$G(t)$ = Η ροή του αέρα που ανανεώθηκε ( $m^3s^{-1}$ ).

Η μονάδα συγκέντρωσης που χρησιμοποιήθηκε είναι το ppm ή μέρος στο εκατομμύριο. Αυτή αντιπροσωπεύει την ποσότητα σε όγκο τροχοδεικτικού αερίου, που είναι παρόν εντός του θερμοκηπίου, ανά μονάδα όγκου.

Η εξίσωση 2.3 μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε δύο διαφορετικές πειραματικές προσεγγίσεις για τον καθορισμό του μεγέθους της ανανέωσης, εκφραζόμενο σε  $h^{-1}$ .

- Είτε να εισάγουμε το τροχοδεικτικό αέριο με ρυθμό και να παρακολουθήσουμε τη μείωση του στο χρόνο: πρόκειται για μέθοδο φθίνουσας συγκέντρωσης
- Είτε να διατηρήσουμε, για μια μακρά χρονική περίοδο σταθερή έγχυση αερίου, εντός του θερμοκηπίου: είναι η μέθοδος της συνεχόμενης ροής.

Αυτές οι δύο τροχοδεικτικοί μέθοδοι είναι που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση ανανέωσης του αέρα εντός του θερμοκηπίου, η πρώτη παρουσία χλωρίδας με  $N_2O$  και η δεύτερη σε άδειο θερμοκήπιο με  $CO_2$ .

### 2.3.1.3 Μέθοδος της φθίνουσας συγκέντρωσης αερίου δείκτη

Ο αέριος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις με τη μέθοδο της φθίνουσας συγκέντρωσης με αερίου δείκτη ήταν το  $N_2O$  (πρωτοξείδιο του αζώτου), το οποίο είναι ευκολόχρηστο ανιχνεύσιμο αέριο, καθώς 'έχει το πλεονέκτημα να μην επηρεάζει τα φυτά και να μην είναι παρόν στον εξωτερικό αέρα με μετρήσιμες συγκεντρώσεις.

Αρχικά, γινόταν έγχυση μιας συγκεκριμένης ποσότητας  $N_2O$ , κατά τρόπο ώστε η αρχική συγκέντρωση στο εσωτερικό του θερμοκηπίου να αντιστοιχεί στο μέγιστο της κλίμακας του αναλυτή αερίων (ADC gas analyser 7000, με κλίμακα μέτρησης 0-200 ppm και ακρίβεια 5 ppm, Analytical Development Company, Hoddesdon, U.K.). Κατόπιν, γινόταν ομοιόμορφη ανάμειξη του αερίου χρησιμοποιώντας τους ανεμιστήρες δροσισμού του θερμοκηπίου. Μετά την έγχυση του αερίου δείκτη στο θερμοκήπιο ακολούθησε άνοιγμα των παραθύρων σε διάφορες γωνίες και κατόπιν ξεκινούσε η καταγραφή της πτώσης της συγκέντρωσης  $N_2O$ . Κατά τη διάρκεια της περιόδου μείωσης της συγκέντρωσης του  $N_2O$  γινόταν αναρρόφηση του αέρα του θερμοκηπίου από επιλεγμένες θέσεις ισομετρικά κατανεμημένες μέσα στο θερμοκήπιο. Ο αέρας από τις θέσεις αυτές διοχετευόταν στο υπέρυθρο αναλυτή αερίου προκειμένου να γίνει η μέτρηση της συγκέντρωσης του  $N_2O$ . Η συγκέντρωση του αερίου δείκτη στον αέρα του θερμοκηπίου καταγραφόταν σε σύστημα καταγραφής δεδομένων με συχνότητα καταγραφής 1Hz.

Για τον υπολογισμό του ρυθμού ανανέωσης του αέρα χρησιμοποιείται η εξίσωση 2.3 η οποία απλοποιείται, καθώς ο όρος  $F_g(t)$  στην προκειμένη περίπτωση, διότι η έγχυση του αερίου δείκτη γίνεται μία φορά στην αρχή της μέτρησης και όχι συνεχώς κατά την διάρκειά της, ενώ ο όρος  $C_0$  (είναι και αυτός 0), διότι ο αέρας δεν περιέχει σε ανιχνεύσιμη ποσότητα  $N_2O$ . Έτσι η εξίσωση 2.3 γίνεται

$$C_i(t) = C_i(t_0)e^{-[(G/V)(t-t_0)]} \quad (2.4)$$

ή

$$G = -(V/(t-t_0)) \ln(C_i(t)/C_i(t_0)) \quad (2.5)$$

όπου  $C_i(t_0)$  η αρχική συγκέντρωση του  $N_2O$  και  $t$  ο χρόνος. Η ροή του αέρα που ανανεώθηκε ( $G$ ) μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της γραμμής συσχέτισης που προκύπτει από την συσχέτιση  $\ln(C_i(t)/C_i(t_0))$ .

### 2.3.1.4 Μετρήσεις της ταχύτητας του αέρα

Η ταχύτητα του αέρα είναι ένα ποσοτικό άνυσμα με χαρακτηριστική διεύθυνση και μέγεθος. Σε μερικές μελέτες, μπορεί να είναι απαραίτητο να αναλύσουμε το ποσοτικό άνυσμα της ταχύτητας σε x, y και z καρτεσιανές συντεταγμένες με αποτέλεσμα τις u, v και w συνιστώσες της ταχύτητας του αέρα. Συνήθως όμως αυτό που χρησιμοποιείται και μετριέται είναι η οριζόντια συνιστώσα.

### 2.3.1.5 Εκτίμηση Φυσικού Αερισμού

Για ένα θερμοκήπιο εξοπλισμένο μόνο με πλαϊνά ή μόνο με ανοίγματα οροφής, ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα G σε m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> μπορεί να υπολογιστεί με τη σχέση (Kittas *et al.* 1997):

$$G = \frac{A_T}{2} * C_d * \sqrt{\left(2g * \frac{\Delta T}{T_o} * \frac{h}{2} + C_w * u^2\right)} \quad (2.6)$$

όπου: A<sub>T</sub> η επιφάνεια των ανοιγμάτων αερισμού σε m<sup>2</sup>, g η επιτάχυνση της βαρύτητας σε m<sup>2</sup> s<sup>-2</sup>. ΔT η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού αέρα σε °C, T<sub>o</sub> η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα σε °C, h είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ του μέσου των ανοιγμάτων οροφής και πλαϊνών σε m, u η ταχύτητα του εξωτερικού αέρα σε ms<sup>-1</sup>, C<sub>d</sub> ο συντελεστής ανεμοφόρτισης και C<sub>w</sub> ο συντελεστής ανεμοπίεσης.

Ο υπολογισμός του ρυθμού ανανέωσης του αέρα, σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση λαμβάνει υπόψη την επίδραση τόσο του εξωτερικού αέρα όσο και των φαινομένων άνωσης. Η επίδραση των φαινομένων άνωσης στο ρυθμό ανανέωσης του αέρα είναι σημαντική μόνο σε μικρές ταχύτητες του εξωτερικού αέρα.

Στην περίπτωση αυτή ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα:

$$G = \frac{A_T}{2} * C_d * \sqrt{(C_w * u^2)} \quad (2.7)$$

Για ένα θερμοκήπιο εξοπλισμένο μόνο με ανοίγματα οροφής, ο Kittas *et al.* (1997) πρότειναν την ακόλουθη σχέση:

$$G = \frac{A_T}{2} * C_d * \sqrt{\left(2g * \frac{\Delta T}{T_o} * \frac{h}{4} + C_w * u^2\right)} \quad (2.8)$$

Στην περίπτωση που το θερμοκήπιο είναι εξοπλισμένο με ανοίγματα οροφής και πλαϊνά ανοίγματα τότε ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα δίνεται από τη σχέση (Kittas *et al.* 1997):

$$G = \frac{A_T}{2} * C_d * \sqrt{\left(\frac{A_R * A_S}{\sqrt{A_R^2 + A_S^2}} 2g * \frac{\Delta T}{T_o} * h + \frac{A_T}{2} C_w * u^2\right)} \quad (2.9)$$

όπου:  $A_T$  η επιφάνεια των ανοιγμάτων αερισμού σε  $m^2$  οροφής ( $A_R$ ) και πλαϊνών ( $A_S$ ).

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές σχέσεις που δίνουν το ρυθμό ανανέωσης του αέρα είτε συναρτήσει της ταχύτητας του εξωτερικού αέρα είτε της διαφοράς θερμοκρασίας. Κάθε μια όμως ισχύει για το θερμοκήπιο στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι συγκεκριμένες μετρήσεις. Μια γενική έκφραση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα μπορεί να δοθεί από μια αδιάστατη συνάρτηση, η οποία εκφράζει τον αερισμό συναρτήσει της γωνίας ανοίγματος του παραθύρου  $\zeta$  ( $\zeta^\circ$ ). Η έκφραση αυτή του ρυθμού ανανέωσης του αέρα προτάθηκε αρχικά από τον Bot (1983) και στη συνέχεια υιοθετήθηκε από τους άλλους ερευνητές.

Ο Jolliet (1994) πρότεινε την ακόλουθη σχέση υπολογισμού του ρυθμού ανανέωσης του αέρα, συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού-εξωτερικού αέρα, της ταχύτητας του ανέμου και της επιφάνειας των ανοιγμάτων αερισμού:

$$G = A_f * (f_w^2 * u^2 + f_T^2 (T_i - T_o)) \quad (2.10)$$

όπου:

$$A_f = A_r * f_f + 0.00588 * A_T * \zeta * e^{-a/50} \quad (2.11)$$

Στις εξισώσεις οι παράμετροι  $f_w$  και  $f_T$  εκφράζουν την επίδραση του ανέμου και των φαινομένων της άνωσης με τιμές 0.22 και  $0.16 \text{ ms}^{-1}\text{K}^{-1/2}$ . Η παράμετρος  $f_f$  χαρακτηρίζει τη στεγανότητα του θερμοκηπίου με τιμές  $2.5^{-4}$  για πολύ στεγανό θερμοκήπιο και  $5^{-4}$  για στεγανό θερμοκήπιο. Η επιφάνεια των ανοιγμάτων αερισμού καθορίζεται από την παράμετρο  $a$  ( $a, \circ$ ),  $u$  είναι η ταχύτητα του εξωτερικού ανέμου,  $A_T$  η επιφάνεια των ανοιγμάτων αερισμού σε  $m^2$  και  $A_r$  η επιφάνεια του καλύμματος σε  $m^2$ .

Η επίδραση του ανέμου θεωρείται ο πιο σημαντικός παράγοντας για τον αερισμό θερμοκηπίου, εξοπλισμένου μόνο με ανοίγματα οροφής (Bot, Fernandez and Bailey, Boulard and Draui, Kittas et al) καθώς και για θερμοκήπια εξοπλισμένα με ανοίγματα οροφής και πλαϊνά (Boulard, Papadakis et al.). Περιλαμβάνει δύο συστατικά: το στατικό, το οποίο οφείλεται στην επίδραση της πίεσης του ανέμου στο κάλυμμα του θερμοκηπίου και της τυρβώδους ροής κατά μήκος του ανοίγματος (Boulard et al). Η στατική επίδραση προκαλεί μια κάθετη και οριζόντια κατανομή της πίεσης ειδικότερα μεταξύ των ανοιγμάτων, πλαϊνών και οροφής και μεταξύ του πάνω και του κάτω μέρους του παραθύρου. Επιπρόσθετα θα πρέπει να θεωρήσουμε ότι η επίδραση του φαινομένου της άνωσης προκαλεί μια κάθετη κατανομή των στατικών πιέσεων μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού του θερμοκηπίου και δίνει μια αύξηση στην εισροή του αέρα στο κατώτερο μέρος του ανοίγματος και μια εκροή στο ανώτερο μέρος (Bruce).

Εάν η διαφορά θερμοκρασίας (DT) ή το ύψος της καμινάδας (H) παίρνουν μικρές τιμές, τότε η επίδραση του ανέμου είναι πιο σημαντική από την επίδραση του φαινομένου της «καμινάδας», το οποίο μπορεί να αγνοηθεί:

$$G = \frac{Ar}{2} * C_d * \sqrt{(C_w * u^2)} \quad (2.12)$$

Από τον ρυθμό αερισμού (G) μπορούμε να υπολογίσουμε το N, το ρυθμό ανανεώσεων του αέρα ( $h^{-1}$ ):

$$N = 3600 * G / V \quad (2.13)$$

Ο συνδυασμός των παραπάνω εξισώσεων μας οδηγούν στην εξίσωση:

$$N = 3600 * \frac{\frac{Ar}{2} * C_d * \sqrt{\left(2g * \frac{\Delta T}{T_o} * \frac{h}{4} + C_w * u^2\right)}}{V} \quad (2.14)$$

ή αν παραβλεφθεί το φαινόμενο της άνωσης:

$$N = 3600 * \frac{\frac{Ar}{2} * C_d * \sqrt{(C_w * u^2)}}{V} \quad (2.15)$$

εάν  $N_o$  συμβολίζει της απώλειες διαφυγής του αέρα τότε η παραπάνω εξίσωση μετατρέπεται:

$$N = 3600 * \frac{\frac{A_T}{2} * C_d * \sqrt{(C_w * u^2)}}{V} + N_o \quad (2.16)$$

### 2.3.1.6 Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανανέωσης του αέρα

Για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανανέωσης του αέρα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος τις φθίνουσας συγκέντρωσης ενός αερίου δείκτη. Ο αέριος δείκτης που χρησιμοποιείται για τις μετρήσεις είναι το N<sub>2</sub>O (πρωτοξείδιο του αζώτου), το οποίο είναι εύχρηστο ανιχνεύσιμο αέριο, καθώς έχει το πλεονέκτημα να μην επιδρά στα φυτά και να μην είναι παρόν στον εξωτερικό αέρα σε μετρήσιμες συγκεντρώσεις.

Αρχικά γινόταν έκχυση μια συγκεκριμένης ποσότητας N<sub>2</sub>O στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, κατά τέτοιο τρόπο ώστε η αρχική συγκέντρωση στο εσωτερικό του θερμοκηπίου να αντιστοιχεί στο μέγιστο της κλίμακας του αναλυτή αερίων. Κατόπιν γίνεται ομοιόμορφη ανάμειξη του αερίου χρησιμοποιώντας τον ανεμιστήρα του συστήματος θέρμανσης (αερόθερμο) του θερμοκηπίου. Μετά την έκχυση του αερίου δείκτη στο θερμοκήπιο ακολουθούσε άνοιγμα των παραθύρων σε διάφορα ύψη και εν συνεχεία ακολουθούσε άνοιγμα των παραθύρων σε διάφορα ύψη και εν συνεχεία ξεκινούσε η καταγραφή της πτώσης της συγκέντρωσης του N<sub>2</sub>O. Κατά τη διάρκεια της περιόδου μείωσης της συγκέντρωσης του N<sub>2</sub>O γινόταν αναρρόφηση του αέρα του θερμοκηπίου από (7) επιλεγμένες θέσεις ισομετρικά κατανεμημένες μέσα στο θερμοκήπιο. Ο αέρας από τις θέσεις που διοχετευόταν στον υπέρυθρο αναλυτή αερίου προκειμένου να γίνει η μέτρηση της συγκέντρωσης του N<sub>2</sub>O. Η συγκέντρωση του αερίου δείκτη στον αέρα του θερμοκηπίου καταγράφονταν σε σύστημα καταγραφής δεδομένων με συχνότητα καταγραφής 1 Hz.

Υποθέτοντας μια ομοιόμορφη έκχυση του αερίου δείκτη στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και μια τέλεια ανάμειξη του με τον εσωτερικό του αέρα, η μεταβολή της συγκέντρωσης του αερίου σε συνάρτηση με το χρόνο περιγράφεται από την εξίσωση:

$$V \frac{dC_i}{dt} = -G(t)[C_i(t) - C_o(t)] + F_a(t) \quad (2.17)$$

Όπου C<sub>i</sub>(t) η συγκέντρωση του τροχοδεικτικού αερίου τη στιγμή t εντός του θερμοκηπίου σε ppm, C<sub>o</sub>(t) η συγκέντρωση του τροχοδεικτικού αερίου τη στιγμή t στο εξωτερικό περιβάλλον σε ppm, F<sub>a</sub>(t) η ροή του αερίου δείκτη που εισήχθη εντός



του θερμοκηπίου σε  $\text{mg}^3 \text{s}^{-1}$ ,  $V$  ο όγκος του θερμοκηπίου σε  $\text{m}^3$ ,  $G$  η ροή του αέρα που ανανεώθηκε σε  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$  και  $t$  ο χρόνος σε  $\text{s}$ .

Ο όρος  $F_a(t)$  της εξίσωσης είναι μηδενικός στην προκειμένη περίπτωση, διότι είναι η έγχυση του αερίου δείκτη γίνεται στην αρχή της μέτρησης για μια μόνο φορά και όχι συνεχώς κατά τη διάρκειά της, ενώ ο όρος  $C_o(t)$  είναι και αυτός μηδέν, διότι ο εξωτερικός αέρας δεν περιέχει  $\text{N}_2\text{O}$  σε ανιχνεύσιμη ποσότητα. Έτσι η εξίσωση γίνεται:

$$C_i(t) = C_i(t_0) * e^{-\left[\frac{G}{V} * (t-t_0)\right]} \quad (2.18)$$

ή

$$G = -\frac{V}{(t-t_0)} * \ln\left(\frac{C_i(t)}{C_i(t_0)}\right) \quad (2.19)$$

Όπου  $C_i(t_0)$  η αρχική συγκέντρωση του  $\text{N}_2\text{O}$  και  $t$  ο χρόνος. Η ροή του αέρα που ανανεώθηκε ( $G$ ) μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της γραμμής συσχέτισης που προκύπτει από τη συσχέτιση

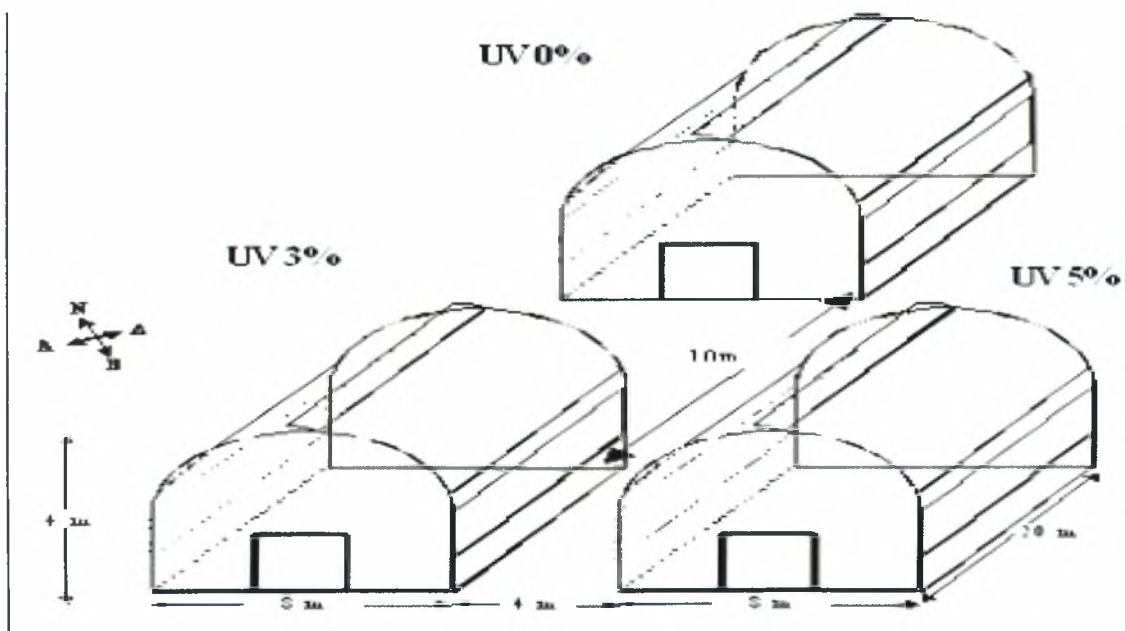
$$\ln\left(\frac{C_i(t)}{C_i(t_0)}\right) \text{ προς } t. \quad (2.20)$$

Αρχικά γίνεται έκχυση του αερίου από ένα σημείο στο κέντρο του θερμοκηπίου για τα Τοξωτά και σε 12 διαφορετικά σημεία σε ύψος 2m, ομοιόμορφα κατανεμημένα για Τροποποιημένα Τοξωτά θερμοκήπια. Για όλες τις περιπτώσεις και μετά την έκχυση του αερίου δείκτη και την σταθεροποίηση της τιμής του στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, καταγράφεται ο ρυθμός εξασθένησης της συγκέντρωσης της τιμής του αερίου δείκτη (Boulard, Feuilloley, Kittas).

Σε συνθήκες φυσικού αερισμού χρειάζονται κάποια λεπτά για την ομογενοποίηση του αερίου δείκτη στο χώρο και η χρονική διάρκεια της μείωσης της συγκέντρωσης του αερίου βρίσκεται μεταξύ των 3 min σε ανοικτό θερμοκήπιο με δυνατό άνεμο ( $4 < U < 7 \text{ ms}^{-1}$ ) και 30 min για κλειστό θερμοκήπιο.

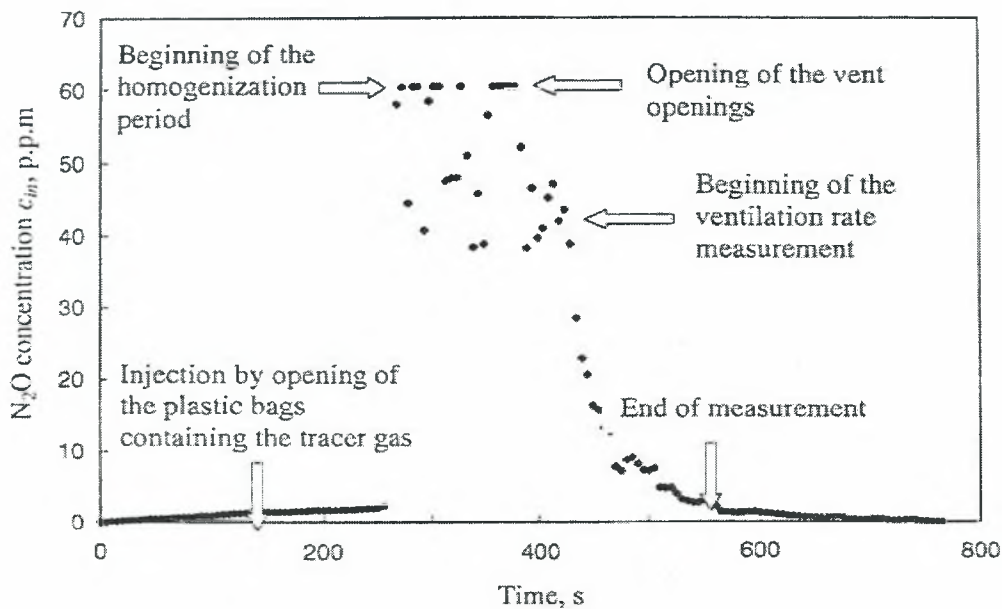


Εικόνα 2.1. Διάταξη των πειραματικών θερμοκηπίων



Εικόνα 2.2. Διάταξη των πειραματικών θερμοκηπίων





**Εικόνα 2.3 :** Ανάπτυξη της συγκέντρωσης του N<sub>2</sub>O σε σχέση με το χρόνο κατά τη διάρκεια των διαφόρων φάσεων της μέτρησης ανανέωσης αέρα θερμοκηπίων σε ένα πολύ μεγάλο θερμοκήπιο. (Fatnassi et al., 2002)

### 2.3.1.7 Ισοζύγιο Θερμότητας

Το ενεργειακό ισοζύγιο αποτελεί μέθοδο προσδιορισμού του ρυθμού αερισμού τόσο στα στατικά όσο και στα δυναμικά μοντέλα. Στα στατικά μοντέλα η κατανάλωση ενέργειας αντισταθμίζει τις απώλειες θερμότητας.

Τα δυναμικά μοντέλα για θερμοκήπια μπορούν να υπολογίζουν ταυτόχρονα, τόσο τις απαιτήσεις σε ενέργεια, όσο και το κλίμα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Αρκετά δυναμικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί (Takakura et al., 1971; Kindelan, 1980; Bot, 1983; De Haulex et al., 1991).

### 2.3.1.8 Ισοζύγιο Μάζας

Στις συνθήκες των θερμοκηπίων υπάρχουν δύο ειδών σταθερές επιφάνειες: οι τοίχοι του θερμοκηπίου, αποτελούμενοι κυρίως από γυαλί ή πλαστικό, και τα φύλλα της καλλιέργειας. Σε κοντινές επιφάνειες με τις σταθερές, η κίνηση το ρευστού θεωρείται ιξώδης. Η επίδραση του ιξώδους είναι υπεύθυνη για το κριτήριο

### 2.3.1.9 Μοντέλα Αερισμού

#### Βασικοί Μηχανισμοί κατά τον Αερισμό

Η ποσότητα της ροής των ρευστών μέσα από ένα παράθυρο μπορεί να υπολογιστεί από τις απώλειες μέσω της εξίσωσης Bernoulli. Εάν η ταχύτητα του αέρα  $u$  είναι σταθερή κατά μήκος ενός ανοίγματος η διαφορά πίεσης  $\Delta P$  κατά μήκος ενός ανοίγματος δίνεται από την εξίσωση.

$$\Delta P = 1/2 \zeta \rho u^2$$

Ο συντελεστής ανεμοφόρησης ορίζεται απευθείας από το συντελεστή της διαφοράς της πίεσης:

$$C_d = \zeta^{-0.5}$$

Ο συντελεστής αυτός είναι πολύ χρήσιμος για τον καθορισμό των συνθηκών ροής σε συνθήκες αερισμού εάν η διαφορά της πίεσης  $\Delta P$  καθορίζεται μεταξύ δύο σημείων και στις δύο πλευρές του ανοίγματος.

#### «Το φαινόμενο της καμινάδας»

Περιγράφει τις ανταλλαγές του αέρα, απ' τη μια πλευρά και την άλλη ενός ή πολλών ανοιγμάτων, που δημιουργούνται από μια διαφορά μάζας και όγκου του αέρα, μ' αυτήν την τελευταία να εξαρτάται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της υγρασίας.

Θα θεωρήσουμε μόνο σε πρώτη φάση, τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Καταλήγουμε αμέσως ότι τις διαφορές στην υγρασία, οι οποίες προκαλούν εξίσου και διαφορές της πυκνότητας του αέρα, μπορούμε να τις μεταχειριστούμε σα διαφορές της θερμοκρασίας διαμέσου της σύλληψης της εικονικής θερμοκρασίας. Το «φαινόμενο της καμινάδας» μπορεί να μοντελοποιηθεί σε προσεγγίσεις όλο και πιο εκλεπτυσμένες, τις οποίες θα ονομάσουμε για ευκολία πρώτης, δεύτερης και τρίτης τάξης.

#### Επίδραση της Άνωσης

Η θεώρηση ενός πεδίου με μεταβλητή θερμοκρασία, χαρακτηρίζεται ενδιαφέρουσα, με ένα άνοιγμα ανάμεσα στα δύο μέρη του πεδίου. Η ροή εμφανίζεται μεταξύ του θερμού και του ψυχρού μέρους των ρευστών ακόμη και κατά την απουσία

των δυνάμεων της πίεσης, λόγω των εξωτερικών συνθηκών (άνεμος). Αυτή η ροή οφείλεται στη κλίση της πυκνότητας των ρευστών και οδηγεί σε κάθετες δυνάμεις άνωσης.

Συνεπώς όταν θεωρείται μια κάθετη κατανομή της θερμοκρασίας  $T_a(z)$ , σε κάθε πλευρά των ανοιγμάτων, η διαφορά της πίεσης για κάθε κάθετο σημείο  $z$ , καθορίζεται από την υδροστατική εξίσωση:

$$\Delta P(z) = \Delta P_0 - \int_0^z \rho(T_0) \frac{T(z) - T_0}{T_0} g dz$$

Δύο σημαντικές υποθέσεις εμπεριέχονται στην κίνηση του αέρα κατά μήκος των ανοιγμάτων και πρέπει να γίνουν αποδεκτές:

1. η μέση ταχύτητα του αέρα που εισέρχεται και του αέρα που εξέρχεται αθροίζεται και θεωρείται σταθερή.
2. η ταχύτητα  $u(z)$  ολοκληρώνεται για το πλήρες άνοιγμα του παραθύρου. Αυτές οι δύο υποθέσεις θεωρούνται η 1<sup>η</sup> και η 2<sup>η</sup> προσέγγιση.

**A. 1<sup>η</sup> προσέγγιση.** Στην περίπτωση ενός ανοίγματος, η εξίσωση απλοποιείται με τη θεώρηση της ταχύτητας του αέρα σταθερής καθ' όλη την επιφάνεια του ανοίγματος και είναι ίση με  $u$  για την εισερχόμενη ταχύτητα του αέρα και  $-u$  για την εξερχόμενη ταχύτητα του αέρα. Έπειτα ορίζεται ως  $h$  το ύψος από το γεωμετρικό κέντρο της επιφάνειας. Αν ολοκληρώσουμε την ταχύτητα του αέρα  $u$  κατά μήκος  $0$  του  $H/2$  (επιφάνειας εισερχόμενου αέρα) ή του  $H/2$  (επιφάνειας εξερχόμενου αέρα) η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$G = \frac{A_T}{2} * C_d * \sqrt{\left(2g * \frac{\Delta T}{T_0} * \frac{h}{4}\right)}$$

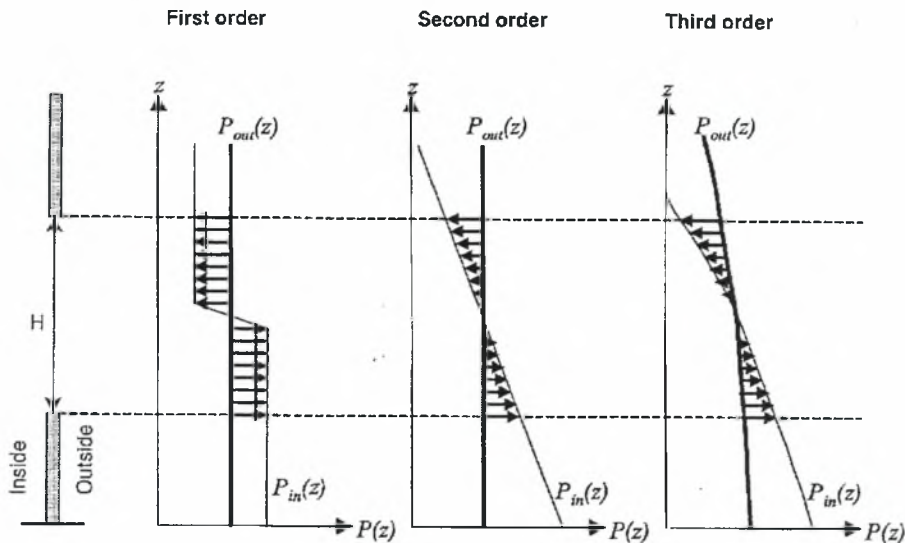
**B. 2<sup>η</sup> προσέγγιση.** Ολοκληρώνοντας τη ταχύτητα του αέρα στην εσωτερική επιφάνεια του ανοίγματος (κάτω μέρος του ανοίγματος) ή στην εξωτερική επιφάνεια του ανοίγματος (επάνω μέρος του ανοίγματος), η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$G = \frac{wH}{3} * C_d * \sqrt{\left(2g * \frac{\Delta T}{T_0} * \frac{h}{2}\right)}$$

Όπου  $w$  είναι το πλάτος της επιφάνειας του ανοίγματος και  $H$  το κάθετο ύψος του ανοίγματος.

**Γ. 3<sup>η</sup> προσέγγιση.** Για φαινόμενα μικτής συναγωγής όπου η επίδραση της ταχύτητας του αέρα και του φαινομένου της άνωσης έχουν ποσοτικά την ίδια επίδραση, ο

καθορισμός των θερμοκρασιακών διαφορών για κάθε πλευρά του ανοίγματος είναι απαραίτητος για την ακρίβεια του μοντέλου της ροής του αέρα στο άνοιγμα.



**Εικόνα 2.5** Σχηματική απεικόνιση της κατανομής της εσωτερικής πίεσης  $P_{in}(z)$ , της εξωτερικής πίεσης  $P_{out}(z)$  και της ταχύτητας του αέρα σε άνοιγμα ύψους  $H$ .

### «Το φαινόμενο του ανέμου»

Το φαινόμενο του ανέμου στα θερμοκήπια, είναι μαζί με το φαινόμενο της καμινάδας, η κυριότερη κινητήριος δύναμη του φυσικού αερισμού.

Αυτό το τελευταίο γίνεται εμφανές μέσω των πιέσεων που ασκεί στις κατασκευές και το αντιλαμβανόμαστε διαμέσου της σύλληψης του συντελεστή της πίεσης.

### Επίδραση του Αέρα

Η επίδραση του αέρα σε κατασκευές όπως κτίρια ή θερμοκήπια έχουν ως αποτέλεσμα την κατανομή της πίεσης γύρω από αυτά τα εμπόδια. Η επίδραση του ανέμου διαχωρίζεται σε δύο συστατικά:

- Το πρώτο οφείλεται στη μέση ταχύτητα του ανέμου, μέσω του συντελεστή  $C$ .

$$\Delta P = 1/2 \rho C u^2$$

- Το δεύτερο οφείλεται στην τυρβώδη ροή και χαρακτηρίζεται από το  $C'$ , και χαρακτηρίζει τη διακύμανση των χαρακτηριστικών της πίεσης του αέρα.

$$\Delta P = 1/2 \rho C' u^2$$

Καθώς οι μετρήσεις δεν μπορούν να καθορίσουν τη σχετική συμβολή του μέσου και του τυρβώδους συστατικού οι περισσότεροι ερευνητές (Boulard and Baille, 1995; Kittas et al, 1995, 1996; Papadakis et al., 1996; Baptista et al., 1999; Bailey, 2000; Fatnassi et al., 2002) τα αθροίζουν σε έναν συντελεστή επίδρασης του ανέμου  $C_w$  και η εξίσωση μετατρέπεται σε:

$$\Delta P = 1/2 \rho C_w u^2$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση της πίεσης, σε εξίσωση ρυθμού αερισμού, αυτή μετατρέπεται σύμφωνα με τους (Boulard and Baille, 1995; Papadakis et al., 1996) σε:

$$Q = A/2 C_d C_w^{0.5} u$$

Η εξίσωση αυτή είναι παρόμοια με την εμπειρική εξίσωση των () η οποία συσχετίζει το ρυθμό αερισμού γραμμικά με την ταχύτητα του αέρα:

$$Q = A/2 C_t u$$

Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής  $C_t$  είναι συνολικός συντελεστής επίδρασης του αέρα και είναι ίσος με  $C_t = C_d C_w^{0.5}$ .

### **Συνδυασμός της επίδρασης της Άνωσης και της επίδρασης του Αέρα**

Ο φυσικός αερισμός του θερμοκηπίου είναι συνήθως ένας συνδυασμένο αποτέλεσμα των δυνάμεων του αέρα και της άνωσης.

#### **2.3.1.10 Καθορισμός των παραμέτρων των μοντέλων**

Ο συντελεστής ανεμοφόρησης  $C_w$  επίδρασης του ανέμου και ο συντελεστής ανεμοπίεσης  $C_d$  είναι οι δύο κύριοι πειραματικοί συντελεστές, οι οποίοι εμπεριέχονται στα ημι-εμπειρικά μοντέλα και πρέπει να καθοριστούν για κάθε είδους ανοιγμάτων παραθύρων για κάθε είδους θερμοκήπιο. Ο ρυθμός αερισμού  $G$  καθορίζεται από μετρήσεις ροής του όγκου του αέρα και κλιματικών παραμέτρων όπως ( $T$ ,  $\Delta T$ ,  $u$ ) οι οποίες μετρώνται ταυτόχρονα με την ανοιχτή επιφάνεια  $A$ . Με τη χρήση των μοντέλων που περιγράφηκαν στη θεωρία οι άγνωστοι παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν. Γραμμικές και μη γραμμικές τεχνικές συσχέτισης (π.χ. ο αλγόριθμος Marquardt's) χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των τιμών του συντελεστή ανεμοφόρησης  $C_w$  και του συντελεστή ανεμοπίεσης  $C_d$ . Με αυτό τον

τρόπο ελαχιστοποιείται το λάθος μεταξύ των μετρήσιμων τιμών για τον ρυθμό αερισμού και των υπολογιζόμενων τιμών.

### Συντελεστής ανεμοπίεσης $C_d$

Ο συντελεστής ανεμοπίεσης  $C_d$  είναι μια παράμετρος των χαρακτηριστικών του παραθύρου και συνήθως καθορίζεται από μοντέλα ή από μεγάλης-κλίμακας πειράματα. Ο πίνακας 1 παρουσιάζει τιμές που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία για κάθετα ανοίγματα σε κτίρια και σε θερμοκήπια. Ο συντελεστής ανεμοπίεσης  $C_d$  παίρνει τιμές μεταξύ των 0.6 και 0.8 με μέση τιμή την 0.66. Για θερμοκήπια με συνεχόμενα ανοίγματα διαφορετικοί ερευνητές δεν αθροίζουν τη διακύμανση της γωνίας ανοίγματος των παραθύρων, καθώς παρατήρησαν ότι ο συντελεστής ανεμοπίεσης  $C_d$  εξαρτάται από τη γωνία ανοίγματος του παραθύρου σύμφωνα με τη σχέση:

$$C_d = (1.75 + 0.7 * e^{-(w/32)(1/\sin a)})^{-0.5}$$

όπου  $w$  είναι το πλάτος του ανοίγματος και  $H$  το ύψος του ανοίγματος αερισμού. Ο συντελεστής ανεμοπίεσης  $C_d$  αναφέρεται σε ανοίγματα παραθύρων θερμοκηπίων που δεν παρουσιάζουν εμπόδια στην κίνηση του αέρα. Εάν υπάρχουν εμπόδια στην κίνηση του αέρα, η τιμή του συντελεστή ανεμοπίεσης  $C_d$  μπορεί να μειωθεί όπως στην περίπτωση των μεγάλου μήκους καλλιιεργειών (Sase, 1989) ή την περίπτωση των διχτύων εντομοστεγανότητας και των διχτύων σκίασης (Fatnassi et al., 2002). Ο συντελεστής ανεμοπίεσης  $C_d$  στο κάλυμμα του θερμοκηπίου και στα δίχτυα αναλύεται στο δεύτερο μέρος της ανασκόπησης.

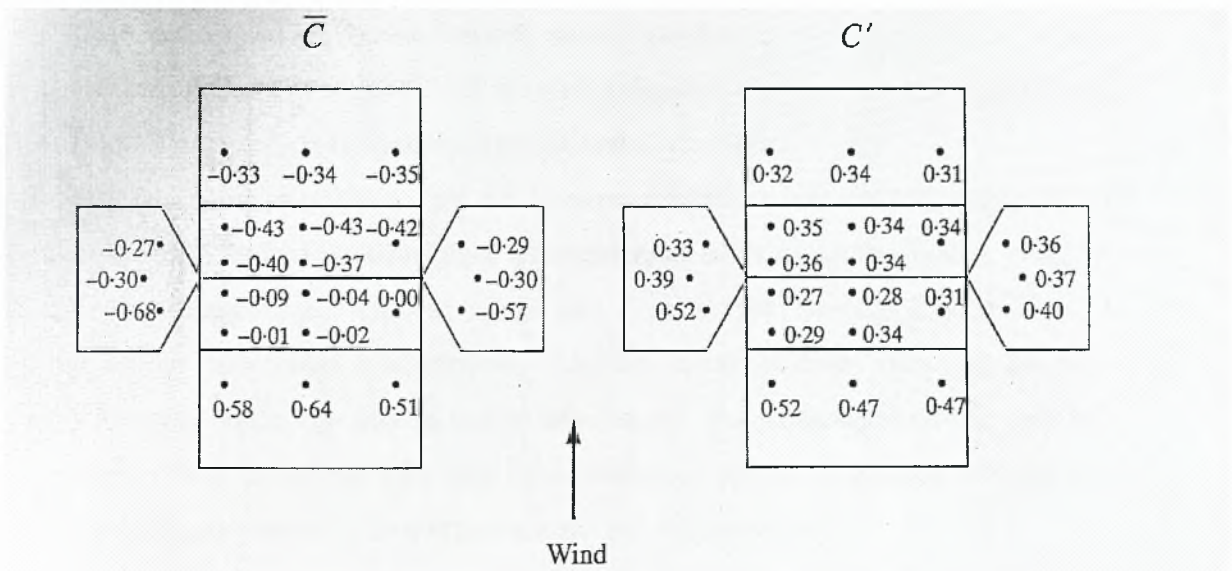


**Πίνακας 1.** Συντελεστής απαλλαγής  $C_d$  όπως καθορίζεται από μερικούς συγγραφείς.

Discharge coefficient $C_d$	Conditions	Source
0.6-0.8	Building, rectangular	Brown and Solvason (1963)
0.67	Building, rectangular	De Gids (1978)
0.6	Building, rectangular	Bruce (1982)
0.65-0.7	Greenhouse, roof vents	Bot (1983)
0.63	Building, vertical and rectangular	Hellickson and Walker (1983)
0.6-0.7	Building, vertical and rectangular	Timmons <i>et al.</i> (1984)
0.65	Building, vertical	Bois <i>et al.</i> (1988)
0.61	Building, vertical and rectangular	Zhang <i>et al.</i> (1989)
0.65-0.75	Greenhouse, roof vents	De Jong (1990)
0.65	Building, rectangular	Randall and Patal (1994)
0.61	Building, rectangular	Vandaele and Wouters (1994)
0.644	Greenhouse, continuous vents	Boulard and Baille (1995)

### Συντελεστής ανεμοφόρτησης $C_w$

Η συσχέτιση του συντελεστή ανεμοφόρτησης  $C_w$  με το  $C$  και με το  $C'$ , έγινε με τη βοήθεια του sonic anemometry και με



**Εικόνα 2.6.** Διανομή του μέσου συντελεστή επίδρασης του αέρα  $\bar{C}$  και του ταραχώδους συντελεστή επίδρασης του αέρα  $C'$  (Gandemer & Bietry, 1989)

#### 2.3.1.11 Ανοίγματα αερισμού

Στην Ελλάδα τα περισσότερα θερμοκήπια αερίζονται με φυσικό τρόπο. Ο φυσικός αερισμός για να λειτουργήσει ικανοποιητικά έχει ανάγκη από μεγάλα ανοίγματα, τα οποία πρέπει να τοποθετηθούν στις κατάλληλες θέσεις στο θερμοκήπιο.

Ένα στενόμακρο θερμοκήπιο, με πλάτος που δεν υπερβαίνει τα 10 m, είναι δυνατό να βασίζει τον αερισμό του σε πλευρικά μόνο ανοίγματα. Όσο όμως το

πλάτος του θερμοκηπίου είναι μεγαλύτερο, τόσο ανεπαρκής αποδεικνύεται ο εγκάρσιος αερισμός με πλευρικά μόνο ανοίγματα και επομένως απαιτούνται πρόσθετα ανοίγματα οροφής. Πολλές φορές, ακόμη και σε όχι μεγάλου πλάτους θερμοκήπια, ο αερισμός με πλευρικά μόνο ανοίγματα αποδεικνύεται ανεπαρκής όταν καλλιεργούνται μεγάλου ύψους φυτά που αυξάνουν την αντίσταση ροής του αέρα. Πολύ συχνά τα πρόσθετα ανοίγματα οροφής αποδεικνύονται σωτήρια, διότι τις ημέρες με άπνοια βοηθούν να λειτουργήσει σωστά αερισμός που βασίζεται στις διαφορές θερμοκρασίας. Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από το έδαφος και τα φυτά, ο αέρας που βρίσκεται σε επαφή με αυτά θερμαίνεται, γίνεται ελαφρότερος και ανέρχεται. Έτσι, με ανοίγματα αερισμού στην οροφή και στις πλευρές έχουμε ικανοποιητικό αερισμό, επειδή ο ψυχρότερος και βαρύτερος εξωτερικός αέρας εισέρχεται από τα κατώτερα πλευρικά ανοίγματα και ο θερμότερος, άρα και ο ελαφρότερος αέρας εξέρχεται από τα υψηλότερα ανοίγματα. Τα επάνω ανοίγματα καλά είναι να βρίσκονται στο υψηλότερο μέρος της οροφής, ώστε να μην εγκλωβίζεται θερμός αέρας ψηλά. Η ευνοϊκή επίδραση που έχει αυτός ο σχεδιασμός στον φυσικό αερισμό είναι εμφανής όταν επικρατεί άπνοια.

Τα ανοίγματα αερίζονται για να δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα με το φυσικό αερισμό, πρέπει να είναι μεγάλης επιφάνειας, αλλά και ρυθμιζόμενα, ώστε να επιτρέπουν μικρότερες παροχές όταν δεν απαιτείται μεγάλος αερισμός. Ο αυτοματισμός εδώ είναι απαραίτητος, διότι οι απαιτήσεις σε αερισμό διαρκώς μεταβάλλονται, ιδίως την άνοιξη και το φθινόπωρο. Υψηλότερος αερισμός από τον απαιτούμενο την ψυχρή περίοδο έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες απώλειες ενέργειας ή χαμηλότερες από την επιθυμητή θερμοκρασία στο θερμοκήπιο.

### **2.3.1.12 Μηχανισμοί των ανοιγμάτων εξαερισμού**

Η ροή του αέρα στον παθητικό αερισμό ρυθμίζεται με την αυξομείωση της έκτασης των ανοιγμάτων αερισμού (παράθυρα). Τα παράθυρα κατασκευάζονται συνήθως συνεχόμενα κατά μήκος των κατακόρυφων πλευρών και της οροφής. Η προσαρμογή του παραθύρου στον σκελετό γίνεται από την επάνω πλευρά και είναι αρθρωτή.

Το άνοιγμα και το κλείσιμο των παραθύρων οροφής γίνεται μέσω οδοντωτών ή σπαστών βραχιόνων. Οι βραχίονες αυτοί συγκρατούν την κάτω πλευρά του



παραθύρου καθ' όλο το μήκος του και συνδέονται μεταξύ τους με ένα σωληνωτό άξονα, έτσι ώστε με την περιστροφή αυτού του άξονα να μετακινούνται όλοι οι βραχίονες μαζί και να ανοίγουν ή να κλείνουν το παράθυρο. Η περιστροφή του άξονα μπορεί να γίνεται με χειροκίνητο μηχανισμό ή με ηλεκτροκινητήρα δεξιόστροφο και αριστερόστροφο, στον οποίο έχει παρεμβληθεί μειωτήρας στροφών. Στους ηλεκτροκίνητους μηχανισμούς η εντολή για το άνοιγμα ή το κλείσιμο δίνεται με χειροκίνητο διακόπτη ή με θερμοστάτη χώρου ή με εξελεγμένο σύστημα αυτοματισμού. Υπάρχει πάντα όμως η δυνατότητα ανοίγματος με το χέρι στην περίπτωση που θα υπάρξει διακοπή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα παράθυρα των κατακόρυφων πλευρών στα υαλόφρακτα θερμοκήπια και σε μερικά πλαστικής κάλυψης έχουν την ίδια κατασκευή όπως της οροφής. Στα περισσότερα θερμοκήπια με κάλυμμα πλαστικό φύλλο είναι πολύ απλούστερη. Σ' αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει σκελετός παραθύρου, αλλά το πλαστικό φύλλο που καλύπτει το άνοιγμα συγκρατείται σταθερά στο σκελετό από την επάνω πλευρά, ενώ στην κάτω πλευρά τυλίγεται μέχρι ενός σημείου σε ανεξάρτητο από το σκελετό σωλήνα 1/2'' στην μια άκρη του σωλήνα προσαρμόζεται μανιβέλα, έτσι ώστε, περιστρέφοντας τη μανιβέλα το πλαστικό να τυλίγεται στο σωλήνα. Με το τύλιγμα του πλαστικού στο σωλήνα αυτός μετακινείται προς τα επάνω και αφήνει ανοικτό το άνοιγμα του αερισμού. Με αντίθετη περιστροφή το ξανακλείνει. Η περιστροφή και εδώ μπορεί να γίνει με ηλεκτροκινητήρα που παίρνει εντολή από θερμοστάτη και χειροκίνητα, όπως γίνεται συνηθέστερα.

### **2.3.1.13 Κατανομή και έκταση των ανοιγμάτων αερισμού**

Τα ανοίγματα αερισμού, πρέπει να εξασφαλίζουν τον απαιτούμενο αερισμό και να κατανέμουν τον αέρα ομοιόμορφα μέσα στο θερμοκήπιο. Αυτό επιτυγχάνεται με το κατάλληλο μέγεθος των ανοιγμάτων, ώστε να είναι ομοιόμορφα και συμμετρικά κατανεμημένα κατά μήκος του θερμοκηπίου.

Η επιφάνεια αερισμού του θερμοκηπίου δίνεται από τη σχέση :

$$S = N \times L \times h \text{ [m}^2\text{]}$$

Όπου :  $S =$  η μέγιστη επιφάνεια ανοιγμάτων αερισμού [ $m^2$ ]

$N =$  ο αριθμός των ανοιγμάτων

$L =$  το μήκος του ανοίγματος [ $m$ ]

$h =$  το μέγιστο πραγματικό πλάτος του [ $m$ ].

Το μέγιστο πραγματικό πλάτος του ανοίγματος δεν είναι πάντα αυτό αντιστοιχεί στο πλάτος του παραθύρου ως κατασκευή, αλλά προσδιορίζεται από την κάθετο που φέρεται από το κάτω χείλος του ανοίγματος προς την επιφάνεια του παραθύρου όταν βρίσκεται στο μέγιστο του ανοίγματος

Η επιφάνεια ανοιγμάτων αερισμού εκφράζεται συνήθως επί τοις % της καλυπτόμενης επιφάνειας εδάφους :

$$\Sigma A = ( S / A_g ) 100$$

Όπου :  $\Sigma A =$  η σχετική επιφάνεια των ανοιγμάτων αερισμού

$A_g =$  η επιφάνεια εδάφους του θερμοκηπίου

Η ελάχιστη σχετική επιφάνεια ανοιγμάτων αερισμού που θα πρέπει να διαθέτει ένα θερμοκήπιο είναι συνάρτηση των κλιματικών συνθηκών της περιοχής, καθώς και του είδους των φυτών που θα καλλιεργηθούν.

Υπολογίζεται ότι στις δικές μας συνθήκες, στα κηπευτικά και τα δρεπτά άνθη, για τον αερισμό κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου, η έκταση των ανοιγμάτων θα πρέπει να επιτρέπει περισσότερες από 40 αλλαγές του αέρα την ώρα.

Κατά το χειμώνα, η θερμοκρασία του θερμοκηπίου μπορεί να ρυθμιστεί και πρέπει να ρυθμίζεται με μόνο τα ανοίγματα αερισμού της οροφής. Τα ανοίγματα των πλευρών αυτή την εποχή έχουν αποτέλεσμα την εισαγωγή ψυχρού αέρα αμέσως στη ζώνη των φυτών, με δυσμενή αποτελέσματα γι' αυτά.

Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εξωτερικού και εσωτερικού αέρα στον παθητικό αερισμό μικραίνει όσο η επιφάνεια των ανοιγμάτων αυξάνει, μέχρι η επιφάνεια των ανοιγμάτων να γίνει το 30 % της επιφάνειας του εδάφους. Πάνω από αυτό το ποσοστό, η επιπλέον επιφάνεια ανοιγμάτων έχει πολύ μικρή επίδραση στην παραπέρα μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας. Μειώνεται περίπου 0,1 °C για κάθε 1% επιπλέον επιφάνεια ανοιγμάτων, μέχρι το όριο 45%. Πέρα από αυτό το όριο κάθε αύξηση ανοιγμάτων κατά 1% συμβάλλει στη μείωση της θερμοκρασίας περίπου κατά 0,06 °C



## 2.4. Φυσικός 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>) για τα φυτά στο θερμοκήπιο.

### 2.4.1. Επίδραση στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου

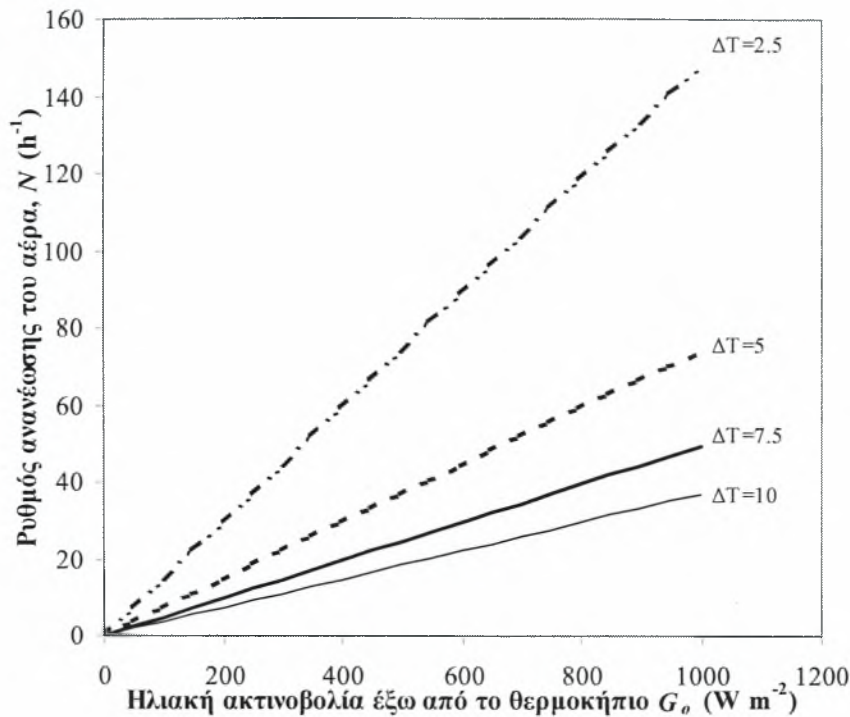
Στις χώρες με θερμό κλίμα, ο σημαντικός ρόλος του αερισμού, εξηγεί το αυξημένο ενδιαφέρον των ερευνητών να διερευνήσουν τη ροή του αερισμού στο θερμοκήπιο και να αποκτήσουν νέα, καλύτερη γνώση των μηχανισμών που την προκαλούν. Η μελέτη του αερισμού των θερμοκηπίων έγινε είτε με πειράματα (Fernandez and 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 Duynne 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 (Εικόνα 2.7).

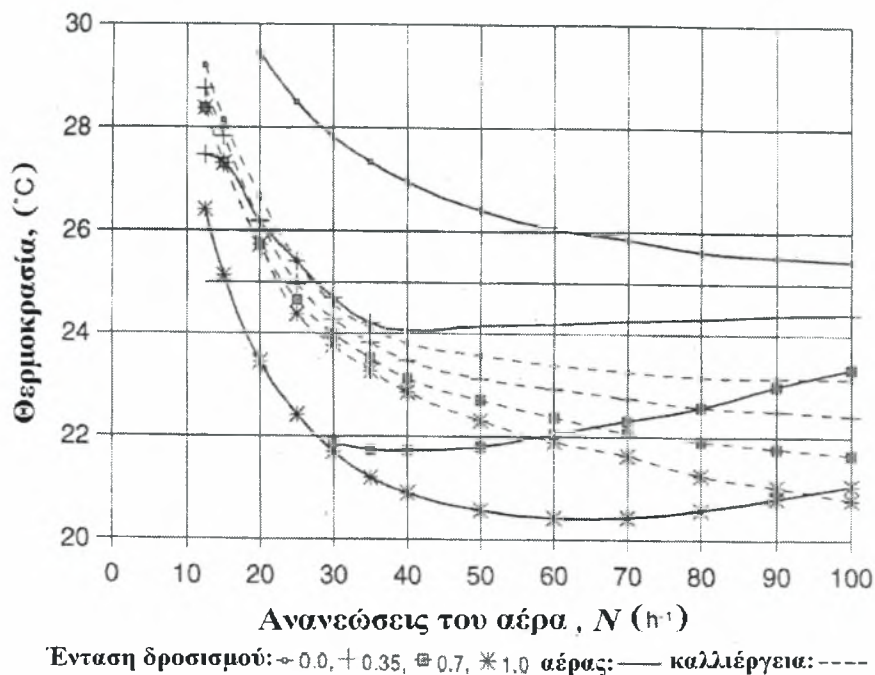
Η θερμοκρασία στο θερμοκήπιο επηρεάζεται σημαντικά από το ρυθμό ανανέωσης του αέρα, όταν αυτός είναι μικρότερος από 20 αλλαγές ανά ώρα, ενώ επηρεάζεται ελάχιστα, όταν ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα είναι μεγαλύτερος από 30 h<sup>-1</sup> Εικόνα (2.8), (Boulard and Baille 1993).



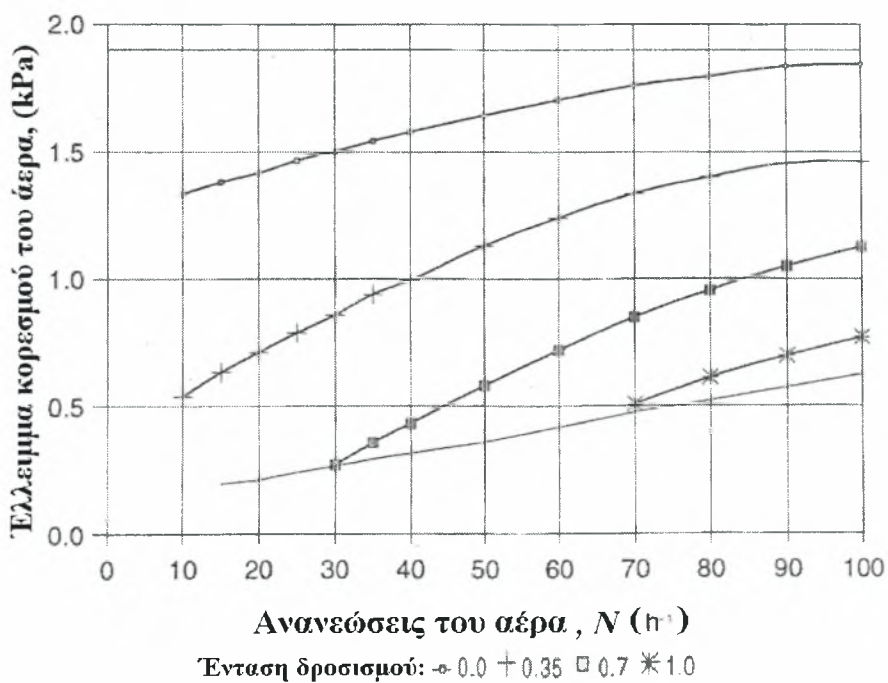
**Εικόνα 2.7.** Εκτίμηση αναγκών αερισμού σε θερμοκήπιο με καλλιέργεια τριανταφυλλιάς σύμφωνα με τον Κίττα και συνεργάτες (1999).

Στην εικόνα 2.8(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)

**Εικόνα 2.8.** Προσομοίωση (α) της θερμοκρασίας και (β) του ελλείμματος κορεσμού του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, συναρτήσει του ρυθμού ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου, για διάφορες παροχές νερού ( $kg\ m^{-2}$  ημέρα $^{-1}$ ) 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  $ILA = 3$ .



**Πίνακας 2.** Επίδραση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα ( $N$  h-1) στη διαφορά θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου με τον εξωτερικό αέρα ( $\Delta T_{i-o}$  °C), στο έλλειμμα κορεσμού του αέρα του θερμοκηπίου ( $e_i$  kPa), στη διαφορά ελλείμματος κορεσμού μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα ( $\Delta e_{i-o}$  kPa), στην αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου ( $g_v$  mm s-1) και στο λόγο Bowen ( $\beta$ ).  
(Στοιχεία από Fuchs et al. 1997)

N	$\Delta T_{i-o}$	$e_i$	$\Delta e_{i-o}$	$g_v$	$\beta$
h-1	°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

#### 2.4.2. Επίδραση στην καλλιέργεια

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.8, 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).

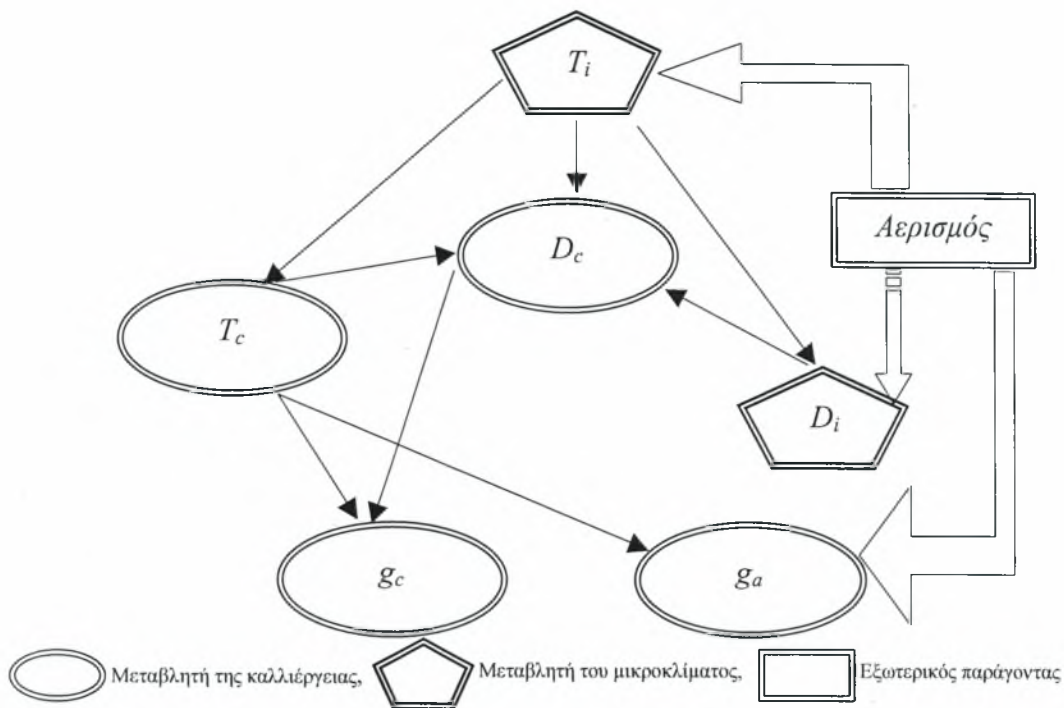
Πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση του ρυθμού ανανέωσης του αέρα στην αεροδυναμική αγωγιμότητα του θερμοκηπίου δίνονται στον Πίνακα 2. (Fuchs et al. 1997).

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<sup>-1</sup> δεν προκαλεί σημαντική μείωση της θερμοκρασίας των φύλλων (Fuchs 1993, Montero and Antón 1994).

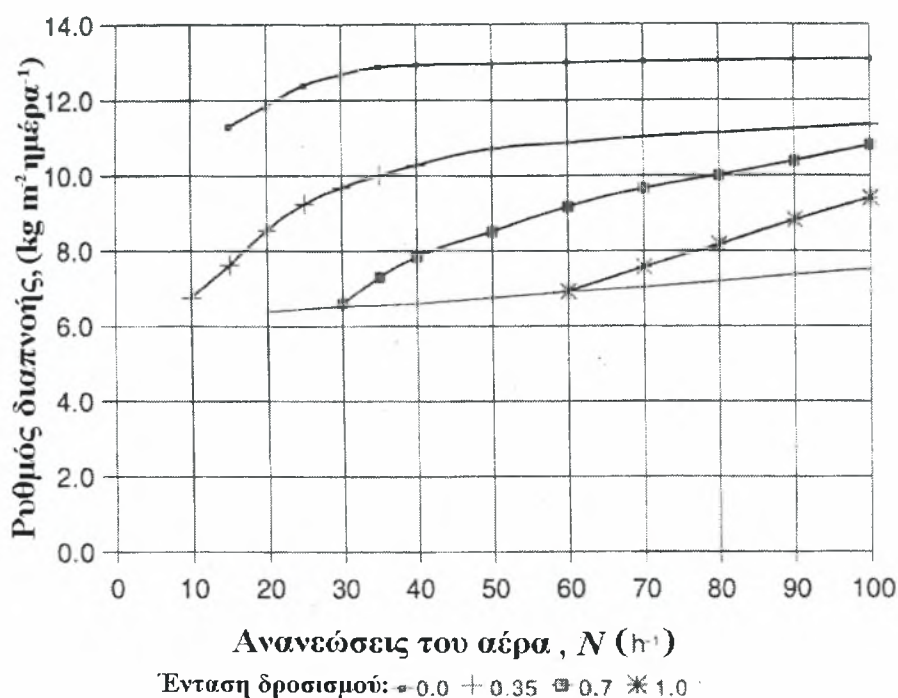
Ο αερισμός του θερμοκηπίου επηρεάζει και τη στοματική αγωγιμότητα της καλλιέργειας μέσω των μεταβολών που προκαλούνται στη θερμοκρασία της καλλιέργειας και στο έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα. Το έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα επηρεάζεται τόσο από τη θερμοκρασία της καλλιέργειας, όσο και από το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (Σχήμα 2.9). 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<sup>-1</sup>, μειωνόταν από 1.6 έως 3 φορές περισσότερο συγκριτικά με την περίπτωση όπου η ταχύτητα του ανέμου ήταν 0.5 m s<sup>-1</sup>.





**Εικόνα 2.9.** 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 (Εικόνα 2.10), 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 στην εικόνα 2.8.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.



**Εικόνα 2.10..** 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  $PLA = 3$ .

Ο Fuchs (1993) μελέτησε τη διαπνοή μιας καλλιέργειας τομάτας σε συνάρτηση με το ρυθμό ανανέωσης του αέρα για διάφορες συνθήκες ακτινοβολίας και υγρασίας. Σημειώτεον, 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.

### **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>. Υλικά & Μέθοδοι**

### 3.1 Η τοποθεσία

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του Βελεστίνου, 18 χιλιόμετρα από το Βόλο και στα νοτιοδυτικά του νομού Μαγνησίας, όπου βρίσκονται οι εγκαταστάσεις του Αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

### 3.2 Το θερμοκήπιο



**Εικόνα 3.1.** Το πειραματικό θερμοκήπιο

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ένα τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο (Εικόνα 3.1), επιφάνειας  $160\text{m}^2$  (20 μέτρα μήκος και 8 μέτρα πλάτος) , με μέγιστο ύψος 4,65 m στον κορφιά, ενώ το ύψος του ορθοστάτη έφτανε τα 3 μέτρα. Το υλικό του σκελετού ήταν γαλβανισμένος χάλυβας. Το έδαφος των θερμοκηπίων ήταν πλήρως καλυμμένο με αδιαφανές, διπλής όψεως ασπρόμαυρο πλαστικό.

Επιπλέον, ο προσανατολισμός του θερμοκηπίου ήταν ανατολή-δύση. Το κάλυμμα του θερμοκηπίου ήταν πολυαιθυλένιο με πρόσθετα βελτίωσης των ιδιοτήτων του και είχε χρησιμοποιηθεί για τρία έτη.

### 3.3. Αερισμός - Θέρμανση

Στα θερμοκήπια υπήρχαν δύο πλαϊνά ανοίγματα κατά μήκος των δύο μεγάλων πλευρών, διαστάσεων 1.5m x 22.5m στο μέσο των πλευρών με τη βοήθεια των οποίων γινόταν ο αερισμός.

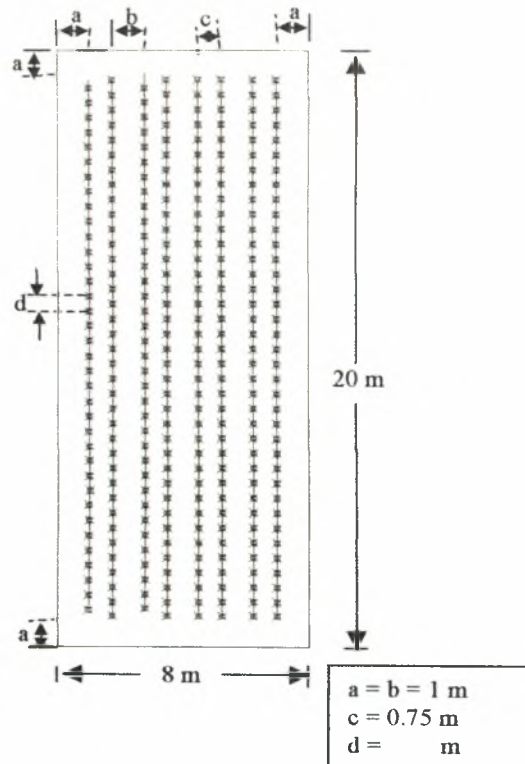
Η θέρμανση του θερμοκηπίων ήταν επιδαπέδια. Η θερμοκρασία θερμοστάτη ορίστηκε στους 15 °C κατά τη διάρκεια της νύχτας και 21 °C κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι θερμοστάτες στο θερμοκήπιο τοποθετήθηκαν στο κέντρο των θερμοκηπίων, 2 m πάνω από το έδαφος. Ως καύσιμη ύλη χρησιμοποιήθηκε πετρέλαιο.

### 3.4. Η καλλιέργεια

Χρησιμοποιήθηκαν φυτά τομάτας, (*Lycopersicon esculentum*), ποικιλία Belladona. Πρόκειται για ποικιλία αυτογονιμοποιούμενη, με χαρακτηριστικό τη μεγάλη διάρκεια ζωής του καρπού.

Το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν περλίτης , σε σάκους μήκους 1 μέτρου. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 136 σάκοι , οι οποίοι τοποθετήθηκαν 0,4m πάνω από το έδαφος. Σε κάθε σάκο τοποθετήθηκαν 3 φυτά τομάτας.

Η καλλιέργεια εγκαταστάθηκε σε τέσσερις διπλές σειρές με αποστάσεις φύτευσης 0,33 m επί της γραμμής και 0,75 m μεταξύ των γραμμών της διπλής σειράς, με πυκνότητα 2,4 φυτά/m<sup>2</sup>. Το πλάτος του διαδρόμου ήταν 1m (Εικόνα 3.2, 3.3).



Εικόνα 3.2. Διάταξη και αποστάσεις των φυτών τομάτας



Εικόνα 3.3. Διάταξη των φυτών τομάτας στο πειραματικό θερμοκήπιο.



### 3.5. Περιγραφή των οργάνων μέτρησης

#### Μετρήσεις

##### Μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον

Στο εξωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου θα καταγραφούν:

- Η θερμοκρασία ( $T_o, ^\circ\text{C}$ ) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ( $D_o, \text{kPa}$ ) με αεριζόμενο ψυχρόμετρο τύπου Assman (τύπος VPI, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Το ψυχρόμετρο μετρούσε τις θερμοκρασίες ξηρού και υγρού θερμομέτρου από τις οποίες υπολογίζεται το έλλειμμα κορεσμού του αέρα.
- Η ηλιακή ακτινοβολία ( $RG_o, \text{Wm}^{-2}$ ) με πυρανόμετρο (CM-6B, Kipp and Zonen, Delft, The Netherlands).
- Η ταχύτητα του αέρα ( $u, \text{m s}^{-1}$ ) με ανεμόμετρο κυπέλλων (τύπος AN1-UM-3, Delta-T Devices, Cambridge, UK).
- Η διεύθυνση του αέρα ( $WD \text{ }^\circ$ ) με ανεμοδείκτη (τύπος WD1-UM3-3, Delta-T Devices, Cambridge, UK).

##### Μετρήσεις στο εσωτερικό περιβάλλον

Στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου θα καταγραφούν:

- Η θερμοκρασία ( $T_o, ^\circ\text{C}$ ) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα ( $D_o, \text{kPa}$ ) με αεριζόμενο ψυχρόμετρο τύπου Assman (τύπος VPI, Delta-T Devices, Cambridge, UK).
- Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ( $RG_o, \text{Wm}^{-2}$ ) στο κέντρο του θερμοκηπίου, με πυρανόμετρο (CM-6B, Kipp and Zonen, Delft, The Netherlands).

### 3.6. Περιγραφή της επεξεργασίας

Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων, επιλέχθηκαν και επεξεργάστηκαν οι μετρήσεις οι οποίες λήφθηκαν κατά τη διάρκεια περιόδων με μια σχετικά σταθερή διεύθυνση του αέρα (Βόρεια προς Νότια μεταξύ  $10^\circ$  και  $194^\circ$ )



παρουσιάζονται. Από συνολικά 92 παρατηρήσεις που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου, 70 εκπλήρωσαν το ανωτέρω κριτήριο.

Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν και επεξεργάστηκαν εγκαταστάθηκαν στην εξίσωση (2.12) χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Marquardt (Marquardt, 1963).

## **Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα.**

## 4.1. Αποτελέσματα

Οι μετρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού του 2005, επέτρεψαν τη μελέτη της ομοιομορφίας του αερισμού στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Αναλυτικότερα μελετήθηκε η πτώση της συγκέντρωσης του αερίου στα διάφορα σημεία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου για τον υπολογισμό του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα. Θα παρουσιαστεί δηλαδή, η επίδραση της θέσης στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο ρυθμό ανανέωσης του αέρα.

Ο μέσος όρος της εξωτερικής ταχύτητας του ανέμου κατά τη διάρκεια των ημερών που έγιναν οι μετρήσεις ήταν  $1,4 \text{ m s}^{-1}$ , η εξωτερική διεύθυνση του αέρα κυμαινόταν από  $10^\circ$  έως  $194^\circ$  και η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα ήταν  $32^\circ\text{C}$ .

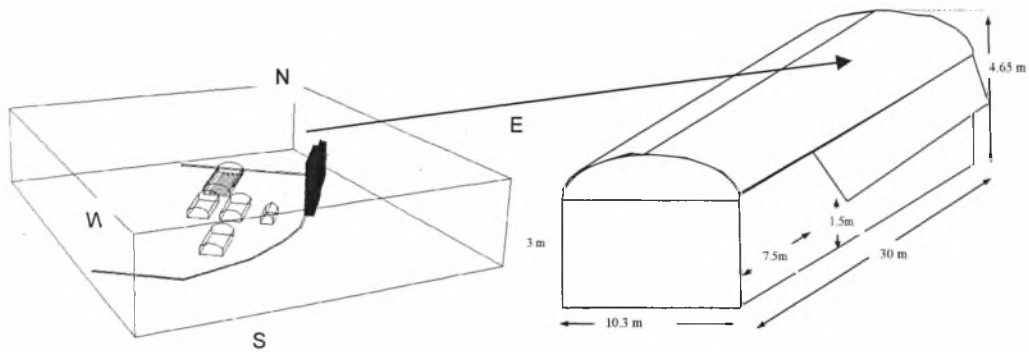
Η κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του θερμοκηπίου παρουσιάζεται στον πίνακα.1. Είναι φανερό ότι στο σημείο 4 το οποίο βρίσκεται στην βόρεια πλευρά του θερμοκηπίου η θερμοκρασία ήταν πάντα υψηλότερη από ότι στα υπόλοιπα σημεία.

	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)
Μέσος όρος	32,1	31,5	32,3	33,3

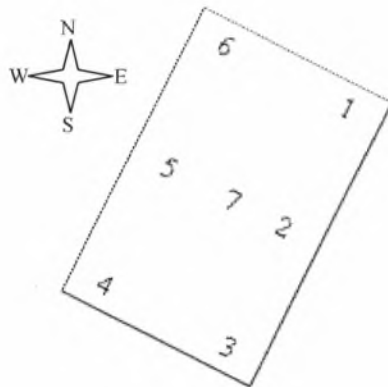
**Πίνακας1.** Θερμοκρασίες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου σε τέσσερα διαφορετικά σημεία κατά τη διάρκεια των ημερών που έγιναν οι μετρήσεις.

## 4.2. Επίδραση της διεύθυνσης του εξωτερικού ανέμου στο ρυθμό ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου

Από τις μετρήσεις στο μέσο του θερμοκηπίου με το όργανο model 7000, ADC gas analyzer (εύρος μέτρησης 0 έως 200 p.p.m, ακρίβεια  $\pm 5$ p.p.m, Analytical Development Company), υπολογίστηκε ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα. Μέσα στο θερμοκήπιο υπήρχαν δύο όργανα, το ADC και ένα ακόμα. Με το ADC λήφθηκαν μετρήσεις μόνο στο μέσο του θερμοκηπίου, στο σημείο 7 ενώ με το άλλο λήφθηκαν στα σημεία από 1-6.

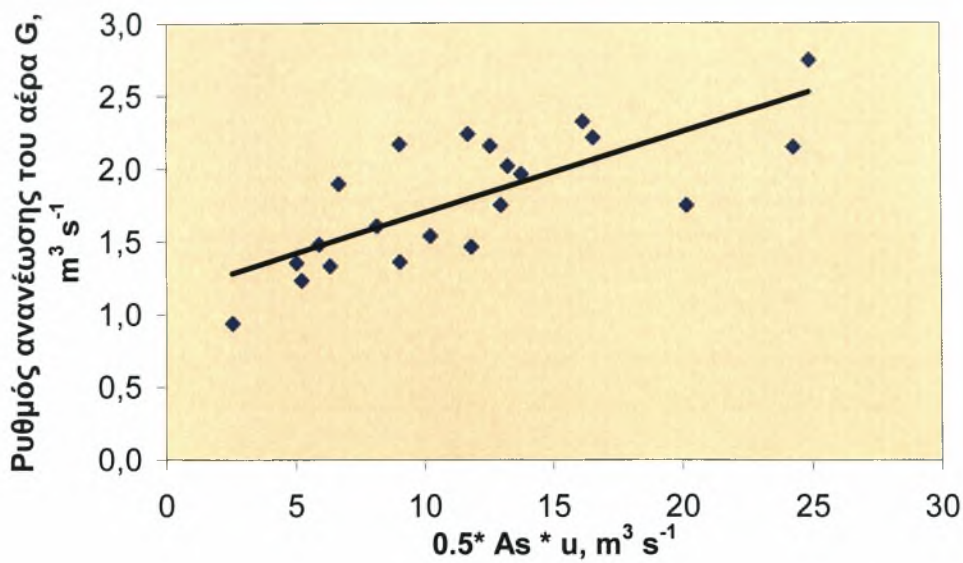


**Εικόνα 4.1.** Πειραματικό θερμοκήπιο. Η περιβαλλοντική υπολογιστική περιοχή του.

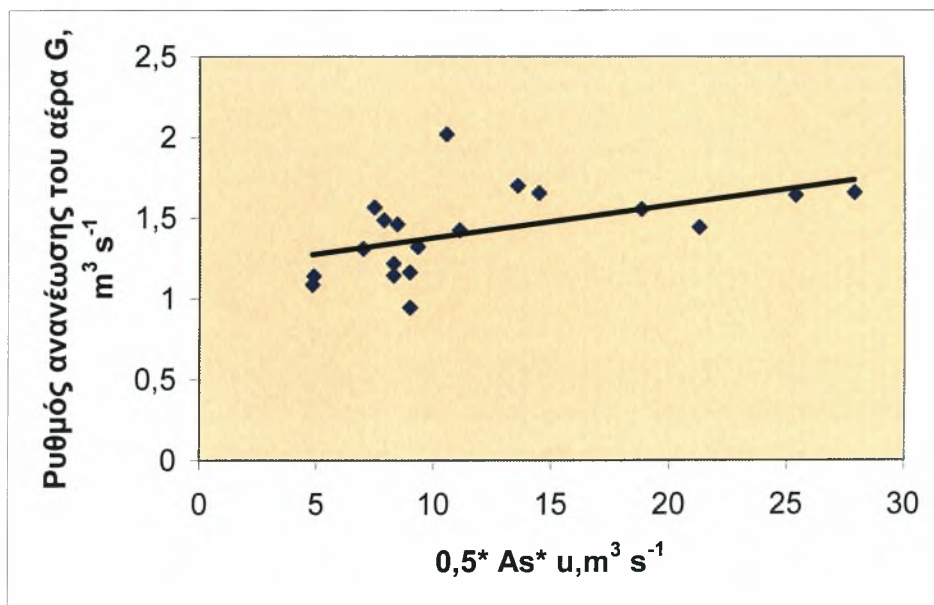


**Εικόνα 4.2.** Θέσεις μέτρησης (1-7) μέσα στο πειραματικό θερμοκήπιο.

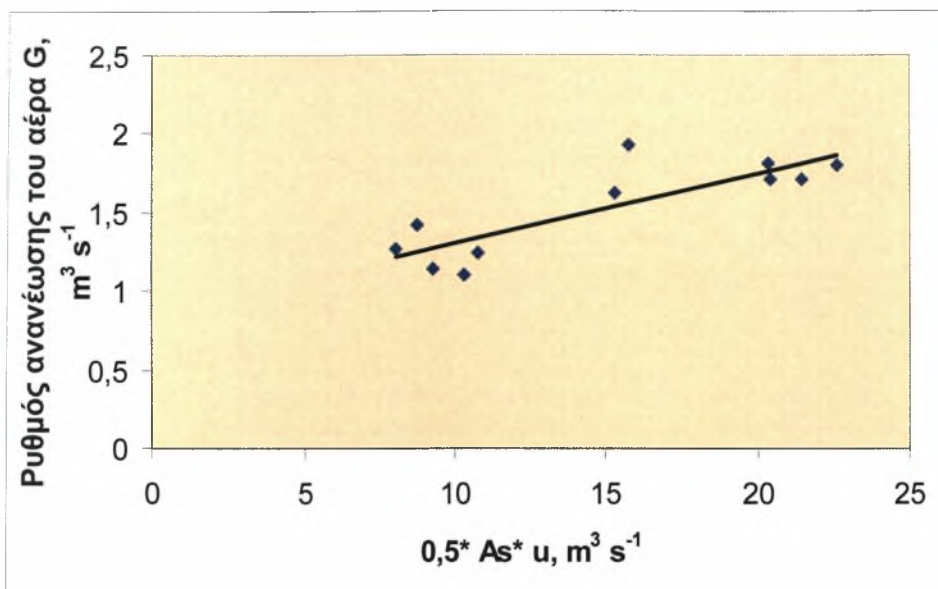
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα με τις τιμές του ρυθμού ανανέωσης του αέρα από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο κεντρικό σημείο ADC για διάφορες τιμές της διεύθυνσης του ανέμου.



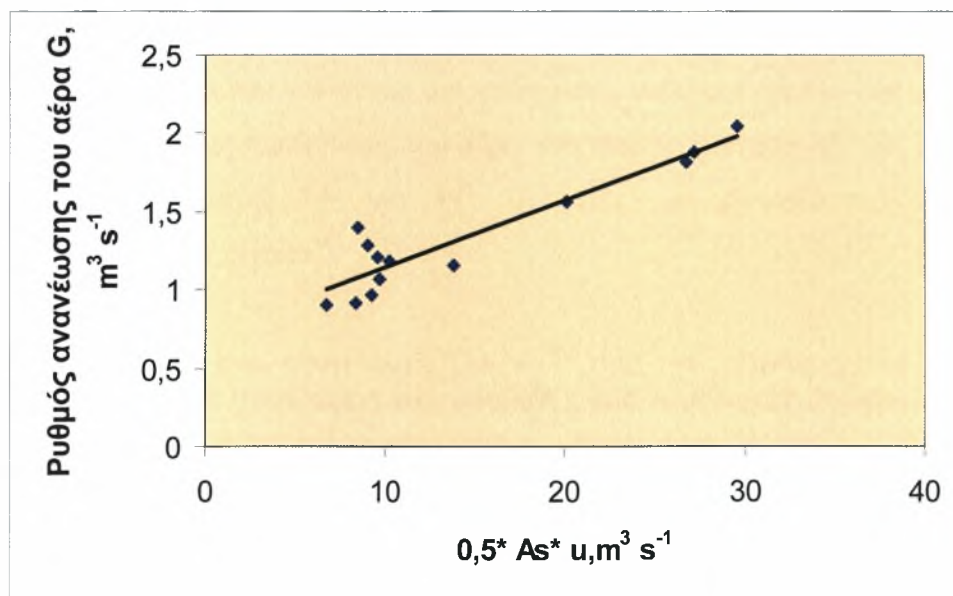
**Σχήμα 4.3.** Μετρημένες τιμές του ρυθμού ανανέωσης του αέρα ως συνάρτηση του γινομένου της ταχύτητας του αέρα επί την επιφάνεια ανοίγματος, όταν η διεύθυνση του αέρα κυμαίνεται από 10° έως 119°.



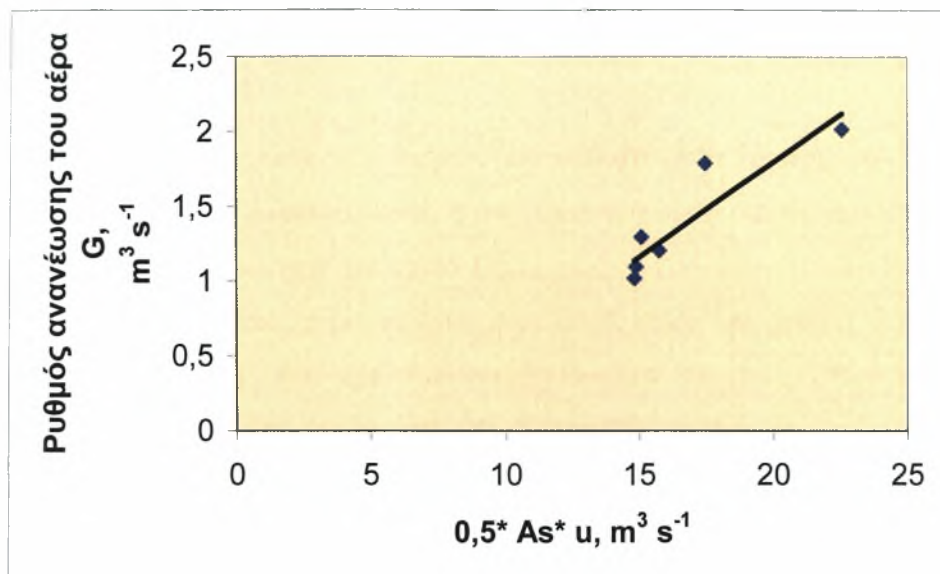
**Σχήμα 4.4.** Μετρημένες τιμές του ρυθμού ανανέωσης του αέρα ως συνάρτηση του γινομένου της ταχύτητας του αέρα επί την επιφάνεια ανοίγματος, όταν η διεύθυνση του αέρα κυμαίνεται από 121° έως 139°.



**Σχήμα 4.5.** Μετρημένες τιμές του ρυθμού ανανέωσης του αέρα ως συνάρτηση του γινομένου της ταχύτητας του αέρα επί την επιφάνεια ανοίγματος, όταν η διεύθυνση του αέρα κυμαίνεται από  $140^\circ$  έως  $158^\circ$ .



**Σχήμα 4.6.** Μετρημένες τιμές του ρυθμού ανανέωσης του αέρα ως συνάρτηση του γινομένου της ταχύτητας του αέρα επί την επιφάνεια ανοίγματος, όταν η διεύθυνση του αέρα κυμαίνεται από  $160^\circ$  έως  $177^\circ$ .



**Σχήμα 4.7.** Μετρημένες τιμές του ρυθμού ανανέωσης του αέρα ως συνάρτηση του γινομένου της ταχύτητας του αέρα επί την επιφάνεια ανοίγματος, όταν η διεύθυνση του αέρα κυμαίνεται από 179° έως 194°.

Σύμφωνα με την εξίσωση (2.7) υπολογίστηκε ο ολικός συντελεστής  $CdCw^{0,5}$  με γραμμική παλινδρόμηση των πειραματικών μετρήσεων του ρυθμού ανανέωσης του αέρα συναρτήσει του γινομένου του ανοίγματος αερισμού με την ταχύτητα του αέρα, για τις διάφορες διευθύνσεις του αέρα που κυμαινόταν από 10° έως 192° για δύο τύπους ανοίγματος 22° και 45°. Οι τιμές του συντελεστή  $CdCw^{0,5}$  παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

**Πίνακας 2.** Τιμές του συντελεστή  $CdCw^{0,5}$  για τις μετρήσεις του ρυθμού ανανέωσης του αέρα συναρτήσει του γινομένου του ανοίγματος αερισμού με την ταχύτητα του αέρα.

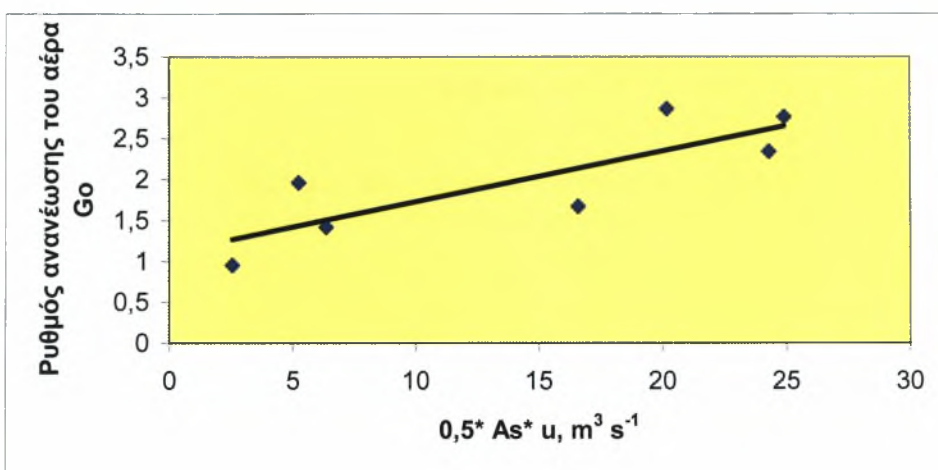
WD	Numbers of measurements	$CdCw^{0,5}$	Go	$R^2$
10°-119°	8	0,06	1,14	0,58
121°-139°	8	0,02	1,18	0,25
140°-158°	8	0,05	0,86	0,70
160°-177°	8	0,04	0,72	0,87
179°-192°	8	0,12	0,76	0,83



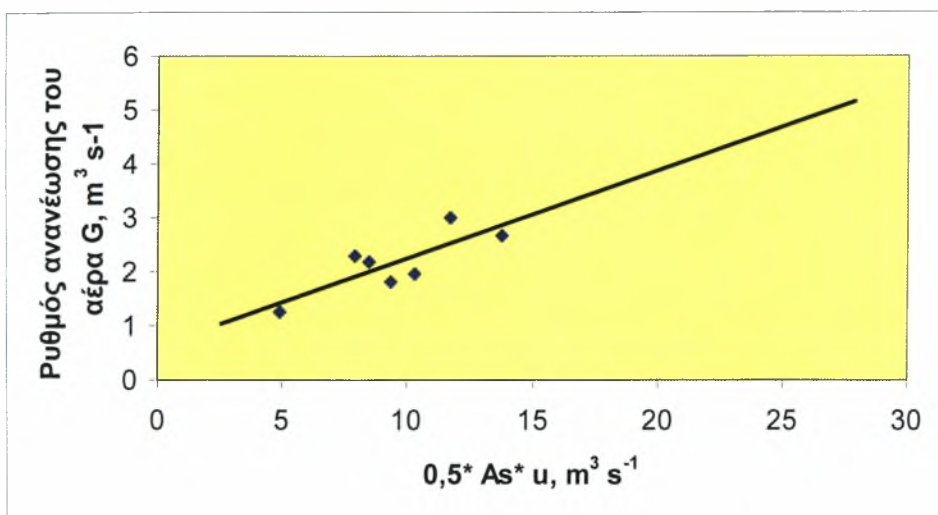
### 4.3. Επίδραση της θέσης στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στο ρυθμό ανανέωσης του αέρα

Όπως αναφέρθηκε μέσα στο θερμοκήπιο υπήρχαν δύο όργανα, το ADC και ένα ακόμα. Με το ADC λήφθηκαν μετρήσεις μόνο στο μέσο του θερμοκηπίου, στο σημείο 7, ενώ με το άλλο στα σημεία από 1-6.

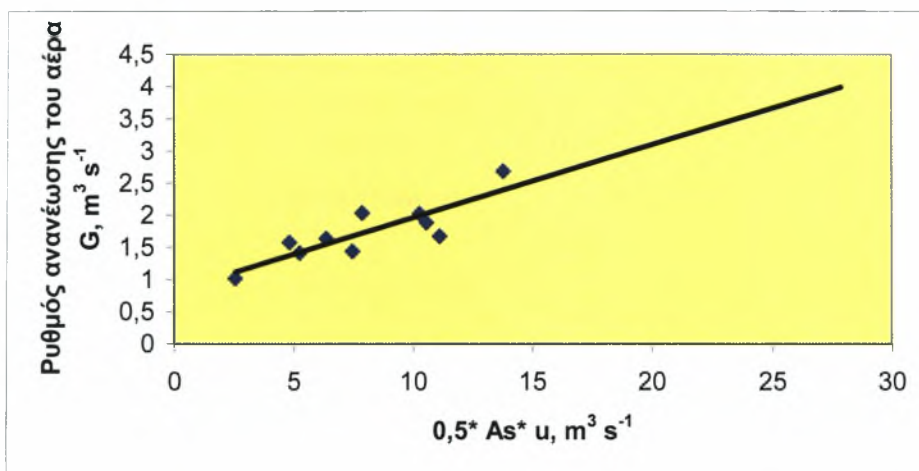
Παρακάτω, παρουσιάζονται διαγράμματα με τις τιμές του ρυθμού ανανέωσης του αέρα από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα σημεία 1,3,4 και 6 για τη διεύθυνση του αέρα που κυμαινόταν από  $10^\circ$  έως περίπου  $177^\circ$ .



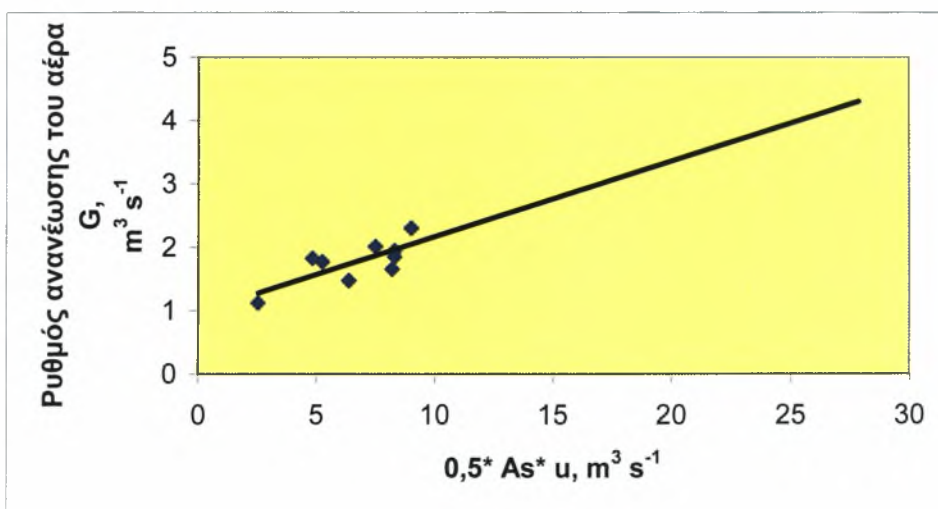
Σχήμα 4.8. Μετρημένες τιμές του ρυθμού ανανέωσης του αέρα ως συνάρτηση του γινομένου της ταχύτητας του αέρα επί την επιφάνεια ανοίγματος, για το σημείο 1.



**Σχήμα 4.9.** Μετρημένες τιμές του ρυθμού ανανέωσης του αέρα ως συνάρτηση του γινομένου της ταχύτητας του αέρα επί την επιφάνεια ανοίγματος, για το σημείο 3.



**Σχήμα 4.10.** Μετρημένες τιμές του ρυθμού ανανέωσης του αέρα ως συνάρτηση του γινομένου της ταχύτητας του αέρα επί την επιφάνεια ανοίγματος, για το σημείο 4.



**Σχήμα 4.11.** Μετρημένες τιμές του ρυθμού ανανέωσης του αέρα ως συνάρτηση του γινομένου της ταχύτητας του αέρα επί την επιφάνεια ανοίγματος, για το σημείο 6.

Σύμφωνα με την εξίσωση (2.7) υπολογίστηκε ο ολικός συντελεστής  $CdCw^{0.5}$  με γραμμική παλινδρόμηση των πειραματικών μετρήσεων του ρυθμού ανανέωσης του αέρα συναρτήσει του γινομένου του ανοίγματος αερισμού με την ταχύτητα του αέρα, για τις διάφορες διευθύνσεις του αέρα που κυμαινόταν από  $10^0$  έως  $139^0$  για

δύο τύπους ανοίγματος 22° και 45°. Οι τιμές του συντελεστή  $CdCw^{0,5}$  παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3.

**Πίνακας 3.** Τιμές του συντελεστή  $CdCw^{0,5}$  για τις μετρήσεις του ρυθμού ανανέωσης του αέρα συναρτήσει του γινομένου του ανοίγματος αερισμού με την ταχύτητα του αέρα για τα σημεία 1,3,4 και 6.

Σημεία	WD	Numpers of measurements	$CdCw^{0,5}$	Go	$R^2$
1	10°-119°	8	0,062	1,11	0,69
3	10°-139°	8	0,62	0,64	0,65
4	10°-139°	8	0,11	0,84	0,74
6	10°-130°	8	0,12	0,97	0,58

Οι τιμές του συντελεστή  $CdCw^{0,5}$  για διευθύνσεις του αέρα από 10° έως 194° για το σημείο ADC φαίνεται να είναι μικρότερες από αυτές που δίνει ο Katsoulas et al., (2006) για απλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο με πλαϊνά ανοίγματα (=0,078) και μικρότερες από αυτές που δίνει ο Boulard et al., (1997) για τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο με συνεχή πλαϊνά ανοίγματα (=0,128) και τέλος είναι επίσης μικρότερες από αυτές που δίνουν οι Teitel and Tanny, (1999) για πολλαπλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο με ανοίγματα οροφής (=0,11).

Από τον πίνακα 2 συμπεραίνεται ότι υπάρχει μια σχετική ομοιομορφία στο ρυθμό ανανέωσης του αέρα αφού όλες οι τιμές του  $CdCw^{0,5}$  είναι παρόμοιες σχεδόν για όλες τις διευθύνσεις του αέρα εκτός από την τελευταία μέτρηση για διεύθυνση του αέρα από 179° έως 192°(για το σημείο ADC).

Επίσης, από τον πίνακα 3 συμπεραίνεται ότι στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα δεν είναι ομοιόμορφος, αφού όπως παρατηρείται οι τιμές του συντελεστή  $CdCw^{0,5}$  είναι διαφορετικές για κάθε τιμή της διεύθυνσης του αέρα.

## **Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>.Συμπεράσματα**

## 5.1.Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η ομοιομορφία του αερισμού σε ένα τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο και έγινε διερεύνηση της επίδρασης της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου καθώς και του ανοίγματος των παραθύρων στο ρυθμό ανανέωσης του αέρα σε διάφορα σημεία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι:

- Η θερμοκρασία κατά μήκος του θερμοκηπίου ήταν σχετικά ομοιόμορφη με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στη βόρεια πλευρά του θερμοκηπίου, κυρίως όταν η διεύθυνση του ανέμου ήταν από το βορρά προς το νότο. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στο side wall effect όπου όταν η διεύθυνση του ανέμου είναι παράλληλη με τον άξονα του θερμοκηπίου ο αέρας εισέρχεται στο θερμοκήπιο από την υπήνεμη πλευρά.
- Οι μεγαλύτερες τιμές του αερισμού παρατηρήθηκαν όταν η διεύθυνση του αέρα ήταν σχεδόν κάθετη στα ανοίγματα αερισμού, δηλαδή όταν οι τιμές της διεύθυνσης του αέρα κυμαίνονταν κοντά στις  $160^\circ$ , ενώ οι μικρότερες τιμές αερισμού παρατηρήθηκαν όταν η διεύθυνση του ήταν παράλληλη στα ανοίγματα αερισμού.
- Ο αερισμός στο εσωτερικό του θερμοκηπίου δεν ήταν ομοιόμορφος. Όταν η διεύθυνση του αέρα κυμαινόταν από  $10^\circ$  έως  $139^\circ$  τότε ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα ήταν μεγαλύτερος στο 3ο σημείο, ενώ στις ίδιες διευθύνσεις του αέρα ο ρυθμός ανανέωσης του αέρα ήταν μικρότερος στο 1ο σημείο.

## **Βιβλιογραφία.**

**Abbot J.D., Peet M.M., Willits D.H, Sanders D.C. and Gough R.E ., 1986.** Effects of irrigation frequency and scheduling on fruit production and radial fruit cracking in greenhouse tomatoes in soil, beds and in a soilless medium in bags. *Scientia Horticulturae* 28 : 209-217

**Bailey B J (2000).** Constraints, limitations and achievements in greenhouse natural ventilation. *Acta Horticulturae*, 534, 21–30

**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 process to a dynamical model. PhD Thesis, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands

**Boulard T; Draoui B (1995).** Natural ventilation of a 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(4),249-266

**Boulard T; Wang S (2000).** Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100(1), 25–34

**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., Draoui, B., 1995.** Natural ventilation of greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 61: 27-36



**Brun, R., Lagier, J.**, 1985. A new greenhouse structure adapted to the Mediterranean growing conditions. *Acta Horticulturae*, 170: 34-46

**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 Halleux D; Nijkens J; Deltour J** (1991). Adjustment and validation of a greenhouse climate dynamic model. Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux, 26, 429–453

**De Jong T** (1990). Natural ventilation of large multi-span greenhouses. PhD Thesis, Agricultural University of Wageningen, The Netherlands

**Fatnassi H; Boulard T; Demrati H; Bouirden L; Sappe G** (2002). Ventilation performance of a large canarian-type greenhouse equipped with insect-proof nets. *Biosystems Engineering*, 82(1), 97–105

**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

**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

**Harmanto, Salokhe V.M, Babel M.S, Tantau H.J**, 2005. Water requirement of drip irrigated tomatoes in tropical environment. *Agricultural water requirement* 7:225-242

**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

**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

**Kittas, C.,** 1995. A simple climagraph for characterizing regional suitability for greenhouse cropping in Greece. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78: 133-141

**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., 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

**Lee I; Okushima L; Sase S; Ikeguchi A** (2003). Improvement of particle image velocimeter (PIV) at large-sized wind tunnel test for aerodynamic study of natural ventilation in multi-span greenhouses. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, 46(3), 763-777

**Lizarraga A., Boesveld H., Huibers F., Robles C,** 2003. Evaluating irrigation of hydroponic tomato in Navvarra, Spain. *Irrigation and drainage*.52 : 177-188

**Mahajan G and Singh K.G.,**2006. Response of greenhouse tomato to irrigation and fertigation. *Agricultural water management*. Vol.84, issues 1-2 : 202-206

**Marquardt D W** (1963). An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters. *Journal Society of Applied Mathematics*, 2, 432-441

**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

**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

**Montero J I; Hunt G R; Kamarrudin R; Anton A; Bailey B J** (2001). Effect of ventilator configuration on wind driven ventilation in a crop protection structure for the tropics. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80(1), 99-107

**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

**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

**Sase S** (1989). The effect of plant arrangement on airflow characteristics in a naturally ventilated greenhouse. *Acta Horticulturae*, 245, 429-435

**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

**Short, T. H., Duyne, G. V.,** 1990. Multi-span sawtooth greenhouses for the Mediterranean basin. *ASAE*, Paper No. 90-4535

**Teitel, M., Tanny, J.,** 1999. Natural ventilation of greenhouses: experiments and model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 96: 59-70

**Verlodt, 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; Deltour J** (1996). An experimental ventilation function for large greenhouses based on a dynamic energy balance model. *International Agricultural Engineering Journal*, 5(3-4), 103-112

**Wang, S.**, 1998. Measurement and modeling of natural ventilation in a large Venlo-type greenhouse. *PhD Thesis*, Gembloux Agricultural Faculty, Belgium, 194 pp

**White, R. A. J.**, 1975. Effect of ventilation on maximum air temperatures in twelve identical glasshouses. *Acta Horticulturae*, 46: 63-70

**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

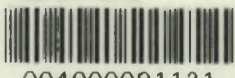
**Κατσούλας, Ν.**, 2002. Επίδραση των παραγόντων του περιβάλλοντος στη διαπνοή τριανταφυλλιάς υπό κάλυψη. *Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας*, 244 σελ.

**Μαυρογιανόπουλος, Γ.**, 2001. Θερμοκήπια. Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα, 602 σελ.

**Ολύμπιος Χ. Μ.**, 2001. Η τεχνική της καλλιέργειας των κηπευτικών στα θερμοκήπια. Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα. 28-29, 110



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000091121