



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ  
ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΟΦΙΑ Γ. ΜΑΥΡΙΔΟΥ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΜΠΟΥΡΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΚΟΖΑΝΗ  
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ, 2005**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Τελειώνοντας τη διπλωματική αυτή εργασία δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν στην πραγματοποίηση του στόχου αυτού.

Καταρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου, κύριο Δημήτρη Μπούρη, ο οποίος δεν μου αρνήθηκε τη βοήθειά του κάθε φορά που τη χρειάστηκα. Οι γνώσεις του πάνω στο αντικείμενο της μετάδοσης θερμότητας και της μηχανικής των ρευστών αποδείχθηκαν ιδιαίτερα χρήσιμες για να αντιμετωπίσω τις δυσκολίες που παρουσιάστηκαν.

Επιπλέον, πρέπει να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον συμφοιτητή μου Λυσσίμαχο Σταματίου για τη σημαντική βοήθειά του και την προθυμία του να αφιερώσει πολύτιμο χρόνο για να ξεπεράσω όσα 'τεχνικά' προβλήματα αντιμετώπισα, τα οποία κάθε άλλο παρά λίγα ήταν.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους όχι μόνο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής, αλλά και για όλα τα χρόνια των σπουδών μου, αφού δίχως αυτούς δεν θα έφτανα στο σημείο που βρίσκομαι σήμερα.

Έχοντας φτάσει μια ανάσα πριν από την απόκτηση του τίτλου του 'Μηχανικού Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων', και έχοντας διδαχθεί από καθηγητές έμπειρους, με βαθιά γνώση της επιστήμης τους, μπορώ να πω πως νιώθω έτοιμη να εργαστώ πάνω στο αντικείμενο των σπουδών μου και να αντιμετωπίσω τις όποιες προκλήσεις πρόκειται να παρουσιαστούν.

Α.Π.Θ. - ΤΜΗΜΑ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ  
Αριθμ. Εισαγ.:...1612.....  
Ημερομηνία:..19/4/06.....

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>Περιεχόμενα</b> .....	i
<b>Εισαγωγή</b> .....	1
<b>1<sup>ο</sup> κεφάλαιο: Χαρακτηρισμός και μορφολογία θερμοκηπίων</b> .....	3
1.1. Τοποθέτηση του θερμοκηπίου στο χώρο.....	3
1.2. Είδη θερμοκηπίων.....	5
1.2.1. Προσαρτημένα θερμοκήπια (Attached greenhouses).....	5
1.2.2. Θερμοκήπια ως ανεξάρτητες κατασκευές (Freestanding greenhouses).....	7
1.3. Σχήματα θερμοκηπίων.....	9
1.4. Υλικά κάλυψης θερμοκηπίων.....	11
<b>2<sup>ο</sup> κεφάλαιο: Ιδιαίτερες απαιτήσεις εσωτερικού κλίματος</b> .....	14
2.1. Θερμοκρασία.....	15
2.1.1. Θερμοκρασία εσωτερικού αέρα.....	15
2.1.2. Θερμοκρασία εδάφους.....	17
2.2. Υγρασία.....	18
2.3. Συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα.....	19
2.4. Φωτισμός.....	21
<b>3<sup>ο</sup> κεφάλαιο: Θέρμανση θερμοκηπίων</b> .....	24
3.1. Είδη καυσίμων και συστήματα θέρμανσης θερμοκηπίων.....	25
3.2. Δίκτυο σωληνώσεων.....	26
3.3. Θέρμανση του αέρα.....	28
3.4. Θέρμανση με ηλεκτρισμό.....	28
3.5. Τοποθέτηση των συστημάτων θέρμανσης στο χώρο του θερμοκηπίου.....	29
3.6. Διαστασιολόγηση συστημάτων θέρμανσης.....	39
3.7. Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή συστήματος θέρμανσης.....	43
3.8. Σημεία προσοχής.....	45
<b>4<sup>ο</sup> κεφάλαιο: Αερισμός θερμοκηπίων</b> .....	46
4.1. Φυσικός αερισμός (Natural ventilation).....	46
4.2. Μηχανικός αερισμός (Forced-air ventilation).....	49

4.3. Άλλες μέθοδοι αερισμού.....	50
4.4. Επιλογή ανεμιστήρων.....	51
4.5. Τρόπος εγκατάστασης για ανεμιστήρες και γρίλιες.....	54
<b>5<sup>ο</sup> κεφάλαιο: Κυκλοφορία – διανομή του αέρα.....</b>	<b>56</b>
5.1. Ανεμιστήρες οριζόντιας ροής (Horizontal air flow fans – HAF).....	57
5.2. Σύστημα πολλαπλών αγωγών (Poly-tube system).....	58
<b>6<sup>ο</sup> κεφάλαιο: Συστήματα αυτόματου ελέγχου.....</b>	<b>62</b>
<b>7<sup>ο</sup> κεφάλαιο: Εξοικονόμηση ενέργειας σε θερμοκήπια.....</b>	<b>65</b>
<b>8<sup>ο</sup> κεφάλαιο: Βασικές αρχές της υπολογιστικής ρευστομηχανικής.....</b>	<b>75</b>
8.1. Εισαγωγή.....	75
8.2. Μαθηματικό υπόβαθρο.....	76
8.3. Μεθοδολογία.....	78
8.4. Ακτινοβολία.....	80
8.4.1. Εκπομπή ακτινοβολίας από σώμα.....	81
8.4.2. Σημαντικά μεγέθη.....	82
8.4.3. Μοντέλα ακτινοβολίας.....	82
8.4.3.1. Το μοντέλο ακτινοβολίας Monte Carlo.....	83
8.5. Τύρβη.....	85
8.5.1. Στατιστικά μοντέλα τύρβης και το πρόβλημα του “κλεισίματος”.....	86
8.5.2. Εξισώσεις Navier-Stokes ολοκληρωμένες κατά Reynolds.....	87
8.5.3. Το μοντέλο τύρβης k-ε.....	88
<b>9<sup>ο</sup> κεφάλαιο: Περιγραφή του προσομοιωτικού προγράμματος CFX.....</b>	<b>91</b>
9.1. Ansys Design Modeler.....	91
9.2. ICEM CFD.....	91
9.3. CFX-Pre.....	92
9.4. CFX-Solver.....	93
9.5. CFX-Post.....	94
<b>10<sup>ο</sup> κεφάλαιο: Παρουσίαση του προβλήματος – σχέδιο προσομοίωσης.....</b>	<b>95</b>

<b>11<sup>ο</sup> κεφάλαιο: Προσομοιώσεις συστημάτων θέρμανσης με χρήση του προγράμματος CFX – παρουσίαση αποτελεσμάτων.....</b>	<b>99</b>
<b>12<sup>ο</sup> κεφάλαιο: Συμπεράσματα.....</b>	<b>127</b>
12.1. Υπολογιστική τεχνική.....	127
12.2. Επίδραση παραμέτρων.....	128
12.2.1. Επιφάνεια σωληνώσεων.....	128
12.2.2. Θερμοκρασία σωληνώσεων.....	129
12.2.3. Διάταξη σωληνώσεων – εναλλακτικές διατάξεις.....	129
12.3. Επιλογή διάταξης.....	130
12.4. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	131
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>133</b>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα θερμοκήπια αποτελούν έναν ευρέως διαδεδομένο τρόπο καλλιέργειας φυτών, ανθέων ή λαχανικών υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Οποιοσδήποτε τύπος των ειδών αυτών μπορεί να αναπτυχθεί και να καλλιεργηθεί μέσα σε ένα θερμοκήπιο, οποιαδήποτε εποχή του έτους, αρκεί να παρέχονται σε κατάλληλες ποσότητες και να ελέγχονται η ηλιακή ακτινοβολία, το νερό, ο φωτισμός, η θερμότητα και ο κρύος αέρας. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός του θερμοκηπίου είναι:

- Να παρέχει ένα ελεγχόμενο και διαρκές (σε όλο το έτος) περιβάλλον ανάπτυξης των καλλιεργειών,
- Να παρατείνει την περίοδο ανάπτυξης των φυτών, ιδιαίτερα αυτών που η ανάπτυξή τους αναστέλλεται σε κρύο καιρό,
- Να βελτιώσει την ποιότητα και την ποσότητα της εκάστοτε καλλιέργειας.

Όπως αναφέρεται από τους Briassoulis et al. (1997), η συνολική επιφάνεια καλυπτόμενη από θερμοκήπια στην Ευρωπαϊκή Ένωση - συμπεριλαμβανομένων των απλών προστατευτικών στεγών - ανερχόταν σε 695 Km<sup>2</sup> το 1990, πολύ μεγάλο ποσό σχετικά με τις ΗΠΑ (60 Km<sup>2</sup>) και την Ιαπωνία (430 Km<sup>2</sup>). Τα τελευταία χρόνια, η τεχνική και οικονομική ανάπτυξη έχει σαν αποτέλεσμα την διαρκή αύξηση της καλυπτόμενης από θερμοκήπια έκτασης στην Ε.Ε.

Στην Ελλάδα, η κατασκευή θερμοκηπίων παρουσιάζει αλματώδη αύξηση τα τελευταία έτη. Τα 2,7 Km<sup>2</sup> γης καλυμμένης από θερμοκήπια το 1967 ανήλθαν σε 37 Km<sup>2</sup> το 1987, και σε 42,5 Km<sup>2</sup> το 1993 - από τα οποία το 92% καλύπτεται από λαχανικά και το 8% από διακοσμητικά φυτά.

Όλα τα παραπάνω καθιστούν σαφή τη σημαντικότητα των θερμοκηπίων και των μεθόδων ελέγχου του εσωτερικού τους κλίματος. Έτσι, η παρούσα εργασία εστιάζει στη μελέτη των συστημάτων θέρμανσης προς δημιουργία βέλτιστων εσωτερικών συνθηκών για την ανάπτυξη των καλλιεργούμενων φυτών στο χώρο του θερμοκηπίου.

Πιο συγκεκριμένα, μετά την αναφορά σε κάποια βασικά χαρακτηριστικά των θερμοκηπίων και στις συνθήκες που διαμορφώνουν το κλίμα στο εσωτερικό τους, εξετάζονται τα κύρια

θερμαντικά συστήματα, ο τρόπος τοποθέτησης αυτών στο χώρο καθώς και τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα καύσιμα. Επίσης, εξετάζονται οι παράγοντες που καθορίζουν την επιλογή ενός συστήματος θέρμανσης και ακολουθεί αναλυτικό παράδειγμα διαστασιολόγησης. Κάποιες γενικές αρχές αερισμού και διανομής του αέρα περιλαμβάνονται επίσης στο κείμενο που ακολουθεί, ενώ προτείνονται και μέθοδοι για εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη λειτουργία των θερμοκηπίων.

Η επίδραση της θέσης τοποθέτησης του θερμαντικού συστήματος στη διαμόρφωση της θερμοκρασιακής κατανομής μέσα στο θερμοκήπιο αποτελεί το υπολογιστικό μέρος της εργασίας αυτής. Βάσει των αρχών της υπολογιστικής ρευστομηχανικής και των μεθόδων που χρησιμοποιεί για την ανάλυση και προσομοίωση των ροών, έγινε προσομοίωση των θερμικών ροών που δημιουργούνται εξαιτίας της λειτουργίας συστήματος θέρμανσης μέσα σε ένα θερμοκήπιο. Όλοι οι υπολογισμοί έγιναν με χρήση του προσομοιωτικού εργαλείου CFX. Σαν επίλογος, γίνεται αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν καθώς και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

## 1.1. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΣΤΟ ΧΩΡΟ

Η θέση τοποθέτησης του θερμοκηπίου στο χώρο επιλέγεται με κριτήριο τη μέγιστη συλλογή ηλιακής ακτινοβολίας (Ross, Envirocept Greenhouses, etc., 2000). Πρώτη και βέλτιστη επιλογή είναι η νότια ή νοτιοανατολική πλευρά ενός κτιρίου ή δέντρων. Το φως του ήλιου είναι επιθυμητό καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, όμως η πρωινή ακτινοβολία της ανατολής είναι προτιμότερη για τα φυτά, καθώς επιτρέπει στη διαδικασία παραγωγής της τροφής τους να ξεκινήσει από νωρίς. Κατά συνέπεια η ανάπτυξή τους μεγιστοποιείται.

Δεύτερη καλύτερη θέση αποτελεί η ανατολή, αφού έτσι το θερμοκήπιο θα λαμβάνει την περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία τους μήνες Νοέμβριο έως Φεβρουάριο, περίοδο κατά την οποία οι ημέρες είναι μικρές και συνήθως συννεφιασμένες ενώ ο ήλιος κινείται χαμηλά στον ορίζοντα.

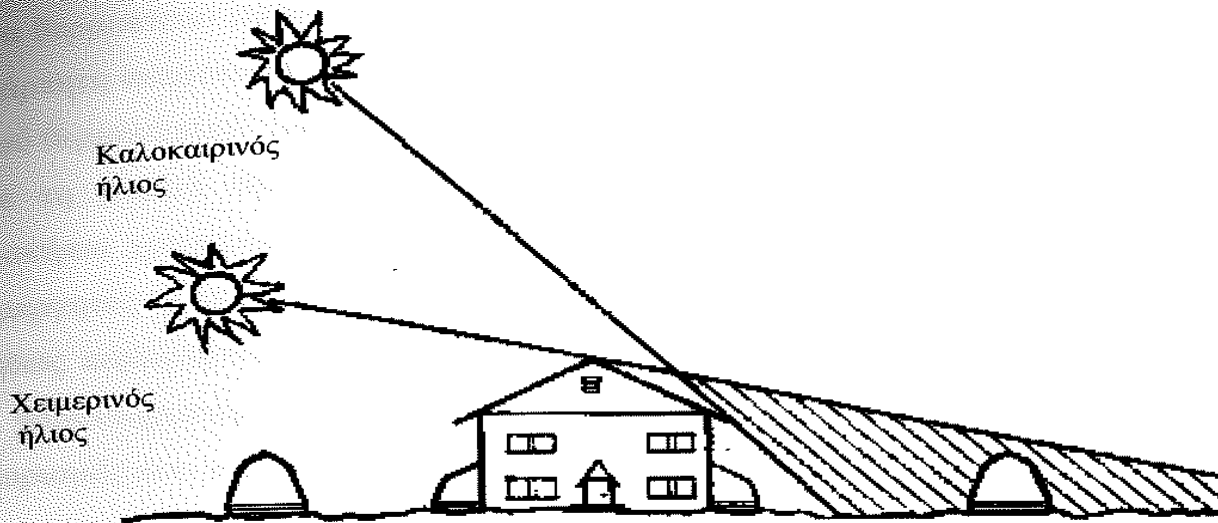
Ακολουθεί η τοποθέτηση νοτιοδυτικά και δυτικά, καθώς έτσι τα φυτά δέχονται ακτινοβολία αργότερα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο δυτικός προσανατολισμός προσφέρει επαρκείς ποσότητες ακτινοβολίας, παράλληλα όμως απαιτεί ικανοποιητικό σκιασμό το καλοκαίρι.

Ο βορράς αποτελεί την λιγότερο επιθυμητή τοποθεσία και επιλέγεται για την καλλιέργεια φυτών που χρειάζονται λίγο φως.

Τα φυλλοβόλα δέντρα, όπως οι βελανιδιές, είναι σε θέση να παρέχουν ικανοποιητικό σκιασμό στο θερμοκήπιο από την έντονη ηλιακή ακτινοβολία που παρατηρείται αργά τα καλοκαιρινά απογεύματα. Παρόλα αυτά, δεν θα πρέπει να το σκιάζουν το πρωί. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των φυλλοβόλων δέντρων είναι ότι επιτρέπουν την μέγιστη έκθεση στον χειμερινό ήλιο καθώς ρίχνουν τα φύλλα τους από το φθινόπωρο κιόλας. Από την άλλη, αειθαλή δέντρα τα οποία διατηρούν το φύλλωμά τους σε όλη τη διάρκεια του έτους δεν πρέπει να τοποθετούνται έτσι ώστε να σκιάζουν το θερμοκήπιο, αφού θα αποτελούσαν εμπόδιο για την μικρότερης έντασης χειμερινή ηλιακή ακτινοβολία. Στόχος είναι η μέγιστη έκθεση στον χειμερινό ήλιο, ιδιαίτερα εάν το θερμοκήπιο χρησιμοποιείται όλο το χρόνο. Κατά την επιλογή της τοποθεσίας είναι σημαντικό να έχει κανείς κατά νου ότι το χειμώνα, ο



ήλιος βρίσκεται χαμηλότερα στη νότια πλευρά, προκαλώντας έτσι μακρές σκιές όταν συναντά κτίρια ή αειθαλή δέντρα (σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 : Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην έκταση της σκιάς που δημιουργείται από 'εμπόδια' το χειμώνα και το καλοκαίρι.

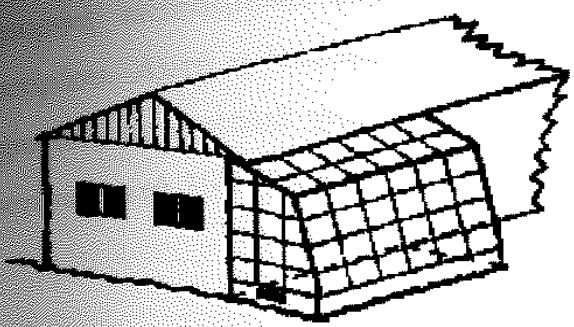
Μία ακόμη απαίτηση που πρέπει να ικανοποιεί η τοποθεσία είναι η ύπαρξη καλού συστήματος διοχέτευσης των υδάτων. Εάν είναι απαραίτητο, το θερμοκήπιο μπορεί να τοποθετηθεί σε υπερυψωμένο έδαφος ώστε το βρόχινο νερό και το νερό της άρδευσης να ρέουν μακριά. Άλλοι παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι οι απαιτήσεις των καλλιεργούμενων φυτών σε ηλιακή ακτινοβολία, η διαθεσιμότητα πηγών ηλεκτρισμού, νερού και θέρμανσης καθώς και η προστασία από το χειμερινό άνεμο. Η πρόσβαση στο χώρο του θερμοκηπίου πρέπει να είναι εύκολη για τους ανθρώπους αλλά και για τον αναγκαίο εξοπλισμό. Τέλος, η ύπαρξη αποθηκευτικού χώρου κοντά στην κατασκευή είναι εξίσου απαραίτητη.

## 1.2 ΕΙΔΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

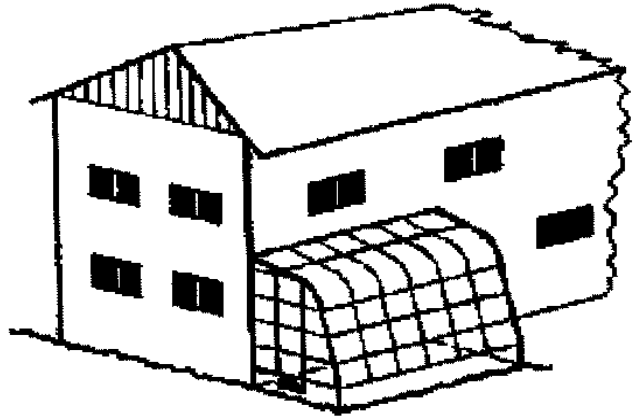
Ένα θερμοκήπιο μπορεί να είναι προσαρτημένο σε κάποιο σπίτι ή αποθήκη, ή να αποτελεί ανεξάρτητη κατασκευή. Το προσαρτημένο θερμοκήπιο μπορεί να παρουσιάζεται με τη μορφή ‘μισού θερμοκηπίου’ (half greenhouse), ως κατασκευή πλήρους μεγέθους (full-size structure) ή με τη μορφή εκτεταμένου παραθύρου (extended window structure). Τα αυτόνομα θερμοκήπια χρησιμοποιούνται κατά βάση για μεγάλης κλίμακας παραγωγή, ενώ οι μικροί καλλιεργητές (εκείνοι δηλαδή που δεν ασχολούνται επαγγελματικά με το θερμοκήπιο), συνήθως περιορίζονται σε μικρότερα, προσαρτημένα θερμοκήπια. Κάθε τύπος έχει τα δικά του χαρακτηριστικά καθώς και διαφορετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Ο διαχωρισμός που ακολουθεί προτείνεται από τον Ross.

### 1.2.1. ΠΡΟΣΑΡΤΗΜΕΝΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ (ATTACHED GREENHOUSES)

**Θερμοκήπιο με επικλινή σκεπή (lean-to).** Ένα τέτοιο θερμοκήπιο προσαρτάται στη μια πλευρά κάποιου άλλου κτιρίου (σχήμα 1.2 και 1.3). Η κατασκευή του προτιμάται σε περιπτώσεις που το εύρος του διαθέσιμου χώρου είναι περιορισμένο (περίπου 2 – 3,6 m), ενώ θεωρείται το φθηνότερο από όλα τα υπόλοιπα είδη. Πλεονεκτεί στο γεγονός ότι βρίσκεται κοντά στην εκάστοτε διαθέσιμη πηγή ηλεκτρισμού, νερού και θερμότητας. Στα μειονεκτήματα του είδους αυτού περιλαμβάνονται κάποιοι περιορισμοί σχετικά με το χώρο, την ηλιακή ακτινοβολία, τον αερισμό και τον έλεγχο της θερμοκρασίας. Το ύψος του τοίχου στήριξης περιορίζει το ενδεχόμενο μέγεθος του θερμοκηπίου. Όσο πιο φαρδύ είναι το θερμοκήπιο, τόσο ψηλότερος τοίχος απαιτείται για τη στήριξή του. Οι δυσκολίες που παρατηρούνται στον θερμοκρασιακό έλεγχο οφείλονται στο γεγονός ότι ο τοίχος που συγκρατεί την κατασκευή του θερμοκηπίου συλλέγει την θερμότητα του ήλιου, ενώ από το διαφανές κάλυμμα της κατασκευής παρατηρούνται θερμικές απώλειες με ταχείς ρυθμούς. Ο προσανατολισμός του θερμοκηπίου θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να του εξασφαλίζει επαρκή έκθεση στον ήλιο. Επιπλέον, πρέπει να μελετώνται οι θέσεις στις οποίες θα βρίσκονται τα παράθυρα και οι πόρτες του κτιρίου στήριξης, ενώ πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη το γεγονός ότι το χιόνι, ο πάγος και η δυνατή βροχή θα γλιστρούν από την οροφή του κτιρίου επάνω στο θερμοκήπιο.

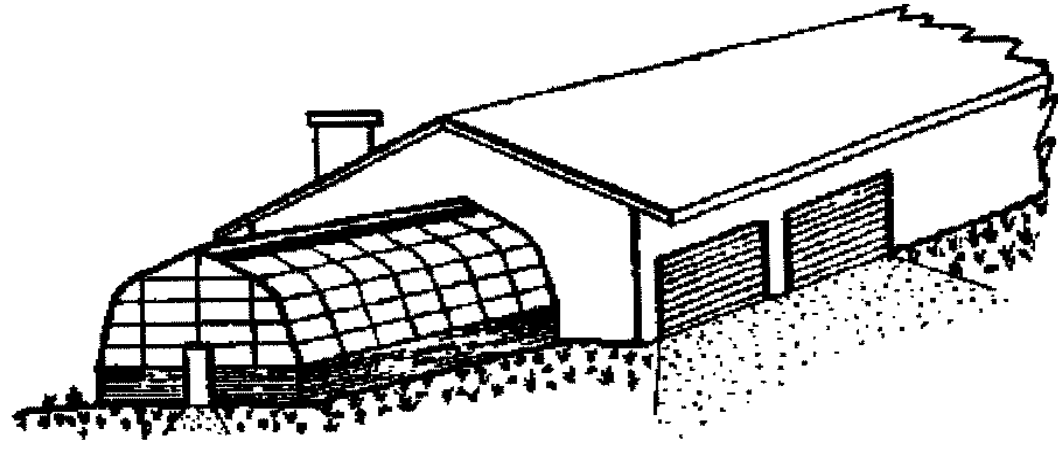


Σχήμα 1.2:  
Επικλινές θερμοκήπιο  
με ευθύ γείσο, προσαρτημένο κάτω  
από τη στέγη μονώροφου κτιρίου.



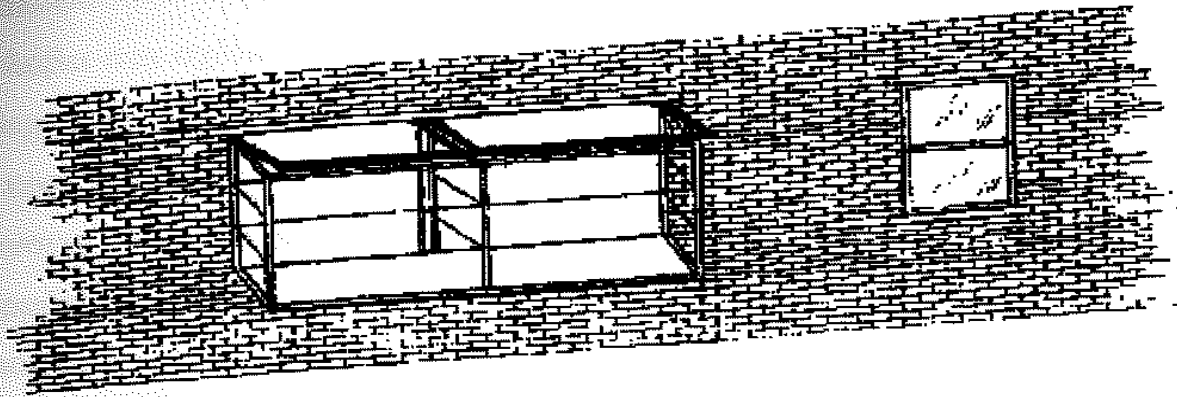
Σχήμα 1.3:  
Επικλινές θερμοκήπιο με καμπύλο  
γείσο, σε διώροφο κτίσμα.

**Τοξωτό θερμοκήπιο (even-span).** Ένα τοξωτό θερμοκήπιο αποτελεί κατασκευή πλήρους μεγέθους που το ένα άκρο της (το οποίο καταλήγει σε αέτωμα) είναι προσαρτημένο σε άλλο κτίριο (σχήμα 1.4). Συνήθως είναι η μεγαλύτερη σε μέγεθος και η πιο ακριβή επιλογή, όμως παρέχει περισσότερο αξιοποιήσιμο χώρο και οι παρεμβάσεις επιμήκυνσης είναι δυνατές. Το σχήμα του, σε σχέση με το επικλινές θερμοκήπιο, είναι ευνοϊκότερο όσον αφορά την κυκλοφορία του αέρα, για τη διατήρηση ομοιόμορφων θερμοκρασιών κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου θέρμανσης. Στο εσωτερικό του μπορούν να χωρέσουν δύο ή τρεις πάγκοι για τις αναπτυσσόμενες καλλιέργειες. Όσον αφορά στο κόστος θέρμανσής του, αυτό είναι αρκετά μεγάλο λόγω του μεγάλου μεγέθους της κατασκευής και της συνολικής εκτεθειμένης επιφάνειας υαλοστασίου.



Σχήμα 1.4: Τοξωτό θερμοκήπιο προσαρτημένο σε γκαράζ.

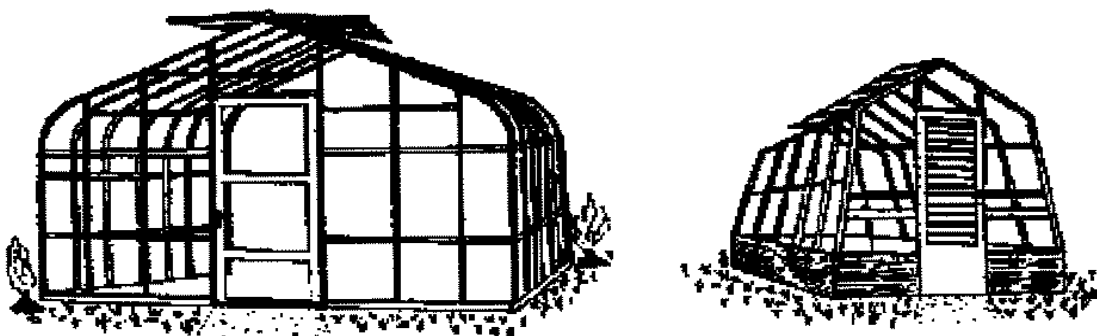
**Θερμοκήπιο τοποθετημένο σε παράθυρο (window-mounted).** Ένα θερμοκήπιο με τη μορφή εκτεταμένου παραθύρου προσαρτάται στην νότια ή την ανατολική πλευρά κάποιου κτίριου. Αυτή η ‘περίφραξη’ από υαλοστάσιο προσφέρεται για την ανάπτυξη λίγων μόνο φυτών, με σχετικά χαμηλό κόστος (σχήμα 1.5). Αυτή η ειδική κατασκευή εξέχει από το κτίριο κατά 30,5 cm περίπου και μπορεί να περιέχει ένα ή δύο ράφια.



Σχήμα 1.5: Θερμοκήπιο με μορφή εκτεταμένου παραθύρου, προσαρτημένο σε κτίριο.

## 1.2.2. ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΩΣ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ (FREESTANDING GREENHOUSES)

Ένα θερμοκήπιο αυτού του είδους αποτελεί αυτόνομο κτίσμα – δεν προσαρτάται σε άλλο κτίριο, συγκεντρώνοντας έτσι περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία, ενώ μπορεί να κατασκευαστεί όσο μεγάλο ή μικρό επιθυμεί κανείς (σχήμα 1.6). Στην περίπτωση αυτή, η ύπαρξη ξεχωριστού συστήματος θέρμανσης καθώς και εγκαταστάσεις τροφοδοσίας ηλεκτρισμού και νερού είναι απαραίτητες για τη λειτουργία του χώρου.



Σχήμα 1.6: Αυτόνομα θερμοκήπια, τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα επιλογής τοποθεσίας και μπορούν να είναι μεγαλύτερα από τα προσαρτημένα.

Κατά κανόνα, τα αυτόνομα (ή τα τοξωτά) θερμοκήπια πλάτους 5–5,5 μέτρων προσφέρουν το χαμηλότερο κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο καλλιεργούμενου εδάφους. Σε αυτά μπορούν να στεγαστούν ένας κεντρικός πάγκος, δύο πλευρικοί, και δύο διάδρομοι. Η αναλογία κόστους προς αξιοποιήσιμο καλλιεργούμενο χώρο είναι ικανοποιητική.

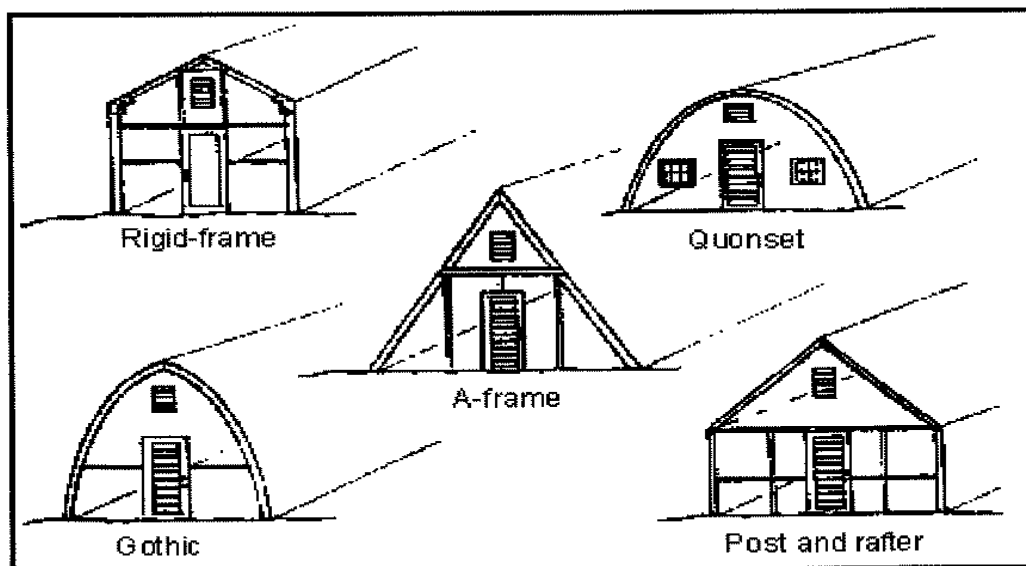
Πριν αποφασίσει κανείς για το είδος του θερμοκηπίου που θα κατασκευάσει θα πρέπει να συμπεριλάβει στα σχέδιά του αρκετό χώρο για πάγκους, αποθηκευτικό χώρο αλλά και χώρο για ενδεχόμενη μελλοντική επέκταση. Ο χειρισμός των μεγάλων θερμοκηπίων είναι ευκολότερος, διότι στις μικρές κατασκευές η θερμοκρασία παρουσιάζει πιο απότομες διακυμάνσεις. Τα μικρά θερμοκήπια έχουν μεγάλη εκτεθειμένη επιφάνεια μέσω της οποίας ρέει θερμότητα (προς το εξωτερικό και το εσωτερικό του χώρου) ενώ ο όγκος του περικλειόμενου αέρα είναι σχετικά μικρός. Αποτέλεσμα αυτών είναι οι απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στο χώρο. Ελάχιστες προτεινόμενες διαστάσεις είναι 1,8 m πλάτος και 3,6 m μήκος, για ανεξάρτητα ή τοξωτά θερμοκήπια.

### 1.3. ΣΧΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Το σχήμα που παρουσιάζει ο σκελετός ενός θερμοκηπίου μπορεί να είναι από πολύ απλό έως αρκετά σύνθετο, ανάλογα με τη φαντασία του κατασκευαστή και τις μηχανικές απαιτήσεις του κτίσματος. Σύμφωνα με τον Ross, τα συχνότερα χρησιμοποιούμενα σχήματα είναι τα εξής (σχήμα 1.7):

**Quonset.** Αποτελεί μια απλή κατασκευή με κυκλικό σχήμα πλαισίου, καλυμμένη συνήθως από πλαστικό υλικό. Το ύψος των πλευρικών τοίχων είναι περιορισμένο, συνεπώς ο αποθηκευτικός χώρος και το ελεύθερο ύψος είναι και αυτά περιορισμένα. Η κατασκευή του είναι σχετικά φθηνή, προσφέρει αντίσταση στους ισχυρούς ανέμους και είναι κατάλληλο για εποχικές καλλιέργειες. Μειονεκτεί στο γεγονός ότι το κάλυμμά του πρέπει να αντικαθίσταται κάθε χρόνο.

**Gothic.** Η κατασκευή του είναι παρόμοια με την προηγούμενη αλλά το σχήμα του είναι γοτθικό. Συνήθως χρησιμοποιούνται ξύλινες ασίδες οι οποίες ενώνονται στην κορυφή της στέγης. Το γοτθικό σχήμα παρέχει μεγαλύτερο ελεύθερο ύψος στην περιοχή των πλευρικών τοίχων, σε σχέση με το Quonset.



Σχήμα 1.7: Τα θερμοκήπια παρουσιάζουν ποικιλία σχημάτων/κατασκευαστικών πλαισίων.

**Rigid-frame.** Σε αυτό το σχήμα συναντώνται κατακόρυφοι πλευρικοί τοίχοι και δοκάρια, χωρίς κολόνες ή άλλα υποστηρίγματα της στέγης. Η τυπική τριγωνική σκεπή και οι τοίχοι παρέχουν άπλετο εσωτερικό χώρο και καλή κυκλοφορία του αέρα. Μια καλή θεμελίωση θεωρείται απαραίτητη για τη στήριξη του πλευρικού βάρους/φορτίου επάνω στους τοίχους.

**Post and rafter.** Ο σκελετός ενός τέτοιου θερμοκηπίου είναι κατασκευασμένος από μια ενσωματωμένη κολόνα και από δοκάρια, και απαιτεί περισσότερο ξύλο ή μέταλλο από τις άλλες κατασκευές. Όπως και το rigid-frame εξασφαλίζει ευρυχωρία και ικανοποιητική κυκλοφορία αέρα.

**A-frame.** Το πλαίσιο αυτού του τύπου μοιάζει με το προηγούμενο, με διαφορά ότι τα δύο πλευρικά δοκάρια συγκρατούνται από μια επιπρόσθετη κατασκευή δοκαριών.

## 1.4. ΥΛΙΚΑ ΚΑΛΥΨΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Το υλικό που θα επιλεγεί για την κάλυψη του θερμοκηπίου έχει μεγάλη επίδραση στη διαμόρφωση του περιβάλλοντος εντός του χώρου. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του καλύμματος επηρεάζουν άμεσα την καλλιέργεια και ανάπτυξη των φυτών.

Το κάλυμμα δρα με δύο βασικές λειτουργίες στην παραγωγή του θερμοκηπίου (Connellan, 2001): καθορίζει την ακτινοβολία που μεταβιβάζεται στα φυτά - την ποσότητα αλλά και την ποιότητά της, ενώ έχει άμεση επίδραση στο θερμικό περιβάλλον (θερμότητα και θερμοκρασία).

Η θερμοκρασία εντός του θερμοκηπίου επηρεάζεται άμεσα από τον αριθμό των καλυμμάτων, ένα ή δύο, καθώς επίσης και από το βαθμό μετάδοσης της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος διαμέσου του υλικού κάλυψης. Στην περίπτωση διπλών στρώσεων υλικού περισσότερη θερμότητα συγκρατείται εντός του θερμοκηπίου και η ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος απορροφάται πιο έντονα από αυτό.

Όπως αναφέρει και η Bellows (2003), τα υλικά κάλυψης, όπως και το σύνολο των κατασκευαστικών μερών του θερμοκηπίου, πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικά για να αντιστέκονται σε φορτία όπως το χιόνι και ο άνεμος. Είναι σημαντικό να επιτρέπουν στο μέγιστο δυνατό ποσό ηλιακής ακτινοβολίας να εισέρχεται στο χώρο και παράλληλα να ελαχιστοποιούν τις ενεργειακές απώλειες. Επιπλέον, η καλή ανάπτυξη των φυτών προϋποθέτει ότι το κάλυμμα είναι διαπερατό (προς το εσωτερικό του θερμοκηπίου) από το φάσμα της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (photosynthetically active radiation - PAR).

Τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα καλύμματα θερμοκηπίων μπορεί να είναι γυαλί, πλαστικές μεμβράνες, γυαλί σε μορφή τινών ή συνδυασμός αυτών. Το είδος του καλύμματος θα πρέπει να ταιριάζει με το πλαίσιο/σκελετό του θερμοκηπίου. Γενικά, το καθαρό γυαλί διαβιβάζει την άμεση ακτινοβολία, ενώ όλα τα άλλα τραχεία υλικά διαχέουν το φως. Αν και τα φυτά μπορούν να αναπτυχθούν και υπό άμεση και υπό έμμεση ακτινοβολία, το άμεσο φως που περνάει από καλύμματα τα οποία στηρίζονται σε διάφορα σημεία τους, δημιουργεί περισσότερες σκιές και ανομοιόμορφη ανάπτυξη των φυτών. Αντιθέτως, η έμμεση



ακτινοβολία ομαλοποιεί τις σκιές που δημιουργούνται από τα στηρίγματα της κατασκευής, με αποτέλεσμα την ομαλότερη ανάπτυξη των φυτών.

Γενικά, κατά την επιλογή του καλύμματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

- Η ποσότητα φωτός που χρειάζεται η καλλιέργεια (ή οι καλλιέργειες),
- Η διάρκεια ζωής του καλύμματος,
- Το κόστος του καλύμματος καθώς και η συντήρηση που απαιτεί.

**Γυαλί.** (Rafferty) Το γυαλί αποτελεί παγκοσμίως το παραδοσιακό υλικό κάλυψης θερμοκηπίων. Η κατασκευή γυάλινων θερμοκηπίων είναι η περισσότερο δαπανηρή σε σχέση με τις κατασκευές από άλλα υλικά. Αυτό οφείλεται στο αυξημένο κόστος του γυαλιού σε συνδυασμό με την απαίτηση για καλή/στιβαρή κατασκευή σκελετού για τη στήριξή του.

Ένα από τα μειονεκτήματα των γυάλινων καλυμμάτων είναι η χαμηλή ενεργειακή απόδοση που παρουσιάζουν. Το κόστος θέρμανσης είναι υψηλό λόγω ανεπαρκούς μονωτικής προστασίας του μονού στρώματος γυαλιού αλλά και λόγω διείσδυσης κρύου αέρα από τυχόν ρωγμές στο υλικό. Αυτό το θέμα των αυξημένων απωλειών θερμότητας τα τελευταία χρόνια αντιμετωπίζεται με την εγκατάσταση διπλού στρώματος γυαλιού. Όμως, το κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης και η αρνητική επίδρασή της στη μεταβίβαση του φωτός καθιστούν κυρίαρχη τη χρήση μονού γυάλινου στρώματος.

**Μεμβράνες πλαστικού.** (Rafferty, Ross) Τα καλύμματα πλαστικού αποτελούν νεότερη τεχνολογία στην κατασκευή θερμοκηπίων. Χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο, μια και το κόστος τους ανά τετραγωνικό μέτρο είναι συνήθως το 1/6 – 1/10 του κόστους του γυαλιού, ενώ κάτω από αυτά μπορούν να αναπτυχθούν φυτά εξίσου καλά με αυτά που καλλιεργούνται κάτω από γυάλινο κάλυμμα. Διατίθενται σε διάφορους βαθμούς ποιότητας και σε διάφορα υλικά, όπως πολυαιθυλένιο (PE), πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), συμπολυμερή ή άλλα. Τα μεγάλα εμπορικά θερμοκήπια χρησιμοποιούν κάλυμμα από PE με συστατικά ανάσχεσης της υπερϊώδους ακτινοβολίας μέσα στη μάζα του.

Οι απαιτήσεις συντήρησης ενός τέτοιου καλύμματος είναι αυξημένες, δεδομένου ότι χρειάζεται αντικατάσταση περίπου κάθε τρία χρόνια ή λιγότερο, ανάλογα με την ποιότητα του υλικού.

Στα θερμοκήπια χρησιμοποιούνται συνήθως δύο στρώματα πλαστικού, χωριζόμενα από κενό με αέρα. Το κενό αυτό διατηρείται από την ύπαρξη μικρού ανεμιστήρα ο οποίος ασκεί υποπίεση στον όγκο μεταξύ των δύο στρωμάτων. Έτσι, επιτυγχάνεται μια πολύ αποδοτική ενεργειακά προσέγγιση στην κατασκευή θερμοκηπίων. Οι δύο στρώσεις όχι μόνο μειώνουν τις θερμικές απώλειες κατά ποσοστό 30-40%, αλλά ελαχιστοποιούν και τη διείσδυση κρύου αέρα (δεν παρατηρούνται ρωγμές, όπως σε άλλα υλικά). Αν και το πλαστικό χάνει περισσότερη θερμότητα λόγω ακτινοβολίας σε σχέση με το γυαλί, το τελικό αποτέλεσμα είναι μείωση των θερμαντικών απαιτήσεων συγκριτικά με τις γυάλινες κατασκευές. Δυστυχώς, η υψηλή ενεργειακή απόδοση των πλαστικών καλυμμάτων επισκιάζεται από τη μειωμένη μεταβίβαση φωτός στο εσωτερικό του χώρου (κάθε στρώμα υλικού μειώνει το φως κατά 10% περίπου). Συνεπώς, φυτά των οποίων η ανάπτυξη προϋποθέτει υψηλή ένταση φωτός, δεν καλλιεργούνται αποτελεσματικά σε τέτοιου είδους κατασκευές.

**Γυαλί υπό μορφή ινών (fiberglass).** (Rafferty, Ross) Τα θερμοκήπια από fiberglass κατασκευάζονται παρόμοια με αυτά από γυαλί και παρουσιάζουν παρόμοιες απώλειες θερμότητας, όμως εξαιτίας της ελαφρότητας του υλικού απαιτούν λιγότερη στήριξη.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η τοποθέτηση υλικού καλής ποιότητας, γιατί σε αντίθετη περίπτωση προκαλείται αποχρωματισμός του και μείωση της διείσδυσης φωτός μέσα στο χώρο. Για την κατασκευή των θερμοκηπίων συνίσταται η χρήση μόνο διαφανούς ή ημιδιαφανούς fiberglass. Η διαπερατότητα στο φως είναι αρχικά όμοια με αυτήν του γυαλιού, όμως μπορεί να μειωθεί με το χρόνο αν το υλικό δεν είναι καλής ποιότητας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: ΙΔΙΑΙΤΕΡΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ

Η διαφοροποίηση στα είδη των καλλιεργούμενων φυτών μέσα σε ένα θερμοκήπιο απαιτεί διαφορετικές συνθήκες θέρμανσης, φωτισμού και υγρασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μέσα στο ίδιο θερμοκήπιο, να δημιουργούνται διαφορετικά περιβάλλοντα, ανάλογα με την ποικιλία του κάθε φυτού. Τα μικρά περιβάλλοντα (ή κλίματα) που διαμορφώνονται ονομάζονται *μικροκλίματα*. (Garden Moose, 2004)

Κάθε είδος φυτού για να ευδοκιμήσει και να αναπτυχθεί κατά το βέλτιστο δυνατό χρειάζεται συγκεκριμένα ποσά θερμότητας και φωτός. Πριν φυτευτούν τα φυτά και κατά την επιλογή του κατάλληλου μικροκλίματος για το καθένα από αυτά, είναι χρήσιμο να εξετασθούν τα παρακάτω:

- Ποιο μέρος του θερμοκηπίου είναι το πιο ηλιόλουστο ή το βλέπει ο ήλιος το μεγαλύτερο διάστημα της ημέρας.
- Ποιο είναι το περισσότερο σκιαζόμενο τμήμα του θερμοκηπίου.
- Το πάνω μέρος του θερμοκηπίου είναι θερμότερο απ' ό τι το κατώτερο.
- Όσο πιο κοντά στα πλευρικά τοιχώματα ή στην οροφή τοποθετηθούν τα φυτά τόσο περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία θα δέχονται.
- Εάν στο χώρο λειτουργεί σύστημα θέρμανσης, τα φυτά που θα βρίσκονται κοντά σε αυτό θα δέχονται μεγάλα ποσά θερμότητας κατά τους χειμερινούς μήνες.
- Τα φυτά που τοποθετούνται κοντά σε αεραγωγούς ή ανεμιστήρες πρέπει να είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στον αέρα.

Γενικά, το κλίμα εντός του θερμοκηπίου μπορεί να παρασταθεί με την εξής σχέση εξάρτησης (Popovski, 2005):

$$GC = f(I, T_a, CO_2, H_2O) \quad (2.1)$$

όπου,

GC = greenhouse climate

I = ένταση φωτός (W/m<sup>2</sup>, lumens)

T<sub>a</sub> = θερμοκρασία φυλλώματος (°C)

CO<sub>2</sub> = συγκέντρωση CO<sub>2</sub> του αέρα γύρω από τα φυτά (%), και

H<sub>2</sub>O = εσωτερική υγρασία αέρα και υγρασία εδάφους (%).

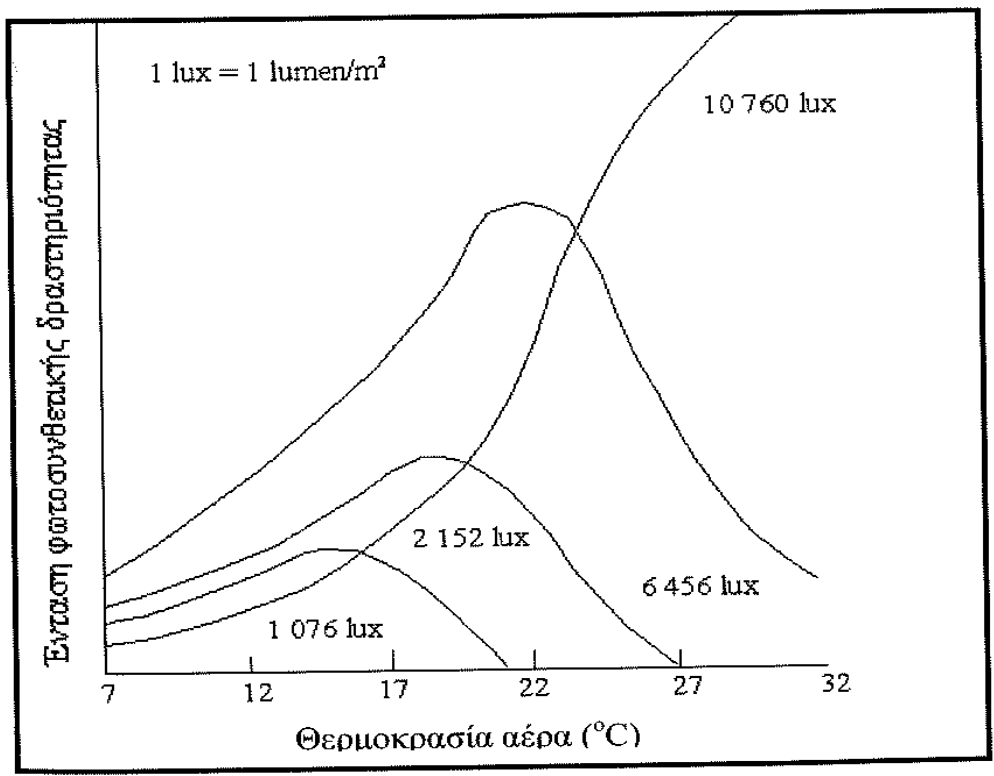
## 2.1. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Σύμφωνα με τον Poronski (2005), οι θερμοκρασίες οι οποίες πρέπει να ελέγχονται κατά τη λειτουργία ενός θερμοκηπίου, είναι: η θερμοκρασία αέρα που απαιτείται μέσα στο χώρο, η θερμοκρασία του εδάφους και η ελάχιστη εξωτερική θερμοκρασία που παρατηρείται στην περιοχή.

### 2.1.1. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΑΕΡΑ

Η θερμοκρασία του αέρα επηρεάζει την ενεργειακή ισορροπία των φυτών μέσω της μετάδοσης θερμότητας με αγωγή στο φύλλωμα αλλά και στο υπόλοιπο 'σώμα' τους. Ανάλογα με την κίνηση του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο, η θερμοκρασία αυτή είναι πάνω-κάτω κοντά στη θερμοκρασία των φυτών.

Το ευνοϊκότερο επίπεδο θερμοκρασίας αέρα μέσα στο χώρο εξαρτάται από τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών, η οποία επηρεάζεται από την ένταση της προσπιπόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (σχήμα 2.1) (π.χ. για κάθε επίπεδο έντασης φωτός υπάρχει μία βέλτιστη θερμοκρασία αέρα [ή φύλλων] η οποία επιτρέπει μέγιστη φωτοσυνθετική δραστηριότητα).



Σχήμα 2.1: Η φωτοσυνθετική δραστηριότητα υπό διαφορετικές συνθήκες φωτός και θερμοκρασίας αέρα (καλλιέργεια ντομάτας). (Kamenev, 1975)

Λόγω μεταβλητότητας του κλίματος εντός του θερμοκηπίου (αλληλεξάρτηση της έντασης της ακτινοβολίας και άλλων παραμέτρων) δεν είναι δυνατό να καθοριστεί μία 'ιδανική' θερμοκρασία αέρα. Όσα αποτελέσματα έχουν προκύψει από έρευνες για τον εντοπισμό ιδανικών μοντέλων θερμοκρασίας δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σαν εργαλείο καθορισμού ενός βέλτιστου κλίματος (πίνακας 2.1), αλλά σαν βάση για προσανατολισμό και επιλογή τιμών για τον υπολογισμό των θερμαντικών απαιτήσεων και καταναλώσεων ενός θερμοκηπίου.

Πίνακας 2.1: Πρότυπα ευνοϊκών θερμοκρασιών αέρα και υγρασίας για καλλιέργεια λαχανικών σε θερμοκήπια. (Kamerev, 1975)

		Εσωτερική θερμοκρασία αέρα (°C)						
		Ανάπτυξη		Συγκομιδή			Νεαρά	Σχετική
Λαχανικά	Φύτρωμα	Ημέρα*	Ημέρα*	Νύχτα	Ημέρα	Νύχτα	φυτά	υγρασία
								αέρα
								(%)
αγγούρι	17-18	22-25	27-30	17-18	25-30	18-20	13-15	85-95
πεπόνι, καρπούζι	17-18	22-25	27-30	17-18	25-30	18-20	13-15	65-75
ντομάτα, μήλο, πιπέρι, πάπρικα, φασόλι	10-12	20-22	25-27	10-13	22-28	15-17	8-10	50-60
μαρούλι, σέλινο, σκόρδο	8-9	17-18	20-26	8-12				70-80
σπανάκι, μαϊντανός	8-9	15-16	20-21	8-9				70-80
ραπανάκι, λάχανο	6-7	12-13	16-18	7-8				65-75

\*θερμοκρασία για διαφορετικές ποικιλίες

Κατά γενικό κανόνα η θερμοκρασία δεν θα πρέπει να είναι υψηλότερη από την απολύτως απαραίτητη. Εάν καλλιεργούνται φυτά που χρειάζονται υψηλότερη θερμοκρασία από αυτήν που παρέχεται στο χώρο, η εταιρεία EnviroCept Greenhouses, etc. (2000) προτείνει τη χρήση κάποιου καλύμματος ή ενός θερμού πάγκου με καλώδια ελεγχόμενα από θερμοστάτη, για τη θέρμανση του αέρα γύρω από τα φυτά αυτά.

### 2.1.2. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η θερμοκρασία του εδάφους είναι ένας ακόμη παράγοντας που επηρεάζει τα καλλιεργούμενα φυτά. Η μετάδοση της θερμότητας λαμβάνει χώρα με αγωγή μέσα στη δομή του εδάφους (χώμα), αλλά και ανάμεσα στις ρίζες των φυτών και τη ροή νερού γύρω από αυτά.

Μετά από μεγάλο αριθμό πειραμάτων και ερευνών, ο Poronski (2005) αναφέρει πως έχουν αποδειχθεί τα εξής:

- Η κατάλληλη θερμοκρασία εδάφους εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης των φυτών (πίνακας 2.2),
- Η κατάλληλη θερμοκρασία εδάφους εξαρτάται από την ένταση της διαθέσιμης ακτινοβολίας, και
- Η θερμοκρασία του εδάφους επηρεάζει την τιμή της κατάλληλης θερμοκρασίας αέρα (π.χ. υψηλή θερμοκρασία εδάφους απαιτεί χαμηλή θερμοκρασία αέρα, και αντίστροφα).

Πίνακας 2.2: Κατάλληλες θερμοκρασίες εδάφους για την καλλιέργεια ντομάτας.

Φάση ανάπτυξης	Υψηλή ένταση φωτός	
	Χαμηλή ένταση φωτός (°C)	(°C)
ανάπτυξη πριν το άνθισμα	13-14	17-20
άνθισμα	15-16	19-22
συγκομιδή	20-22	23-25

Πρέπει να τονιστεί ότι όσο αποκλίνει κανείς από τις κατάλληλες θερμοκρασίες, τόσο περισσότερο επηρεάζεται η ανάπτυξη των ριζών και κατά συνέπεια η παραγωγική ικανότητα και η ποιότητα των προϊόντων. Χαμηλότερες από τις ιδανικές θερμοκρασίες οδηγούν σε μείωση της παραγωγής, ενώ υψηλότερες ξηραίνουν τις ρίζες, επηρεάζοντας και πάλι αρνητικά την παραγόμενη ποσότητα και ποιότητα.

Συμπερασματικά, γνωρίζοντας κανείς τη φύση και τις απαιτήσεις των φυτών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την θερμική κατανάλωση του θερμοκηπίου, με την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ των θερμοκρασιών αέρα και εδάφους, καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιέργειας.

## 2.2. ΥΓΡΑΣΙΑ

Η αύξηση της υγρασίας μπορεί να αποτελέσει σημαντικό πρόβλημα σε ένα θερμοκήπιο. Η υγρασία εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της εξάτμισης του νερού των 'πλημμυρισμένων' περιοχών, και της αναπνοής των καλλιεργούμενων φυτών (Buschermohle). Συνήθως τα προβλήματα υγρασίας δεν παρουσιάζονται κατά τις περιόδους που χρησιμοποιείται το σύστημα αερισμού για τον έλεγχο υπερβολικής αύξησης της θερμοκρασίας. Εντούτοις, τις πιο ψυχρές περιόδους, όταν δεν χρειάζεται αερισμός για τον έλεγχο της θερμοκρασίας, υπάρχει κίνδυνος η υγρασία να αυξηθεί σταδιακά και να φτάσει σε υψηλά επίπεδα. Το πιο εμφανές αποτέλεσμα από μια τέτοια αύξηση είναι η συμπύκνωση των υδρατμών στις εσωτερικές επιφάνειες της κατασκευής (σχήμα 2.2). Εν συνεχεία, οι συμπυκνωμένοι υδρατμοί στάζουν από την οροφή, από την κάτω επιφάνεια των σωληνώσεων αλλά και από τις διατάξεις στήριξης και 'πλημμυρίζουν' τους σπόρους, ενώ η υγρασία στο φύλλωμα των φυτών αυξάνει το ενδεχόμενο εμφάνισης ασθενειών.



Σχήμα 2.2: Προβλήματα συμπύκνωσης λόγω υψηλών επιπέδων υγρασίας.

Για όλους αυτούς τους λόγους ο έλεγχος του επιπέδου υγρασίας μέσα στο θερμοκήπιο είναι καθοριστικός για τη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών. Οι απλούστερες μέθοδοι ελέγχου είναι ο περιορισμός του χώρου με έναν μικρό ανεμιστήρα ο οποίος θα λειτουργεί συνεχώς, με έναν μεγαλύτερο που θα σταματάει κατά διαστήματα με χρονοδιακόπτη, ή ανοίγοντας τα πετάσματα από την πλευρά του πνέοντος ανέμου κατά 2,5 cm ή 5 cm, ακόμη και όταν η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από την επιθυμητή θερμοκρασία ανάπτυξης των φυτών στο εσωτερικό του χώρου. Κατά κανόνα, η σχετική υγρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος είναι χαμηλότερη από αυτήν του θερμοκηπίου. Κατά τη θέρμανση του αέρα μέχρι να επιτευχθεί η κατάλληλη θερμοκρασία για την καλλιέργεια παρατηρούνται φαινόμενα ξήρανσης τα οποία μειώνουν ακόμη περισσότερο τη σχετική υγρασία του χώρου. Τα οφέλη που προκύπτουν από τη διατήρηση της συμπύκνωσης στο ελάχιστο εφικτό επίπεδο και τη συντήρηση των φυτών σε στεγνή κατάσταση υπερέρχουν κατά πολύ του κόστους θέρμανσης του αέρα. Όσο πιο στεγνό και θερμό παραμένει το θερμοκήπιο, τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα εμφάνισης ασθενειών στα φυτά.

### 2.3. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Όπως αναφέρει ο Ross, το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και το φως θεωρούνται απαραίτητα (και αλληλένδετα) στοιχεία για την ανάπτυξη των φυτών. Με την ανατολή του ήλιου το πρωί, τα φυτά δέχονται ηλιακή ακτινοβολία ώστε να ξεκινήσουν τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Έτσι, το επίπεδο του  $\text{CO}_2$  μέσα στο θερμοκήπιο μειώνεται, καθώς χρησιμοποιείται από τα φυτά. Γενικά, τα στεγανά θερμοκήπια διαθέτουν πολύ μικρές ποσότητες  $\text{CO}_2$  για να αξιοποιήσουν αποδοτικά το διαθέσιμο φως. Επομένως, όταν οι αεραγωγοί είναι κλειστοί, τα φυτά αδυνατούν να αναπτυχθούν στο βέλτιστο δυνατό. Όταν λοιπόν το σύστημα αερισμού λειτουργεί, είναι σε θέση να αναπληρώσει το  $\text{CO}_2$  που καταναλώθηκε.

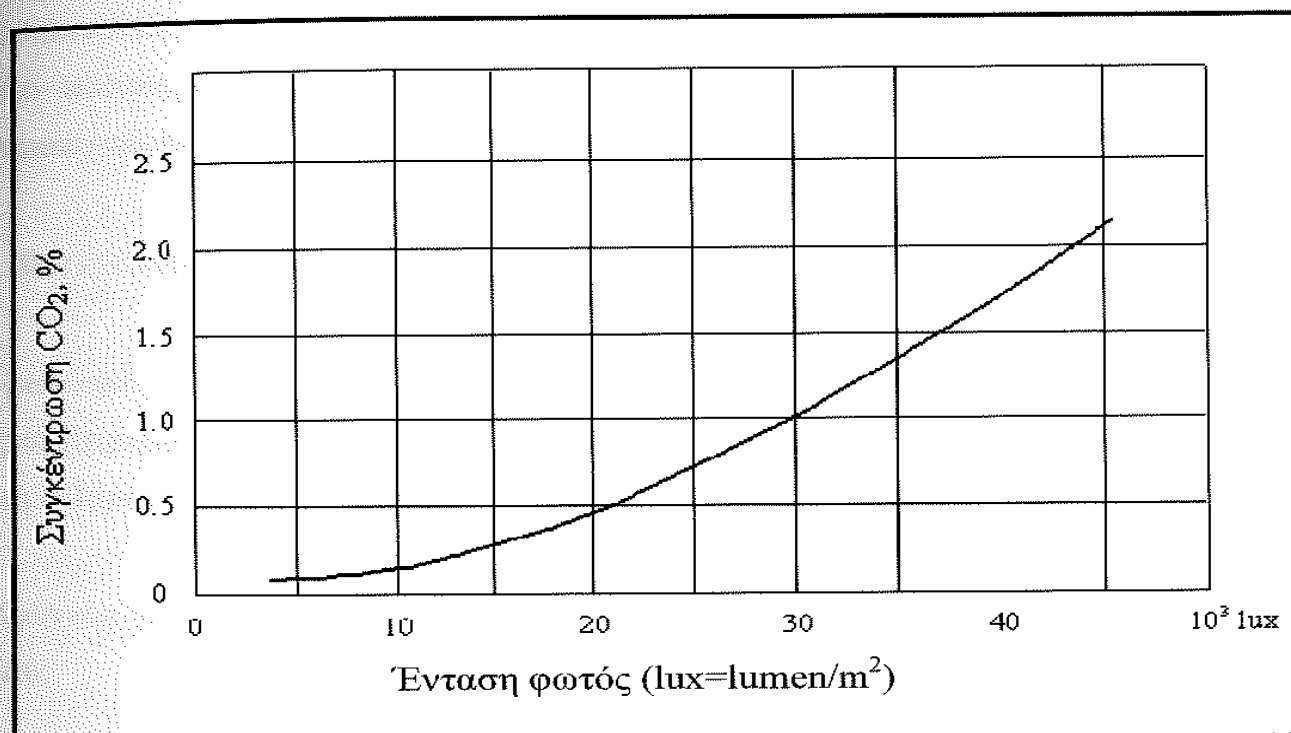
Ο αέρας περιέχει 300 ppm  $\text{CO}_2$  ενώ τα θερμοκήπια μπορεί να χρειάζονται συγκεντρώσεις έως και πάνω από 2000 ppm (Buffington et al.). Το επιπλέον απαιτούμενο ποσό  $\text{CO}_2$  πρέπει να παρέχεται από κάποιο εμπορικό σύστημα και όχι από καύση. Επίσης, το  $\text{CO}_2$  που παράγεται από την καύση φυσικού αερίου ή πετρελαίου στις μονάδες θέρμανσης του χώρου δεν μπορεί να αξιοποιηθεί από τα φυτά, καθώς το σύστημα λειτουργεί κατά κύριο λόγο τη νύχτα. Η συσσώρευση και κατά συνέπεια οι υψηλές συγκεντρώσεις  $\text{CO}_2$  αλλά και υδρατμών (ως παραπροϊόν του συστήματος καύσης) κατά τη διάρκεια της νύχτας στον κλειστό χώρο



του θερμοκηπίου, σε συνδυασμό με τις μικρές ποσότητες οξυγόνου (το οποίο καταναλώνεται για την καύση) θεωρούνται ανεπιθύμητες διότι αποτελούν εμπόδιο στον έλεγχο των ασθενειών των φυτών.

Μακροχρόνιες έρευνες έχουν αποδείξει ότι (Poronski, 2005):

- Για σταθερές θερμοκρασιακές συνθήκες μέσα σε ένα θερμοκήπιο, η συγκέντρωση CO<sub>2</sub> έχει άμεση επίδραση στην ένταση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτών, και
- Η βέλτιστη συγκέντρωση CO<sub>2</sub> στο χώρο του θερμοκηπίου εξαρτάται άμεσα από την ένταση της προσπιπτόμενης ηλιακής ακτινοβολίας (σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Εξάρτηση της βέλτιστης συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> από την ένταση του φωτός, σε καλλιεργούμενη περιοχή θερμοκηπίου. (Denis, et al., 1978)

Επειδή το CO<sub>2</sub> και το φως συμπληρώνουν το ένα το άλλο, ο ηλεκτρικός φωτισμός σε συνδυασμό με την έγχυση CO<sub>2</sub> χρησιμοποιούνται για την αύξηση της καλλιέργειας και τη βελτίωση της παραγωγής. Κάποιες μορφές CO<sub>2</sub> για τον εμπλουτισμό της ατμόσφαιρας του θερμοκηπίου σύμφωνα με την εταιρεία EnviroCept Greenhouses, etc (2000), είναι:

- Αέριο από φιάλες, το οποίο έχει υγροποιηθεί μετά από διαδικασία καύσης.
- Στεγνός πάγος (dry ice), ο οποίος μπορεί να τοποθετηθεί μέσα στο θερμοκήπιο ή σε θάλαμο ανάπτυξης σε μορφή κύβων, ή μέσα σε έναν μετατροπέα (δοχείο υπό πίεση) όπου μένει αποθηκευμένος μέχρι να χρησιμοποιηθεί.
- Καιγόμενα αέρια καύσιμα που δεν περιέχουν θείο, όπως φυσικό αέριο, αέριο LP ή υγρό ανθρακούχο καύσιμο όπως η κηροζίνη.

Τα εμπορικά θερμοκήπια χρησιμοποιούν συνήθως τέτοιες μεθόδους.

Στο εμπόριο διατίθενται διάφορα είδη εξοπλισμών με αισθητήρες ενεργοποιούμενους από υπέρυθρη ακτινοβολία, για μέτρηση και έλεγχο των επιπέδων CO<sub>2</sub> από 0 έως 2000 ppm ώστε να καλύπτονται οι εκάστοτε απαιτήσεις. Μειονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι το μεγάλο κόστος τους και η ανάγκη για συχνή βαθμονόμηση. Αντί αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλα, πιο οικονομικά μετρητικά εργαλεία.

## 2.4. ΦΩΤΙΣΜΟΣ

Ο φωτισμός είναι η πιο σπουδαία παράμετρος για τη ζωή και την ανάπτυξη των φυτών. Όλες οι διεργασίες του φυτού μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο υπό την παρουσία και τη θετική επίδραση του φωτός.

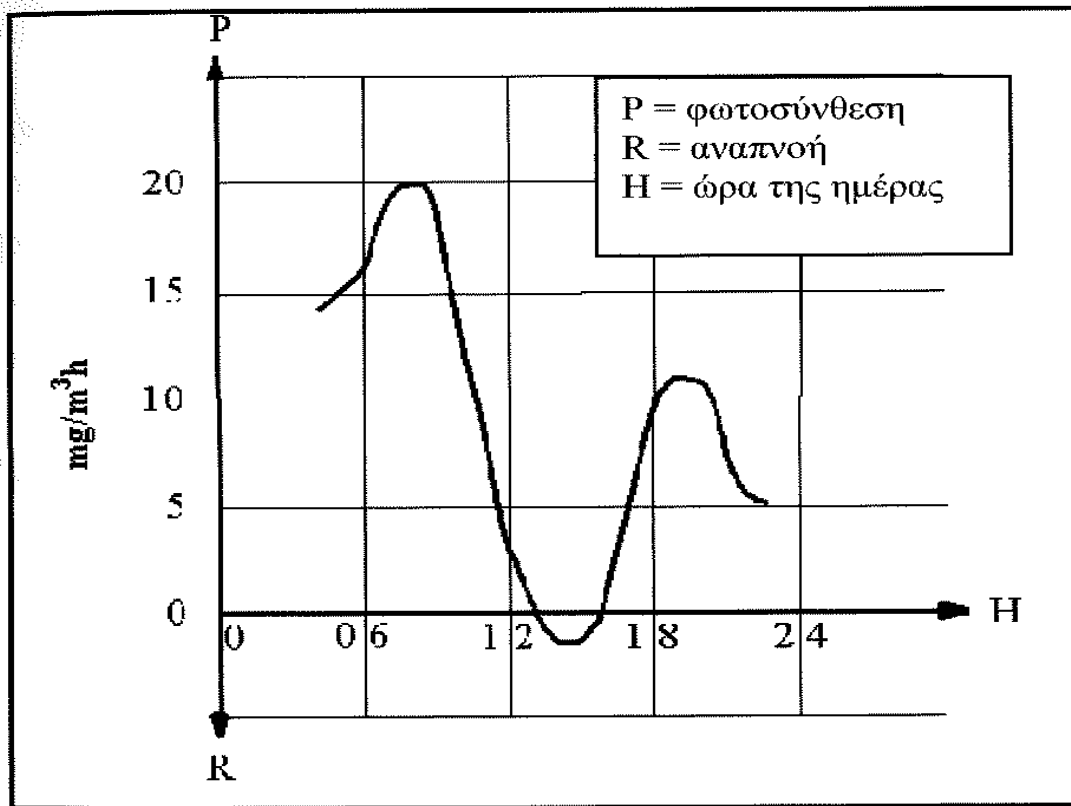
Μιλώντας για φυσικό φωτισμό (δηλαδή ηλιακή ακτινοβολία), ο Poronvski (2005) διακρίνει μεταξύ:

- ηλιακής ακτινοβολίας με συγκεκριμένη επίδραση στις διεργασίες των φυτών, και
- ηλιακής ακτινοβολίας με επίδραση στα φυτά σχετιζόμενη με την ενέργεια, με άμεσο τρόπο ή έμμεσο μέσω επίδρασης στο περιβάλλον.

Με τη χρήση διάφορων επιστημονικών μεθόδων και ερευνών στην φωτοσύνθεση, φωτομορφογένεση και σε άλλες διαδικασίες των φυτών βρέθηκε ότι μόνο το μέρος του συνολικού ηλιακού φάσματος μεταξύ 400 και 700 nm επηρεάζει καθοριστικά την πρόοδο των φυτών. Αυτό καθορίζει και την ποιότητα των διαφανών υλικών κάλυψης των

θερμοκηπίων, τα οποία πρέπει να παρουσιάζουν τη μέγιστη δυνατή διαπερατότητα σε αυτά τα μήκη κύματος.

Η ένταση εκείνου του τμήματος του ηλιακού φάσματος που σχετίζεται με την ενέργεια (π.χ. του υπέρυθρου), προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια στα φυτά. Ανάλογα με την έντασή του οι διεργασίες των φυτών είναι περισσότερο ή λιγότερο δραστικές (σχήμα 2.4). Πάνω από κάποιο χαρακτηριστικό επίπεδο (το οποίο διαφέρει από είδος σε είδος φυτών) αυξάνεται η δραστηριότητα των διεργασιών. Μετά από ένα σημείο όμως, η δραστηριότητα αρχίζει και μειώνεται. Κάτω και πάνω από αυτές τις χαρακτηριστικές τιμές έντασης οι δραστηριότητες των φυτών σταματούν. Κάτω επειδή δεν υπάρχει αρκετό φως για να ενεργοποιηθούν και πάνω επειδή το φυτό έχει υπερθερμανθεί και έχει ξεκινήσει τη διαδικασία δροσισμού του για να προστατευτεί.



Σχήμα 2.4: Αλλαγές στη φωτοσυνθετική δραστηριότητα κατά τη διάρκεια μιας καλοκαιρινής μέρας. (Kamenev, 1975)

Για να βελτιωθούν οι συνθήκες φωτισμού, χρησιμοποιείται τεχνητό φως όταν το φυσικό δεν επαρκεί. Οι ανάγκες των φυτών για φωτισμό διαφοροποιούνται από ποικιλία σε ποικιλία: υπάρχουν κάποια που ευδοκμούν υπό το φως του ήλιου ενώ άλλα παρουσιάζουν καλύτερη

ανάπτυξη στη σκιά. Κατά κανόνα, τα περισσότερα φυτά μπορούν να καλλιεργηθούν είτε στο φυσικό είτε στο τεχνητό φως. Το τεχνητό φως χρησιμοποιείται για:

- Να παρέχει αυξημένη ένταση φωτισμού όταν επιθυμείται μεγάλη ανάπτυξη της καλλιέργειας.
- Να παρατείνει τις ώρες φυσικού φωτός ώστε να διατηρηθούν τα φυτά υπό συνθήκες πολύωρης ημέρας.

Ο σωστός φωτισμός λοιπόν όχι μόνο βοηθά τα φυτά να αναπτυχθούν αλλά δίνει στον καλλιεργητή τη δυνατότητα να εργασθεί στο χώρο του θερμοκηπίου ακόμη και κατά τις νυχτερινές ώρες, παρατείνοντας έτσι την περίοδο καλλιέργειας. Οι τρεις βασικοί τύποι λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται συνήθως για φωτισμό των θερμοκηπίων, είναι οι παρακάτω (EnviroCept Greenhouses, etc., 2000):

- **Λαμπτήρες φθορισμού.** Οι λαμπτήρες αυτοί έχουν το πλεονέκτημα της μεγάλης ικανότητας φωτισμού με μικρή εκπομπή θερμότητας. Είναι οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενοι για συμπληρωματικό φωτισμό. Διατίθενται σε ποικιλία χρωμάτων με περισσότερο συνηθισμένους τους λαμπτήρες ψυχρού λευκού χρώματος. Επίσης, χρησιμοποιούνται οι λυχνίες φωτισμού υψηλής έντασης οι οποίες απαιτούν μεγαλύτερη ισχύ.
- **Λαμπτήρες πυρακτώσεως.** Η ισχύς τους κυμαίνεται από 60 ως 500 Watt. Χρησιμοποιούνται για να παρατείνουν τη διάρκεια την ημέρας στα θερμοκήπια.
- **Λαμπτήρες εκκενώσεως μεγάλης έντασης (High Intensity Discharge - HID).** Αυτός ο τύπος λαμπτήρων παρουσιάζει μεγάλη διάρκεια ζωής, η οποία φθάνει τις 5000 ώρες ή και περισσότερο. Περαιτέρω βελτιώσεις στην ένταση του παραγόμενου φωτός είναι δυνατόν να προκύψουν πχ. με την προσθήκη νατρίου και μεταλλικών ενώσεων αλογόνου.

Η ένταση του αποδιδόμενου φωτός μπορεί να μετρηθεί με σχετικά οικονομικούς μετρητές φωτός οι οποίοι διατίθενται στην αγορά. Οι πιο συνηθισμένοι από αυτούς βαθμονομούνται σε τετραγωνικά κηρία ή lux (1 lux = 10,76 τετραγωνικά κηρία). Η μέτρηση πρέπει να γίνεται στο επίπεδο ανάπτυξης των φυτών. Για κάθε καλλιεργούμενη ποικιλία η βέλτιστη ποσότητα φωτός που χρειάζεται για ανάπτυξη ή πολλαπλασιασμό είναι διαφορετική.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Με την παρουσίαση των πρώτων θερμοκηπίων η μοναδική πηγή θερμότητας ήταν ο ήλιος. Όμως, όπως επισημαίνεται και από την εταιρεία EnviroCept Greenhouses, etc. (2000), η ηλιακή ακτινοβολία μπορεί να καλύψει μόνο το 25% με 30% περίπου των θερμαντικών αναγκών ενός θερμοκηπίου (κατά τους χειμερινούς μήνες). Λόγω των απρόβλεπτων θερμοκρασιακών διακυμάνσεων κατά την εναλλαγή των εποχών (ή ακόμα και των ημερών) δεν μπορεί κανείς να αρκεστεί σε αυτήν, το οποίο σημαίνει ότι πρέπει να υπάρχει εγκατεστημένο κάποιο σύστημα βοηθητικής θέρμανσης.

Σήμερα λοιπόν, όλα τα θερμοκήπια, μικρά ή μεγάλα, μπορεί να διαθέτουν θερμαντικό σύστημα έτσι ώστε να αντισταθμίζονται οι απώλειες θερμότητας από το χώρο και να εξασφαλίζεται ένα περιβάλλον το οποίο θα προάγει τη βέλτιστη ανάπτυξη των καλλιεργούμενων φυτών. Γενικά, οι απώλειες θερμότητας από ένα θερμοκήπιο συνίστανται στα εξής (Rafferty):

- μεταφορά θερμότητας μέσω των τοίχων και της οροφής προς το εξωτερικό περιβάλλον, και
- απώλειες θερμότητας από τη διείσδυση κρύου αέρα ή από αερισμό.

Ο Roberts (1997) θεωρεί τις θερμικές απώλειες συνάρτηση τεσσάρων παραμέτρων: (1) της συνολικής επιφάνειας του θερμοκηπίου, (2) της τοποθεσίας, (3) του είδους της καλλιέργειας και (4) της υαλοκατασκευής. Οι απώλειες προς το έδαφος είναι συνήθως αμελητέες και δεν συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς, καθώς η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ θερμοκηπίου και χώματος είναι μικρή.

Υπάρχουν διάφορα συστήματα θέρμανσης για θερμοκήπια και η επιλογή του κατάλληλου είναι πρωταρχικής σημασίας για την αξιοποίηση της μέγιστης δυνατής απόδοσής του. Σε επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική αναφορά στους παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία επιλογής.

Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα θέρμανσης είναι (Buschermhole) :

- οι εναλλάκτες θερμότητας,
- οι θερμοστάτες, για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας,
- οι ανεμιστήρες, για τη διανομή της θερμότητας σε κάθε σημείο του θερμοκηπίου, και
- οι βραχίονες στήριξης, για την τοποθέτηση του συστήματος στην κατάλληλη θέση.

Οι μέθοδοι θέρμανσης θερμοκηπίων βρίσκονται διαρκώς υπό εξέταση, εξαιτίας των ολοένα αυξανόμενων απαιτήσεων για εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση της ρύπανσης και το σημαντικότερο όλων, αποδοτική παραγωγή. Έτσι, υπάρχει δυνατότητα επιλογής ανάμεσα στη χρήση διαφορετικών καυσίμων προς θέρμανση, σε διάφορα είδη συστημάτων και σε ποικιλία μεθόδων τοποθέτησής τους στο χώρο του θερμοκηπίου.

### 3.1. ΕΙΔΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Ο Buschermohle προτείνει τα εξής καύσιμα ως πιθανά για χρήση στα θερμαντικά συστήματα των θερμοκηπίων:

**Φυσικό αέριο.** Το φυσικό αέριο είναι ένα καθαρό καύσιμο και ως εκ τούτου απαιτεί ελάχιστη συντήρηση του εξοπλισμού. Δεν χρειάζεται αποθήκευση και τροφοδοτείται εύκολα στον εναλλάκτη. Η τιμή του είναι συνήθως ανταγωνιστική με την τιμή του ρευστοποιημένου πετρελαίου. Μία χιλιοθερμίδα φυσικού αερίου περιέχει θερμότητα ίση με 0,105 GJ. Μειονεκτεί στο ότι δεν είναι διαθέσιμο σε όλες τις περιοχές και ο ανεφοδιασμός ίσως είναι ανεπαρκής σε περιόδους εκτεταμένης κακοκαιρίας.

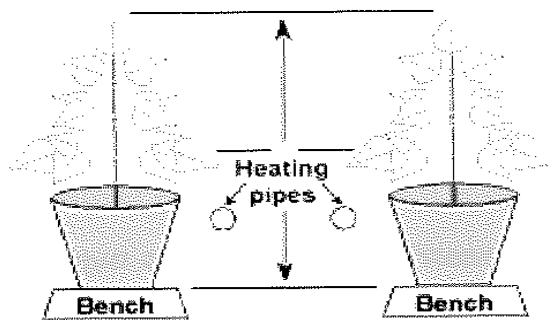
**Ρευστοποιημένο πετρέλαιο (LP).** Το ρευστοποιημένο πετρέλαιο συντίθεται κυρίως από προπάνιο και βουτάνιο, τα οποία καίγονται με εξαιρετική καθαρότητα. Η συντήρηση που απαιτείται είναι μηδαμινή, όμως χρειάζεται να αποθηκευτεί σε δεξαμενές. Όσον αφορά στο θερμικό του περιεχόμενο, 3,79 λίτρα ρευστοποιημένου πετρελαίου αντιστοιχούν περίπου σε 0,1002 GJ.

**Καύσιμο πετρέλαιο, diesel και κηροζίνη.** Οι εναλλάκτες θερμότητας που χρησιμοποιούν αυτά τα καύσιμα παρουσιάζουν μεγαλύτερο κόστος αγοράς και λειτουργίας από αυτούς με

LP ή φυσικό αέριο. Η ύπαρξη δεξαμενών με σύστημα συγκράτησης γύρω από τους εναλλάκτες, για ενδεχόμενη διαρροή πετρελαίου, είναι απαραίτητη, ενώ η άντληση των καυσίμων αυτών είναι δύσκολη σε περιπτώσεις πολύ χαμηλών θερμοκρασιών (κοντά στους  $-17^{\circ}\text{C}$ ). Σημαντική απαίτηση αυτών των συστημάτων είναι η ύπαρξη αεραγωγών, έτσι ώστε να περιορίζεται η αύξηση του καπνού μέσα στο θερμοκήπιο.

### 3.2. ΔΙΚΤΥΟ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ

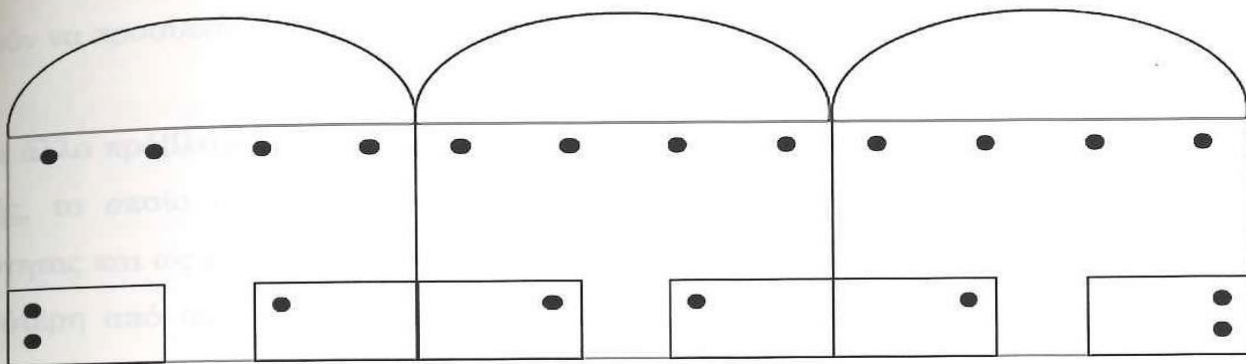
Ένα από τα πιο κοινά συστήματα θέρμανσης θερμοκηπίων είναι το δίκτυο σωληνώσεων, το οποίο μπορεί να είναι εγκατεστημένο σε διάφορες θέσεις μέσα στο χώρο. Οι σωλήνες κατασκευάζονται από μέταλλο ή από πλαστικό και μέσα σε αυτούς κυκλοφορεί είτε ζεστό νερό είτε ατμός. Κατά τους Prenger et al., με τη μέθοδο αυτή, προκύπτει αποτελεσματική θέρμανση της καλλιέργειας μέσω αγωγής από τη θέρμανση του αέρα του θερμοκηπίου, αλλά και μέσω ακτινοβολίας απευθείας στο φύλλωμα των φυτών. Η αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος και κατά συνέπεια ο καλύτερος θερμοκρασιακός έλεγχος του χώρου μπορεί να επιτευχθεί με χαμηλή τοποθέτηση των σωλήνων κοντά στα φυτά ή κάτω από αυτά (βλέπε Κεφάλαιο 7). Οι πιο αποδοτικές συνθήκες θέρμανσης μέσω ακτινοβολίας παρατηρούνται κατά την εγκατάσταση του συστήματος στο μέσο ύψος της καλλιέργειας (σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Αποτελεσματική θέση σωλήνων θέρμανσης.

Μειονεκτήματα τοποθέτησης των σωληνώσεων σε χαμηλές θέσεις είναι ότι το υλικό κατασκευής τους πρέπει να είναι ανθεκτικό στις φυτοκομικές χημικές ουσίες και ότι δεν πρέπει να εμποδίζουν την καλλιέργεια. Τελευταία, έχουν αναπτυχθεί ρυθμιζόμενα συστήματα, τα οποία μπορούν να απομακρυνθούν από τη θέση τους κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας. Επιπλέον, η χαμηλή τοποθέτηση των σωληνώσεων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην ξεραθούν/καούν τα φυτά από αυτούς.

Για θερμοκήπια εύρους μεγαλύτερο των εννέα μέτρων, για πιο ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας ο Roberts (1997) προτείνει τοποθέτηση των σωλήνων έτσι ώστε το 1/3 να βρίσκεται στους πλευρικούς κατά πλάτος τοίχους, και άλλο 1/3 στην οροφή (με ομοιόμορφη διάταξη σε όλο το εύρος του χώρου). Με αυτό τον τρόπο, οι σωλήνες της οροφής συμβάλλουν στο λιώσιμο του χιονιού και των πάγων, έτσι ώστε το νερό να κυλά από τη στέγη και να μην συσσωρεύεται πάνω σε αυτήν (σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Τυπική εγκατάσταση σωλήνων σε θερμοκήπιο.

Τα συστήματα θέρμανσης με σωλήνες θερμού νερού (hot water systems) είναι περισσότερο διαδεδομένα γιατί ο έλεγχός τους είναι ευκολότερος σχετικά με τα συστήματα ατμού (Buffington, et al.). Η θέρμανση και ψύξη των σωλήνων νερού είναι πιο αργή σε σχέση με τους σωλήνες ατμού, αλλά επιτυγχάνεται πιο ομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο. Η ύπαρξη λέβητα είναι απαραίτητη ενώ η εμβέλεια του συστήματος είναι μικρή, γι' αυτό και χρησιμοποιείται κυρίως σε χώρους περιορισμένης έκτασης.

Από την άλλη μεριά, στο σύστημα σωλήνων ατμού (steam heating system) οι σωλήνες (οι οποίοι μπορεί να είναι λείοι ή με πτερύγια) θερμαίνονται και ψύχονται γρήγορα, ενώ συνήθως απαιτείται μικρότερο μήκος σωληνώσεων – σχετικά με το προηγούμενο σύστημα. Ο λέβητας είναι κι εδώ αναγκαίος, ενώ όσον αφορά στην παραγόμενη θερμότητα, το 1/3 αυτής πρέπει να πηγαίνει στην οροφή και τα υπόλοιπα 2/3 κατά μήκος των πλευρικών τοίχων. Μία επιπλέον λειτουργία του συστήματος είναι η χρήση του ατμού για την αποστείρωση του εδάφους. Το αρχικό κόστος του είναι υψηλό, όμως παρουσιάζει μεγάλη διάρκεια ζωής. Χρησιμοποιείται σε χώρους μεγάλης έκτασης αφού ο ατμός έχει την ικανότητα να μεταφέρεται αποτελεσματικά σε μεγάλες αποστάσεις.





### 3.3. ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Οι μονάδες θέρμανσης αέρα αποτελούν ένα σύστημα γρήγορης ανταπόκρισης για τη θέρμανση θερμοκηπίων (Prenger et al.). Συνήθως εγκαθίστανται σε υπερυψωμένες θέσεις, ενώ η διανομή της θερμότητας στο χώρο γίνεται μέσω ανεμιστήρων ή διάτρητων σωλήνων πολυαιθυλενίου (βλέπε Κεφάλαιο 5). Η απόδοσή τους μπορεί να βελτιωθεί με εγκατάσταση των θερμαντικών σωλήνων σε χαμηλές θέσεις. Το κύριο μειονέκτημα της θέρμανσης αέρα είναι τα έξοδα λειτουργίας του ανεμιστήρα για τη μετακίνηση του ζεστού αέρα, τα οποία μπορούν να προσθέσουν 10% στο ενεργειακό κόστος.

Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι η θέρμανση του αέρα αποτελεί διαδικασία θέρμανσης μέσω αγωγής, το οποίο σημαίνει πως ο αέρας είναι απαραίτητο μέσο για τη μεταφορά της θερμότητας και ως εκ τούτου, η θερμοκρασία του φυλλώματος των φυτών δε μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτήν του αέρα. Επιπλέον, τα διαστήματα λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης του αέρα μπορεί να μην επιτρέπουν στα φυτά να φτάσουν τη θερμοκρασία του αέρα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων συμπύκνωσης. Αντιθέτως, η θέρμανση με ακτινοβολία - όπως είναι η ακτινοβολία του ήλιου και η ακτινοβολία των σωλήνων ή του θερμαινόμενου εδάφους - μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία των φύλλων σε επίπεδα υψηλότερα από αυτά της θερμοκρασίας του αέρα.

### 3.4. ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΡΙΣΜΟ

Σχετικά με τις ηλεκτρικές μονάδες θέρμανσης, η U.S. Global Resources (2004) αναφέρει πως δεν κοστίζουν ακριβά σε αγορά, αλλά το κόστος λειτουργίας τους είναι απαγορευτικό, εκτός και αν πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε μικρά ερευνητικά θερμοκήπια. Στις περισσότερες των περιπτώσεων απαιτείται εγκατάσταση μεγάλου αριθμού μονάδων καθώς δεν είναι σε θέση να παράγουν αρκετά Watt, ενώ η εμβέλειά τους δεν είναι ικανοποιητική. Η χρήση του δεν συνίσταται σε εμπορικά θερμοκήπια.

### 3.5. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΣΤΟ ΧΩΡΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

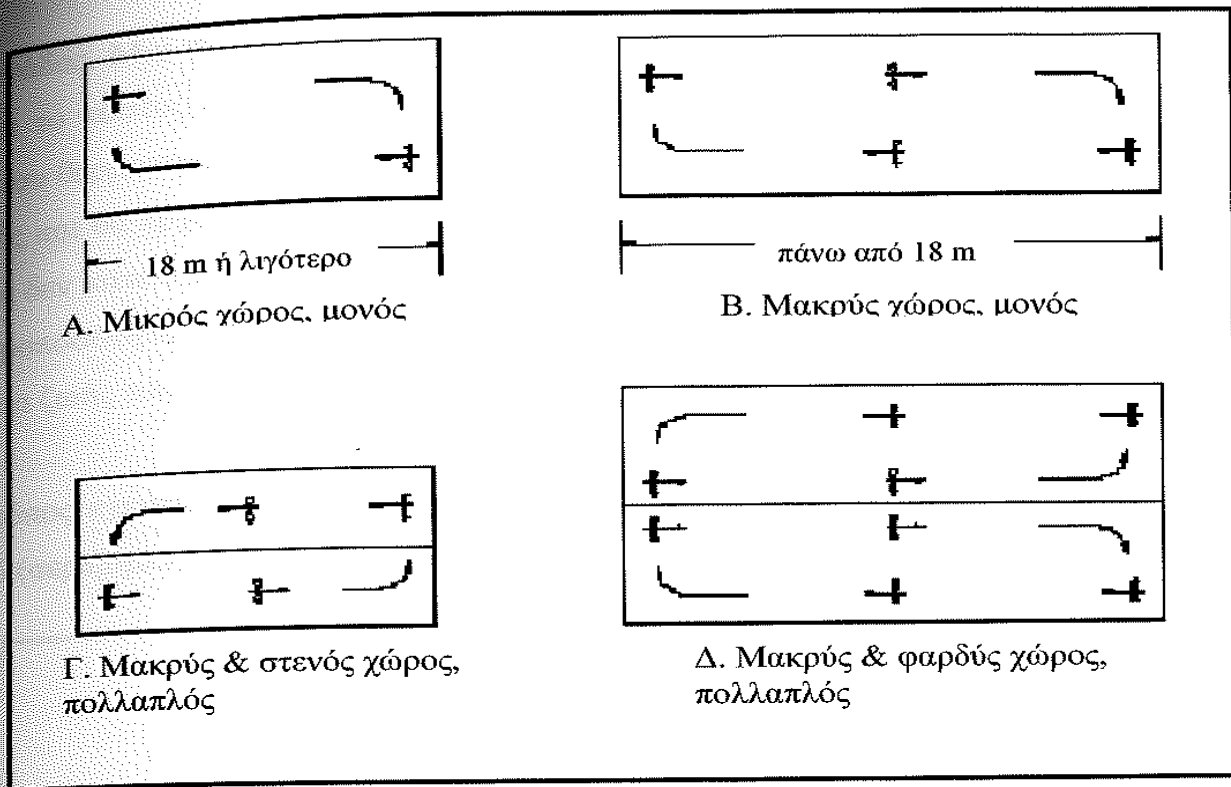
Η εταιρεία Togaman Biothermal Systems Inc. (2004) προτείνει τις παρακάτω θέσεις εγκατάστασης των θερμαντικών συστημάτων μέσα στο θερμοκήπιο:

**Τοποθέτηση θερμαντικών μονάδων (unit heaters) σε διάφορα σημεία του χώρου.** Η θέρμανση του θερμοκηπίου γίνεται με θερμαντικά σώματα-μονάδες, παρόμοια με αυτό του σχήματος 3.3, τοποθετημένα σε όλο το χώρο. Η εγκατάστασή τους είναι εύκολη υπόθεση, και η συντήρηση που χρειάζονται μικρότερη από αυτήν που απαιτούν οι κεντρικοί λέβητες, όμως η διανομή της θερμότητας δεν γίνεται κατά ομοιόμορφο τρόπο. Η θερμοκρασιακή διακύμανση μπορεί να μειωθεί αποτελεσματικά με τη χρήση πολλαπλών αγωγών. Συνίστανται για τη θέρμανση θερμοκηπίων περιορισμένης έκτασης.



Σχήμα 3.3: Θερμαντική μονάδα.

Οι θερμαντικές μονάδες, είτε είναι τοποθετημένες στο πάτωμα είτε ανυψωμένες με υποστηρίγματα, λειτουργούν κυρίως με φυσικό αέριο ή με καύσιμο πετρέλαιο και διαθέτουν ανεμιστήρες για τη διανομή της θερμότητας στο χώρο. Η θέση τοποθέτησης των ανεμιστήρων πρέπει να είναι τέτοια ώστε να καλύπτουν το σύνολο του θερμοκηπίου με θερμό αέρα (σχήμα 3.4) (Buffington et al.).



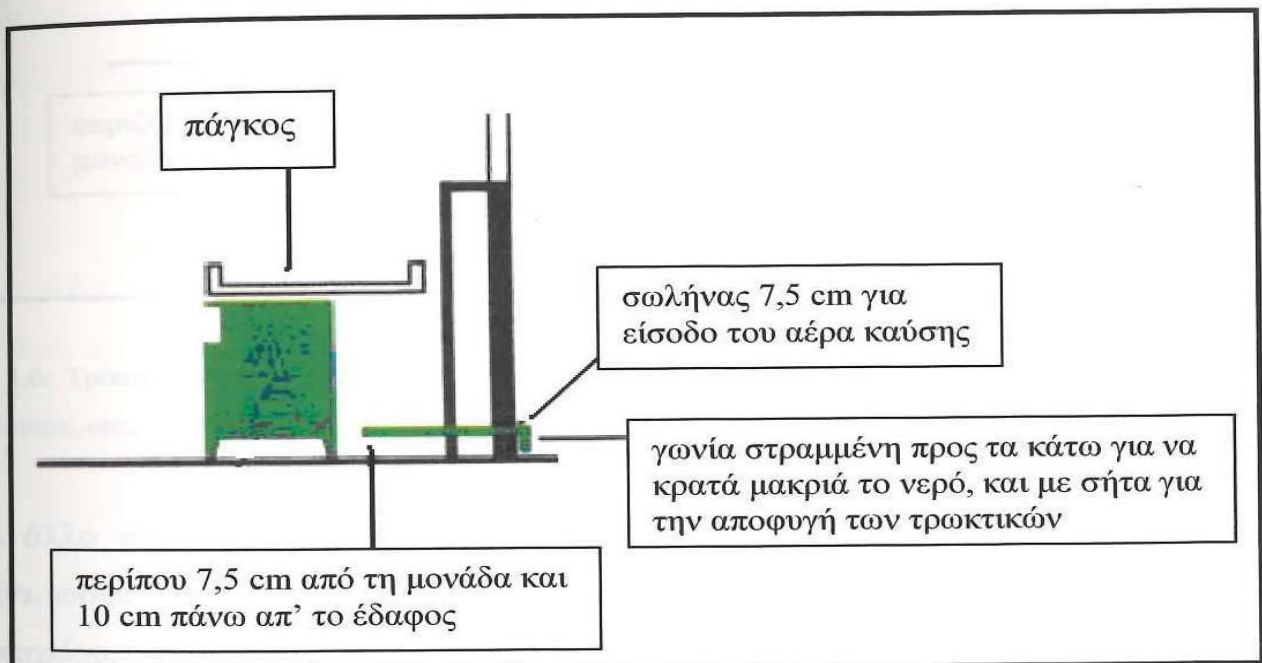
Σχήμα 3.4: Τυπική διεύθετηση των ανεμιστήρων στο χώρο, για οριζόντια κυκλοφορία του αέρα.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στον αερισμό των μονάδων. Αυτές, κατά την καύση του αερίου ή του πετρελαίου, παράγουν αέριο διοξείδιο του άνθρακα το οποίο είναι απαραίτητο για τη σωστή ανάπτυξη των φυτών. Εντούτοις, από την καύση παράγονται και άλλα παραπροϊόντα επικίνδυνα για τους ανθρώπους (μονοξείδιο του άνθρακα) αλλά και για τα φυτά (αιθυλένιο, διοξείδιο του θείου και άκαυστοι υδρογονάνθρακες). Αυτά, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα αν τα καυσαέρια δεν απορρίπτονται έξω από το θερμοκήπιο και αν οι ποσότητες εισερχόμενου αέρα δεν επαρκούν για την καύση. Για να εξασφαλιστεί ικανοποιητική κίνηση του αέρα προς τα έξω, μέσω της καπνοδόχου, ο σωλήνας εξαγωγής πρέπει να έχει το κατάλληλο μέγεθος (το οποίο συνήθως προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή της θερμοαντικής μονάδας) και να εκτείνεται τουλάχιστο  $1,2\text{ m}$  πάνω από το υψηλότερο σημείο του κτιρίου

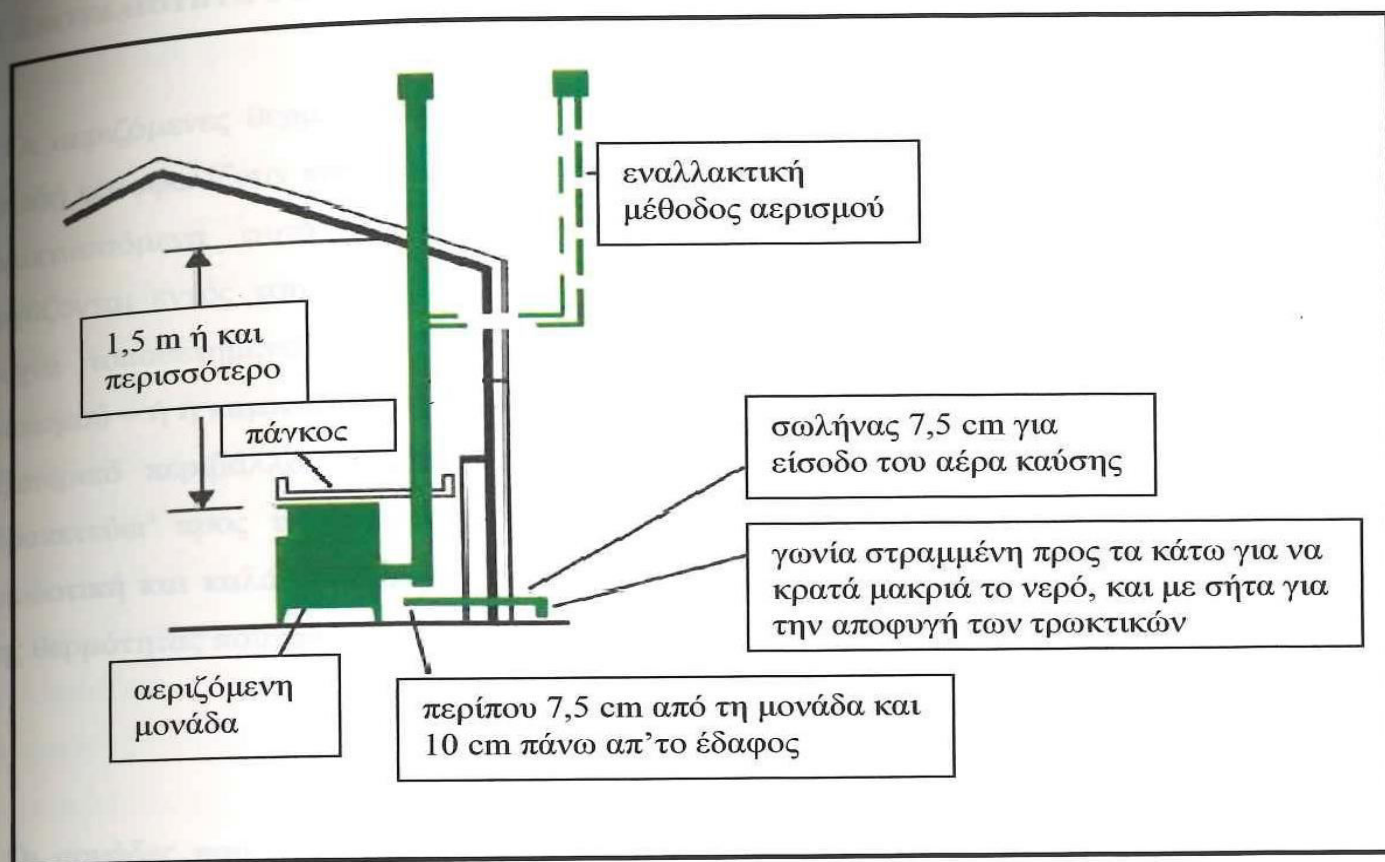
Για την περίπτωση που ο καυστήρας βρίσκεται μέσα στο θερμοκήπιο, ο Roberts (1997) τονίζει ότι πρέπει να υπάρχει εγκατεστημένος ένας αγωγός εισαγωγής αέρα, ο οποίος θα διοχετεύει φρέσκο εξωτερικό αέρα απευθείας στο χώρο της καύσης. Τα σύγχρονα πλαστικά θερμοκήπια είναι τόσο αεροστεγή ώστε το οξυγόνο εντός του χώρου μπορεί να εξαντληθεί με αποτέλεσμα τη δημιουργία επικίνδυνων συνθηκών για όσους εργάζονται εκεί. Ο αγωγός αυτός πρέπει να παρέχει άνοιγμα εισόδου αέρα  $322,5\text{ cm}^2$  περίπου για κάθε  $29\text{ KW}$  απόδοση

της μονάδας. Μια τέτοια διαστασιολόγηση εξασφαλίζει ικανοποιητική καύση και μπορεί να μειώσει το κόστος λειτουργίας. Οι σύγχρονες μονάδες θερμού αέρα υιοθετούν την καύση εκτός του θερμοκηπίου, έτσι ώστε να διασφαλίζεται ότι ο παρεχόμενος αέρας θα είναι πάντα αρκετός και θα έρχεται από το εξωτερικό της κατασκευής. Με αυτό τον τρόπο, ο χώρος της καύσης δεν καταναλώνει αέρα του θερμοκηπίου, γεγονός ευνοϊκό, καθώς έχει αποδειχθεί ότι οι μικροποσότητες μικροβιοκτόνων και η υψηλή υγρασία του θερμοκηπίου μειώνουν τη διάρκεια ζωής των εναλλακτών θερμότητας.

Ο τρόπος εγκατάστασης των σωλήνων εισαγωγής αέρα παρουσιάζεται στα σχήματα 3.5 και 3.6 (αεριζόμενη και μη αεριζόμενη μονάδα θέρμανσης, αντίστοιχα).



Σχήμα 3.5: Ορθή μέθοδος εισαγωγής αέρα στο χώρο του θερμοκηπίου, για εξασφάλιση του απαραίτητου οξυγόνου σε θερμοκηπική μονάδα δίχως αερισμό. (Envirocept Greenhouses, etc., 2000)



Σχήμα 3.6: Τρόπος εγκατάστασης σωλήνων αερισμού και εισόδου αέρα, σε αεριζόμενη μονάδα. (Envirocept Greenhouses, etc., 2000)

Ένα άλλο παραπροϊόν της καύσης είναι οι υδρατμοί (Buffington, et al.). Οι υψηλές συγκεντρώσεις υδρατμών και  $\text{CO}_2$  κατά τη διάρκεια της νύχτας στον κλειστό χώρο του θερμοκηπίου, με χαμηλά ποσά οξυγόνου (το οξυγόνο χρησιμοποιείται για την καύση) θεωρούνται ανεπιθύμητες εφόσον αποτελούν εμπόδιο στον έλεγχο των ασθενειών των φυτών.

## Η ΣΠΟΥΔΑΙΟΤΗΤΑ ΥΠΑΡΕΗΣ ΑΕΡΑΓΩΓΩΝ ΣΤΙΣ ΜΟΝΑΔΕΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Οι αεριζόμενες θερμαντικές μονάδες γενικά προτιμώνται για τη θέρμανση θερμοκηπίων επειδή εξασφαλίζουν καθαρότερο, ασφαλέστερο και με λιγότερη υγρασία περιβάλλον για τα αναπτυσσόμενα φυτά αλλά και για τους ανθρώπους που εργάζονται εντός του χώρου (Buschermohle). Οι μονάδες είναι συχνά τοποθετημένες μέσα στο θερμοκήπιο και ο σωλήνας αερισμού – ή η καμινάδα – μεταφέρει τα προϊόντα της καύσης στο εξωτερικό περιβάλλον (σχήμα 3.7). Κάποιο ποσό θερμότητας 'δραπετεύει' προς τα έξω μέσω του αεραγωγού, επομένως μια αποδοτική και καλά συντηρημένη μονάδα χάνει 20-30% περίπου της θερμότητας που παράγει.



Σχήμα 3.7: Αεριζόμενη μονάδα θέρμανσης.

Οι μονάδες που δεν διαθέτουν αεραγωγούς, όπως αυτές που λειτουργούν με αέριο LP, εγκαθίστανται μέσα στο θερμοκήπιο και δεν υπάρχει τρόπος απόρριψης των προϊόντων της καύσης προς τα έξω. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει απώλεια θερμότητας μέσω της καμινάδας, οι μη αεριζόμενες μονάδες συχνά θεωρούνται σχεδόν 100% αποδοτικές. Παρά το πλεονέκτημά τους αυτό, η χρήση τους συνεπάγεται σημαντική αύξηση του φαινομένου συμπύκνωσης και πιθανότητα μόλυνσης του αέρα εντός του θερμοκηπίου. Μια τέτοια μονάδα φαίνεται στο σχήμα 3.8.



Σχήμα 3.8: Θερμαντική μονάδα δίχως αερισμό.

Ένα από τα παραπροϊόντα της καύσης αερίου LP, είναι το νερό (κάθε 3,8 lt καιγόμενου LP παράγουν περίπου 5,7 lt νερού). Καθώς οι μη αεριζόμενες μονάδες δεν έχουν κάποιο τρόπο απόρριψης των υδρατμών στο περιβάλλον, αυτός συσσωρεύεται μέσα στο θερμοκήπιο και συμπυκνώνεται στις ψυχρές επιφάνειες και στην οροφή του. Σε όλα τα θερμοκήπια εμφανίζεται συμπύκνωση, αλλά σε εκείνα στα οποία χρησιμοποιούνται μονάδες χωρίς εξαερισμό, το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο. Με τη συμπύκνωση των υδρατμών στις επιφάνειες της κατασκευής, οι σταγόνες πέφτουν επάνω στα φυτά προκαλώντας ζημιά σε

αυτά και κατά συνέπεια μερική μείωση της παραγωγής. Παράλληλα, ο έλεγχος των ασθενειών στα φυτά αποδεικνύεται δύσκολη υπόθεση όταν το φύλλωμά τους είναι υγρό.

Ένα ακόμη πρόβλημα το οποίο παρουσιάζεται όταν δεν χρησιμοποιούνται αεριζόμενες θερμαντικές μονάδες είναι η πιθανότητα μόλυνσης του αέρα μέσα στο χώρο του θερμοκηπίου. Προκειμένου να καούν 3,8 lt καυσίμου, χρειάζονται περίπου 56,6 m<sup>3</sup> αέρα. Καθώς το οξυγόνο μέσα στο χώρο μειώνεται, πρέπει να εισαχθεί επιπλέον αέρας από έξω. Ευτυχώς τα περισσότερα θερμοκήπια δεν είναι ερμητικά κατασκευασμένα, έτσι εισέρχεται κανονποιητική ποσότητα αέρα η οποία παρέχει το απαραίτητο οξυγόνο για την καύση. Παρόλα αυτά, ένα ερμητικά κατασκευασμένο θερμοκήπιο δεν επιτρέπει στη ροή του αέρα να εισέλθει, με συνέπεια οι θερμαντικές μονάδες να αντιμετωπίζουν έλλειψη οξυγόνου. Αυτή η έλλειψη παρατηρείται κυρίως τις πρωινές ώρες μετά από μία ψυχρή νύχτα που το σύστημα λειτουργούσε για μεγάλα διαστήματα και κατανάλωσε μεγάλες ποσότητες οξυγόνου. Η έλλειψη οξυγόνου δεν επιτρέπει την πλήρη καύση του καυσίμου. Η φτωχή καύση λοιπόν, όχι μόνο μειώνει την αποδοτικότητα του συστήματος αλλά το καύσιμο που δεν κάηκε περιέχει ρυπογόνες ενώσεις, όπως μονοξειδίο του άνθρακα, διοξειδίο του θείου, νιτρικό οξύ και αιθυλένιο. Όλα αυτά, ακόμη και σε μικρές ποσότητες, μπορούν να βλάψουν τα ευαίσθητα νεοαναπτυσσόμενα φυτά. Επιπλέον, η έλλειψη οξυγόνου στον αέρα και η αύξηση των επιπέδων μονοξειδίου του άνθρακα αποτελεί μεγάλο κίνδυνο για όσους εργάζονται μέσα στο θερμοκήπιο. Αν και μια αεριζόμενη θερμαντική μονάδα που δεν έχει αρκετό οξυγόνο έχει τις ίδιες πιθανότητες να παράγει τις παραπάνω ρυπογόνες ουσίες με μια μονάδα δίχως εξαερισμό, στην πρώτη περίπτωση οι ρυπαντές αποβάλλονται στο εξωτερικό περιβάλλον μέσω του σωλήνα αερισμού ενώ στη δεύτερη παραμένουν μέσα στο χώρο.

Τέλος, σύμφωνα με τον Roberts (1997), πολύ χρήσιμη είναι η τοποθέτηση συσκευής στην κορυφή της καμινάδας εξαγωγής, η οποία έχει τη δυνατότητα να αλλάζει την κατεύθυνση των καυσαερίων, και να προλαμβάνει τυχόν αλλαγή της φοράς τους προς τα κάτω (μέσα στο χώρο του θερμοκηπίου) σε περίπτωση θυελλωδών συνθηκών, ή σε περίπτωση που οι ανεμιστήρες χρησιμοποιούνται για έλεγχο της υγρασίας την ίδια στιγμή που λειτουργούν οι θερμαντικές μονάδες.

**Κεντρική θέρμανση (Central heating).** Οι λέβητες κεντρικής θέρμανσης, όπως αυτός του σχήματος 3.9, καίνε το καύσιμο μέσα στον ειδικό θάλαμο, προς θέρμανση του νερού στους  $82^{\circ}\text{C}$  περίπου ή προς ατμοποίησή του σε εναλλάκτη θερμότητας. Η παραγόμενη αιθάλη διέρχεται μέσω καπνοδόχου και απορρίπτεται στο περιβάλλον. Το ζεστό νερό ή ο ατμός μεταφέρονται σε όλο το θερμοκήπιο (προς θέρμανση του εσωτερικού αέρα) μέσω σωλήνων, μικρότερων μονάδων ή συνδυασμό και των δύο, όπως δείχνει το σχήμα 3.10. Το αρχικό κόστος του συστήματος είναι μεγαλύτερο των μικρών μονάδων και η εγκατάστασή του αρκετά χρονοβόρα, αλλά το κόστος λειτουργίας του είναι αρκετά χαμηλότερο. Κατά κανόνα προτιμάται για τη θέρμανση μεγάλων θερμοκηπίων. Μία επιπλέον χρήση του είναι για προθέρμανση του νερού άρδευσης και συνεπώς προστασία των φυτών από την επαφή με το κρύο νερό.



Σχήμα 3.9: Λέβητας.



Σχήμα 3.10: Σύστημα μεταφοράς θερμότητας

**Θέρμανση με “ευθυγραμμισμένους” σωλήνες επί του εδάφους (Pipe/Rail heating system).**



Τα σχήματα 3.11 και 3.12 παρουσιάζουν αυτό τον τρόπο θέρμανσης, ο οποίος επιτυγχάνει ομοιόμορφες θερμοκρασίες και επηρεάζει θετικά το μικροκλίμα των φυτών. Η ανοδική κίνηση του αέρα που προκαλείται από τους θερμότερους από αυτόν σωλήνες μειώνει την υγρασία και δημιουργεί ομοιόμορφο μικροκλίμα γύρω από τα φυτά. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιείται σε θερμοκήπια για καλλιέργεια λαχανικών.



Σχήμα 3.11 (αριστερά) και 3.12 (δεξιά): Σωλήνες επί εδάφους.



**Ενδοδαπέδια θέρμανση (In-floor heating system).** Μια σημαντική βελτίωση του συστήματος θέρμανσης με σωλήνες αποτελεί η ενδοδαπέδια θέρμανση. Η θερμότητα παρέχεται μέσω δικτύου σωληνώσεων ζεστού νερού ή ατμού, τοποθετημένων κάτω από το χώμα ή τη συμπαγή επιφάνεια του δαπέδου της κατασκευής. Το βασικότερο πλεονέκτημα είναι η ομοιογενής μεταφορά θερμότητας σε κάθε σημείο του θερμοκηπίου, από την εκτεταμένη επιφάνεια του δαπέδου. Η θέρμανση από τα χαμηλά στρώματα επιτρέπει στον θερμό αέρα να ανέρχεται διαμέσου των φυτών, εξασφαλίζοντας καλύτερη μεταφορά/διανομή της θερμότητας. Ακόμη, η θέρμανση των φυτών στις ρίζες επηρεάζει θετικά την υγεία και την ανάπτυξή τους.

Εντούτοις, το σύστημα έχει και μειονεκτήματα, με σημαντικότερα το μεγάλο χρόνο απόκρισης στις διαδικασίες ελέγχου και το σχετικά μεγάλο κόστος εγκατάστασης (Prenger al.). Βέβαια, το κόστος αντισταθμίζεται σημαντικά από τη βελτιωμένη θερμαντική απόδοση του συστήματος. Συχνά χρησιμοποιείται βοηθητική θέρμανση με σωλήνες ή εξαναγκασμένο αέρα, έτσι ώστε να επιτευχθεί μικρότερος χρόνος απόκρισης.

Η ενδοδαπέδια θέρμανση είναι κατάλληλη για φυτά τα οποία αναπτύσσονται απευθείας επί του εδάφους ή μέσα σε 'πλημμυρισμένες' περιοχές (σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13: 'Πλημμυρισμένη' περιοχή.

**Θέρμανση από σωλήνες τοποθετημένους κάτω από πάγκους (Under bench heating system).** Η τοποθέτηση των σωλήνων κάτω από τους πάγκους, με τον τρόπο που δείχνει το σχήμα 3.14, είναι μία ακόμη μέθοδος μεγιστοποίησης της επιφάνειας μεταφοράς θερμότητας. Η χρήση τους ενδείκνυται για την ανάπτυξη φυτών επάνω σε πάγκους και επάνω σε τραπέζια σταθερά, κυλιόμενα ή μεταφερόμενα.



Σχήμα 3.14: Θέρμανση κάτω από πάγκους, με σωλήνες ζεστού νερού.

**Σύστημα θέρμανσης τοποθετημένο στην οροφή (Overhead Heating System).** Οι ευθυγραμμισμένοι σωλήνες επί του εδάφους καθώς και οι σωλήνες κάτω από πάγκους ή μέσα στο έδαφος συνήθως δεν μπορούν να επιτύχουν το επιθυμητό και απαραίτητο επίπεδο θέρμανσης κατά τη διάρκεια του χειμώνα, και ως εκ τούτου χρειάζεται βοηθητική θέρμανση. Ένα σύστημα θέρμανσης εγκατεστημένο στην οροφή του θερμοκηπίου, όπως στα σχήματα 3.15 και 3.16, είναι σε θέση να προσφέρει αυτή την επιπλέον θερμότητα.

Τέτοια συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν σε θερμοκήπια με κρεμώμενες γλάστρες, χρησιμοποιούνται και για το λιώσιμο του χιονιού ενώ συναντώνται με μονή ή διπλή ράγα και σωλήνες απλούς ή με πτερύγια.



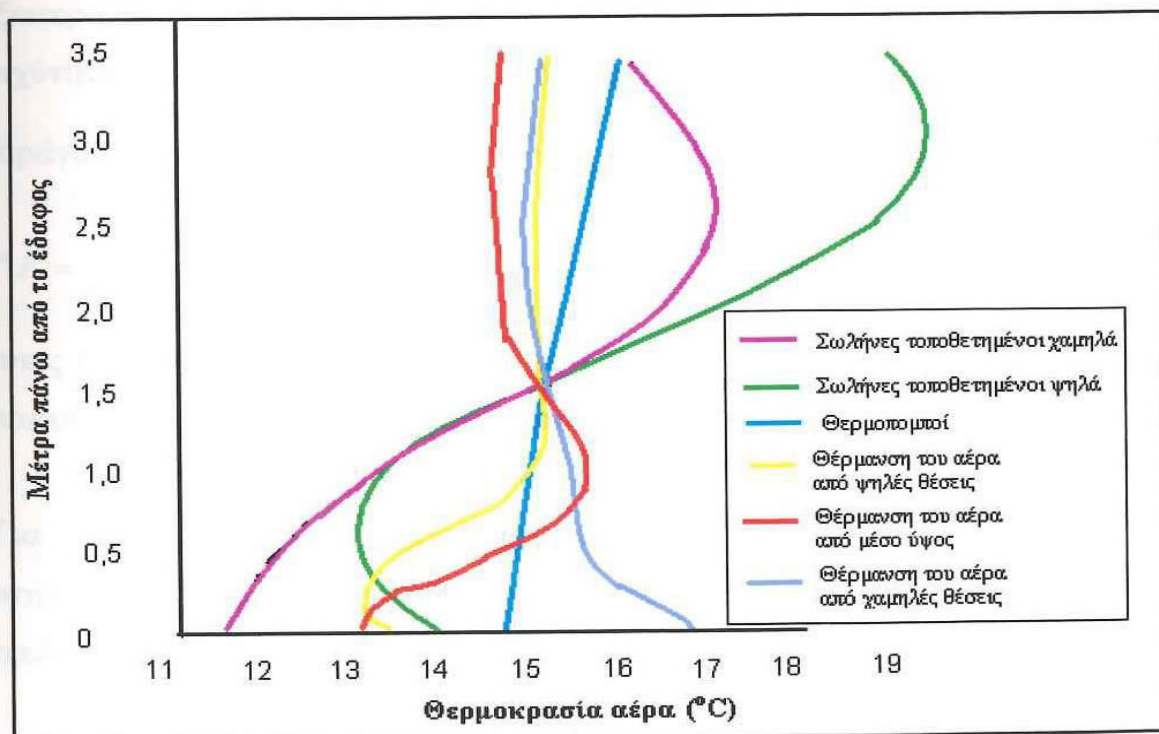
Σχήμα 3.15 (αριστερά) και 3.16 (δεξιά): Τοποθέτηση του θερμαντικού συστήματος στην οροφή του θερμοκηπίου.

**Σύστημα θέρμανσης τοποθετημένο περιμετρικά (Perimeter Heating System).** Ομοίως με την προηγούμενη περίπτωση, το περιμετρικό σύστημα του σχήματος 3.17 παρέχει την επιπλέον θερμότητα που δεν είναι σε θέση να παρέχουν τα άλλα συστήματα θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο του έτους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί περιστασιακά και παρέχει ένα ομοιόμορφο θερμοκρασιακό περιβάλλον εντός του θερμοκηπίου. Οι σωλήνες που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι είτε απλοί είτε με πτερύγια.



Σχήμα 3.17: Περιμετρικό σύστημα θέρμανσης.

Το είδος και η τοποθέτηση της θερμαντικής εγκατάστασης επηρεάζουν καθοριστικά την κατανομή της θερμοκρασίας και την κίνηση του αέρα εντός του θερμοκηπίου. Η σχέση εξάρτησης των προαναφερθέντων μεγεθών παρουσιάζεται διαγραμματικά στο σχήμα 3.18.



Σχήμα 3.18: Κάθετες κατανομές θερμοκρασίας αέρα σε θερμοκήπιο, δημιουργούμενες από διάφορες θερμαντικές εγκαταστάσεις. (Popovski, 2005)

### 3.6 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Κατά τη διαδικασία επιλογής του συστήματος θέρμανσης τίθεται το ζήτημα της διαστασιολόγησής του. Το σύστημα πρέπει να είναι σε θέση να παράγει ποσό θερμότητας ικανό να αντισταθμίσει τις θερμικές απώλειες προς τα έξω, και να εξασφαλίσει ένα εσωτερικό περιβάλλον κατάλληλο για τη βέλτιστη ανάπτυξη των καλλιεργούμενων φυτών. Η επιθυμητή απόδοση του συστήματος εξαρτάται από το μέγεθος του θερμοκηπίου, την χρησιμοποιούμενη υαλοκατασκευή (μονό ή διπλό στρώμα πλαστικού ή γυαλιού) και από τη μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Μονάδες μέτρησης της αποδοτικότητας ενός θερμαντικού συστήματος είναι τα Watt (ή Btu/hr). Αυτή η απόδοση,  $q_1$ , υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τους εξής παράγοντες (Ross):

1.  $A$ , είναι η συνολική εκτεθειμένη (εξωτερική) επιφάνεια του θερμοκηπίου – πλευρικές επιφάνειες και στέγη – μετρούμενη σε τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ ) (όπως προαναφέρθηκε, η επιφάνεια του δαπέδου δεν συνυπολογίζεται).
2.  $u$ , ορίζεται ως συντελεστής θερμικών απωλειών, ο οποίος μετρά το ποσό θερμικής ενέργειας που ρέει προς το εξωτερικό του θερμοκηπίου, εξαρτάται από τον τύπο του εξωτερικού καλύμματος και επηρεάζεται από την ποιότητα της κατασκευής και την ταχύτητα του ανέμου. Για παράδειγμα, για ένα μονό κάλυμμα από πλαστικό ή γυαλί ο παράγοντας  $u$  έχει τιμή  $1,2 \frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$  (όπου  $1Btu/hr = 0,3 \text{ Watt}$ ,  $1ft^2 = 0,093 m^2$ ,

$1^\circ F = \frac{5}{9} K$ ). Ένα διπλό κάλυμμα αντιστοιχεί σε τιμή  $u = 0,8 \frac{Btu}{hr \cdot ft^2 \cdot ^\circ F}$ . Στις τιμές

αυτές συμπεριλαμβάνονται, εκτός από τις απώλειες θερμότητας λόγω αγωγής, και οι διαφυγές αέρα από το χώρο του θερμοκηπίου.

Για παλαιά γυάλινα θερμοκήπια, κακοσυντηρημένα, ο συντελεστής  $u$  λαμβάνει υψηλότερες τιμές. Στην περίπτωση αυτή, μια αύξηση του φορτίου 10% κατά το σχεδιασμό του θερμοκηπίου, είναι αρκετή.

3.  $(T_i - T_o)$ , είναι η μέγιστη διαφορά μεταξύ εξωτερικής ( $T_o$ ) και εσωτερικής ( $T_i$ ) θερμοκρασίας. Ως  $T_o$  ορίζεται η επιθυμητή θερμοκρασία που επικρατεί μέσα στο

θερμοκήπιο. Ως  $T_i$  δεν λαμβάνεται η ελάχιστη εξωτερική θερμοκρασία που έχει καταγραφεί, αλλά η χαμηλότερη θερμοκρασία που παρατηρήθηκε στην περιοχή σχεδόν για 22 ώρες το χρόνο, κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης.

Η παραπάνω περιγραφή συνοψίζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$q_1 = A \times u \times (T_i - T_o) \quad (3.1),$$

όπου  $q_1$  οι απώλειες θερμότητας με μεταφορά μέσω των τοίχων και της οροφής του θερμοκηπίου.

Σε περίπτωση που στο θερμοκήπιο παρατηρείται διείσδυση κρύου αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον, ο Raferty αναφέρει ότι πρέπει να συνυπολογιστεί. Αυτή η ποσότητα, συμβολιζόμενη ως  $ach$  (air changes per hour), δείχνει πόσες φορές την ώρα ο αέρας του θερμοκηπίου αντικαθίσταται από τον κρύο αέρα του περιβάλλοντος. Αποτελεί συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, της κατασκευής του θερμοκηπίου και της διαφοράς εσωτερικής-εξωτερικής θερμοκρασίας και λαμβάνεται υπόψη ως εξής:

$$q_2 = ach \times V \times (T_i - T_o) \times 0,018 \quad (3.2)$$

Τέλος, αν στο θερμοκήπιο λειτουργεί και μηχανικός αερισμός, τότε πρέπει να προστεθεί και αυτός, αφού υπολογιστεί με ανάλογο τρόπο (Raferty).

### Παράδειγμα (Ross, Raferty):

Σε υποτιθέμενο θερμοκήπιο με τα εξής χαρακτηριστικά

πλάτος, 16 ft (1 ft = 30,5 cm)

μήκος, 24 ft

ύψος ως το τελείωμα της στέγης, 12 ft

ύψος παράπλευρων τοίχων, 6 ft

μονό κάλυμμα από γυαλί (από το έδαφος ως το τελείωμα της στέγης),

το απαιτούμενο μέγεθος του συστήματος θέρμανσης έτσι ώστε η εσωτερική θερμοκρασία να διατηρείται στους 60 °F, με ελάχιστη εξωτερική 0 °F (κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής νύχτας), υπολογίζεται ως εξής:

Συνολική εκτεθειμένη επιφάνεια

2 πλευρές κατά μήκος,  $2 \cdot 6 \text{ ft} \cdot 24 \text{ ft} = 288 \text{ ft}^2$

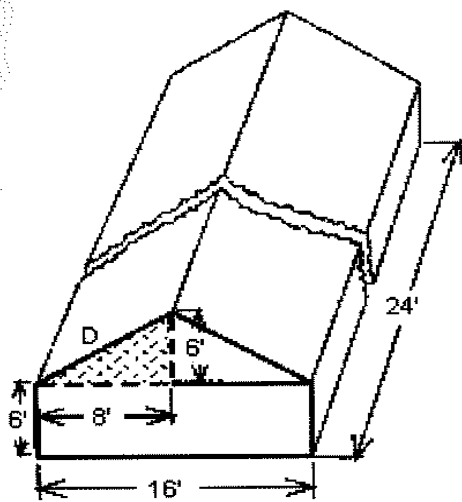
2 πλευρές κατά πλάτος,  $2 \cdot 6 \text{ ft} \cdot 16 \text{ ft} = 192 \text{ ft}^2$

ατέγη,  $2 \cdot 10 \text{ ft} \cdot 24 \text{ ft} = 480 \text{ ft}^2$

τριγωνικό μέρος πάνω από τις πλευρικές επιφάνειες,  $4 \times \frac{8 \text{ ft} \cdot 6 \text{ ft}}{2} = 96 \text{ ft}^2$

---


$$A = 1056 \text{ ft}^2$$



$$D^2 = 6^2 + 8^2$$

$$D = \sqrt{36 + 64}$$

$$D = 10 \text{ feet}$$

Σχήμα 3.19:

Υπολογισμός της απαιτούμενης ικανότητας του συστήματος θέρμανσης με χρήση των διαστάσεων του θερμοκηπίου.

Συντελεστής θερμικών απωλειών,  $u = 1,2 \frac{\text{Btu}}{\text{hr} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ \text{F}}$

Θερμοκρασιακή διαφορά,  $(T_i - T_o) = 60^\circ \text{F} - 0^\circ \text{F} = 60^\circ \text{F}$

$\rightarrow q_1 = 1056 \times 1,2 \times 60 = 76032 \text{ Btu/hr}$  (ή 22,28 KW) : απώλειες θερμότητας με μεταφορά

Όγκος θερμοκηπίου:  $V = (16 \cdot 6 \cdot 24) + (\frac{1}{2} \cdot 6 \cdot 16 \cdot 24) = 3456 \text{ ft}^3$

Εναλλαγές αέρα ανά ώρα (air changes per hour – ach): 2,5

$\rightarrow q_2 = \text{ach} \times V \times (T_i - T_o) \times 0,018 = 9331,2 \text{ Btu/hr}$  (ή 2,73 KW) : απώλειες θερμότητας από διείσδυση αέρα

Τελικά, οι συνολικές θερμικές απαιτήσεις του θερμοκηπίου είναι

$$Q = q_1 + q_2 = 85363,2 \text{ Btu/hr (25,01 KW)}^1$$

Σε ένα θερμοκήπιο, θα πρέπει να εξετάζονται και να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες που αφορούν σε τεχνικά θέματα. Η συνεισφορά του κάθε όρου της εξίσωσης (3.1) στο τελικό αποτέλεσμα πρέπει να μελετάται προσεκτικά (Ross). Σε περίπτωση που για την κατασκευή των τοίχων ή της οροφής χρησιμοποιούνται διαφορετικά υλικά, οι θερμικές απώλειες θα πρέπει να υπολογιστούν ξεχωριστά για το κάθε ένα από αυτά.

Για θέρμανση του θερμοκηπίου μέσω ηλεκτρισμού, αν το τελικό αποτέλεσμα δίδεται σε Btu/hr (όπως στο προηγούμενο παράδειγμα), τότε η μετατροπή τους σε KW γίνεται διαιρώντας τα Btu/hr με το συντελεστή 3413.

Εάν το θερμοκήπιο βρίσκεται σε περιοχή εκτεθειμένη στον άνεμο και έχει πολλά ανοίγματα διείσδυσης αέρα, ο Buschermohle επισημαίνει ότι τα υπολογιζόμενα μεγέθη πρέπει να αυξηθούν κατά ένα ποσοστό της τάξης του 10%. Τέλος, αν το σύστημα διαθέτει κεντρικό λέβητα, στην τιμή του Q πρέπει να προστεθεί τουλάχιστον ένα 25% έτσι ώστε να συμπεριληφθούν τυχόν απώλειες θερμότητας στο σύστημα διανομής.

1. Ο υπολογισμός αυτός θεωρεί ότι η διείσδυση αέρα καλύπτει τις χειμερινές ανάγκες σε αερισμό. Εάν κάτι τέτοιο δε συμβαίνει και ο μηχανικός αερισμός είναι απαραίτητος, τότε αυτός πρέπει να συνυπολογιστεί στο φορτίο.

### 3.7. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια αξιόπιστη πηγή θερμότητας είναι απαραίτητη για τον έλεγχο της θερμοκρασίας μέσα στο χώρο του θερμοκηπίου. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος θέρμανσης είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων. Οι παράγοντες αυτοί πρέπει να εξετασθούν προσεκτικά προτού επενδύσει κανείς σε ανάλογο εξοπλισμό, γιατί το σύστημα που θεωρείται το καλύτερο για μια περίπτωση μπορεί να μην είναι και για κάποια άλλη. Η ανάλυση των παραγόντων που ακολουθεί έγινε με βάση τους Buffington et al.

Πριν καθοριστεί ο τύπος του θερμαντικού συστήματος που θα εγκατασταθεί είναι απαραίτητο να υπολογισθεί (με τον τρόπο που έχει ήδη περιγραφεί) το ποσό της θερμότητας που θα χρειαστεί για την κάλυψη των θερμαντικών αναγκών του χώρου. Πρέπει δηλαδή ο σχεδιασμός να γίνει με βάση **το μέγεθος και τον τύπο του θερμοκηπίου**. Σε αυτό τον υπολογισμό λοιπόν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι πιο αντίξοες **κλιματολογικές συνθήκες** που αναμένεται να παρουσιαστούν στην περιοχή.

Η ελάχιστη ανεκτή θερμοκρασία εσωτερικού χώρου εξαρτάται από **το είδος των φυτών** που καλλιεργούνται. Κάποια τροπικά φυτά παύουν να αναπτύσσονται στους 12,5-15,5 °C, ενώ σε θερμοκρασία 7 °C πεθαίνουν. Επίσης, τα φυτά που αναπτύσσονται επί του εδάφους απαιτούν διαφορετικό τρόπο θέρμανσης από αυτά που μεγαλώνουν επάνω σε πάγκους.

Η **επιθυμητή ποιότητα παραγωγής** είναι ένας ακόμη παράγοντας για την επιλογή θερμαντικού συστήματος. Η θερμοκρασία που πρέπει να επιτευχθεί απλώς για να προστατευθούν τα φυτά από ζημιές λόγω ψύχους είναι διαφορετική από αυτήν που απαιτείται για να συνεχιστεί η φυσιολογική – ή σχεδόν φυσιολογική – ανάπτυξή τους.

Επιπλέον, σημαντικό παράγοντα αποτελεί **η ταχύτητα του ανέμου στον περιβάλλοντα χώρο του θερμοκηπίου** (όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα και η ένταση του ανέμου, τόσο μεγαλύτερες οι απώλειες θερμότητας). Αυτή, λαμβάνεται υπόψη μέσω του συντελεστή  $u$  (συντελεστής θερμικών απωλειών, εξίσωση 3.1). Μια τιμή του συντελεστή  $u$  γύρω στο 1,0 υποδηλώνει καλά κατασκευασμένο, στεγανό θερμοκήπιο, που πιθανώς διαθέτει κάποια



διάταξη προστασίας από τον άνεμο. Μια τιμή περίπου 1,2 χρησιμοποιείται για όχι αρκετά καλή κατασκευή, με περισσότερες διαφυγές αέρα.

Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται στην **αποδοτικότητα της θερμαντικής μονάδας**. Οι περισσότεροι κατασκευαστές εξοπλισμού θέρμανσης αναφέρουν και την είσοδο (κατανάλωση) και την έξοδο (αποδιδόμενη θερμότητα), σε Watt (ή σε Btu/hr). Στην πράξη, οι υπολογισμοί κατά τη διαστασιολόγηση του εξοπλισμού πρέπει να βασίζονται στην ικανότητα απόδοσης θερμότητας.

Η **επιλογή καυσίμου**, ανάλογα με το κόστος και τη διαθεσιμότητα, είναι κι αυτό ένα ερώτημα που πρέπει να αντιμετωπίσει κανείς προκειμένου να επιλέξει σύστημα θέρμανσης. Κατά γενική ομολογία, το καύσιμο που μπορεί να αποτελέσει αξιόπιστη πηγή θερμότητας με το χαμηλότερο κόστος, είναι αυτό που πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Τέλος, πολύ σημαντικός είναι και ο οικονομικός παράγοντας, γι' αυτό **το αρχικό κόστος του συστήματος και η οικονομική ή όχι λειτουργία του** αποτελούν κριτήρια πρωταρχικής σημασίας. Κάποια συστήματα κοστίζουν φθηνά στη αγορά ή χρησιμοποιούν σχετικά φθηνά καύσιμα. Υπάρχουν και άλλα με υψηλό αρχικό κόστος που όμως είναι πιο αποδοτικά ή πιο οικονομικά στην λειτουργία.

Συμπερασματικά, η επιτυχής θέρμανση ενός θερμοκηπίου εξαρτάται από τη σωστή διαστασιολόγηση και εγκατάσταση του θερμαντικού συστήματος, αξιόπιστα συστήματα ελέγχου και μεθόδους εξασφάλισης ομοιόμορφης διανομής της θερμοκρασίας. Για το λόγο αυτό, και λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παραπάνω παράγοντες, ο σχεδιασμός και η επίβλεψη εγκατάστασης του συστήματος θέρμανσης σε ένα θερμοκήπιο θα πρέπει να ανατίθεται μόνο σε ανθρώπους πλήρως εξοικειωμένους με αυτό το αντικείμενο, που μπορούν να ανταπεξέλθουν στις συγκεκριμένες απαιτήσεις κάθε ιδιοκτήτη.

### 3.8. ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΣΟΧΗΣ

Γενικά, συνίσταται να δίνεται προσοχή στα παρακάτω (Buffington et al.):

1. Κατά το σχεδιασμό του συστήματος θέρμανσης είναι χρήσιμο να λαμβάνεται υπόψη η προοπτική επέκτασής του μελλοντικά, ενώ η απόδοση του συστήματος πρέπει να είναι αρκετή για να αντισταθμίζει τις θερμικές απώλειες του χώρου, υπό τις πιο αντίξοες καιρικές συνθήκες. Συνήθως, ο σχεδιασμός γίνεται για θερμοκρασίες λίγο πάνω από τις χαμηλότερες θερμοκρασίες που σημειώθηκαν τα τελευταία 15 με 20 χρόνια στην περιοχή, σύμφωνα με τοπικά κλιματικά δεδομένα.
2. Ένας καλός έλεγχος του συστήματος θέρμανσης δεν είναι από μόνος του αρκετός. Ο χρήστης θα πρέπει να γνωρίζει ποια είναι η κατάλληλη θερμοκρασία για την ανάπτυξη των φυτών. Αν για παράδειγμα καλλιεργούνται λουλούδια, αυτά ανθίζουν κάποια συγκεκριμένη εποχή. Ο θερμοκρασιακός έλεγχος μπορεί να αποδειχθεί βασικός σε τέτοιου είδους περιπτώσεις.
3. Εάν είναι δυνατόν, καλό είναι να επιλέγονται θερμαντικά συστήματα που, αν χρειαστεί, επιτρέπουν τη μετατροπή από χρήση ενός καυσίμου σε άλλο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : ΑΕΡΙΣΜΟΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

Οι μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας εξωτερικού περιβάλλοντος μπορούν να προκαλέσουν σημαντικά προβλήματα. Δίχως σωστό αερισμό, η θερμοκρασία μέσα στο θερμοκήπιο μπορεί να φτάσει σε αρκετά υψηλά επίπεδα, ικανά να προκαλέσουν καταστροφές στην παραγωγή. Έντονη ζέστη μέσα στο χώρο παρατηρείται τις ημέρες που ο ουρανός είναι καθαρός, ακόμη και αν οι εξωτερικές συνθήκες είναι σχετικά δροσερές. Δεν είναι ασυνήθιστο να παρατηρούνται ακόμη και 37 °C σε ένα κλειστό θερμοκήπιο μια ασυννεφιαστη μέρα, όταν έξω επικρατούν μόλις 10 °C.

Ο αερισμός είναι μια διαδικασία ανταλλαγής αέρα, με την οποία ο ζεστός-υγρός αέρας του θερμοκηπίου αντικαθίσταται από τον πιο δροσερό, και συνήθως λιγότερο υγρό αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Ο σωστός αερισμός όχι μόνο ψύχει το θερμοκήπιο αλλά μειώνει το επίπεδο υγρασίας μέσα στο χώρο και εξασφαλίζει επαρκείς ποσότητες οξυγόνου και CO<sub>2</sub> για τα αναπτυσσόμενα φυτά. Τα δύο βασικά συστήματα αερισμού είναι φυσικού και εξαναγκασμένου αέρα.

### 4.1. ΦΥΣΙΚΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (NATURAL VENTILATION)

Όπως αναφέρει ο Roberts (1997), φυσικός αερισμός είναι δυνατό να δημιουργηθεί από θερμοκρασιακές διαφορές ή από ανεμώδεις συνθήκες. Έτσι, όταν παρατηρείται διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου και όταν υπάρχουν ανοίγματα που επιτρέπουν στον ψυχρό αέρα να εισέλθει στο χώρο και να αντικαταστήσει τον θερμότερο που υπάρχει εκεί, τότε πραγματοποιείται φυσικός αερισμός.

Η μέγιστη δυνατότητα για φυσικό αερισμό παρουσιάζεται κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν δηλαδή η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού χώρου είναι μέγιστη. Δυστυχώς όμως, εκείνη την εποχή η ανάγκη για αερισμό είναι η μικρότερη. Στις πολύ ζεστές καλοκαιρινές μέρες, η εξωτερική θερμοκρασία ίσως είναι λίγο χαμηλότερη από την εσωτερική και η δυνατότητα για αερισμό είναι ελάχιστη έως μηδαμινή, ενώ η αναγκαιότητα φτάνει στο μέγιστο. Κατά συνέπεια, τις ζεστές μέρες του έτους, επαρκής φυσικός αερισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με την εμφάνιση ανέμων, φαινόμενο το οποίο εξαρτάται άμεσα από την τοποθεσία.

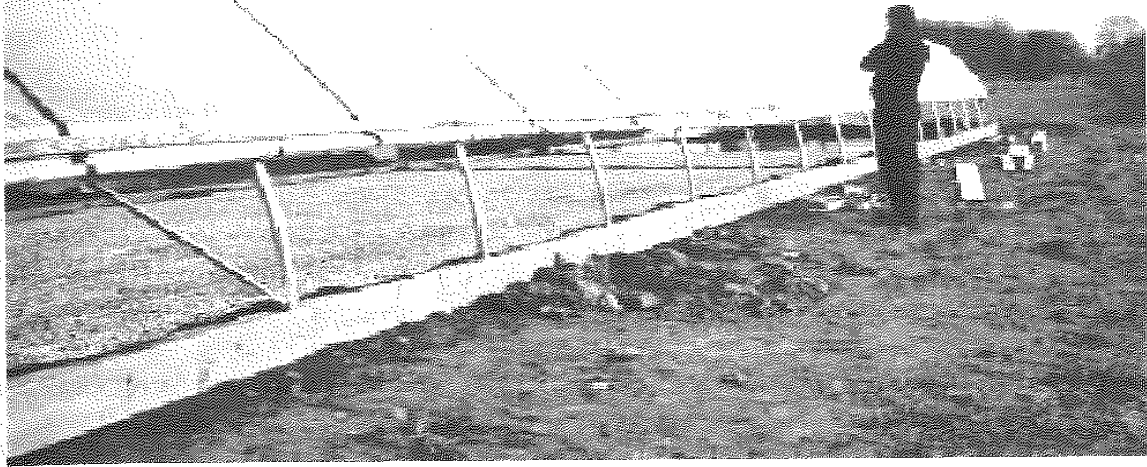
Τα θερμοκήπια με φυσικό αερισμό διαθέτουν πλευρές κατά το μήκος του χώρου οι οποίες μπορούν να κινούνται, σαν πετάσματα (Buscherrohle), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Όταν χρειάζεται αερισμός τα πετάσματα κατεβαίνουν, επιτρέποντας έτσι στον δροσερό εξωτερικό αέρα να διασχίζει την κατασκευή. Το ποσό του εσωτερικού αέρα που εξέρχεται ελέγχεται σε κάποιο βαθμό από το πόσο χαμηλωμένα είναι τα πετάσματα. Αυτά, μπορούν να κατέβουν μόνο μερικά εκατοστά όταν θέλει κανείς να επιτύχει μικρού βαθμού αερισμό, ή να είναι πλήρως ανοιχτά σε περίπτωση που απαιτείται μέγιστος αερισμός. Φυσικός αερισμός είναι δυνατόν να επιτευχθεί και μέσω αεραγωγών που τοποθετούνται στην κορυφή της στέγης του θερμοκηπίου, και επιτρέπουν στον θερμό ανερχόμενο αέρα να αποβάλλεται στο περιβάλλον. Ο Buscherrohle επισημαίνει κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθόδων αυτών:

#### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Μικρό αρχικό κόστος.
- Μικρό κόστος λειτουργίας.
- Επιτρέπει την πρόσβαση στα φυτά από έξω.

#### ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Έλλειψη ακριβή ελέγχου της ροής του αέρα: ο φυσικός αερισμός εξαρτάται από τον άνεμο, ο οποίος παρουσιάζει μεταβολές τόσο στην ταχύτητα όσο και στην κατεύθυνση, κατά τη διάρκεια της ημέρας. Με αυτή την επιλογή ο καλλιεργητής διακινδυνεύει μη ικανοποιητικό αερισμό τις ζεστές μέρες και υπέρ του απαιτούμενου αερισμό κατά τις ψυχρές, ανεμώδεις μέρες.
- Τα πετάσματα που λειτουργούν χειρωνακτικά προϋποθέτουν τη συνεχή διαθεσιμότητα του καλλιεργητή.
- Υπάρχει κίνδυνος να προκύψουν υψηλότερα έξοδα θέρμανσης εάν παρουσιαστούν διαφυγές αέρα λόγω μη στεγανής εφαρμογής των πετασμάτων στο θερμοκήπιο.



Σχήμα 4.1: Θερμοκήπιο που χρησιμοποιεί φυσικό αερισμό (με πετάσματα ανοιγόμενα από κάτω προς τα επάνω).

Το επίπεδο ψύξης που επιτυγχάνεται με τον φυσικό αερισμό εξαρτάται από την ταχύτητα και τη διεύθυνση του πνέοντος ανέμου, τον προσανατολισμό και το πλάτος του θερμοκηπίου, τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα και οποιαδήποτε παρεμπόδιση στη ροή του αέρα από περιβάλλοντα δέντρα ή κτίρια. Τα φυσικά αεριζόμενα θερμοκήπια πρέπει να έχουν ανοίγματα εύρους τουλάχιστον 90 cm με 1,2 m κατά μήκος της κατασκευής, ώστε να επιτρέπεται ο απέναντι αερισμός από τα ρεύματα αέρα. Τα πετάσματα πρέπει να ανοίγουν από επάνω προς τα κάτω ώστε το πρώτο άνοιγμα για αερισμό, τις κρύες μέρες, να επιτρέπει την ανάμιξη του ψυχρού αέρα με τον θερμότερο εσωτερικό, πριν κατευθυνθεί ακριβώς επάνω στα φυτά και ενδεχομένως προκαλέσει σε αυτά καταστροφές.

Ο προσανατολισμός, όπως και η τοποθεσία είναι βασικά στοιχεία για τον φυσικό αερισμό των θερμοκηπίων. Έτσι, η σωστή τοποθέτησή τους είναι τέτοια ώστε ο άνεμος να φυσά εγκάρσια και όχι κατά μήκος της κατασκευής. Επιπλέον, πρέπει να βρίσκονται μακριά από δάση, κτίρια και οποιαδήποτε άλλα φυσικά εμπόδια τα οποία θα μπορούσαν να αναχαιτίσουν την κίνηση του αέρα δια μέσου του θερμοκηπίου.

## 4.2. ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΑΕΡΙΣΜΟΣ (FORCED-AIR VENTILATION)

Ένας μεγάλος αριθμός θερμοκηπίων χρησιμοποιούν ανεμιστήρες για την κίνηση του αέρα προς και από το εσωτερικό τους. Το σύστημα εξαναγκασμένου αερισμού χρησιμοποιεί ανεμιστήρες εγκατεστημένους στο ένα άκρο του χώρου, και κινούμενες διόδους εισαγωγής αέρα ή γρίλιες στο απέναντι άκρο (Buschermohle). Όταν η εσωτερική θερμοκρασία ξεπερνά το επιθυμητό επίπεδο, ένας θερμοστάτης θέτει σε λειτουργία τις γρίλιες και τους ανεμιστήρες. Ο αερισμός επιτυγχάνεται καθώς ο εξωτερικός αέρας εισέρχεται στο θερμοκήπιο μέσα από τις γρίλιες, διασχίζει το χώρο κατά μήκος και τελικά εξέρχεται στο περιβάλλον ωθούμενος από τους ανεμιστήρες. Όταν αποκατασταθεί η επιθυμητή θερμοκρασία χώρου ο θερμοστάτης κλείνει τους ανεμιστήρες και τις γρίλιες. Κάποια πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα που αντιμετωπίζει κανείς με μια εγκατάσταση μηχανικού αερισμού, είναι:

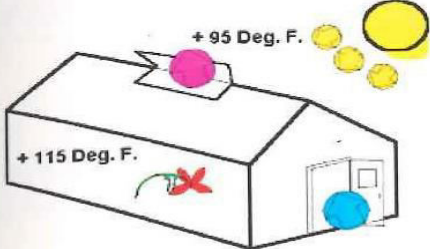
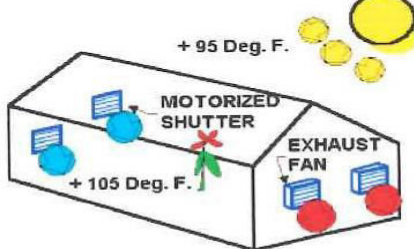
### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες καταστροφής των φυτών λόγω ψύχους.
- Παρέχεται ακριβέστερος έλεγχος του εσωτερικού περιβάλλοντος.
- Η πλήρης αυτοματοποίηση του συστήματος είναι εύκολη υπόθεση.

### ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Οι ανεμιστήρες, οι γρίλιες και τα υλικά των χρησιμοποιούμενων καλωδίων αυξάνουν το αρχικό κόστος του θερμοκηπίου.
- Η απαραίτητη για τη λειτουργία των ανεμιστήρων ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί συνεχόμενη δαπάνη.

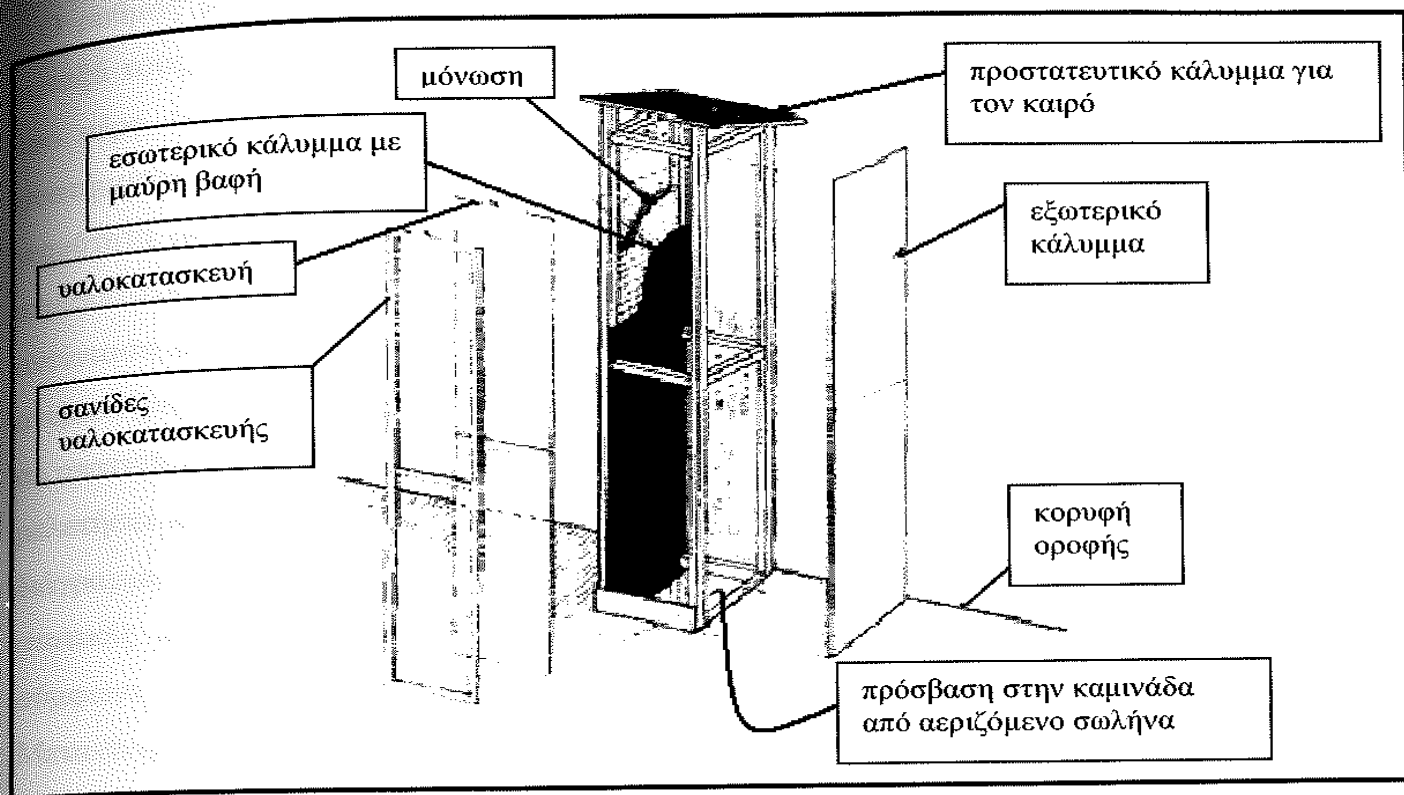
Μια συνοπτική απεικόνιση των δύο μεθόδων αερισμού που περιγράφηκαν, φαίνεται στο σχήμα 4.2.

Natural ventilation	Forced-air ventilation
	
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Σε μια ζεστή καλοκαιρινή μέρα, υπάρχει πιθανότητα η εσωτερική θερμοκρασία να ξεπεράσει κατά πολύ την εξωτερική.</li> <li>✓ Συνίσταται μόνο για περιοχές ήπιου κλίματος.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Με σωστό σχεδιασμό του συστήματος η εσωτερική θερμοκρασία ξεπερνά την εξωτερική μόνο κατά μικρό ποσοστό.</li> <li>✓ Οι γρίλιες και οι ανεμιστήρες ελέγχονται θερμοστατικά.</li> </ul>

Σχήμα 4.2: Σχηματική απεικόνιση των δύο βασικών μεθόδων αερισμού θερμοκηπίων. (International Greenhouse Company, 2003)

### 4.3. ΑΛΛΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΕΡΙΣΜΟΥ

Η Bellows (2003) αναφέρει μία ακόμη μέθοδο που θα μπορούσε να συμμετέχει στον αερισμό των θερμοκηπίων: την ηλιακή καμινάδα (solar chimney) του σχήματος 4.3. Αυτή αποτελεί έναν παθητικό ηλιακό συλλέκτη, εγκαθίσταται στο υψηλότερο σημείο του θερμοκηπίου και χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με αεραγωγούς ή ανοίγματα στα δύο άκρα του χώρου. Η καμινάδα διαθέτει μια είσοδο από την οποία εισέρχεται ο θερμός αέρας του χώρου και μια έξοδο μέσω της οποίας απορρίπτεται στο περιβάλλον. Για να αυξηθεί το ηλιακό κέρδος μέσα στην καμινάδα και να ενισχυθεί η ροή του αέρα, η εσωτερική επιφάνεια της καπνοδόχου διαθέτει υαλώδη επίστρωση ή βάφεται μαύρη. Στην κορυφή της καμινάδας τοποθετείται ένας στρόβιλος εξαερισμού, ο οποίος παρέχει επιπλέον δύναμη για την εξαγωγή του θερμού αέρα από το εσωτερικό του θερμοκηπίου.



Σχήμα 4.3: Ηλιακή καμινάδα.

Τέλος, τα υλικά αποθήκευσης θερμότητας (thermal storage materials) είναι αρκετά αποτελεσματικά στο να διατηρούν ένα θερμοκήπιο δροσερό το καλοκαίρι αλλά και θερμό κατά τους χειμερινούς μήνες (Bellows, 2003). Δεδομένου ότι τα υλικά αυτά απορροφούν θερμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας, μικρότερα ποσά εκπέμπονται μέσα στο χώρο κατά το διάστημα ηλιοφάνειας. Με τη δύση του ήλιου, η αποδιδόμενη από τα υλικά θερμότητα απορρίπτεται στο εξωτερικό περιβάλλον μέσω του χρησιμοποιούμενου συστήματος αερισμού.

#### 4.4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ

Ως ικανότητα των ανεμιστήρων ο Buschermohle ορίζει τον όγκο του αέρα που μετακινείται ανά μονάδα χρόνου. Συνήθως εκφράζεται σε κυβικά μέτρα ανά λεπτό (cubic meters per minute - cmm). Η ποσότητα του αέρα που κινεί ο ανεμιστήρας εξαρτάται από τη διάμετρο και το σχήμα του πτερυγίου του, την ταχύτητα του ανεμιστήρα μετρούμενη σε στροφές ανά λεπτό (revolutions per minute - rpm), την ισχύ του κινητήρα και το σχήμα του καλύμματος. Όλα αυτά τα μεγέθη είναι χρήσιμα αλλά χωρίς τα χαρακτηριστικά λειτουργίας (ροή αέρα και στατική πίεση) αποτελούν απλούς δείκτες της ικανότητας του ανεμιστήρα.



Ο ρυθμός ροής του αέρα (cmh) και η στατική πίεση είναι μεγέθη στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους, για τους ανεμιστήρες και τα συστήματα αερισμού. Η ικανότητα μετακίνησης του αέρα (cmh) από τον ανεμιστήρα επηρεάζεται άμεσα από την στατική πίεση του συστήματος. Καθώς η αντίσταση στη ροή του αέρα (δηλαδή η στατική πίεση) αυξάνει, η ικανότητα μετακίνησης του αέρα μειώνεται. Κατά συνέπεια, ένας ανεμιστήρας 'διανέμει' περισσότερο αέρα έναντι μιας χαμηλής στατικής πίεσης, παρά μιας υψηλής. Γενικά, η αντίσταση ενός συστήματος είναι 0,25 cm – 0,32 cm στήλης ύδατος. Για το λόγο αυτό, οι ανεμιστήρες αερισμού επιλέγονται τυπικά έτσι ώστε να διανέμουν την επιθυμητή ροή αέρα σε στατική πίεση 0,32 cm στήλης ύδατος. Πριν την αγορά του ανεμιστήρα, είναι χρήσιμο να μελετήσει κανείς το διάγραμμα λειτουργίας του, όπως δίνεται από τον κατασκευαστή. Το διάγραμμα αυτό βοηθά στον καθορισμό της ικανότητας ροής αέρα (cmh) σε διάφορες στατικές πιέσεις. Πολλοί κατασκευαστές σχεδιάζουν/ρυθμίζουν τους ανεμιστήρες τους σύμφωνα με πρότυπες διαδικασίες δοκιμής οι οποίες πιστοποιούνται από τον Οργανισμό Μετακίνησης και Ελέγχου Αέρα (Air Movement and Control Association - AMAC), ένα ανεξάρτητο εργαστήριο δοκιμών. Μια συνιστώμενη τακτική είναι η επιλογή ανεμιστήρων που φέρουν την εγγύηση αναγνωρισμένης αξίας από τον AMAC. Οι ανεμιστήρες που διαθέτουν την εγγύηση αυτή είναι περισσότερο βέβαιο ότι θα λειτουργούν σύμφωνα με τα πρότυπα του κατασκευαστή.

Γενικά, πρέπει κανείς να επιλέγει ανεμιστήρες υψηλής απόδοσης που είναι σε θέση να παρέχουν μακρά και δίχως προβλήματα περίοδο λειτουργίας. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες τους πρέπει να εσωκλείονται σε κάλυμμα για να διαφυλάσσονται πλήρως από τη σκόνη και την υγρασία, ενώ το εξωτερικό του καλύμματος πρέπει να διατηρείται καθαρό.

Η λάθος επιλογή ανεμιστήρων μπορεί να οδηγήσει σε σπατάλη ενέργειας και χρημάτων αλλά και σε ζημιές στα φυτά. Ανεμιστήρες μεγέθους μικρότερου από το κανονικό δεν είναι σε θέση να ελέγξουν αποτελεσματικά τη θερμοκρασία του χώρου τις ζεστές ημέρες του χρόνου. Αντίστοιχα, οι υπερδιαστασιοποιημένοι ανεμιστήρες όχι μόνο απαιτούν μεγαλύτερη αρχική επένδυση, αλλά και κοστίζουν περισσότερο στη λειτουργία ενώ παράλληλα δημιουργούν μεγάλες ταχύτητες αέρα οι οποίες έχουν αρνητική επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών.

Ο απαιτούμενος ρυθμός αερισμού σε ένα θερμοκήπιο είναι συνήθως μία εναλλαγή αέρα ανά λεπτό. Επειδή ο ρυθμός αερισμού είναι αρκετά μικρότερος κατά τη διάρκεια των ψυχρών ανοιξιάτικων ημερών από ότι είναι τις ζεστές ημέρες, τα συστήματα αερισμού πρέπει να

λειτουργούν κατά στάδια για να παρέχουν το κατάλληλο ποσό εισερχόμενου αέρα, με αποτέλεσμα έναν καλό θερμοκρασιακό έλεγχο. Το πρώτο στάδιο του αερισμού αναλαμβάνεται από έναν μικρό ανεμιστήρα και το δεύτερο στάδιο από κάποιον άλλο ή από έναν ανεμιστήρα δύο ταχυτήτων ελεγχόμενο από θερμοστάτη, ο οποίος θα παρέχει ανάλογα χαμηλά ή υψηλά επίπεδα αερισμού. Η σωστή διαστασιολόγηση και τοποθέτηση των ανεμιστήρων θα συντελέσει στον κατάλληλο αερισμό του χώρου και στη διατήρηση ενός βέλτιστου περιβάλλοντος για την ανάπτυξη των φυτών. Υπάρχουν καλλιεργητές οι οποίοι στην προσπάθειά τους να μειώσουν το αρχικό κόστος επένδυσης εγκαθιστούν έναν μεγάλο ανεμιστήρα μίας ταχύτητας μόνο. Το βασικότερο μειονέκτημα χρήσης ενός τέτοιου συστήματος είναι ότι υπάρχει πιθανότητα να εισέλθουν στο θερμοκήπιο μεγάλες ποσότητες κρύου αέρα σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Κάτι τέτοιο όμως μπορεί να οδηγήσει σε πάγωμα των μικρών φυτών που βρίσκονται κοντά στις εισόδους.

## 4.5. ΤΡΟΠΟΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΕΣ ΚΑΙ ΓΡΙΛΙΕΣ

Όπως είναι γνωστό, σε όλα σχεδόν τα συστήματα αερισμού η τοποθέτηση των εισόδων αέρα απέναντι από τον ανεμιστήρα (ή τους ανεμιστήρες) καθώς και το μέγεθός τους, είναι σημαντικό ζήτημα. Οι γρίλιες μέσα από τις οποίες ο αέρας εισέρχεται στο θερμοκήπιο πρέπει να κινούνται μηχανικά<sup>2</sup>, ενώ, όπως υπολογίζεται από τον Roberts (1997) το μέγεθός τους πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να παρέχουν ταχύτητα αέρα 213,5 m ανά λεπτό, ή 0,13 m<sup>2</sup> εισόδου ανά 28,3 cm εγκατεστημένης ικανότητας ανεμιστήρων. Κατ' αυτό τον τρόπο, παρέχουν ικανοποιητικό άνοιγμα για τον εισερχόμενο αέρα αλλά και δεν εμποδίζουν τη ροή του αέρα από τον ανεμιστήρα. Κατά κανόνα, οι ανεμιστήρες και οι γρίλιες πρέπει να τοποθετούνται 90 cm πάνω από το επίπεδο των φυτών για να επιτρέπουν στον εισερχόμενο αέρα να αναμιγνύεται με τον θερμότερο αέρα του εσωτερικού χώρου πριν φτάσει στα φυτά, ελαχιστοποιώντας έτσι την πιθανότητα καταστροφής τους από αιφνίδιο ψύχος. Μια τυπική εγκατάσταση για γρίλιες φαίνεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: Γρίλιες για είσοδο του αέρα στο χώρο.

Οι γρίλιες πρέπει να διαθέτουν μηχανισμό ώστε να ανοίγουν όταν οι ανεμιστήρες τίθενται σε λειτουργία, επιτρέποντας έτσι στον αέρα να εισέλθει στο θερμοκήπιο (Buschermohle).

2. Υπάρχουν και γρίλιες που η λειτουργία τους βασίζεται στη βαρύτητα, αλλά επειδή εξαρτώνται αποκλειστικά από τον άνεμο, η χρήση τους δεν συνίσταται. (Roberts, 1997)

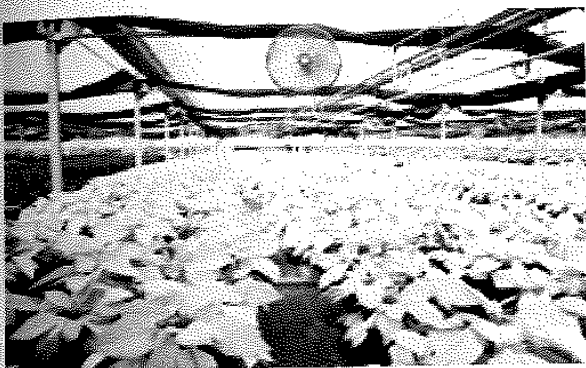
Εάν οι γρίλιες δεν ανοίγουν αρκετά γρήγορα με το ξεκίνημα των ανεμιστήρων, τότε το κύκλωμα των ανεμιστήρων πρέπει να λειτουργεί με μια χρονοκαθυστέρηση 8 έως 10 δευτερολέπτων για να παρέχει το απαιτούμενο διάστημα στις γρίλιες μέχρι να ανοίξουν, διαφορετικά αυτές θα πρέπει να συνδέονται με ξεχωριστό θερμοστάτη, ο οποίος θα τις ανοίγει σε θερμοκρασία 2 – 3 βαθμούς πριν από τους ανεμιστήρες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ – ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ

Ο Porovski (2005) επισημαίνει ότι το είδος και η ταχύτητα κίνησης του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο επηρεάζουν σημαντικά:

- Την ένταση μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του αέρα και των φυτών, και
- Την ένταση ανταλλαγής ποσοτήτων νερού μεταξύ αέρα και φυτών.

Έτσι λοιπόν, μία εξαιρετικά χρήσιμη επένδυση για το χώρο του θερμοκηπίου είναι η εγκατάσταση ανεμιστήρων για την καλή κυκλοφορία του αέρα. Με τον τρόπο αυτό η θερμοκρασία, η υγρασία και η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στην περιοχή καλλιέργειας των φυτών διατηρούνται σε φυσιολογικά επίπεδα.



Σχήμα 5.1:  
Σύστημα κυκλοφορίας του αέρα

Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Buschermohle, δεδομένου ότι σε ένα στεγανό θερμοκήπιο υπάρχει πολύ μικρή φυσική κίνηση αέρα, δημιουργούνται θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ της οροφής και της επιφάνειας των φυτών. Αυτό συμβαίνει γιατί ο θερμός ελαφρύς αέρας ανέρχεται προς την οροφή ενώ ο ψυχρός, βαρύτερος αέρας κινείται καθοδικά, προς το επίπεδο των φυτών. Η μετακίνηση και

ανάμιξη του αέρα με τους ανεμιστήρες εξαλείφει τις διακυμάνσεις αυτές, διανέμοντας τη θερμότητα με ομοιόμορφο τρόπο σε ολόκληρο το χώρο. Αποτέλεσμα αυτής της ομοιομορφίας είναι η διατήρηση μιας σταθερής θερμοκρασίας κοντά στα φυτά που εξασφαλίζει ευνοϊκές συνθήκες ανάπτυξής τους αλλά και μείωση του κόστους θέρμανσης, αφού ο θερμός αέρας διατίθεται εκεί ακριβώς που χρειάζεται, κοντά στα φυτά, και όχι στην οροφή της κατασκευής. Επίσης, ο διερχόμενος ανάμεσα από τα φυτά αέρας διατηρεί το φύλλωμά τους στεγνό, μειώνοντας έτσι το ενδεχόμενο εμφάνισης ασθενειών.

Σύμφωνα με τον Porovski (2005), έχει βρεθεί ότι ταχύτητες αέρα μεταξύ 0,2 και 0,7 m/sec παρέχουν ικανοποιητική μετάδοση της θερμότητας εάν η κίνηση του αέρα είναι κάθετη (για παράδειγμα από το κάτω προς το επάνω μέρος των φυτών). Με ορισμένες εγκαταστάσεις θέρμανσης κάτι τέτοιο είναι εύκολο να επιτευχθεί, αλλά με την πλειοψηφία αυτών

παρατηρείται αρνητική επίδραση στη θερμική κατανάλωση του θερμοκηπίου. Γι' αυτό, πριν την τελική επιλογή της θερμαντικής εγκατάστασης είναι σημαντικό να διερευνάται η θετική ή αρνητική αλληλεπίδρασή της με την κίνηση του αέρα στο εσωτερικό του χώρου.

Συνήθως, μικροί ανεμιστήρες με ικανότητα μετακίνησης αέρα (σε  $m^3/min$ ) ίση με 1/4 του όγκου αέρα του θερμοκηπίου, είναι επαρκείς (Ross). Σε μικρά θερμοκήπια (μήκους μικρότερο από 18 m) οι ανεμιστήρες τοποθετούνται σε απέναντι διαγώνιες πλευρές, όχι όμως κοντά στα άκρα του χώρου. Στόχος είναι να δημιουργηθεί κυκλική (ωοειδής) κίνηση του αέρα. Οι ανεμιστήρες πρέπει να λειτουργούν συνεχώς κατά τη διάρκεια του χειμώνα, ενώ πρέπει να διατηρούνται κλειστοί το καλοκαίρι, όταν δηλαδή το θερμοκήπιο χρειάζεται αερισμό.

Οι δύο πιο κοινές μέθοδοι διανομής του αέρα στα θερμοκήπια είναι το οριζόντιο σύστημα διανομής με ανεμιστήρες και το σύστημα πολλαπλών αγωγών.

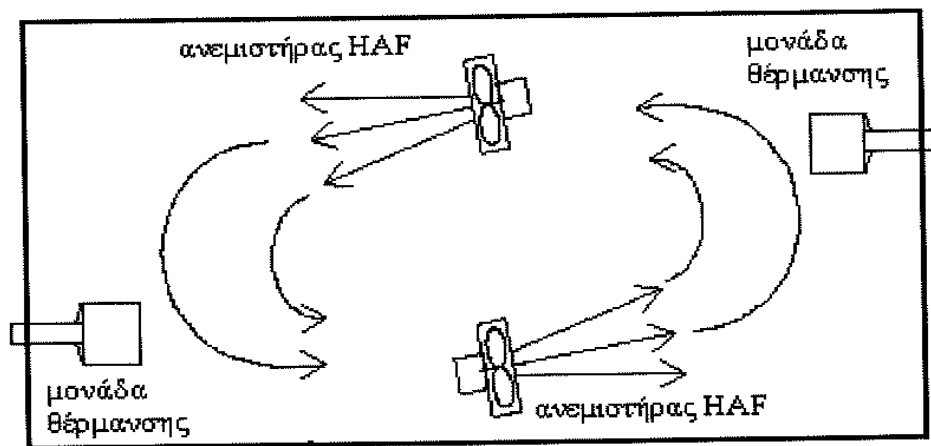
### 5.1. ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΕΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΡΟΗΣ (HORIZONTAL AIR FLOW FANS – HAF)

Όπως αναφέρει και ο Latimer (2001), η μείωση των διαφυγών αέρα και των θερμικών απωλειών από το χώρο του θερμοκηπίου μπορεί να κάνει την κατασκευή στεγανή και να αυξήσει τη σχετική υγρασία. Ανεξάρτητα από τον τύπο του συστήματος θέρμανσης που χρησιμοποιείται, γενικά συνίσταται η τοποθέτηση ενός ικανοποιητικού αριθμού ανεμιστήρων οριζόντιας ροής (σχήματα 5.1 και 5.2) ώστε η κυκλοφορία του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο να γίνεται επαρκώς. Η καλή κυκλοφορία του αέρα συντελεί σε καλύτερη κατανομή της θερμοκρασίας και της υγρασίας στο χώρο, με αποτέλεσμα να μειώνεται το ενδεχόμενο δημιουργίας ψυχρών περιοχών τοπικά καθώς επίσης και να βελτιώνεται η ποιότητα και η ομοιομορφία των φυτών. Ο έλεγχος της υγρασίας κρίνεται απαραίτητος και η διατήρησή της σε επίπεδα κάτω από 80% συνήθως αρκεί για να ελαχιστοποιηθούν πιθανές ασθένειες στα φυτά.



Σχήμα 5.2: Ανεμιστήρας οριζόντιας ροής αέρα.

Εξετάζοντας το σύστημα HAF, ο Buschermohle διακρίνει ότι χρησιμοποιούνται ανεμιστήρες διαμέτρου από 40,5 cm έως 51 cm οι οποίοι είναι αναρτημένοι στο μισό περίπου του ύψους μεταξύ της οροφής και του επιπέδου των φυτών, έτσι ώστε να κινούν συνεχώς τον αέρα μέσα στο χώρο. Οι ανεμιστήρες τοποθετούνται κατά μήκος του θερμοκηπίου με απόσταση 12 – 15 m μεταξύ τους και περίπου στο  $\frac{1}{4}$  του πλάτους κάθε πλευράς. Με αυτή τη διάταξη, οι ανεμιστήρες από κάθε πλευρά του θερμοκηπίου φυσούν προς αντίθετες κατευθύνσεις έτσι ώστε ο αέρας να διασχίζει προς τα κάτω τη μια πλευρά του χώρου, να συνεχίζει διαγωνίως και τελικά να ανέρχεται κατά μήκος της άλλης πλευράς. Επιπλέον, οι ανεμιστήρες θα πρέπει να έχουν κλίση 10 – 15° σχετικά με το κέντρο τους για να επιτυγχάνεται ικανοποιητική ροή του αέρα σε όλο το χώρο. Η λειτουργία των ανεμιστήρων πρέπει να είναι συνεχής. Οι κινητήρες τους είναι πολύ αποδοτικοί και τα οφέλη που προκύπτουν από την καλή κυκλοφορία του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο υπερέρχουν κατά πολύ του κόστους λειτουργίας του συστήματος.



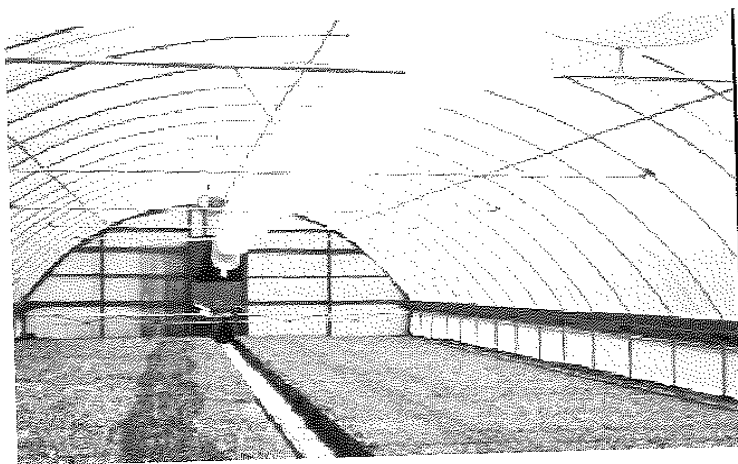
Σχήμα 5.3: Σύστημα HAF.

## 5.2. ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΑΓΩΓΩΝ (POLY – TUBE SYSTEM)

Το σύστημα αυτό, όπως εξηγεί ο Buschermohle, αποτελείται από αγωγούς με οπές σε όλο τους το μήκος, τοποθετημένους στην οροφή του θερμοκηπίου (σχήμα 5.4). Ο αγωγός συνδέεται με την έξοδο αέρα της θερμαντικής μονάδας, διασχίζει το μήκος του θερμοκηπίου και κλείνεται αεροστεγώς στο άλλο του άκρο. Το σύστημα χρησιμοποιείται όχι μόνο για διευκόλυνση της κυκλοφορίας του αέρα αλλά και για θέρμανση και μερικό αερισμό του χώρου. Η κύρια λειτουργία του είναι η μεταφορά και διανομή του αέρα στο χώρο όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα με τη χρήση ανεμιστήρα υψηλής ταχύτητας ο οποίος τοποθετείται

στο ένα άκρο του θερμαινόμενου χώρου, και μέσω σωλήνα σταθερής πίεσης με οπές (διαμέτρου 5- 7,5 cm) κατά μήκος του. Καθώς ο αέρας εξέρχεται με μεγάλη ταχύτητα από τις οπές αναμιγνύει και μετακινεί το μεγάλο όγκο αέρα που υπάρχει μέσα στο θερμοκήπιο, επιτυγχάνοντας έτσι σταθερή και ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλο το χώρο. Ο ανεμιστήρας μπορεί να αποτελεί μέρος του συστήματος θέρμανσης ή να είναι ξεχωριστός από αυτό. Σε περίπτωση που αποτελεί ξεχωριστό μέρος πρέπει να είναι συνδεδεμένος με την τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος για να μπορεί να λειτουργεί ακόμη και όταν το σύστημα θέρμανσης είναι απενεργοποιημένο, ώστε να εξασφαλίζεται διαρκής κυκλοφορία του εσωτερικού αέρα. Ένα πλεονέκτημα του συστήματος πολλαπλών αγωγών έναντι του συστήματος HAF είναι ότι εισάγει στο χώρο φρέσκο αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον και τον διανέμει μέσα από τις οπές των σωληνώσεων, ως πρώτο στάδιο για το δροσισμό του χώρου και τον έλεγχο υγρασίας.

Το μέγεθος των αγωγών καθώς και ο αριθμός και η θέση των οπών είναι συνάρτηση της απόδοσης του ανεμιστήρα και της έκτασης του θερμοκηπίου. Αγωγοί πολύ μικροί ή με πολύ μικρές ή πολύ λίγες οπές, εμποδίζουν τη ροή του αέρα. Κάτι τέτοιο μπορεί να αποτελέσει αιτία ζημιάς στους ανεμιστήρες ή να προκαλέσει ανεπαρκή διανομή του αέρα στο χώρο. Από την άλλη, υπερβολικά μεγάλες οπές, σωλήνες μεγάλου μήκους ή ανεμιστήρες μικρής ικανότητας προκαλούν επίσης μη καλή κατανομή του αέρα<sup>3</sup>. Η θέση των σωλήνων μέσα στο θερμοκήπιο είναι εξίσου σημαντικός παράγοντας. Κατά γενικό κανόνα οι αγωγοί τοποθετούνται στην οροφή, με ωρολογιακή θέση των οπών πάνω τους στις 4 και 8 η ώρα. Οι θέσεις αυτές παρέχουν μια ελαφρά κατεύθυνση προς τα κάτω του εκβαλλόμενου αέρα, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη ανάμειξη στο επίπεδο των φυτών.



Σχήμα 5.4: Σύστημα πολλαπλών αγωγών.

3. Η ταχύτητα του αέρα που βγαίνει από τις οπές των σωλήνων δεν πρέπει να ξεπερνά τα 365 m – 550 m ανά λεπτό, ενώ ο συνολικός όγκος των οπών πρέπει να είναι 1,5-2 φορές το μήκος του σωλήνα. ( Buffington et al.)



Ο αέρας που εξέρχεται από έναν αγωγό μέσω ομαλού κυκλικού ανοίγματος, συμπαρασύρει τον αέρα του θερμοκηπίου και δημιουργεί μια πλήρη και ομαλή ανάμειξη (σχήμα 5.5). Ο Roberts (1997) αναφέρει ότι αυτός ο εξερχόμενος από τον αγωγό αέρας, ακολουθεί την εξίσωση:

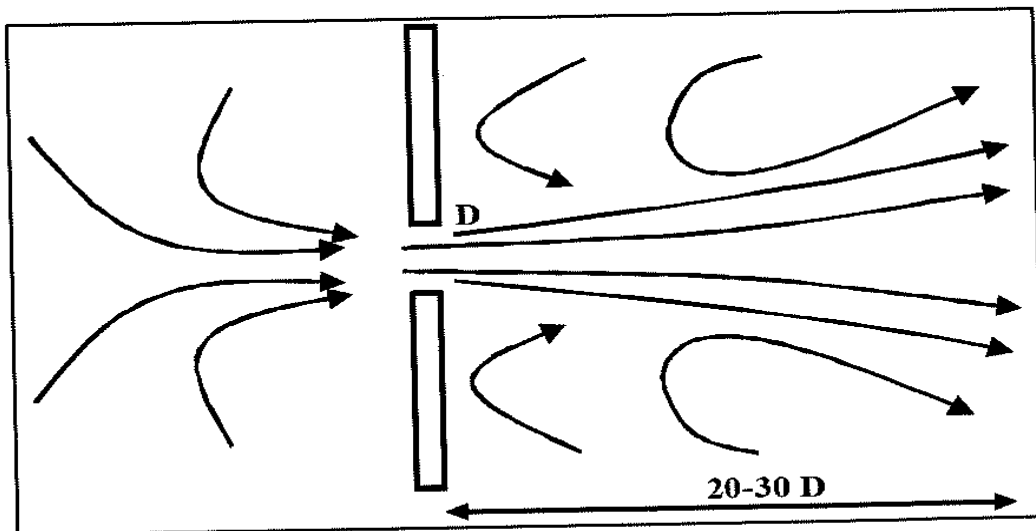
$$Q = 4005 \times C \times A \times (P)^{0,5} \quad (5.1)$$

όπου,  
 $Q$  = η ροή του αέρα σε cfm (cubic feet per minute ή  $\text{ft}^3/\text{min}$ , όπου  $1 \text{ ft} = 30,5 \text{ cm}$ )  
 $C$  = συντελεστής εκροής για κυκλικό άνοιγμα (0,60)  
 $A$  = η επιφάνεια του ανοίγματος σε  $\text{ft}^2$  (για κύκλο:  $\delta d^2/4$ )  
 $P$  = η στατική πίεση μέσα στον σωλήνα, σε ίντσες νερού, και  
 $4005$  = σταθερά του αέρα για δεδομένη θερμοκρασία και πίεση.

Για παράδειγμα, αν ένας λέβητας με ικανότητα μεταφοράς 1800 cfm σε στατική πίεση  $\frac{1}{4}$  ίντσες νερού πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με σωλήνα ο οποίος διαθέτει οπές διαμέτρου 0,25 ft, τότε η ροή αέρα διαμέσου κάθε οπής είναι:

$$Q = 4005 \times 0,6 \times \frac{3,14 \cdot 0,25^2}{4} \times (0,25)^{0,5} = 59 \text{ cfm/οπή.}$$

Εάν το χρησιμοποιούμενο θερμοκήπιο έχει μήκος 96 ft, τότε ο αριθμός των οπών πρέπει να είναι  $1800/59 = 30$  και αν αυτές τοποθετηθούν σε ωρολογιακές θέσεις 4 και 8 η ώρα, τότε απαιτούνται 15 θέσεις πάνω στον αγωγό.



Σχήμα 5.5: Αποτέλεσμα μετακίνησης του αέρα μέσω μικρού ανοίγματος. (Roberts, 1997)

Ο Buschermohle επισημαίνει ως μειονέκτημα του εν λόγω συστήματος, συγκριτικά με το σύστημα HAF, το αρκετά υψηλότερο κόστος ενέργειας, εγκατάστασης και συντήρησης. Ακόμη, οι αγωγοί πρέπει να αντικαθίστανται κάθε λίγα χρόνια, ενώ τα στηρίγματα που χρησιμοποιούνται για την ανύψωσή τους κοστίζουν επίσης ακριβά.

Η λειτουργία ενός συστήματος πολλαπλών αγωγών απεικονίζεται στο σχήμα 5.6 που ακολουθεί.



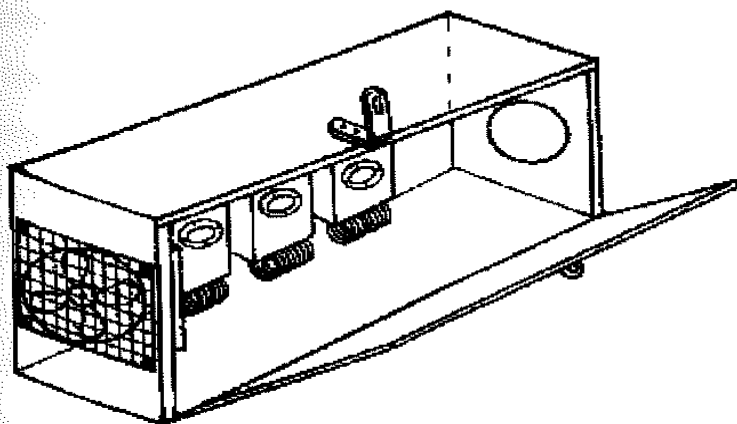
Σχήμα 5.6: Απεικόνιση συστήματος πολλαπλών αγωγών, υποκινούμενου από ανεμιστήρα. (Buffington et al.)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

Η εγκατάσταση αρκετών συστημάτων αυτόματου ελέγχου αποτελεί σημαντικό στοιχείο, καθώς διευκολύνει τους καλλιεργητές οι οποίοι αδυνατούν να βρίσκονται συνεχώς κοντά στο θερμοκήπιο να διατηρούν το κατάλληλο θερμοκρασιακό επίπεδο μέσα στο χώρο.

Το πιο σημαντικό όργανο στα περισσότερα αυτόματα συστήματα είναι ο *θερμοστάτης*, ο οποίος ελέγχει τη λειτουργία τους. Ο θερμοστάτης πρέπει να είναι ακριβής, να αντέχει στις συνθήκες του θερμοκηπίου και να διατηρεί τη βαθμονόμησή του. Η επιλογή της θέσης τοποθέτησής του είναι εξίσου σημαντική. Ο Ross αναφέρει ότι η καταλληλότερη θέση είναι στο επίπεδο των φυτών, κοντά στο κέντρο του θερμοκηπίου, εκεί δηλαδή όπου θα είναι προστατευμένος από την άμεση ακτινοβολία του ήλιου και θα δείχνει την θερμοκρασία του αέρα “καθεαυτού”. Δεν θα πρέπει να τοποθετείται κοντά στα εξωτερικά τοιχώματα ή σε περιοχή άμεσης επιρροής από το σύστημα θέρμανσης. Μια αποτελεσματική λύση είναι η τοποθέτησή του σε ένα μικρό κουτί μέσα από το οποίο θα έχει τη δυνατότητα να “αναπνέει” αλλά και να αερίζεται από μικρής ισχύος ανεμιστήρα, ο οποίος θα κινεί τον αέρα διαμέσου του κουτιού. Συνίσταται η βαφή του κουτιού με άσπρο χρώμα, ώστε να ανακλάται η ηλιακή ακτινοβολία και ο θερμοστάτης να είναι σε θέση να καταγράφει την ακριβή θερμοκρασία του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο. Η ακρίβεια του θερμοστάτη πρέπει να ελέγχεται τακτικά και ο αισθητήρας του να ρυθμίζεται/βαθμονομείται αρκετές φορές κατά τη διάρκεια του έτους. Δεν είναι σημαντική διαφορά μέσα σε μία μόνο ημέρα αν κάποιος νομίζει ότι καλλιεργεί π.χ. στους 17°C ενώ η πραγματική θερμοκρασία είναι 2-3°C υψηλότερη ή χαμηλότερη, η διαφορά όμως γίνεται τρομακτική στη διάρκεια 3-4 χειμερινών μηνών. Ένα σχετικά οικονομικό

θερμόμετρο το οποίο καταγράφει τις μέγιστες και ελάχιστες θερμοκρασίες αποτελεί πολύ χρήσιμη επένδυση, μια που μπορεί να βεβαιώσει ή όχι την ακρίβεια του θερμοστατικού ελέγχου.



Σχήμα 6.1: Κουτί τοποθέτησης θερμοστατών.

Οι θερμοστάτες είναι εξαρτήματα απλά, φθηνά και εύκολα στην εγκατάσταση, όμως είναι πολύ πιθανό να μην είναι ακριβείς και να μην μπορούν να εναρμονισθούν με τον εξοπλισμό ελέγχου του μικροκλίματος. Σύμφωνα με τον Kessler, τα προβλήματα αυτά των θερμοστατών υπερνικούνται από άλλα είδη ρυθμιστών (step controllers) ή από μικροεπεξεργαστές, οι οποίοι παρέχουν πιο πολύπλοκο έλεγχο των συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης και έχουν την ικανότητα να συντονίζουν τις διαδικασίες θέρμανσης, ψύξης και αερισμού. Σε περίπτωση που απαιτούνται υψηλότερα επίπεδα ελέγχου του εξοπλισμού του θερμοκηπίου μπορούν να εγκατασταθούν συστήματα υπολογιστών, τα οποία διαθέτουν αρχεία περιβαλλοντικών δεδομένων και προγράμματα αναπαράστασής τους, αισθητήρες καιρού, καθώς επίσης και άλλες λειτουργίες.

Ένα σύστημα αυτόματου ελέγχου το οποίο αποδεικνύεται εξαιρετικά χρήσιμο σε περιπτώσεις μεταβολής των καιρικών συνθηκών, είναι ο *κινητός εξοπλισμός ρύθμισης της θέσης των πετασμάτων* του θερμοκηπίου, σύστημα θερμοστατικά ελεγχόμενο (Buschermohle). Τα συστήματα ρύθμισης του εξοπλισμού αυτού επιτρέπουν στα πετάσματα να μετακινούνται κατά μικρές προσαυξήσεις, ώστε η ηλιακή ακτινοβολία να εισέρχεται στο χώρο πριν κατεβούν περισσότερο. Το γρήγορο ανέβασμα ή κατέβασμα των πετασμάτων από έναν και μόνο θερμοστάτη δεν ενδείκνυται, επειδή προκαλεί ακανόνιστες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις.

Αντίστοιχα, το *σύστημα αυτόματου αερισμού* κρίνεται απαραίτητο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, όταν η θερμοκρασία αρχίζει να αυξάνει απότομα (Garden Moose, 2004). Επειδή είναι πρακτικά αδύνατο να γνωρίζει κανείς πότε ακριβώς θα παρατηρηθούν αυξημένες θερμοκρασίες, η εγκατάσταση ενός συστήματος αυτόματου αερισμού βοηθάει ώστε το εσωτερικό του θερμοκηπίου να διατηρείται δροσερό ή τουλάχιστον να ανακυκλώνεται ο αέρας για να μην αυξάνεται συνεχώς η θερμοκρασία. Το σύστημα είναι πολύ πρακτικό, ενώ μπορεί να λειτουργήσει και χωρίς ηλεκτρισμό. Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα λειτουργεί με ένα είδος θερμοστάτη, διαφορετικό απ' ό,τι συνήθως. Ως θερμοστάτης χρησιμοποιείται υγρό το οποίο διαστέλλεται με την άνοδο της θερμοκρασίας και στη συνέχεια ενεργοποιεί τον αερισμό του χώρου. Όταν όμως η θερμοκρασία αρχίσει να μειώνεται καθώς βραδιάζει, το υγρό συστέλλεται θέτοντας το σύστημα εκτός λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό, ο θερμοκρασιακός έλεγχος μέσα στο θερμοκήπιο καθίσταται δυνατός, χωρίς να απαιτείται παρακολούθηση από κοντά.

Τέλος, σύμφωνα με την EnviroCept Greenhouses,etc. (2000), χρονομετρητές, συστήματα κυψελών καθώς και άλλος εξοπλισμός διατίθενται στο εμπόριο για τον έλεγχο του φωτισμού, των ανεμιστήρων ή του θερμαντικού συστήματος του θερμοκηπίου, τα οποία είναι σε θέση να παρέχουν ανά πάσα στιγμή έλεγχο του εσωτερικού χώρου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>: ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Το αυξημένο κόστος των καυσίμων και οι πιο ψυχροί από το συνηθισμένο χειμώνες καθιστούν το κόστος θέρμανσης μια σημαντική επιβάρυνση. Κατά συνέπεια τίθεται το ερώτημα πώς μπορεί κανείς να αντιμετωπίσει το υψηλό ενεργειακό κόστος που προκύπτει από τη λειτουργία ενός θερμοκηπίου. Η προσέγγιση του προβλήματος μπορεί να γίνει με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, κάποιιοι από τους οποίους παρατίθενται στη συνέχεια με βάση τους Buschermohle και Latimer (2001).

### Η ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Ο πρώτος και συνηθέστερος τρόπος για μείωση των θερμικών απωλειών και ως εκ τούτου αποτελεσματική θέρμανση του θερμοκηπίου είναι μέσω της κατασκευής του. Οι απώλειες ποικίλλουν ανάλογα με το κάλυμμα της κατασκευής και την παλαιότητά της. Κατά κανόνα οι νεότερες κατασκευές παρουσιάζουν καλύτερη στεγάνωση γύρω από τα ανοίγματα από ότι οι παλαιότερες.

Γενικά, όσο μεγαλύτερο είναι ένα θερμοκήπιο τόσο λιγότερο στοιχίζει η θέρμανσή του ανά τετραγωνικό μέτρο. Οι απώλειες θερμότητας πραγματοποιούνται κυρίως μέσω της εξωτερικής επιφάνειας του θερμοκηπίου. Ένα μεγάλο θερμοκήπιο έχει μικρότερο λόγο εξωτερικής επιφάνειας προς επιφάνεια εδάφους από ότι ένα μικρότερο σε μέγεθος θερμοκήπιο (θεωρώντας κοινό ύψος και για τα δύο μεγέθη). Έτσι, για μια δεδομένη επιφάνεια εδάφους, η θέρμανση ενός μεγάλου θερμοκηπίου κοστίζει λιγότερο από τη θέρμανση δύο μικρών. Ανεξάρτητα από το μέγεθος του χώρου, η μεγιστοποίηση του αριθμού των φυτών ανά τετραγωνικό μέτρο εδάφους μειώνει κατά πολύ το κόστος θέρμανσης.

**Διπλό κάλυμμα.** Τα υλικά των καλυμμάτων δεν αντιστέκονται αποτελεσματικά στη ροή θερμότητας προς το περιβάλλον. Χαρακτηριστικά, ενώ οι εξωτερικοί τοίχοι μιας κατοικίας μπορεί να έχουν τιμή θερμικής αντίστασης  $R$  ίση με  $19 \text{ m}^2\text{K/W}$ , δύο στρώματα πλαστικού με διάκενο αέρα μεταξύ τους παρουσιάζουν μετά βίας  $R = 1,4$ . Για μονό φύλλο πλαστικού η τιμή του  $R$  είναι ακόμη χαμηλότερη, περίπου  $0,9 \text{ m}^2\text{K/W}$  (Buschermohle). Η χρήση διπλού στρώματος από πλαστικό μπορεί να μειώσει το μέγεθος του συστήματος θέρμανσης και να προσφέρει 40% εξοικονόμηση θερμικής ενέργειας.

Αν χρησιμοποιηθεί διπλό κάλυμμα πολυαιθυλενίου η μείωση που επιτυγχάνεται στο κόστος θέρμανσης μπορεί να φτάσει και το 50% σε σχέση με ένα μονό κάλυμμα του ίδιου υλικού. Πριν την τοποθέτηση κάποιου καλύμματος είναι καλό να γνωρίζει κανείς το συντελεστή θερμικών απωλειών ( $u$ ) που παρουσιάζει. Καλύμματα τα οποία μειώνουν την συμπύκνωση υδρατμών, αυξάνουν τη μετάδοση του φωτός και βελτιώνουν τη συγκράτηση της θερμότητας. Ανάμεσα στα φύλλα πολυαιθυλενίου πρέπει να υπάρχει το κατάλληλο κενό ώστε να μεγιστοποιείται η μονωτική ικανότητα του καλύμματος.

**Μετασκευή.** Σε ένα γυάλινο θερμοκήπιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κάλυμμα μονό ή διπλό στρώμα πολυαιθυλενίου για να παρέχει επιπλέον μόνωση τους χειμερινούς μήνες. Ένα μονό στρώμα υλικού πάνω από το γυαλί μειώνει το ετήσιο κόστος θέρμανσης από 5% έως 40% ενώ η αντίστοιχη μείωση που επιτυγχάνεται με διπλό στρώμα κυμαίνεται μεταξύ 40 – 60%. Πριν προβεί κανείς σε μια τέτοια παρέμβαση θα πρέπει να έχει κατά νου ότι εκτός από αυξημένη ενεργειακή απόδοση θα έχει και μειωμένη μεταφορά φωτός, εξαιτίας του διπλού στρώματος πολυαιθυλενίου.

**Ανοίγματα – Ρωγμές.** Ένα στεγανό θερμοκήπιο, με ελάχιστες διαφυγές αέρα (πχ. από σημεία γύρω από τις πόρτες) δεν απαιτεί μεγάλες δαπάνες για θέρμανση. Οποιαδήποτε ρωγμή ή οπή στο πλαστικό, στο γυαλί ή στις πόρτες θα πρέπει να επισκευάζεται. Οι πόρτες πρέπει να παραμένουν κλειστές και τα πλαίσιά τους να διατηρούνται στεγανοποιημένα και να φράσσονται οι χαραμάδες τους.

## ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

**Μόνωση των βόρειων τοιχωμάτων.** Όπως προαναφέρθηκε, τα υλικά κάλυψης των θερμοκηπίων, ειδικά το μονό ή διπλό στρώμα πλαστικού, παρουσιάζουν μικρή αντίσταση στη ροή θερμότητας. Δεδομένου ότι μόνο μια μικρή ποσότητα φωτός εισέρχεται στο χώρο διαμέσου ενός βόρεια προσανατολισμένου τοιχώματος, ο τοίχος αυτός μπορεί να κατασκευαστεί από συμπαγές υλικό, όπως ξύλο ή κοντραπλακέ πάχους 1,3 cm ( το οποίο χάνει περίπου τόση θερμότητα όση και ένας τοίχος από διπλό στρώμα πολυαιθυλενίου) και να μονωθεί με στρώσεις πολυστερίνης, fiberglass ή άλλα παρόμοια μονωτικά υλικά.

Η τοποθέτηση μόνωσης είναι χρήσιμη, τουλάχιστον για προστασία της παραγωγής το χειμώνα. Το μονωτικό υλικό πρέπει να είναι αδιάβροχο ή τουλάχιστον να προστατεύεται από φράγμα υδρατμών. Οι πλάκες ανακλαστικής μόνωσης, οι οποίες προσφέρουν πολύ καλή μονωτική προστασία, τοποθετούνται έτσι ώστε η ανακλαστική τους πλευρά να βρίσκεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Εάν είναι δυνατόν, συνίσταται η τοποθέτηση ανεμοφραχτών έξω από το θερμοκήπιο, σε εκείνη την πλευρά η οποία προσβάλλεται από τον άνεμο. Ως ανεμοφράχτες μπορούν να φυτευτούν κωνοφόρα δέντρα ή να χρησιμοποιηθεί κάποιος άλλος φράχτης, ώστε να εκτρέπει την πορεία του ανέμου.

**Θεμέλια νέων κατασκευών.** Σε καινούργιες κατασκευές, οι απώλειες θερμότητας από τα θεμέλια μπορούν να μειωθούν στο μισό εάν χρησιμοποιηθεί μόνωση πολυουρεθάνης ή πολυστερίνης 2,5 cm – 5 cm. Η μόνωση πρέπει να τοποθετηθεί σε βάθος 46 με 61 cm γύρω από τους τοίχους θεμελίωσης με ιδιαίτερη προσοχή ώστε να μην μείνουν κενά ή ανοίγματα. Κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικά σημαντικό κατά την εγκατάσταση οποιουδήποτε τύπου επιδαπέδιου συστήματος θέρμανσης.

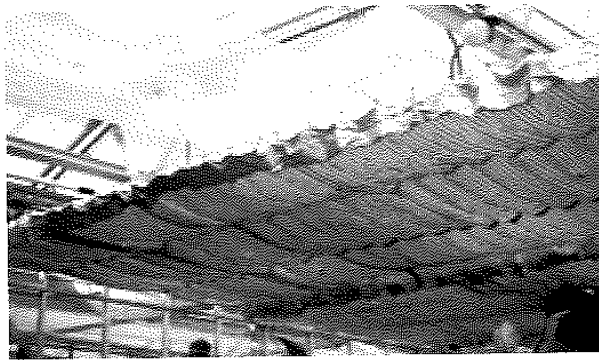
**Υπάρχοντα θεμέλια και πλευρικοί τοίχοι.** Σε περίπτωση που τα θεμέλια του θερμοκηπίου δεν μονώθηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής του είναι χρήσιμο να εξακριβωθεί εάν όλα τα κενά ή οι οπές κάτω από τα θεμέλια έχουν καλυφθεί ή επισκευαστεί. Επίσης, στο εσωτερικό των τοίχων μπορεί να προστεθεί ανακλαστική μόνωση, η οποία όμως δεν πρέπει να εκτείνεται πάνω από το ύψος της καλλιέργειας ή των πάγκων. Οι ανακλαστικές επιφάνειες δεν πρέπει να έρχονται σε επαφή με τους περιμετρικά τοποθετημένους σωλήνες θέρμανσης. Τελικά, η μόνωση των πλευρικών τοίχων μπορεί να μειώσει το ετήσιο κόστος θέρμανσης κατά ποσοστό 5 – 10%.

**Ανεμιστήρες και αεραγωγοί.** Για τη μείωση άλλων διαφυγών αέρα οι βοηθητικοί ανεμιστήρες και αεραγωγοί μπορούν να απομονωθούν, για να μειωθούν με αυτό τον τρόπο οι θερμικές απώλειες από τις περιοχές του θερμοκηπίου που δεν χρησιμοποιούνται, κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Δεν χρειάζεται να καλυφθούν όλοι οι αεραγωγοί, καθώς ο χειμερινός αερισμός είναι απαραίτητος για τον έλεγχο της υγρασίας και την αποκατάσταση της ισορροπίας μεταξύ οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα μέσα στο χώρο. Αυτοί οι αεραγωγοί πρέπει να διατηρούνται σε καλή κατάσταση λειτουργίας ώστε να κλείνουν ερμητικά όταν η χρήση τους δεν κρίνεται απαραίτητη.



## ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΚΑΛΥΜΜΑΤΟΣ (THERMAL BLANKET)

Περισσότερο από 85% των θερμικών απωλειών πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η χρήση ενός θερμικού καλύμματος (σχήμα 7.1) για τη συγκράτηση της θερμότητας μπορεί να αποδειχθεί πολύ αποδοτική επένδυση. Συνιστάνται τα καλύμματα από κάποιο πορώδες υλικό ώστε η συμπύκνωση στο κάτω μέρος της οροφής του θερμοκηπίου να μην 'πλημμυρίζει' (pool above the plants) τα φυτά. Για εκείνες τις κατασκευές που δεν μπορεί να τοποθετηθεί κάποιο εσωτερικό πέτασμα, διατίθενται εξωτερικά καλύμματα τα οποία συμβάλλουν στη μείωση της απώλειας της ακτινοβολίας κατά τις νυχτερινές ώρες.



Σχήμα 7.1: Θερμικό κάλυμμα.

**Μείωση θερμικών απωλειών.** Τα καλύμματα που προσφέρουν κατά κύριο λόγο συγκράτηση της θερμότητας μειώνουν τη χρησιμοποιούμενη ενέργεια σε ποσοστό πάνω από 50%, ενώ αυτά που συνδυάζουν και καλοκαιρινή ηλιοπροστασία μπορούν να μειώσουν το ενεργειακό κόστος το χειμώνα κατά 25% ή και περισσότερο.

**Ανάκτηση του κόστους εγκατάστασης.** Με υπολογιζόμενο κόστος αγοράς και εγκατάστασης περίπου \$10,7 – \$16 /m<sup>2</sup> τα συστήματα αυτά αποδίδουν τα χρήματά τους σε 1 με 2 χρόνια ή και λιγότερο, υπό αυξημένες τιμές καυσίμων.

**Λεπτομέρειες της εγκατάστασης.** Είναι σημαντικό το κάλυμμα να ταιριάζει ακριβώς στους τοίχους του θερμοκηπίου και να εφαρμόζει στεγανά σε αυτούς ώστε να μην παρουσιαστούν απώλειες θερμότητας στο χώρο πάνω από το κάλυμμα.

**Αργό άνοιγμα.** Ιδιαίτερη σημασία έχει το άνοιγμα του καλύμματος με αργό τρόπο, πάνω από φυτά ευαίσθητα στο κρύο. Σε χαμηλές εξωτερικές νυχτερινές θερμοκρασίες, ο χώρος πάνω από το κάλυμμα παρουσιάζει περίπου την μισή θερμοκρασία από αυτή που επικρατεί

μέσα στο θερμοκήπιο. Το κάλυμμα πρέπει να ανοίγει 15 cm – 30,5 cm για 30 λεπτά περίπου έτσι ώστε η ανάμιξη του αέρα να γίνει σταδιακά, πριν το κάλυμμα ανοίξει πλήρως. Ορισμένοι καλλιεργητές περιμένουν έως ότου ο ήλιος ανατείλει και θερμάνει τον αέρα πάνω από το κάλυμμα πριν το ανοίξουν, ο οποίος στη συνέχεια θα αναμιχθεί με τον αέρα του υπόλοιπου χώρου. Κάτι τέτοιο συμβαίνει για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες της καλλιέργειας σε φως.

**Θέση του καλύμματος σε περίπτωση χιονοθύελλας.** Σε περίπτωση χιονοθύελλας το κάλυμμα πρέπει να παραμένει ανοιχτό για να επιτρέπει στη θερμότητα να φτάνει στην οροφή του θερμοκηπίου, έτσι ώστε να εμποδίζεται η συσσώρευση χιονιού πάνω σε αυτήν.

### ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ – ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Η αποδοτικότητα των συστημάτων θέρμανσης ποικίλλει, λαμβάνοντας συνήθως τιμές από 75 έως 100%, ανάλογα με το μοντέλο, την κατασκευή του συστήματος και την ύπαρξη ή όχι αεραγωγών.

Η διατήρηση του θερμαντικού συστήματος σε καλή κατάσταση και λειτουργία αποτελεί βασικό παράγοντα για τη μείωση του κόστους λειτουργίας ενώ παράλληλα παρατείνει τη διάρκεια ζωής της μονάδας. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω:

**Ετήσια συντήρηση.** Η προσεκτική εξέταση του εξοπλισμού για τον εντοπισμό ζημιών σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος είναι απαραίτητη. Κατά τη συντήρηση είναι καλό να ελέγχονται οι ανεμιστήρες των σωληνώσεων, οι εισοδοί του αέρα καθώς και οι εκκενωμένοι σωλήνες για τυχόν εμπόδια (π.χ. φωλιές πουλιών). Οι εστίες θα πρέπει να καθαρίζονται και να ρυθμίζονται τουλάχιστον μία φορά το χρόνο. Ο λέβητας, ο καυστήρας και ο εφεδρικός εξοπλισμός πρέπει να ελέγχεται ότι λειτουργούν με τη μέγιστη δυνατή απόδοση. Επίσης, είναι πολύ σημαντικό να καθαρίζεται η αιθάλη από το εσωτερικό της εστίας. Ακόμη και ένα στρώμα 3 mm μπορεί να αυξήσει την κατανάλωση καυσίμου μέχρι και 10% ενώ ένα στρώμα αιθάλης 1,5 mm στην επιφάνεια ανταλλαγής θερμότητας μιας αεριζόμενης μονάδας είναι αρκετό για να μειώσει την απόδοσή της κατά 25%.

**Επιλογή καυσίμου.** Όλα τα είδη καυσίμων δεν αποδίδουν το μέγιστο σε όλα τα συστήματα θέρμανσης. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να γίνεται επιλογή του κατάλληλου καυσίμου για το εκάστοτε σύστημα, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή απόδοση της θερμότητας.

**Μόνωση.** Ο λέβητας και οι σωλήνες διανομής είναι απαραίτητο να μονώνονται στα σημεία από τα οποία δεν χρειάζεται να μεταδίδεται η θερμότητα.

**Εξωτερικός αέρας για καύση.** Ένας αγωγός εισαγωγής αέρα πρέπει να είναι εγκατεστημένος σε περίπτωση που χρησιμοποιείται σύστημα άμεσης καύσης, ο οποίος θα παρέχει φρέσκο αέρα για καύση από το εξωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου.

**Εξαγωγή καυσαερίων.** Η καμινάδα εξαγωγής αερίων και καυσαερίων της καύσης πρέπει να τοποθετείται τουλάχιστον 75 cm πάνω από το υψηλότερο σημείο της κατασκευής και τουλάχιστον 3 m μακριά από δέντρα ή άλλα εμπόδια. Το ύψος αυτό είναι απαραίτητο ώστε τα αέρια εξαγωγής, περνώντας από τον καπνοσωλήνα, να δημιουργούν ένα ικανοποιητικά ανερχόμενο ρεύμα. Επιπλέον πρέπει να ελέγχεται η στεγανότητα των σωλήνων αερισμού για την αποφυγή διαρροών, ενώ πρέπει να είναι καλά στηριγμένοι ώστε να μην διατρέχουν κίνδυνο κατάρρευσης από τον άνεμο.

**Καθαρισμός των επιφανειών ακτινοβολήσης.** Οι θερμαντικοί σωλήνες ή οποιεσδήποτε άλλες επιφάνειες μετάδοσης της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας πρέπει να καθαρίζονται τακτικά, έτσι ώστε να μην μειώνεται η απόδοσή τους. Επίσης, κατά τη διαδικασία καθαρισμού πρέπει να γίνεται έλεγχος για τυχόν σπασίματα στο θάλαμο καύσης και στους εναλλάκτες, εφόσον αυτά επιτρέπουν τη διαφυγή των άκαυστων αερίων από το θερμοκήπιο. Όλες οι γραμμές αερίων πρέπει να ελέγχονται σε τακτά διαστήματα για τυχόν διαρροές δεδομένου ότι αποτελούν όχι μόνο σπατάλη χρημάτων αλλά και σοβαρή πηγή κινδύνου. Μια συσκευή ανίχνευσης αερίων θεωρείται αποτελεσματική λύση για την εξακρίβωση των διαρροών.

**Κινητήρες και αντλίες.** Η συντήρηση των κινητήρων και των αντλιών του συστήματος θέρμανσης δεν θα πρέπει να παραμελείται, για να μην μειώνεται η αποδοτικότητά τους με την πάροδο του χρόνου.

## **ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΝΕΜΙΣΤΗΡΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΡΟΗΣ (HORIZONTAL AIR FLOW FANS – HAF)**

Με την εγκατάσταση ενός συστήματος ανεμιστήρων HAF (βλέπε Κεφάλαιο 8.1) μπορεί κανείς να επιτύχει ικανοποιητική κυκλοφορία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και κατά συνέπεια βελτιωμένες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας στο χώρο. Τελικά, ευνοείται η παραγωγή καθώς έτσι προάγεται η ανάπτυξη των φυτών και μειώνεται ο κίνδυνος καταστροφής τους λόγω ασθενειών.

## **ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ**

Η χρήση των κατάλληλων θερμοστατών και η σωστή τοποθέτησή τους στο χώρο, όπως έχουν περιγραφεί, είναι ένας ακόμη τρόπος για εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση του κόστους θέρμανσης ή ψύξης ενός θερμοκηπίου. Χαρακτηριστικά είναι τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τη δυνατότητα του θερμοστάτη να “αναπνέει” μέσα στο κουτί όπου τοποθετείται, καθώς έτσι εξοικονομείται 2% με 3% του κόστους καυσίμου, με τη βελτίωση της λειτουργίας του ανεμιστήρα και της θερμαντικής μονάδας. Επιπλέον, οι ηλεκτρονικοί θερμοστάτες θεωρούνται μια πολύ αποδοτική λύση καθώς η θερμοκρασιακή απόκλιση που παρουσιάζουν είναι μικρότερη από 1 °F, σε αντίθεση με τους 3 ή 4 °F που παρατηρούνται στους απλούς, μηχανικούς θερμοστάτες.

Τέλος, δεν πρέπει να παραμελείται η τακτική βαθμονόμηση των αισθητήρων έτσι ώστε να δείχνουν τις πραγματικές θερμοκρασίες εσωτερικού περιβάλλοντος. Ειδικά σε περίπτωση μείωσης των θερμοκρασιών καλλιέργειας οι αισθητήρες πρέπει να είναι ακριβείς για να αποφευχθεί οποιαδήποτε ζημιά στην παραγωγή λόγω ψύχους.

## **ΠΗΓΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ**

Η περισσότερο χρησιμοποιούμενη μέθοδος θέρμανσης θερμοκηπίων είναι η χρήση θερμαντικών μονάδων που τροφοδοτούνται με υγρό, υπό πίεση αποθηκευμένο, προπάνιο. Ωστόσο, πριν καταλήξει κανείς στο καύσιμο που πρόκειται να χρησιμοποιήσει είναι καλό να συγκρίνει μεταξύ των τιμών καυσίμων από διάφορους προμηθευτές, ώστε να επιλέξει την ευνοϊκότερη διαθέσιμη προσφορά. Το σύνολο των ενεργειακών και κατ' επέκταση χρηματικών δαπανών μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας την αποδοτικότητα του θερμοκηπίου από την άποψη εκμετάλλευσης του χώρου και χρήσης τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας. Η

αναβάθμιση του συστήματος καύσης στις υφιστάμενες θερμαντικές μονάδες και η επακόλουθη αύξηση της απόδοσης θα αποζημιώσουν τον καλλιεργητή.

### ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Η αύξηση στις τιμές των συνήθως χρησιμοποιούμενων καυσίμων αρκετές φορές οδηγεί στη χρήση φούρνων ή λεβήτων οι οποίοι καίνε απλό πετρέλαιο, ξύλο ή άνθρακα.

**Σύγκριση κόστους ανά μονάδα καυσίμου.** Εάν κάποιος μελετά τη στροφή προς εναλλακτικά καύσιμα είναι σημαντικό να συγκρίνει μόνο όμοιες μονάδες καυσίμων. Με άλλα λόγια, όλες οι πηγές καυσίμων πρέπει να μελετώνται σε κόστος ισοδύναμης μονάδας θέρμανσης, πχ. € /KW.

**Αξιοπιστία της πηγής καυσίμου.** Κατά την αποτίμηση ενός εναλλακτικού καυσίμου σημαντική θέση κατέχει και η αξιοπιστία της πηγής, καθώς θα πρέπει κανείς να βεβαιωθεί ότι όποια στιγμή χρειαστεί θα έχει στη διάθεσή του επαρκείς ποσότητες αποδεκτής ποιότητας καυσίμου.

**Κόστος μετατροπής και λειτουργίας.** Εκτός από την πραγματική τιμή του καυσίμου, θα πρέπει κανείς να υπολογίσει το κόστος μετατροπής στο νέο σύστημα θέρμανσης και τις διάφορες επιβαρύνσεις κατά τη λειτουργία του συστήματος αυτού. Για παράδειγμα, οι λέβητες που λειτουργούν με ξύλο ή άνθρακα απαιτούν επιπλέον επενδύσεις σε εργατοώρες, ενώ πρέπει να διαθέτουν και μέρος στο οποίο θα συλλέγεται τελικά η στάχτη.

### ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ – ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΤΟΥΣ

Πολλοί καλλιεργητές υιοθετούν την αλλαγή του αρχικού θερμαντικού συστήματος ως τρόπο ελάττωσης των ενεργειακών αναγκών και δαπανών του θερμοκηπίου. Αυτό προϋποθέτει πρωταρχικά την εξέταση της απόδοσης του καθενός συστήματος (Πίνακας 7.1) και της δυνατότητας χρήσης κάποιου συνδυασμού αυτών.

Πίνακας 7.1: Εκτιμώμενες αποδόσεις διαφόρων συστημάτων θέρμανσης θερμοκηπίων (Runkel, 2001)

Σύστημα θέρμανσης	Υπολογιζόμενη απόδοση
Θερμό μονωμένο πάτωμα	90%
Θερμό, μη μονωμένο πάτωμα	80%
Θερμοί σωλήνες νερού κοντά στο πάτωμα	85%
Σωλήνες ατμού κοντά στο πάτωμα	80%
Θερμαντικές μονάδες με αέρα	60%

Επιπλέον, η επιλογή της κατάλληλης θέσης τοποθέτησης του εκάστοτε συστήματος θέρμανσης συντελεί σε αύξηση της απόδοσής του και κατά συνέπεια σε καλύτερο θερμοκρασιακό έλεγχο του χώρου και εξοικονόμηση ενέργειας. Η εγκατάσταση λοιπόν των σωλήνων θέρμανσης σε χαμηλές θέσεις, κοντά στα φυτά, οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας μέχρι και πάνω από 20% σε σχέση με την τοποθέτησή τους σε υψηλότερα σημεία (Teitel et al., 1999). Αυτό συμβαίνει γιατί έτσι ακτινοβολείται περισσότερη θερμότητα απευθείας στα φυτά και μικρότερη προς το διαφανές κάλυμμα της κατασκευής, με αποτέλεσμα τη μείωση των θερμικών απωλειών. Εάν οι σωληνώσεις τοποθετηθούν ακόμη χαμηλότερα, στο ύψος του εδάφους, προκαλείται ευνοϊκή κίνηση του αέρα διαμέσου των φυτών.

**Θέρμανση στις ρίζες των φυτών (root zone heating).** Η θέρμανση στην περιοχή των ριζών είναι μια μέθοδος καλλιέργειας σε θερμοκήπια η οποία εστιάζει στην βέλτιστη θερμοκρασία των ριζών, μέσω διανομής της θερμότητας στα συστήματα που εγκαθίστανται σε πάγκους ή στο δάπεδο. Αποτελεί την κατάλληλη τεχνολογία για προώθηση της ενεργειακής εξοικονόμησης στην σύγχρονη παραγωγή σε θερμοκήπια. Για τη θέρμανση των ριζών, ζεστό νερό διανέμεται μέσω ελαστικών σωλήνων (γνωστών και ως υδρονικό σύστημα) ή μέσω σωληνώσεων από PVC τοποθετημένων σε βρόχους. Αν και τα σύγχρονα θερμοκήπια συνήθως χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ή πετρέλαιο για τη θέρμανση του νερού, υπάρχουν και εναλλακτικές πηγές ενέργειας συμπεριλαμβανομένης της γεωθερμικής, της ηλιακής, της θερμικής βιομάζας (της θερμότητας δηλαδή από το λίπασμα των φύλλων ή από τις σωρούς κλαδιών), της παραγόμενης ενέργειας από την καύση ξυλείας, και της συμπαραγωγής.

Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι εμφανές αποτέλεσμα χρήσης της μεθόδου.. Η έρευνα έχει αποδείξει ότι οι θερμοκρασίες των ριζών είναι περισσότερο κρίσιμες όσον αφορά την ανάπτυξη των φυτών, από ότι οι θερμοκρασίες των φύλλων. Ο Diver (2002) υποστηρίζει ότι διατηρώντας μια ευνοϊκή θερμοκρασία στην περιοχή των ριζών, η θερμοκρασία του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο είναι δυνατόν να μειωθεί μέχρι και 15 °F.

Η χρήση του συστήματος ενδείκνυται για θέρμανση του εδάφους στην περίπτωση φυτών που αναπτύσσονται απευθείας επί του εδάφους (πχ. διακοσμητικά φυτά μέσα σε κοντέινερ) καθώς επίσης και για λαχανικά που καλλιεργούνται μέσα στο χώμα. Σε περίπτωση μάλιστα καλλιεργειών που ευνοούνται από σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, ενδεχομένως να μην χρειάζεται καν βοηθητική θέρμανση του αέρα για ενίσχυση του συστήματος θέρμανσης του εδάφους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Η υπολογιστική ρευστομηχανική (Computational Fluid Dynamics - CFD) είναι ένα υπολογιστικό εργαλείο το οποίο εστιάζει στην προσομοίωση της συμπεριφοράς συστημάτων που περιλαμβάνουν ροές ρευστών, μεταφορά θερμότητας και άλλες σχετικές φυσικές διεργασίες, με τη χρήση Η/Υ. Λειτουργεί επιλύοντας εξισώσεις ροών σε μια εξεταζόμενη περιοχή υπό συγκεκριμένες συνθήκες που καθορίζονται στα όριά της. (CFX-5.7.1 manual, 2004)

### 8.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εδώ και πολλά χρόνια οι Η/Υ χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων ροής, με την ανάπτυξη ποικίλων προγραμμάτων. Από τα μέσα της δεκαετίας του '70 οι πολύπλοκοι μαθηματικοί αλγόριθμοι άρχισαν να κατανοούνται, έτσι αναπτύχθηκαν οι πρώτοι γενικοί επιλυτές υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Η περαιτέρω ανάπτυξη, στις αρχές του 1980, προϋπέθετε πολύ ισχυρούς υπολογιστές, βαθειά γνώση της δυναμικής των ρευστών και πάρα πολύ χρόνο για τη διεκπεραίωση των προσομοιώσεων. Συνεπώς, η υπολογιστική ρευστομηχανική ήταν εργαλείο που χρησιμοποιούνταν σχεδόν αποκλειστικά στην έρευνα.

Η πρόσφατη πρόοδος στην κατασκευή Η/Υ σε συνδυασμό με τα ισχυρά γραφικά και την τρισδιάστατη απεικόνιση των μοντέλων έχουν προάγει την κατασκευή μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής και την ανάλυση των αποτελεσμάτων σε εργασία που απαιτεί πολύ λιγότερο κόπο, χρόνο και κατά συνέπεια κόστος. Εξελιγμένοι πλέον επιλυτές περιέχουν αλγορίθμους οι οποίοι καθιστούν δυνατή την ανάπτυξη μιας αξιόπιστης λύσης μέσα σε λογικό χρονικό διάστημα.

Σαν αποτέλεσμα όλων αυτών, η υπολογιστική ρευστομηχανική είναι πια ένα καθιερωμένο υπολογιστικό εργαλείο που παρέχει δυνατότητα παραλλαγών της προσομοίωσης σε σύντομο χρόνο, με εμφανή πλεονεκτήματα.



## 8.2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Η υπολογιστική ρευστομηχανική βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes. Αυτές, σύμφωνα με τον Γούλα (1986), εκφράζουν ουσιαστικά τον δεύτερο νόμο του Newton που λέει ότι η μεταβολή της ορμής ενός στοιχείου ρευστού ισούται με τη συνισταμένη των δυνάμεων που ενεργούν πάνω στο στοιχείο αυτό. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να χωριστούν:

- α) Σε δυνάμεις πίεσης ( $\nabla p$ ),
- β) Δυνάμεις εξωτερικές, όπως βαρύτητα κλπ. ( $F$ ),
- γ) Δυνάμεις ιξώδους (τριβής), ( $\mu \nabla^2 u$ ).

Σε κάθε διεύθυνση η δύναμη της πίεσης είναι ίση με την κλίση της πίεσης στη διεύθυνση αυτή (π.χ. στη διεύθυνση  $x$  είναι  $\partial p / \partial x$ ).

Οι εξωτερικές δυνάμεις, όπως της βαρύτητας, είναι ανεξάρτητες των χαρακτηριστικών του πεδίου ροής.

Η διανυσματική έκφραση της εξίσωσης Navier – Stokes, είναι

$$\left( \rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{u} + F \right) \quad (8.1),$$

ισχύει για νευτώνιο ρευστό και μπορεί να αναλυθεί στις τρεις διευθύνσεις. Η δύναμη  $F$  είναι εξωτερική δύναμη που έχει σχέση με την βαρύτητα και ονομάζεται *συνήθης* ή *δύναμη του σώματος* (*body force*), γιατί ενεργεί στο κέντρο βάρους του στοιχειώδους όγκου και όχι στην επιφάνειά του, όπως οι δυνάμεις τριβής.

Οι τάσεις που εμφανίζονται στο ρευστό λόγω του ιξώδους ουσιαστικά εμποδίζουν τη σχετική κίνηση ανάμεσα σε γειτονικά στοιχεία του ρευστού ή γενικότερα εμποδίζουν την παραμόρφωση των στοιχείων του ρευστού.

Οι εξισώσεις Navier – Stokes λοιπόν είναι μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις, καθώς η ταχύτητα εμφανίζεται τόσο στον όρο της επιτάχυνσης, όσο και στις δυνάμεις που την καθορίζουν. Η μαθηματική δυσκολία που παρουσιάζεται στην επίλυση των εξισώσεων της Μηχανικής των ρευστών, οφείλεται ακριβώς σ' αυτό το διπλό ρόλο της ταχύτητας.

Αναλυτικότερα, οι εξισώσεις Navier-Stokes αποτελούν τις εξισώσεις μεταφοράς, οι οποίες είναι:

1) **Η εξίσωση συνέχειας:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (8.2),$$

2) **Η εξίσωση ορμής:**

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = \nabla \cdot (-p \delta + \mu(\nabla U + (\nabla U)^T)) + S_M \quad (8.3),$$

3) **Η εξίσωση ενέργειας:**

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (8.4),$$

Το manual του προγράμματος CFX 5.7.1 (2004) επισημαίνει ότι οι εξισώσεις Navier – Stokes μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με εξισώσεις που περιγράφουν άλλες διεργασίες, όπως η καύση. Συνήθως για την παραγωγή των εξισώσεων αυτών χρησιμοποιούνται προσεγγιστικά μοντέλα, με ευρέως χρησιμοποιούμενα τα μοντέλα τύρβης.

Οι κώδικες της υπολογιστικής ρευστομηχανικής χρησιμοποιούν έναν αριθμό διαφορετικών μεθόδων επίλυσης. Η πιο κοινή από αυτές είναι γνωστή ως τεχνική πεπερασμένων όγκων (finite volume technique).

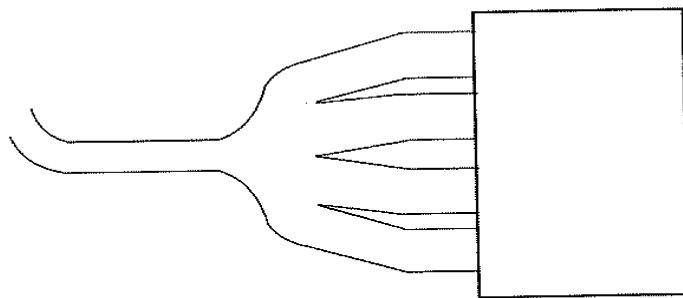
Στην τεχνική αυτή, η εξεταζόμενη περιοχή διαιρείται σε μικρές υπο-περιοχές, που αποκαλούνται όγκοι ελέγχου. Το σύστημα των εξισώσεων επιλύεται με μια επαναληπτική μέθοδο για τον κάθε όγκο ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος λειτουργεί ως εξής: το πεδίο της πίεσης αρχικά λαμβάνεται αυθαίρετο και επιλύονται οι εξισώσεις ορμής με το δεδομένο πεδίο πίεσης (Μπούρης, κ.ά., 1997). Όμως, οι ταχύτητες που υπολογίζονται από τις εξισώσεις ορμής δεν ικανοποιούν την εξίσωση διατήρησης της μάζας και είναι απαραίτητη κάποια διόρθωσή τους. Η διόρθωση του πεδίου των ταχυτήτων γίνεται μέσω μιας αντίστοιχης διόρθωσης στο πεδίο της πίεσης έτσι ώστε τελικά να ικανοποιείται η εξίσωση της συνέχειας. Μετά από τις διορθώσεις αυτές, η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι οι λύσεις πεδίου ταχυτήτων και πίεσης να ικανοποιούν όλες τις εξισώσεις (ορμής αλλά και συνέχειας).

Ως αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής λαμβάνεται μια προσέγγιση της τιμής κάθε μεταβλητής σε συγκεκριμένα σημεία της εξεταζόμενης περιοχής. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί κανείς να έχει μια πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς της ροής.

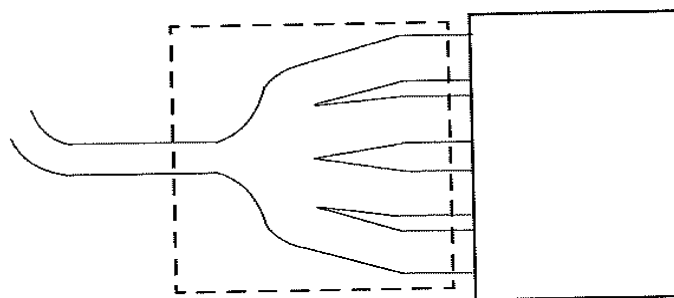
### 8.3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η υπολογιστική ρευστομηχανική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό της λειτουργίας ενός στοιχείου στο στάδιο σχεδιασμού ή για να αναλύσει τα προβλήματα που παρουσιάζονται σε ένα υπάρχον στοιχείο και να προχωρήσει σε βελτιωμένο σχεδιασμό του.

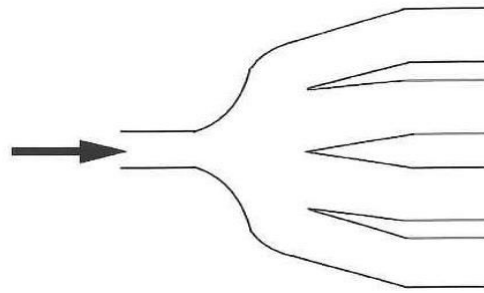
Για παράδειγμα, η πτώση πίεσης διαμέσου στοιχείου διακλάδωσης μπορεί να παρασταθεί ως εξής:



Το πρώτο βήμα είναι να καθοριστεί η περιοχή που πρόκειται να μελετηθεί:

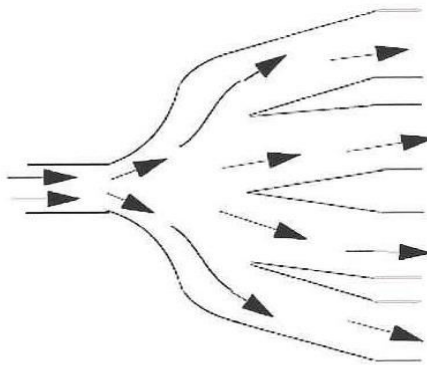


Στη συνέχεια κατασκευάζεται η γεωμετρία της περιοχής αυτής και εισάγεται στο πρόγραμμα. Ακολουθεί η κατασκευή του πλέγματος, η εισαγωγή του στον προ-επεξεργαστή και ο καθορισμός άλλων παραμέτρων, όπως οι οριακές συνθήκες του προβλήματος (είσοδοι ρευστού, έξοδοι, κ.ά.) και οι ιδιότητες των ρευστών.



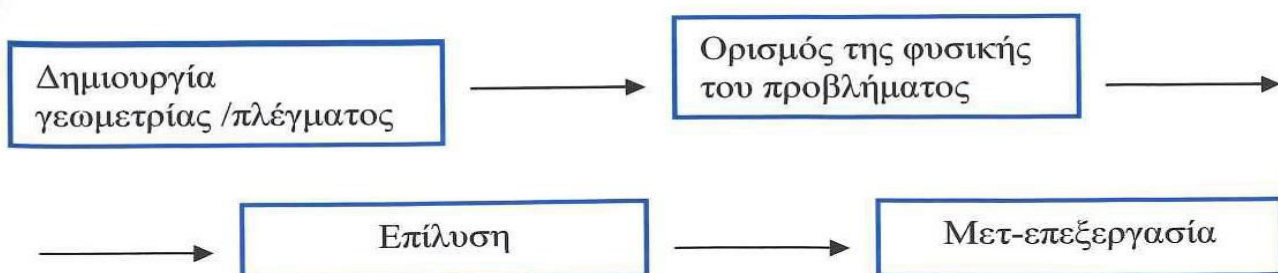
Μετά ξεκινάει το πρόγραμμα επίλυσης της ροής για να δημιουργηθεί ένα αρχείο αποτελεσμάτων το οποίο περιέχει τις μεταβολές της ταχύτητας, της πίεσης και όλων των άλλων μεταβλητών μέσα στην εξεταζόμενη περιοχή.

Τα αποτελέσματα μπορούν να απεικονιστούν παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα κατανόησης της συμπεριφοράς του ρευστού διαμέσου της περιοχής.



Τελικά, διάφορες παραλλαγές του μοντέλου μπορούν να εφαρμοστούν και να εξεταστούν με αλλαγή της γεωμετρίας και μελέτη των αποτελεσμάτων.

Γενικά, τέσσερα είναι τα στάδια προσομοίωσης με ένα πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, τα οποία αναλύονται παρακάτω ειδικά για το πρόγραμμα CFX.



## 8.4. ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Στα πλαίσια της υπολογιστικής ρευστομηχανικής, όπως περιγράφει και το manual του προγράμματος CFX 5.7.1 (2004), η μοντελοποίηση της ακτινοβολίας έχει σκοπό να επιλύσει την εξίσωση μεταφοράς της ακτινοβολίας, και μεταξύ άλλων, να υπολογίσει τον όρο πηγής  $S_E$  για την εξίσωση της ενέργειας και τη ροή της ακτινοβολίας στα τοιχώματα.

Η εξίσωση μεταφοράς της ακτινοβολίας μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{dI_v(r, s)}{dl} = -(K_{av} + K_{lv}) \cdot I_v(r, s) + K_a I_b(v, T) + \frac{K_{lv}}{4\pi} \cdot \int_{4\pi} dI_v(r, s') \cdot \Phi(s \bullet s') d\Omega' + S \quad (8.5),$$

όπου,  $v$  = συχνότητα,

$r$  = διάνυσμα θέσης,

$s$  = διάνυσμα κατεύθυνσης,

$l$  = μήκος πορείας φωτονίου,

$K_a$  = συντελεστής απορρόφησης,

$K_l$  = συντελεστής διάχυσης,

$I_b$  = ένταση εκπομπής σώματος,

$I_n$  = έντασης φασματικής ακτινοβολίας η οποία εξαρτάται από τη θέση ( $r$ ) και την κατεύθυνση ( $s$ ),

$T$  = τοπική απόλυτη θερμοκρασία,

$\Omega$  = στερεά γωνία,

$\Phi$  = συνάρτηση φάσης,

$S$  = ένταση πηγής ακτινοβολίας.

Η εξίσωση (8.5) είναι μια ολοκληρωτική διαφορική εξίσωση πρώτου βαθμού για το  $I_v$  σε μια δεδομένη κατεύθυνση  $s$  (επιλύεται για κάθε μήκος κύματος, δηλαδή για κάθε  $v$ ). Αυτή, για να λυθεί μέσα σε ένα πεδίο ορισμού πρέπει να οριστεί μια οριακή συνθήκη για το  $I_v$ . Οι οριακές συνθήκες που υποστηρίζονται από το προσομοιωτικό πρόγραμμα CFX (το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής), είναι:

- Αδιαφανή όρια για τα οποία η εκπομπή και η διάχυση γίνεται ισοτροπικά,
- Όρια διάχυτης εκπομπής και κατοπτρικής ανάκλασης,
- Ημιδιαφανείς τοίχοι.

Στην περίπτωση που πρόκειται να μελετηθεί στη συνέχεια ισχύουν οι δύο πρώτες από τις τρεις αυτές περιπτώσεις.

Λόγω της εξάρτησης από τις τρεις συντεταγμένες του χώρου, από δύο συντεταγμένες κατεύθυνσης ( $s$ ) και από τη συχνότητα, η συμβατική λύση της εξίσωσης μεταφοράς ακτινοβολίας είναι πολύ χρονοβόρα και συνήθως επιτυγχάνεται με τη χρήση προσεγγιστικών μοντέλων, κάποια από τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια

### 8.4.1. ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΑΠΟ ΣΩΜΑ

Το ενεργειακό φάσμα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα σώμα μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

$$E_b(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \cdot \frac{n^2 h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} [\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}] = \pi I_b(\nu, T) \quad (8.6),$$

όπου,  $n$  = δείκτης διάθλασης,

$h$  = σταθερά του Planck,

$c$  = ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Θέτοντας  $x = \frac{h\nu}{k_B T}$  (όπου το  $k_B$  συμβολίζει τη σταθερά του Boltzman), η εξίσωση (8.6)

γίνεται:

$$E_b(x, T) = n^2 \sigma T^4 \left( \frac{15}{\pi^4} \cdot \frac{x^3}{e^x - 1} \right) \quad (8.7),$$

με  $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2}$  (σταθερά Stefan-Boltzmann). Η συνολική εκπομπή του σώματος

υπολογίζεται από την ολοκλήρωση του  $E_b$  σε όλες τις συχνότητες, δηλαδή:

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_b(x, T) dx = n^2 \sigma T^4 \quad (8.8).$$

Σε αυτό το σημείο αξίζει να παρατηρήσει κανείς ότι η εκπομπή ακτινοβολίας από σώμα είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της θερμοκρασίας. Εξαιτίας λοιπόν αυτής της ισχυρής εξάρτησης η ακτινοβολία είναι συνήθως ασήμαντη ή απόλυτα καθοριστική για τη μετάδοση της θερμότητας, ανάλογα με την επίδραση αγωγής και συναγωγής στο φυσικό φαινόμενο.

### 8.4.2. ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ

Η φασματική ροή θερμότητας με ακτινοβολία,  $q_v$ , που διέρχεται μέσω επιφάνειας σε κάποια θέση  $r$ , με κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα  $n$ , είναι:

$$q_v^R(r, n) = \int (s \cdot n) I_v(r, s) d\Omega_s \quad (8.9).$$

Με την ολοκλήρωση της εξίσωσης μεταφοράς σε όλες τις στερεές γωνίες ( $d\Omega$ ), δηλαδή τις κωνικές γωνίες με κατεύθυνση  $s$ , η απόκλιση της φασματικής ροής θερμότητας με ακτινοβολία γράφεται:

$$(-\nabla \cdot q_v^R) = K_a (G_v - 4E_{bv}) \quad (8.10),$$

όπου  $G_v$  η φασματική προσπίπτουσα ακτινοβολία, η οποία εξ' ορισμού είναι

$$G_v \equiv \int I_v d\Omega_s \quad (8.11),$$

Η ολική ροή ακτινοβολίας λαμβάνεται με ολοκλήρωση της (8.10) σε όλο το φάσμα:

$$\nabla \cdot q^R = \int_0^\infty q_v^R dv = \int_0^\infty K_{av} G_v dv - 4 \int_0^\infty K_{av} E_{bv} dv \quad (8.12).$$

Στην περίπτωση της καθαρής διάχυσης ισχύει  $K_a = 0$ . Συνεπώς  $\nabla \cdot q^R = 0$ , καθώς σε αυτή την περίπτωση δεν χάνεται καθόλου ενέργεια από το πεδίο ακτινοβολίας, γεγονός που επαληθεύεται και από την θερμοδυναμική ισορροπία.

### 8.4.3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Η μοντελοποίηση της ακτινοβολίας είναι δυνατόν να γίνει με τη χρήση διαφόρων μοντέλων, μεταξύ των οποίων, κατά το manual του CFX 5.7.1 (2004), είναι και τα:

1. Μοντέλο Rosseland (ή μοντέλο προσέγγισης της διάχυσης – Diffusion Approximation model),
2. Μοντέλο P-1 (γνωστό και ως μοντέλο Gibb's ή μοντέλο σφαιρικής αρμονίας – Spherical Harmonics model),
3. Μοντέλο διακριτής μεταφοράς (Discrete Transfer model), και
4. Μοντέλο Monte Carlo.

Ροές μεγάλου πρακτικού ενδιαφέροντος εμφανίζονται συνήθως σε περιπτώσεις που το ρευστό και/ή οι επιφάνειες που το περικλείουν βρίσκονται σε θερμή κατάσταση. Στις

περιπτώσεις αυτές, η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία μπορεί να αποδειχθεί σημαντική. Ένα τυπικό παράδειγμα περιβάλλοντος όπου η ακτινοβολία κατέχει σημαντικό ρόλο είναι ένας κλίβανος ή άλλος παρόμοιος θάλαμος καύσης.

Δύο οριακές καταστάσεις μπορούν να διακριθούν στον τρόπο με τον οποίο η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με ένα υγρό ή στερεό μέσο. Στην πρώτη από αυτές το μέσο είναι διαφανές στην ακτινοβολία εκείνων των μηκών κύματος στα οποία πραγματοποιείται το μεγαλύτερο μέρος της διαδικασίας μεταφοράς θερμότητας. Εδώ, η ακτινοβολία επηρεάζει το μέσο μόνο θερμαίνοντας ή ψύχοντας τις επιφάνειες του πεδίου ορισμού, χωρίς άμεση μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία προς το μέσο. Το μοντέλο Monte Carlo είναι το μόνο που θα πρέπει να χρησιμοποιείται για να περιγράψει μια τέτοια κατάσταση. Ενίοτε χρησιμοποιείται και το μοντέλο διακριτής μεταφοράς αλλά με περιορισμένη επιτυχία.

Στη δεύτερη οριακή κατάσταση το μέσο είναι οπτικά πυκνό και η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με το μέσο διαμέσου του χώρου εσωτερικά στο πεδίο ορισμού, καθώς επίσης και διαμέσου των επιφανειών. Όταν το μέσο παρουσιάζει οπτικό πάχος<sup>4</sup>, η ακτινοβολία είτε διασκορπίζεται, είτε απορροφάται και επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις σε μικρής κλίμακας αποστάσεις σχετικά με το μέγεθος του πεδίου ορισμού. Αυτή η κατάσταση είναι γνωστή και ως “όριο διάχυσης” (diffusion limit), δεδομένου ότι η ένταση της ακτινοβολίας είναι ανεξάρτητη της κατεύθυνσης. Σε αυτή την περίπτωση, τα μοντέλα Rosseland και P1 αποτελούν καλή εναλλακτική λύση σε σχέση με το Monte Carlo και το μοντέλο διακριτής μεταφοράς, εξαιτίας της απλότητάς τους.

#### 8.4.3.1. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ MONTE CARLO

Η μέθοδος Monte Carlo προσομοιώνει τις θεμελιώδεις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο εκάστοτε εξεταζόμενο σύστημα, όπως τη φυσική αλληλεπίδραση μεταξύ των φωτονίων και του περιβάλλοντός τους. Αν ακολουθήσει κανείς την πορεία ενός από τα φωτόνια που εκπέμπονται από μια πηγή (π.χ. μια θερμή επιφάνεια) θα διαπιστώσει ότι αυτό, κινείται μέσα στο πεδίο ορισμού και κάθε φορά που συναντά κάποια επιφάνεια, προσκρούει σε αυτήν χάνοντας έτσι ένα ποσοστό από την αρχική του ενέργεια.

4. Το οπτικό πάχος είναι ένα μέτρο της ικανότητας ενός δεδομένου μήκους αερίου να εξασθενεί την ακτινοβολία ενός δεδομένου μήκους κύματος.



Η διαδικασία (ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ φωτονίου-επιφανειών) συνεχίζεται, ώσπου το φωτόνιο χάνει εξολοκλήρου την ενέργειά του. Στο σημείο αυτό θεωρείται ότι “πεθαίνει”. Ο αριθμός των φωτονίων που εκπέμπονται από μία επιφάνεια εκφράζεται με την παράμετρο *histories*. Για να αποκτήσει κανείς μια καλή εκτίμηση των φυσικών ποσοτήτων του συστήματος πρέπει να δημιουργήσει πολλά *histories*.

Το μοντέλο Monte Carlo υποθέτει ότι η ένταση είναι ανάλογη με την διαφορική γωνιακή ροή φωτονίων ( $\frac{q_v}{d\Omega_s}$ ) και παρομοιάζει το πεδίο ακτινοβολίας με αέριο φωτονίων. Για το αέριο αυτό,  $K_a$  θεωρείται η πιθανότητα ανά μονάδα μήκους να απορροφηθεί ένα φωτόνιο σε μια δεδομένη συχνότητα. Επομένως, η μέση ένταση ακτινοβολίας ( $I$ ) είναι ανάλογη της απόστασης που διανύει το φωτόνιο στη μονάδα του όγκου στη θέση  $r$ , ανά μονάδα χρόνου.

Παρομοίως, η φασματική ροή θερμότητας με ακτινοβολία,  $q_v^R$ , είναι ανάλογη του ρυθμού πρόσπτωσης φωτονίων στην επιφάνεια σε θέση  $r$ , αφού η κατ' όγκο απορρόφηση είναι ανάλογη με το ρυθμό απορρόφησης φωτονίων.

Ακολουθώντας έναν αριθμό φωτονίων μέσα σε κάθε στοιχείο του όγκου:

1. Από την απόσταση που διανύθηκε μπορεί κανείς να υπολογίσει τη μέση συνολική ένταση της ακτινοβολίας.
2. Ο πολλαπλασιασμός της απόστασης με το συντελεστή απορρόφησης δίνει τη μέση συνολικά απορροφούμενη ακτινοβολία, και
3. Με τον πολλαπλασιασμό της απόστασης με το συντελεστή διάχυσης υπολογίζεται η μέση συνολικά διαχεόμενη ακτινοβολία.

Τέλος, απαριθμώντας τα φωτόνια που προσπίπτουν σε μια επιφάνεια και πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό αυτό με το συντελεστή εκπομπής, μπορεί κανείς να βρει τη μέση συνολική ροή ακτινοβολίας και τη μέση απορροφούμενη ροή.

## 8.5. ΤΥΡΒΗ

Η τύρβη εκδηλώνεται ως διακύμανση της ροής μέσα στο πεδίο ροής, στο χρόνο αλλά και στο χώρο (manual του CFX 5.7.1, 2004). Αποτελεί μια περίπλοκη διαδικασία κυρίως επειδή είναι τρισδιάστατη, ασταθής και αποτελείται από πολλά στάδια, ενώ μπορεί να έχει καθοριστική επίδραση στα χαρακτηριστικά της ροής. Η τύρβη εμφανίζεται όταν οι δυνάμεις αδράνειας μέσα στο ρευστό αποκτήσουν σημαντικό μέγεθος σε σχέση με τις δυνάμεις συνεκτικότητας, και χαρακτηρίζεται από υψηλό αριθμό Reynolds.

Καταρχήν, οι εξισώσεις Navier-Stokes περιγράφουν τόσο τις στρωτές όσο και τις τυρβώδεις ροές, χωρίς να υπάρχει ανάγκη επιπλέον πληροφοριών. Όμως, οι τυρβώδεις ροές με ρεαλιστικούς αριθμούς Reynolds καλύπτουν μία μεγάλη κλίμακα μήκους τύρβης και χρόνου και γενικά περιλαμβάνουν μήκη πολύ μικρότερα από το μικρότερο μετρήσιμο πλέγμα όγκου το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί πρακτικά στην αριθμητική ανάλυση. Η άμεση αριθμητική προσομοίωση (Direct Numerical Simulation – DNS) των ροών αυτών θα απαιτούσε υπολογιστική ισχύ κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που θα μπορούσε να είναι διαθέσιμη στο προσεχές μέλλον.

Για να μπορέσουν να προβλεφθούν οι επιδράσεις της τύρβης, ένα μεγάλο μέρος της έρευνας στην υπολογιστική ρευστομηχανική εστίασε σε μεθόδους που χρησιμοποιούν μοντέλα τύρβης. Τα μοντέλα τύρβης έχουν αναπτυχθεί ειδικά για να υπολογίζουν τις επιδράσεις της τύρβης στη ροή των ρευστών χωρίς να καταφεύγουν σε επίλυση χρονικά και χωρικά στις κλίμακες της τύρβης.

### 8.5.1. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΤΥΡΒΗΣ ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ “ΚΛΕΙΣΙΜΑΤΟΣ”

Όταν κανείς διεξάγει υπολογισμούς σε χρονικά διαστήματα πολύ μεγαλύτερα από το χρονικό εύρος επίδρασης της τύρβης, η τύρβη φαίνεται να παρουσιάζει χαρακτηριστικά με μέσες τιμές και με μία επιπλέον συνιστώσα, χρονικά μεταβαλλόμενη. Για παράδειγμα, η ταχύτητα μπορεί να χωριστεί σε μια μέση συνιστώσα και μια συνιστώσα ως συνάρτηση του χρόνου.

Γενικά, τα μοντέλα τύρβης προσπαθούν να τροποποιήσουν τις αρχικές ασταθείς εξισώσεις Navier-Stokes με την εισαγωγή μέσων και κυμαινόμενων ποσοτήτων, ώστε να δημιουργήσουν τις εξισώσεις Navier-Stokes ολοκληρωμένες κατά Reynolds (RANS). Οι εξισώσεις αυτές παριστάνουν μόνο τις μέσες ποσότητες της ροής, ενώ μοντελοποιούν την επίδραση της τύρβης χωρίς να χρειάζεται να αναλύσουν τις διακυμάνσεις της. Όλα τα μέρη του τυρβώδους πεδίου μοντελοποιούνται. Τα τυρβώδη μοντέλα που βασίζονται στις εξισώσεις RANS είναι γνωστά ως “στατιστικά μοντέλα τύρβης”, λόγω της στατιστικά μέσης διαδικασίας που ακολουθείται για την εξαγωγή των εξισώσεων.

Η προσομοίωση των εξισώσεων RANS μειώνει σημαντικά την υπολογιστική προσπάθεια συγκριτικά με την άμεση αριθμητική προσομοίωση (DNS) και γενικά υιοθετείται σε υπολογισμούς μηχανικών. Παρόλα αυτά, η διαδικασία των μέσων όρων εισάγει επιπλέον άγνωστους όρους ως “προϊόντα” των μεταβαλλόμενων ποσοτήτων, οι οποίες δρουν σαν επιπρόσθετες τάσεις στο ρευστό. Αυτοί οι όροι είναι γνωστοί ως τάσεις Reynolds και είναι δύσκολο να καθοριστούν.

Οι τάσεις Reynolds πρέπει να μοντελοποιηθούν από επιπλέον εξισώσεις γνωστών ποσοτήτων, ώστε να επιτευχθεί το “κλείσιμο”. Το κλείσιμο δηλώνει ότι υπάρχει επαρκής αριθμός εξισώσεων για όλους τους αγνώστους, συμπεριλαμβανομένων των τάσεων Reynolds που προκύπτουν από τη διαδικασία μέσων όρων. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για το “κλείσιμο” του συστήματος καθορίζουν τον τύπο του μοντέλου τύρβης.

### 8.5.2. ΕΙΣΩΣΕΙΣ NAVIER-STOKES ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑ REYNOLDS

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, τα μοντέλα τύρβης προσπαθούν να λύσουν ένα τροποποιημένο σύνολο εξισώσεων μεταφοράς, με την εισαγωγή μέσων και μεταβαλλόμενων συνιστωσών. Για παράδειγμα, η ταχύτητα  $U$  μπορεί να αναλυθεί σε μια μέση συνιστώσα,  $\bar{U}$ , και σε μια συνιστώσα χρονικά μεταβαλλόμενη,  $u$ :

$$U = \bar{U} + u \quad (8.13).$$

$$\text{Η μέση συνιστώσα δίνεται από τον τύπο } \bar{U} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U dt \quad (8.14),$$

όπου  $\Delta t$  είναι το χρονικό εύρος το οποίο είναι μεγάλο σε σχέση με τις διακυμάνσεις της τύρβης, αλλά μικρό σχετικά με το χρονικό διάστημα στο οποίο επιλύονται οι εξισώσεις.

Η αντικατάσταση των μέσων χρονικά ποσοτήτων στις αρχικές εξισώσεις μεταφοράς δίνει τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (8.15),$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot \{\rho U \otimes U\} = \nabla \cdot \{\tau - \overline{\rho u \otimes u}\} + S_M \quad (8.16),$$

με  $\tau$  = διάνυσμα τάσεων συνεκτικότητας, και

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi - \overline{\rho u \phi}) + S_E \quad (8.17).$$

Η εξίσωση της συνέχειας δεν έχει μεταβληθεί, αλλά η ορμή και οι βαθμοί εξισώσεις μεταφοράς περιέχουν όρους τυρβώδους ροής επιπρόσθετα με τις μοριακές ροές διάχυσης. Έτσι λοιπόν,  $\overline{\rho u \otimes u}$  είναι οι τάσεις Reynolds, και  $\overline{\rho u \phi}$  η ροή Reynolds. Οι όροι αυτοί εκφράζουν το γεγονός ότι η τυρβώδης συναγωγή ( $\nabla \cdot \{\rho U \otimes U\}$ ) οδηγεί σε ενίσχυση της ανάμειξης πέρα και πάνω από αυτήν που προκαλείται από τις μοριακές κινήσεις. Για μεγάλους αριθμούς Reynolds, οι τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας πραγματοποιούνται πάνω από κάποιο μήκος, πολύ μεγαλύτερο της ενδομοριακής απόστασης, με αποτέλεσμα οι τυρβώδεις ροές να είναι πολύ ευρύτερες από τις μοριακές ροές.

Η εξίσωση ενέργειας ολοκληρωμένη κατά Reynolds, είναι:

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot} + \overline{\rho u h} - \lambda \nabla T) = \frac{\partial p}{\partial t} \quad (8.18),$$

στην οποία  $\lambda$  είναι η θερμική αγωγιμότητα και η μέση ολική ενθαλπία δίνεται από τη σχέση

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 + k \quad (8.19).$$

Επιπρόσθετα με τη μέση ροή κινητικής ενέργειας, τώρα η ολική ενθαλπία περιλαμβάνει και τη συμβολή της τυρβώδους κινητικής ενέργειας,  $k$ , η οποία είναι  $k = \frac{1}{2} \overline{u^2}$ .

Τα μοντέλα τύρβης κλείνουν τις ολοκληρωμένες κατά Reynolds εξισώσεις παρέχοντας τρόπους υπολογισμού των τάσεων Reynolds και των ροών Reynolds.

Μια βασική κατηγοριοποίηση των μοντέλων τύρβης είναι σε:

- Μοντέλα τυρβώδους συνεκτικότητας (Eddy-viscosity models), και
- Μοντέλα τάσεων Reynolds.

### 8.5.3. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΡΒΗΣ k-ε

Ένα από τα χαρακτηριστικότερα μοντέλα τύρβης είναι το μοντέλο k-ε, το οποίο ανήκει στην κατηγορία των μοντέλων τυρβώδους συνεκτικότητας, χρησιμοποιείται στους περισσότερους κώδικες υπολογιστικής ρευστομηχανικής και θεωρείται αναγνωρισμένο εργαλείο στη βιομηχανία. Έχει αποδειχθεί ότι είναι σταθερό και αριθμητικά ακριβές, ενώ έχει καθιερωθεί για τη μεγάλη ακρίβεια προβλέψεων που παρέχει.

Στα πλαίσια του προγράμματος CFX, το μοντέλο k-ε χρησιμοποιεί μια προσέγγιση συναρτήσεων τοιχώματος για τη βελτίωση της ορθότητας και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων όταν το πλέγμα κοντά στους τοίχους είναι πολύ λεπτό. Αυτές οι συναρτήσεις τοιχώματος επιτρέπουν την επίλυση σε αυθαίρετα, πολύ λεπτά πλέγματα κοντά στους τοίχους, γεγονός που αποτελεί σημαντική βελτίωση έναντι των συνήθων συναρτήσεων.

Ενώ μοντέλα δύο εξισώσεων, όπως το k-ε, παρέχουν ικανοποιητικές προβλέψεις για ροές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον από μηχανικούς, υπάρχουν κάποιες εφαρμογές για τις οποίες τα μοντέλα αυτά δεν ενδείκνυνται. Ανάμεσα σε αυτές είναι και οι εξής:

- Ροές με αποκόλληση οριακού στρώματος.
- Ροές με ξαφνικές αλλαγές στο μέσο ρυθμό διάτμησης.
- Ροές σε περιστρεφόμενα ρευστά.
- Ροές σε καμπύλες επιφάνειες.

Ο όρος  $k$  αποτελεί την τυρβώδη κινητική ενέργεια και μπορεί να θεωρηθεί ως η συνολική κινητική ενέργεια που αντιπροσωπεύεται από τις υψηλόσυχνες διαταραχές των ταχυτήτων (Μπούρης, κ.ά., 1997). Μετριέται σε μονάδες  $\frac{\text{μήκος}^2}{\text{χρόνος}^2}$  (π.χ.  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ).  $\varepsilon$ , είναι ο ρυθμός καταστροφής της τυρβώδους κινητικής ενέργειας και έχει τις διαστάσεις του  $k$  ανά μονάδα χρόνου (π.χ.  $\text{m}^2/\text{s}^3$ ).

Το μοντέλο k-ε εισάγει δύο νέες μεταβλητές στο σύστημα των εξισώσεων. Έτσι, η εξίσωση της συνέχειας γίνεται:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (8.20),$$

ενώ η εξίσωση της ορμής γράφεται ως:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla U) = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla U)^T + B \quad (8.21),$$

όπου  $B$  = το άθροισμα των δυνάμεων του σώματος,

$\mu_{\text{eff}}$  = η ενεργός συνεκτικότητα που εξηγεί την τύρβη, και

$$p' = \text{η τροποποιημένη πίεση} = p + \frac{2}{3} \rho k.$$

Το μοντέλο k-ε βασίζεται στην υπόθεση του Boussinesq, η οποία συνδέει τις τάσεις Reynolds με τον τοπικό ρυθμό παραμόρφωσης του μέσου πεδίου μέσω του συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας ( $\mu_t$ ):

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \quad (8.22),$$

όπου  $i,j=1,2,3$  και δηλώνουν τις τρεις καρτεσιανές κατευθύνσεις ( $x_i$ ) και τις αντίστοιχες συνιστώσες των ταχυτήτων ( $u_i$ ).

Έτσι λοιπόν, στη δυναμική συνεκτικότητα του ρευστού ( $\mu$ ) προστίθεται και η τυρβώδης συνεκτικότητα ( $\mu_t$ ), καταλήγοντας στη σχέση

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (8.23),$$

$$\text{με } \mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon},$$

όπου  $C_\mu$  σταθερή ποσότητα. Όμως, για τον υπολογισμό της τυρβώδους συνεκτικότητας απαιτείται επίλυση επί πλέον διαφορικών εξισώσεων μιας και δεν είναι ιδιότητα του ρευστού αλλά εξαρτάται από το πεδίο ροής και μεταβάλλεται τοπικά. Οι εξισώσεις που επιλύονται είναι οι διαφορικές εξισώσεις μεταφοράς για την τυρβώδη κινητική ενέργεια ( $k$ ) και τον ρυθμό απορρόφησης της ( $\varepsilon$ ):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (8.24),$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (8.25),$$

με  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$  και  $\sigma_\varepsilon$  σταθερές ποσότητες.  $P_k$  είναι η παραγωγή τύρβης λόγω του ιξώδους και των δυνάμεων άνωσης, το οποίο γράφεται ως

$$P_k = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k) + P_{kb} \quad (8.26).$$

Για ασυμπίεστη ροή, η ποσότητα  $\nabla \cdot U$  είναι μικρή και ο δεύτερος όρος του δεξιού μέλους της εξίσωσης (8.26) δεν συμβάλλει σημαντικά στην παραγωγή τύρβης. Στην περίπτωση συμπιεστής ροής το  $\nabla \cdot U$  είναι μεγάλο μόνο σε περιοχές με μεγάλη απόκλιση της ταχύτητας, όπως είναι οι πυκνές περιοχές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ CFX

Το CFX είναι ένα προσομοιωτικό πρόγραμμα το οποίο απαρτίζεται από τα εξής πέντε επιμέρους προγράμματα:

1. ANSYS Design Modeler
2. ICEM CFD
3. CFX-Pre
4. CFX-Solver
5. CFX-Post.

Η αναλυτική περιγραφή που ακολουθεί, βασίστηκε στο manual του CFX 5.7.1 (2004).

### 9.1 ANSYS DESIGN MODELER

Αποτελεί το σχεδιαστικό πακέτο του CFX. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή της γεωμετρίας του εκάστοτε προβλήματος και παρέχει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ δυσδιάστατων και τρισδιάστατων απεικονίσεων.

Η διαδικασία έχει ως εξής: Αφού οριστεί το πλέγμα πάνω στο οποίο θα γίνει η σχεδίαση στα επίπεδα XY, ZX και YZ, χρησιμοποιούνται τα διαθέσιμα εργαλεία για τη δημιουργία της γεωμετρίας, σε δύο διαστάσεις αρχικά, και στη συνέχεια, εφόσον απαιτείται, οι κατάλληλες εντολές μπορούν να δώσουν στο δυσδιάστατο σχήμα και την τρίτη διάσταση. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα αρχείο της μορφής \*.agdb ή \*.prt το οποίο θα πλεγματοποιηθεί στον ICEM CFD.

Εκτός από την κατασκευή της γεωμετρίας στον Ansys Design Modeler, το CFX δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής γεωμετριών και από άλλα σχεδιαστικά προγράμματα.

### 9.2. ICEM CFD

Εδώ, το σχήμα που κατασκευάστηκε θα υποστεί πλεγματοποίηση (meshing) είτε με τετράεδρα (tetra mesh) είτε με εξαέδρα (hexa mesh). Η κατασκευή εξαέδρων είναι πιο



πολύπλοκη διαδικασία, αλλά δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα. Σε περίπτωση που οι απαιτήσεις του προβλήματος υπαγορεύουν πυκνότερο πλέγμα σε ορισμένα σημεία της γεωμετρίας, το πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα διαφορετικής πλεγματοποίησης σε αυτά. Το αρχείο που προκύπτει είναι της μορφής \*.msh.

### 9.3. CFX-PRE

Το CFX-Pre είναι το εργαλείο της προ-επεξεργασίας. Σε αυτό, μετά την εισαγωγή του αρχείου της πλεγματοποίησης, ορίζεται το είδος της προσομοίωσης που θέλει κανείς να επιτύχει: σταθερή (ανεξάρτητη από το χρόνο) ή μεταβαλλόμενη (χρονικά εξαρτημένη). Για την προσομοίωση του μοντέλου είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός του σε τμήματα/περιοχές (domains), καθεμιά από τις οποίες έχει το δικό της τύπο (είσοδος ρευστού, έξοδος ρευστού, άνοιγμα, τοίχος, κ.ά.) και τις δικές της οριακές συνθήκες (boundary conditions) όπως θερμοκρασία, πίεση, ταχύτητα, κτλ. Εάν υπάρχει ακτινοβολία, τότε εισάγεται σε αυτό το στάδιο. Τελικά, αφού επιλεγεί το μοντέλο μεταφοράς θερμότητας που θα χρησιμοποιηθεί και αφού καθοριστούν οι παράμετροι της ροής, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων και η επιθυμητή σύγκλιση για την επίλυση του προβλήματος, δημιουργείται ένα αρχείο τύπου \*.def (δημιουργούνται και αρχεία της μορφής \*.cfx, \*.gtm και \*.pre, αλλά το αρχείο \*.def είναι αυτό που θα εισαχθεί στον CFX-Solver).

Σημαντικό πλεονέκτημα του CFX-Pre είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ πλήθους ρευστών, αλλά και δημιουργίας νέων ρευστών ή μειγμάτων με τον καθορισμό των φυσικών, χημικών και θερμοδυναμικών τους ιδιοτήτων.

### CFX COMMAND LANGUAGE (CCL)

Η CFX Command Language είναι η γλώσσα εντολών του προγράμματος και χρησιμοποιείται για την εκτέλεση όλων των δραστηριοτήτων των CFX-Pre, CFX Solver Manager και CFX-Post.

Όλα τα βήματα του CFX-Pre εκτελούνται σαν εντολές CCL στο λογισμικό του υπολογιστή, και αυτές οι εντολές μπορούν να εξαχθούν και να εισαχθούν σε άλλες προσομοιώσεις. Μια χρήσιμη εφαρμογή της εισαγωγής αρχείων CCL είναι η χρήση των ίδιων προ-

επεξεργασμένων στοιχείων σε έναν αριθμό διαφορετικών πλεγμάτων. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί κανείς να εισάγει το νέο πλέγμα, να εισάγει τα στοιχεία CCL, να καθορίσει τα διάφορα τμήματα/περιοχές και τις οριακές τους συνθήκες και μετά να δημιουργήσει το αρχείο \*.def για τον CFX-Solver, χωρίς να χρειαστεί να επαναπροσδιορίσει τα προεπεξεργασμένα στοιχεία.

## 9.4. CFX-SOLVER

Αφού κλείσει ο CFX-Pre ξεκινά η επεξεργασία του αρχείου \*.def, για να παραχθούν τα ζητούμενα αποτελέσματα μετά από μαζική επεξεργασία. Συγκεκριμένα:

1. Οι διαφορικές εξισώσεις ολοκληρώνονται σε κάθε έναν από τους όγκους ελέγχου στην περιοχή που εξετάζεται. Η διαδικασία αυτή ισοδυναμεί με την εφαρμογή των βασικών νόμων διατήρησης (π.χ. μάζας ή ορμής) στον κάθε όγκο.
2. Οι ολοκληρωμένες πλέον εξισώσεις μετατρέπονται σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, με τη διακριτοποίηση των όρων τους.
3. Οι αλγεβρικές εξισώσεις λύνονται επαναληπτικά.

Η επαναληπτική προσέγγιση είναι απαραίτητη εξαιτίας της μη-γραμμικής φύσης των εξισώσεων και καθώς προσεγγίζεται η ακριβής λύση των εξισώσεων λέγεται ότι το σύστημα συγκλίνει. Για την κάθε επανάληψη, κάθε λάθος ή υπόλοιπο καταγράφεται ως μέτρο της ικανοποίησης των εξισώσεων.

Το πόσο κοντά στην ακριβή λύση βρίσκεται η τελική λύση εξαρτάται από έναν αριθμό παραγόντων, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους και του σχήματος των όγκων ελέγχου καθώς επίσης και του μεγέθους των τελικών υπολοίπων. Πολύπλοκες φυσικές διεργασίες όπως η καύση και η τύρβη συχνά μοντελοποιούνται με τη χρήση εμπειρικών σχέσεων και οι στρογγυλοποιήσεις που ενυπάρχουν στα μοντέλα αυτά συμβάλλουν επίσης στην απόκλιση της υπολογισμένης λύσης από την πραγματική ροή.

Η διαδικασία επίλυσης δεν απαιτεί την παρεμβολή του χρήστη, αλλά διεξάγεται σαν μαζική επεξεργασία και παρουσιάζεται από τον CFX-Solver Manager με τη μορφή εξελισσόμενου

διαγράμματος (η διαδικασία γίνεται για όσα χρονικά βήματα [timesteps] και όσες επαναλήψεις [iterations] έχουν οριστεί).

Το αρχείο που δημιουργείται περιέχει τον ορισμό της φυσικής του προβλήματος, τις τιμές που προέκυψαν για την κάθε επανάληψη, καθώς και άλλα σχετικά με τη λύση στοιχεία.

## 9.5. CFX-POST

Το CFX-Post είναι το εργαλείο της μετ-επεξεργασίας των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από τον Solver. Εδώ αναλύονται, οπτικοποιούνται και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Κάποιες από τις δυνατότητες που παρέχει αυτό το στάδιο του προγράμματος, είναι:

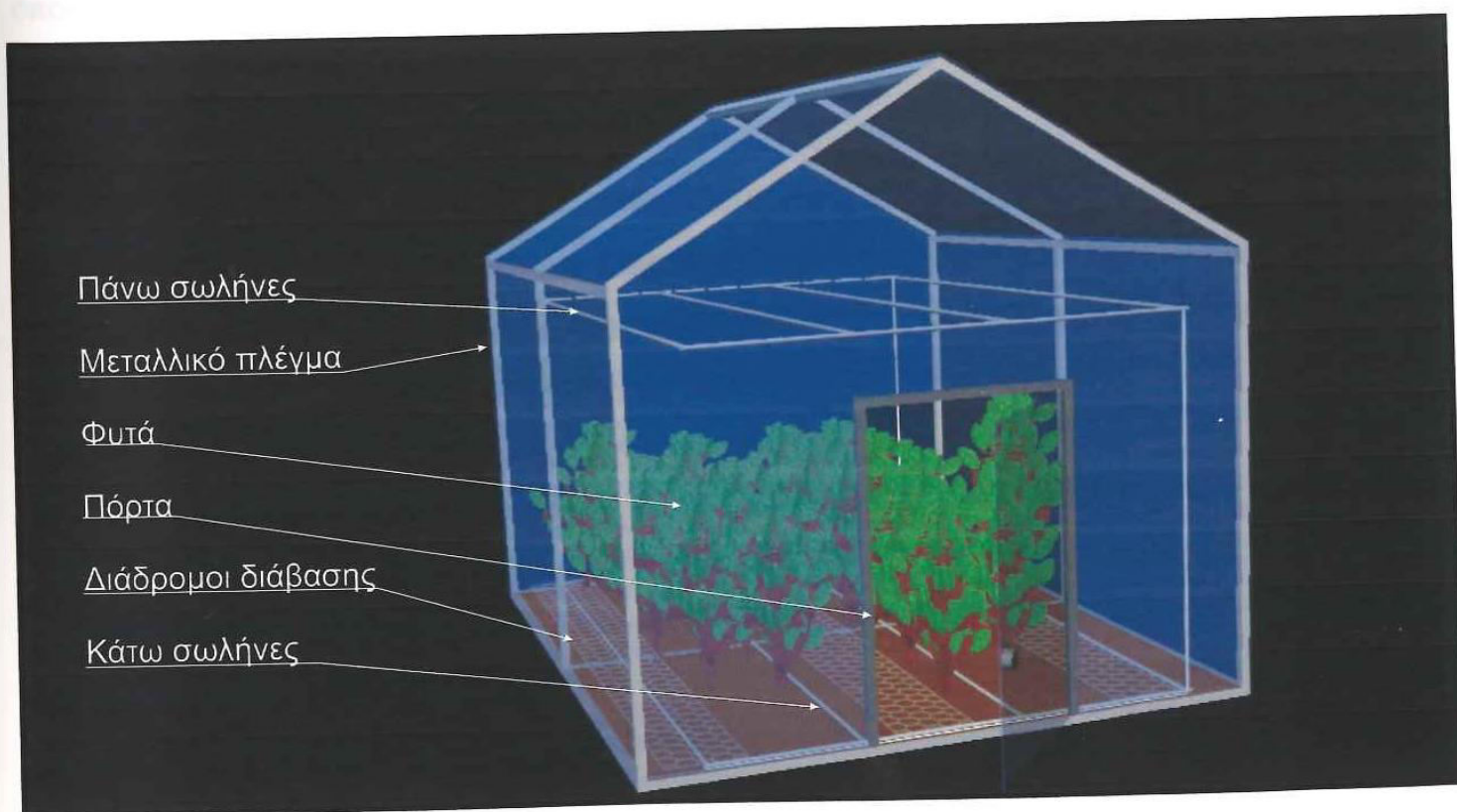
- Απεικόνιση της γεωμετρίας και των όγκων ελέγχου.
- Σχεδίαση διανυσμάτων που δείχνουν την κατεύθυνση και την ένταση της ροής.
- Απεικόνιση της μεταβολής διαφόρων βαθμωτών μεταβλητών (δηλαδή μεταβλητών που έχουν μόνο μέγεθος και όχι κατεύθυνση, όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η ταχύτητα) διαμέσου των καθορισμένων τμημάτων/περιοχών.
- Αριθμητικοί υπολογισμοί.
- Δημιουργία βίντεο (αρχείο της μορφής \*.mpeg) για αναπαράσταση της εξέλιξης του φαινομένου.
- Παρουσίαση διαγραμμάτων.
- Δυνατότητα εκτύπωσης.

Το αρχείο που διαβάζεται έχει τη μορφή \*\_001.res.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10<sup>ο</sup>: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ – ΣΧΕΔΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, το υπολογιστικό μέρος της εργασίας αυτής ασχολείται με την προσομοίωση των θερμικών ροών που δημιουργούνται εξαιτίας της λειτουργίας συστήματος θέρμανσης μέσα σε ένα θερμοκήπιο.

Ως βάση λοιπόν για την έναρξη των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκε ένα τυπικό θερμοκήπιο διαστάσεων 4m×4m και ύψους 4m (3m ύψος πλευρικών τοίχων και 1m η στέγη) (σχήμα 10.1). Μέσα σε αυτό θεωρείται πως καλλιεργούνται φυτά επί του εδάφους, είναι εξ' ολοκλήρου κατασκευασμένο από μονό τζάμι και θερμαίνεται από χαλύβδινους σωλήνες μέσα στους οποίους κυκλοφορεί ζεστό νερό. Οι σωλήνες έχουν διάμετρο 0,027 m, διατρέχουν όλο το μήκος του θερμοκηπίου και τοποθετούνται σε σειρές στο επάνω και στο κάτω μέρος του χώρου. Συγκεκριμένα, η κάτω σειρά θεωρείται ότι απέχει 0,2 m από το έδαφος και ότι η επάνω σειρά είναι τοποθετημένη σε ύψος 2m, με θερμοκρασίες 60 °C και 95 °C αντίστοιχα. Η μελέτη απόκρισης του θερμοκηπίου στη διαδικασία θέρμανσής του γίνεται για μια χειμερινή νύχτα, με θερμοκρασία εξωτερικού περιβάλλοντος 7°C και επιθυμητή θερμοκρασία εσωτερικού χώρου αρχικά στους 13 °C.



Σχήμα 10.1: Τυπικό θερμοκήπιο για την έναρξη των υπολογισμών (το ύψος των φυτών είναι τυχαίο).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα, γίνεται ένας αρχικός υπολογισμός της ενέργειας που απαιτείται για τη θέρμανση του χώρου αυτού. Θεωρώντας ότι:

1. Το θερμοκήπιο είναι στεγανό (δεν παρατηρείται διείσδυση κρύου αέρα),
2. Δεν λειτουργεί μηχανικός αερισμός,
3. Μετάδοση θερμότητας λαμβάνει χώρα τόσο ανάμεσα στην περιμετρική επιφάνεια και το εξωτερικό περιβάλλον, όσο και μεταξύ δαπέδου θερμοκηπίου – χώματος,

και χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.1),  $q = A \times u \times (T_i - T_o)$ ,

όπου  $A = 85,89 \text{ m}^2$ , και

$$u = 6,25 \frac{W}{m^2 K} \left( = \frac{1}{R}, \text{ με } R=0,16 \frac{m^2 K}{W} \text{ για μονό υαλοπίνακα και χειμώνα} \right),$$

η απαιτούμενη ενέργεια του συστήματος θέρμανσης για τη θέρμανση του χώρου υπό τις προαναφερθείσες συνθήκες είναι 3,221 KWatt.

Με γνωστό πλέον το ποσό της απαραίτητης προς θέρμανση ενέργειας, καταστρώνεται μία πρώτη και βασική διαστασιολόγηση του συστήματος, με προσέγγιση του απαιτούμενου μήκους σωληνώσεων (L). Με την προϋπόθεση ότι οι σωλήνες είναι αμόνωτοι, η μετάδοση θερμότητας από αυτούς περιγράφεται από τη σχέση

$$q = \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot (T_1 - T_2) \quad (10.1),$$

όπου  $\alpha$  = συντελεστής μετάδοσης θερμότητας  $\left( \frac{W}{m^2 K} \right)$ ,

$d$  = διάμετρος σωλήνων (m),

$L$  = μήκος σωλήνων (m),

$T_1$  = θερμοκρασία σωλήνων (K), και

$T_2$  = θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα (δηλ. στο εσωτερικό του θερμοκηπίου) (K).

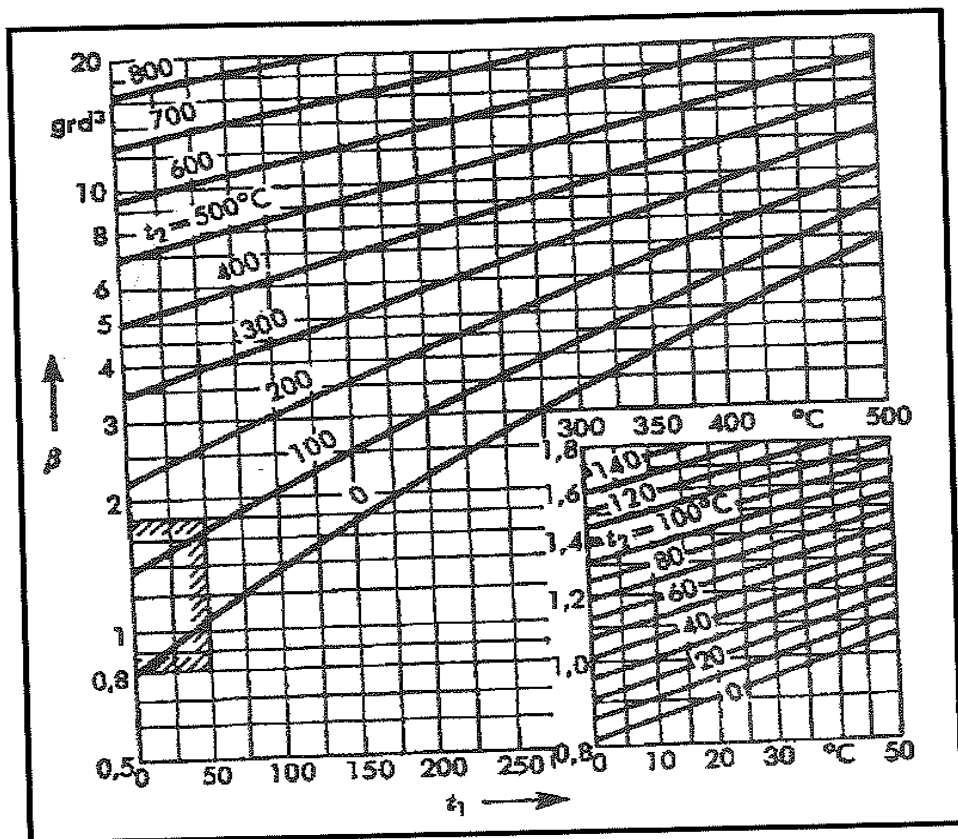
Για οριζόντιους σωλήνες ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας οφείλεται στο συνδυασμό φαινομένων συναγωγής ( $\alpha_k$ ) και ακτινοβολίας ( $\alpha_s$ ) (Μπούρης, 2005):

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_s \quad (10.2),$$

$$\text{με } \alpha_s = \beta \cdot C \left( \frac{W}{m^2 K} \right), \quad (10.3),$$

$$\alpha_k = 5 \cdot 4 \sqrt{\frac{T_1 - T_2}{T_2 \cdot d}} \left( \frac{W}{m^2 K} \right) \quad (10.4).$$

Ο θερμοκρασιακός παράγοντας ( $\beta$ ) που επηρεάζει την ακτινοβολία λαμβάνεται από το σχήμα 10.2, ενώ ο συντελεστής ακτινοβολίας είναι  $C = 4,5 \left( \frac{W}{m^2 K^4} \right)$  για χαλυβδοσωλήνες.



Σχήμα 10.2: Θερμοκρασιακός παράγοντας  $\beta = \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{T_1 - T_2}$ , σε  $K^3$ .

Μετά από συνδυασμό των παραπάνω, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 10.1:

Πίνακας 10.1: Τιμές των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας για διαφορετικές θερμοκρασίες σωλήνων.

	$\alpha_s (W/m^2 K)$	$\alpha_k (W/m^2 K)$	$\alpha (W/m^2 K)$
$T_1 = 95^\circ C$	6,3	19,54	25,84
$T_1 = 60^\circ C$	5,4	17	22,4

Τελικά, για να θερμανθεί το εν λόγω θερμοκήπιο με σωλήνες θερμοκρασίας  $95^\circ C$  και  $60^\circ C$ , το συνολικό απαιτούμενο μήκος σωληνώσεων βρίσκεται ως:

$$q = (a \cdot \pi \cdot d \cdot L_1 \cdot \Delta T)_{95^\circ C} + (a \cdot \pi \cdot d \cdot L_2 \cdot \Delta T)_{60^\circ C} \quad (10.5)$$

$$\Rightarrow 2L_1 + L_2 = 36m$$

Μια διάταξη που προσεγγίζει ικανοποιητικά την παραπάνω διαστασιολόγηση είναι η τοποθέτηση τεσσάρων σωλήνων στο πάνω μέρος του θερμοκηπίου (στα 2m) και τεσσάρων στο κάτω μέρος του (σε ύψος 0,2m). Αυτή αποτελεί την πρώτη διάταξη που εξετάζεται. Μετά

από αυτήν γίνονται επιπλέον δοκιμές, με διαφορετικές γεωμετρίες, οι οποίες αναφέρονται συνοπτικά σε αυτό το κεφάλαιο, και στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται αναλυτική παρουσίασή τους.

Διάταξη 2: Θερμοκήπιο με 12 σωλήνες σε ύψος 2m από το έδαφος και θερμοκρασία 95°C, και 12 σωλήνες στα 0,2m θερμοκρασίας 60°C. Η διάμετρός τους διατηρείται όπως και πριν στα 0,027m, ενώ χρησιμοποιείται το μοντέλο ακτινοβολίας Monte Carlo.

Διάταξη 3: Θερμοκήπιο με 12 σωλήνες θερμοκρασίας 95°C στα 2m από το έδαφος, και 12 στα 0,2m με μειωμένη θερμοκρασία στους 38°C (μοντέλο ακτινοβολίας Monte Carlo).

Διάταξη 4: Θερμοκήπιο θερμαινόμενο αποκλειστικά από 12 σωλήνες διαμέτρου 0,027m σε ύψος 0,2m από το έδαφος και θερμοκρασία 60 °C (μοντέλο ακτινοβολίας Monte Carlo).

Διάταξη 5: Θερμοκήπιο με την ίδια διάταξη όπως το νούμερο 2, αλλά με διπλάσια διάμετρο σωλήνων, δηλαδή  $d = 0,054m$  (μοντέλο ακτινοβολίας Monte Carlo).

Διάταξη 6: Θερμοκήπιο με 12 σωλήνες στο ύψος των 0,2m και άλλες δύο εξάδες τοποθετημένες περιμετρικά στους δύο πλαϊνούς τοίχους. Όλοι οι σωλήνες έχουν διάμετρο 0,027m και κοινή θερμοκρασία 60°C (μοντέλο ακτινοβολίας Monte Carlo).

Διάταξη 7: Θερμοκήπιο με θέρμανση από 12 σωλήνες στο ύψος των 0,2m ( $d = 0,027m$ ) και τοποθέτηση αεροπέδης στα 2m από την επιφάνεια του εδάφους (μοντέλο ακτινοβολίας Monte Carlo).

Τέλος, δοκιμάζονται και κάποιες εναλλακτικές διατάξεις θερμοκηπίων, όλες με χρήση του μοντέλου ακτινοβολίας Monte Carlo.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11<sup>ο</sup>: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ CFX – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται με τη σειρά όλες οι γεωμετρίες που έχουν αναφερθεί, από την κατασκευή της γεωμετρίας, την πλεγματοποίηση και τον ορισμό των οριακών συνθηκών, μέχρι την επίλυση και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

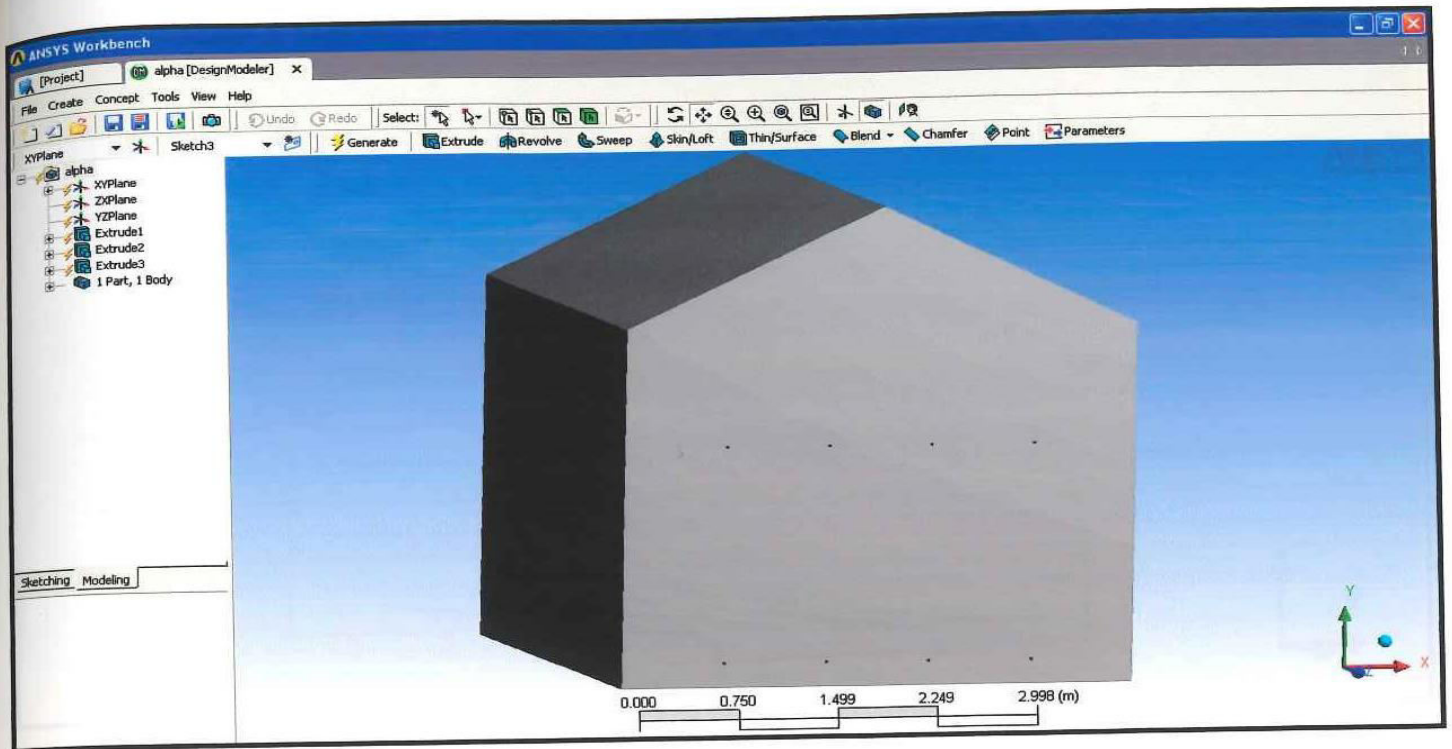
Σημειώνεται ότι τα στάδια της διαδικασίας που ακολουθήθηκε εκτίθενται με αναλυτικό τρόπο για την πρώτη διάταξη, ενώ οι υπόλοιπες διατάξεις επεξεργάστηκαν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Επίσης:

- Ο τύπος όλων των προσομοιώσεων ήταν σταθερός (steady state), δηλαδή χρονικά αμετάβλητος,
- Η αρχική θερμοκρασία του θερμοκηπίου ορίστηκε παντού στους  $10^{\circ}\text{C}$ ,
- Σε όλες τις περιπτώσεις που γίνεται χρήση του μοντέλου ακτινοβολίας Monte Carlo ο αριθμός εκπεμπόμενων φωτονίων ανά επιφάνεια θεωρήθηκε 100.000,
- Το όριο σύγκλισης ήταν σταθερά στο  $10^{-3}$ ,
- Ο αριθμός επαναλήψεων της διαδικασίας για την κάθε διάταξη ορίστηκε 300, ενώ η σύγκλιση επιτυγχανόταν πάντα πολύ νωρίτερα.

### ➤ ΔΙΑΤΑΞΗ 1:

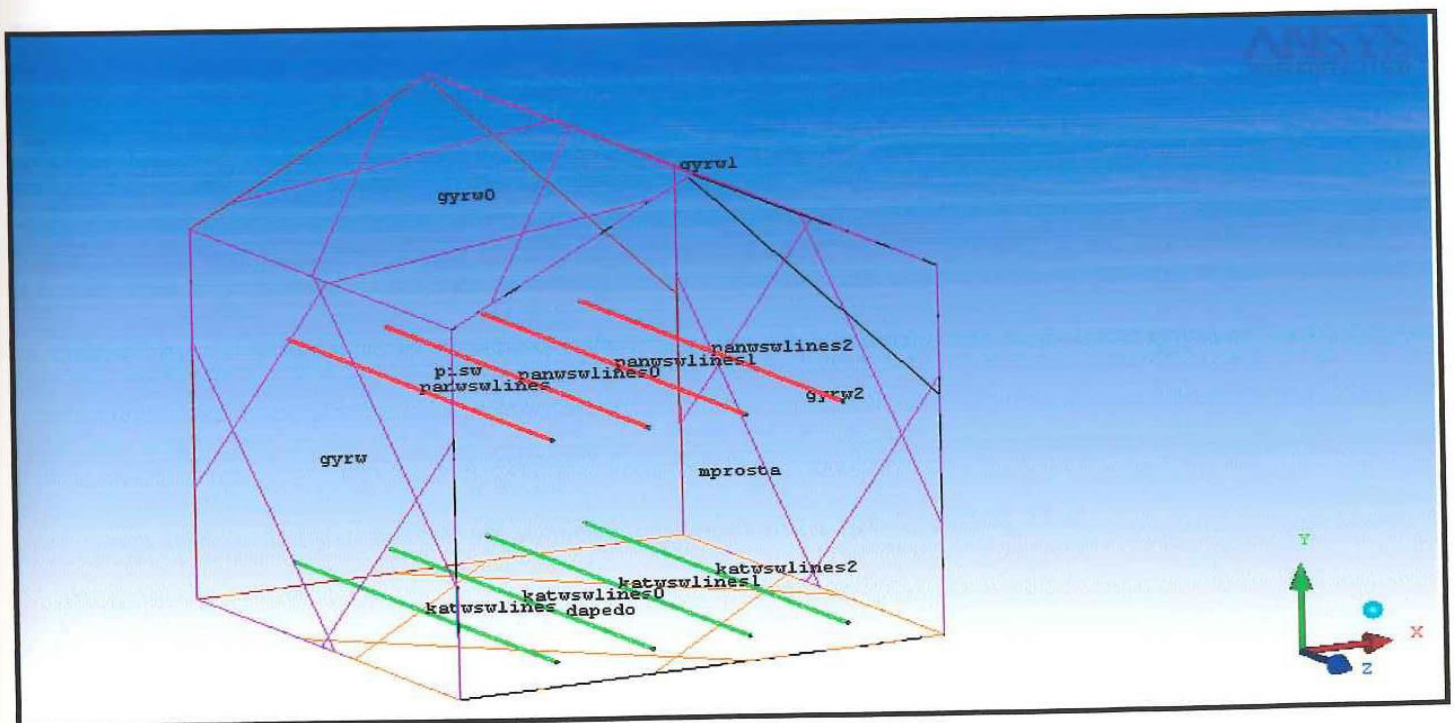
Αυτή αποτελείται από 4 σωλήνες σε ύψος 2m από το έδαφος, και άλλους 4 τοποθετημένους στα 0,2m. Η διάμετρος είναι κοινή για όλους τους σωλήνες, στα 0,027m. Το σχήμα 10.3 δείχνει τη διάταξη αυτή στο γραφικό περιβάλλον του CFX.



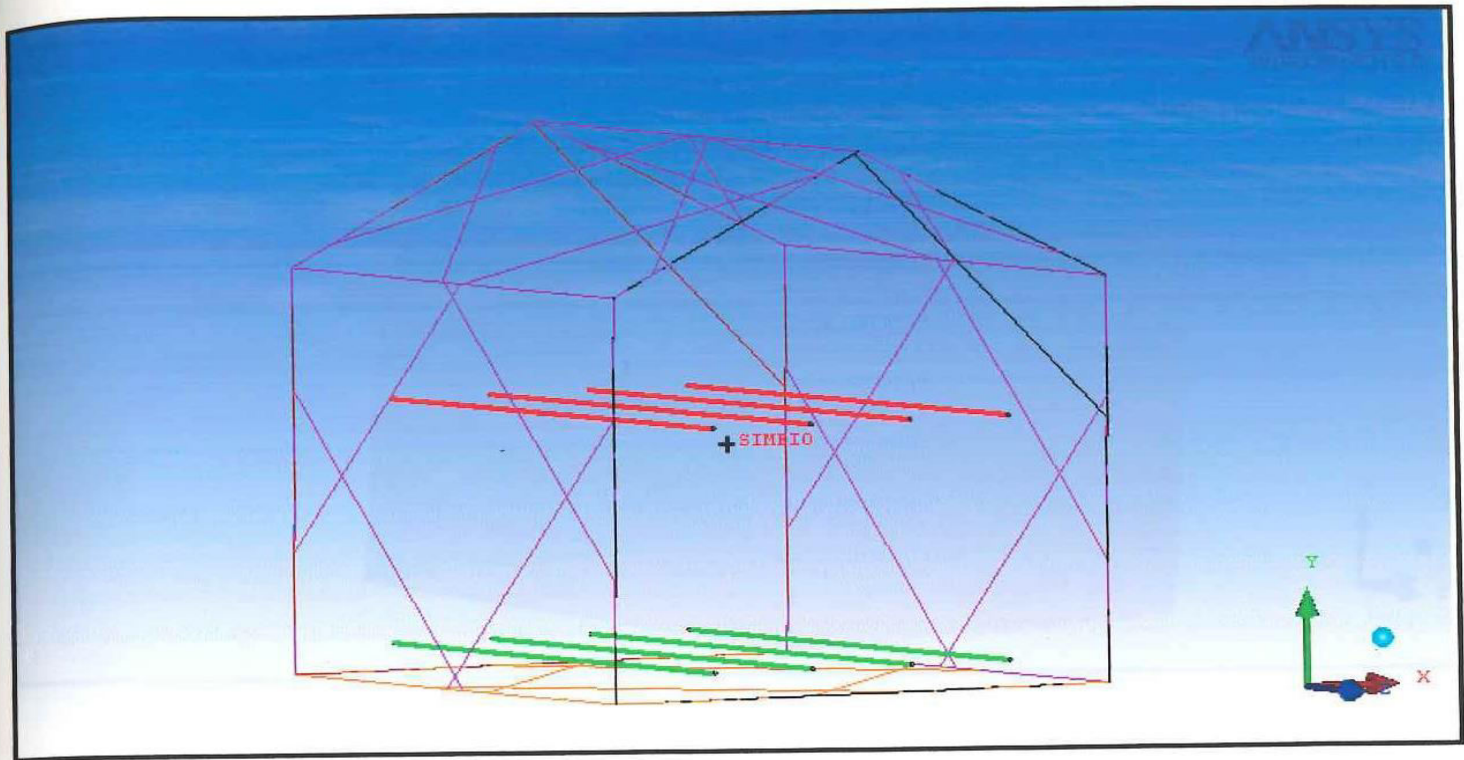


Σχήμα 10.3: Διάταξη 1 (βασική περίπτωση).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την πλεγματοποίηση, έχει ως εξής: αφού ονομάστηκαν όλα τα τμήματα της γεωμετρίας (σχήμα 10.4), ορίστηκε ένα σημείο εσωτερικά αυτής (σχήμα 10.5), για να καθοριστεί ο χώρος που θα πλεγματοποιηθεί.

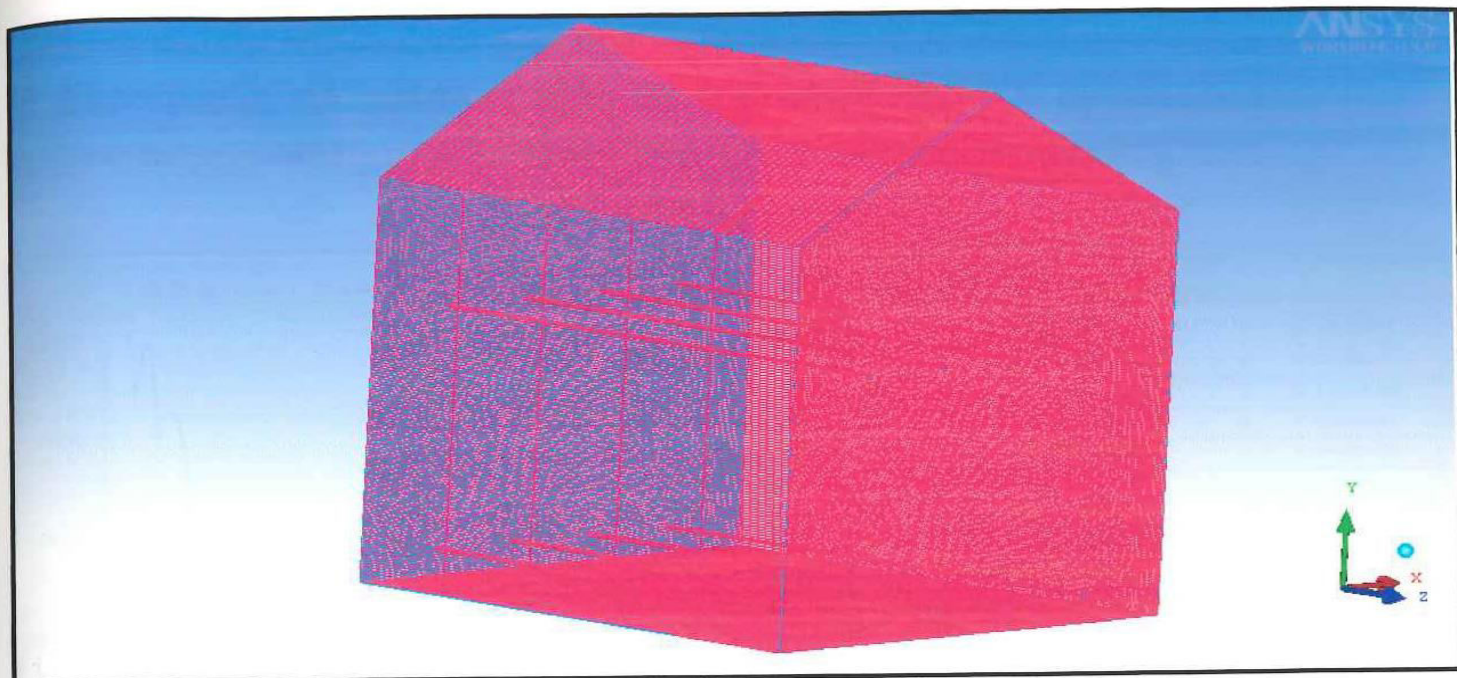


Σχήμα 10.4: Ονομασία των τμημάτων της γεωμετρίας.

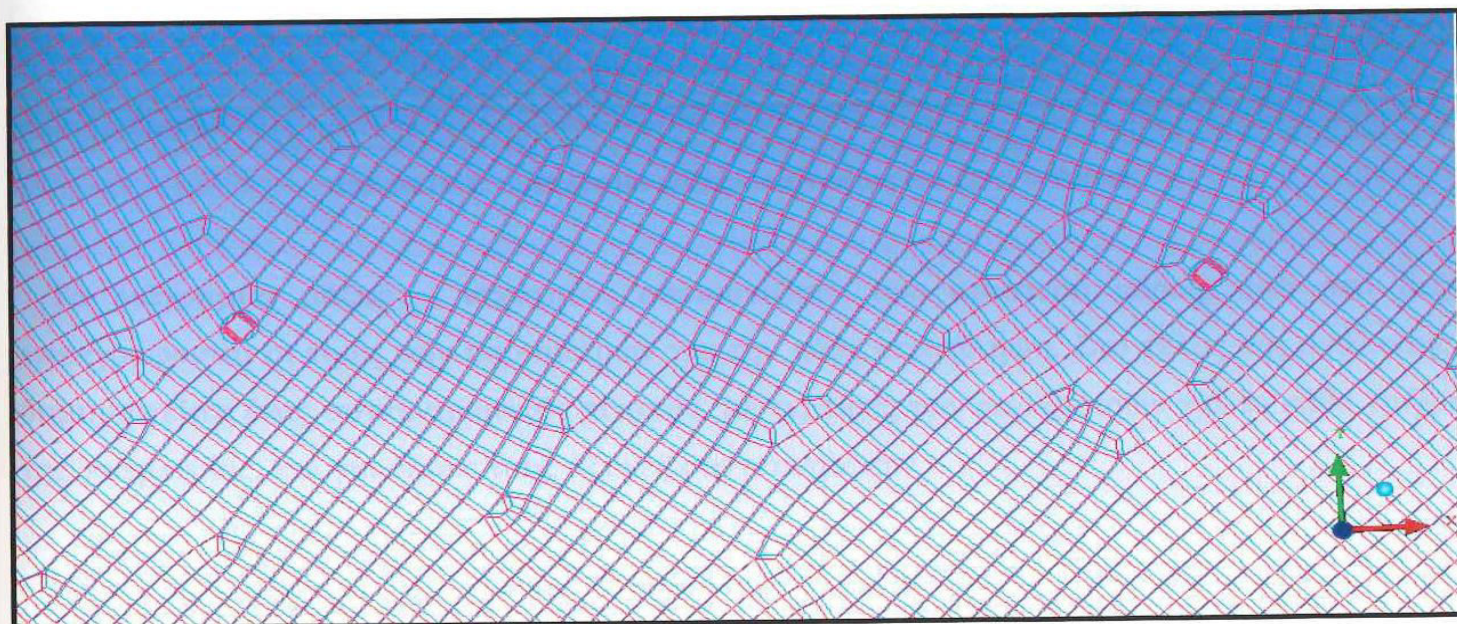


Σχήμα 10.5: Καθορισμός εσωτερικού σημείου.

Εν συνεχεία, δημιουργήθηκε πλέγμα με εξάεδρα στη μια πλευρά του θερμοκηπίου, δόθηκε βάθος σε αυτό (extrude), κατά μήκος του χώρου σε πέντε επίπεδα, και έτσι, προέκυψε το σχήμα 10.6, ενώ η μεγέθυνσή του φαίνεται στο σχήμα 10.7, όπου διακρίνεται και η περιοχή των σωλήνων.

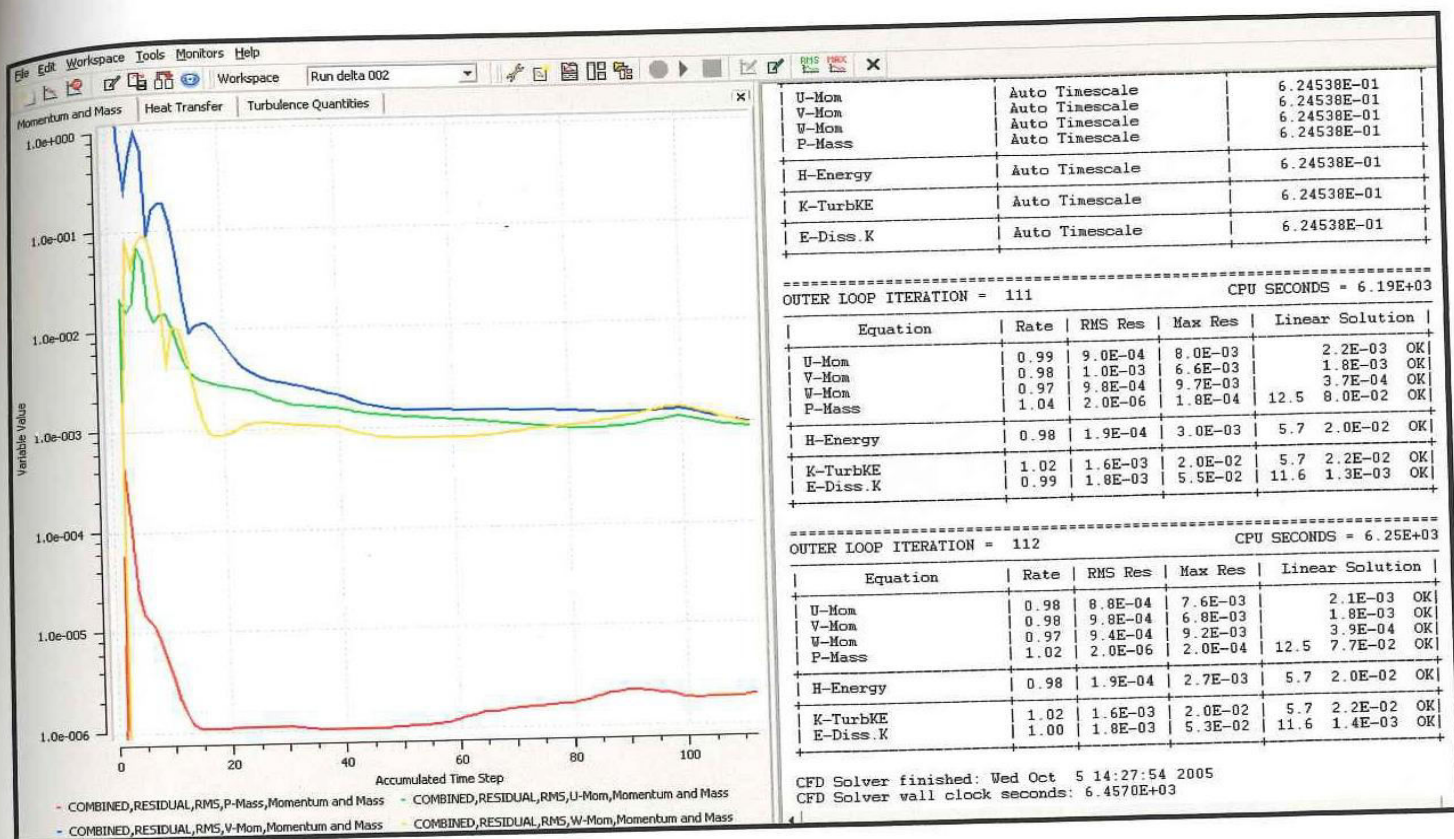


Σχήμα 10.6: Πλεγματοποίηση της βασικής γεωμετρίας.



Σχήμα 10.7: Μεγέθυνση πλέγματος του σχήματος 10.6.

Στο στάδιο της προ-επεξεργασίας, ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος (όπως οι θερμοκρασίες των σωλήνων, 95°C για τους επάνω και 60°C για τους κάτω), και στο αμέσως επόμενο στάδιο ο CFX – Solver έδωσε το διάγραμμα του σχήματος 10.8:



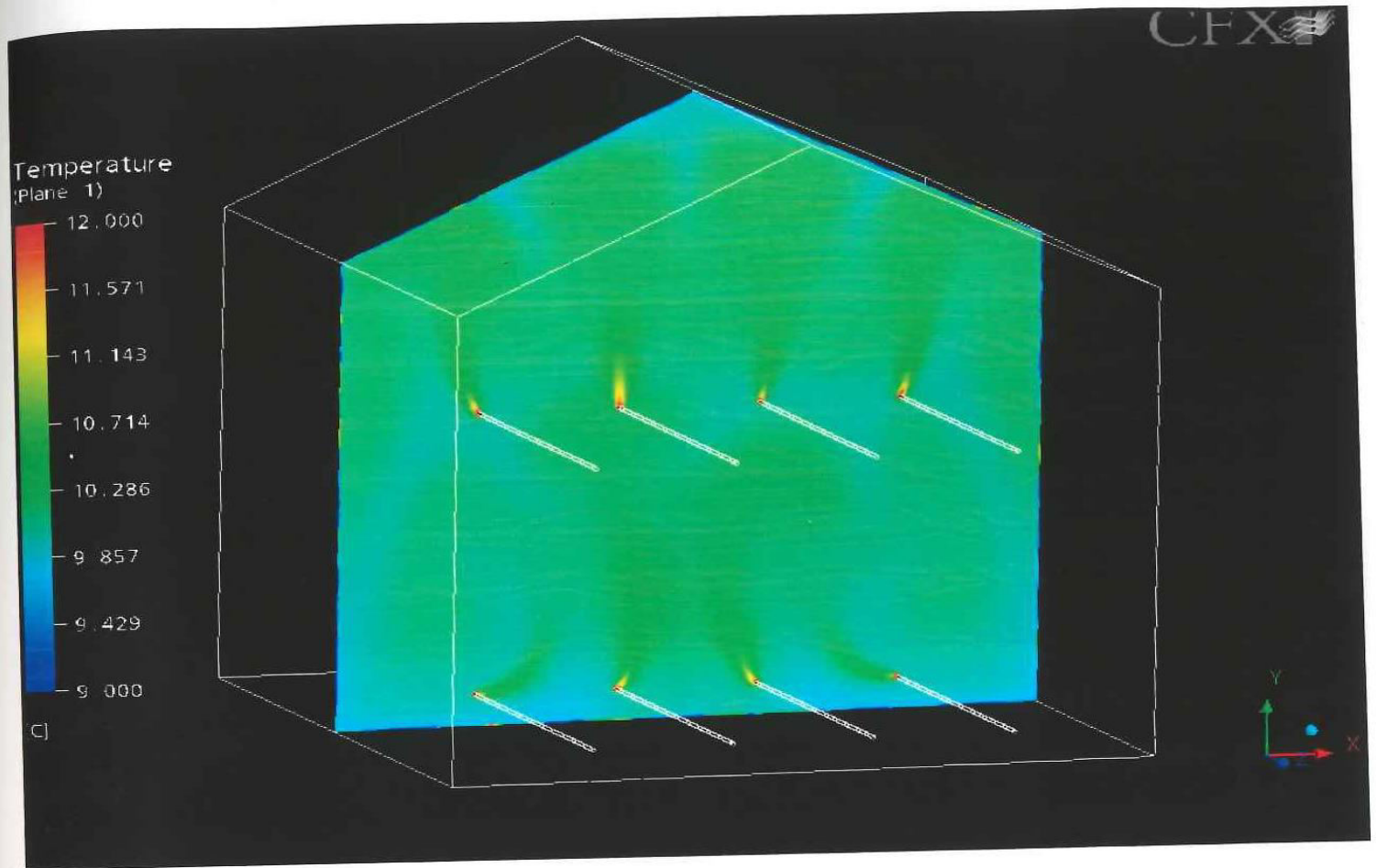
Σχήμα 10.8: Διάγραμμα μάζας – ταχύτητας του CFX – Solver.

Το διάγραμμα μάζας – ταχύτητας απεικονίζεται στο αριστερό μέρος, ενώ στο δεξιό καταγράφονται οι τιμές των παραμέτρων για την κάθε επανάληψη. Στο τέλος της ανάλυσης, δημιουργείται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές των παραμέτρων για το κάθε τμήμα της γεωμετρίας, και για όλους τους άξονες συντεταγμένων.

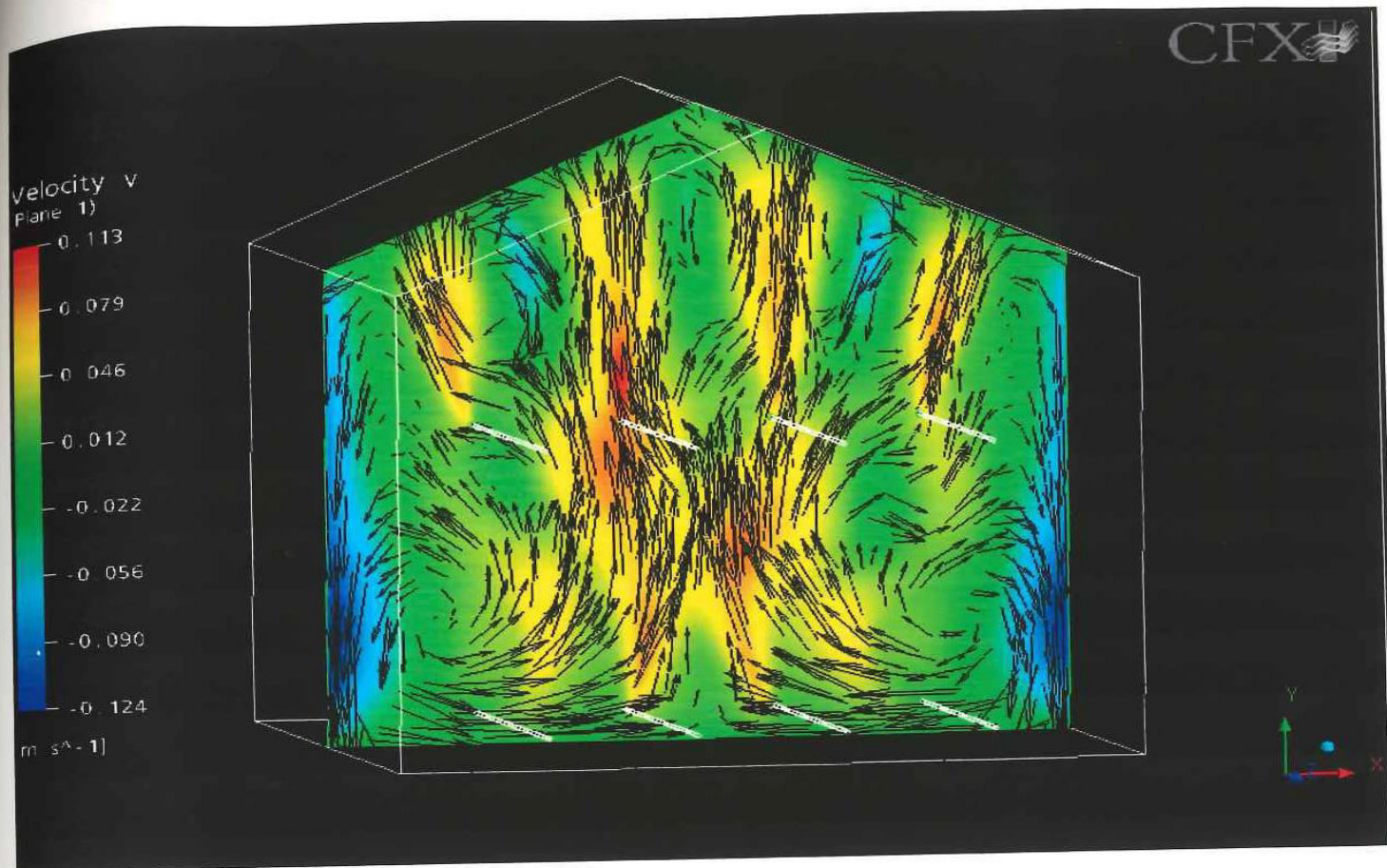
Η επίλυση σταματά σε εκείνη την επανάληψη στην οποία επιτυγχάνεται ο βαθμός σύγκλισης που καθορίστηκε (στην προκειμένη περίπτωση,  $10^{-3}$ ).

Μετά το τέλος της επίλυσης, γίνεται η μετ – επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Σε αυτήν, οι θερμικές ροές που δημιουργούνται μέσα στο χώρο λόγω της θέρμανσής του με σωλήνες ζεστού νερού απεικονίζονται σε ένα επίπεδο (plane) που έχει εισαχθεί στο μέσον του χώρου, ακριβώς γι' αυτό το σκοπό. Πάνω σε αυτό αποτυπώνεται όχι μόνο η θερμοκρασιακή

κατανομή (σχήμα 10.9) αλλά και η κατανομή της κάθετης ταχύτητας  $v$  (σχήμα 10.10), εικόνες ιδιαίτερα χρήσιμες για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων.



Σχήμα 10.9: Απεικόνιση της θερμοκρασιακής κατανομής πάνω σε επίπεδο τοποθετημένο στο μέσο του χώρου.



Σχήμα 10.10: Κατανομή ταχύτητας και βέλη ταχυτήτων.

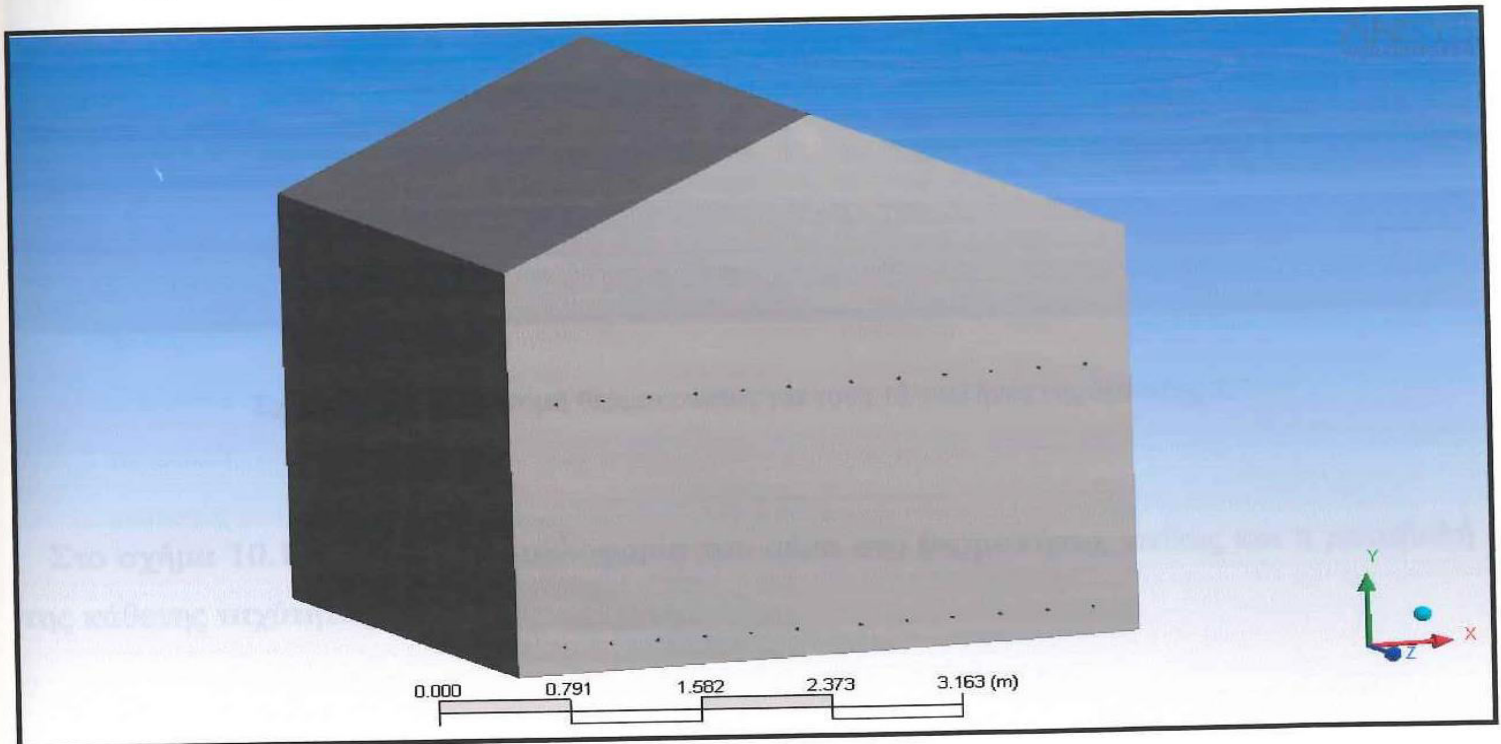
Με μια απλή εφαρμογή της σχέσης (10.5), μπορεί κανείς να διαπιστώσει πως αυτή η διάταξη παρέχει στο χώρο θερμική ενέργεια της τάξης των 4,3 KW, ποσό που προσεγγίζει αρκετά τα 3,221 KW που υπολογίστηκε ότι χρειάζεται το συγκεκριμένο θερμοκήπιο. Παρόλα αυτά, το σχήμα 10.9 δείχνει καθαρά ότι η διάταξη αυτή αδυνατεί να θερμάνει ικανοποιητικά το χώρο, καθώς η κατανομή της θερμοκρασίας στα χαμηλά επίπεδα (δηλαδή στο ύψος ανάπτυξης των φυτών) παρουσιάζει μεγάλη ανομοιομορφία, ενώ η τιμή της θερμοκρασίας εκεί κυμαίνεται γύρω στους 9,7°C. Το αποτέλεσμα αυτό της προσομοίωσης είναι απόλυτα λογικό, εάν σκεφτεί κανείς πως η εφαρμογή της σχέσης (10.3) έγινε με την προϋπόθεση μεμονωμένων σωλήνων. Κάτι τέτοιο φυσικά δεν ισχύει στην πράξη (άρα και στην προσομοίωση), αφού κάθε σωλήνας μέσα στο θερμοκήπιο δέχεται την επίδραση των γειτονικών του σωλήνων, δηλαδή τα  $\Delta T$  της σχέσης (10.5), μικραίνουν. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται πλέον μεγαλύτερο μήκος σωλήνων για τη θέρμανση του χώρου (αφού τα  $\Delta T$  και  $L$  είναι αντιστρόφως ανάλογα,  $\left( L = \frac{q}{a \cdot \pi \cdot d \cdot \Delta T} \right)$ ).

Με αυτή τη λογική, γίνεται επαύξηση της επιφάνειας των σωλήνων, και έτσι δοκιμάζεται η διάταξη 2 που ακολουθεί.

Όσον αφορά στην κατεύθυνση του αέρα μέσα στο χώρο, αυτή απεικονίζεται με τα βέλη του σχήματος 10.10. Κάθε περιοχή διαφορετικού χρώματος αντιπροσωπεύει και μία τιμή της κάθετης ταχύτητας  $v$ , ενώ τα βέλη δείχνουν την πορεία του αέρα, ο οποίος θερμαινόμενος από τους σωλήνες αποκτά μικρότερη πυκνότητα και ανέρχεται προς την οροφή. Εκεί, συναντώντας μια ψυχρότερη επιφάνεια, ψύχεται και ακολουθεί πλέον καθοδική πορεία, δημιουργώντας τις περιοχές ανακυκλοφορίας που φαίνονται στο σχήμα αυτό. Σε μια πιστή απεικόνιση του φαινομένου, για κάθε κελί του πλεγματοποιημένου σχήματος υπάρχει και το αντίστοιχο βέλος. Όμως, επειδή κάτι τέτοιο δημιουργεί πολύ πυκνές περιοχές από βέλη οι οποίες δεν μπορούν να διακριθούν καθαρά, ο αριθμός των βελών του σχήματος 10.10 έχει υποστεί μείωση με σκοπό τη δημιουργία ενός ευδιάκριτου σχήματος.

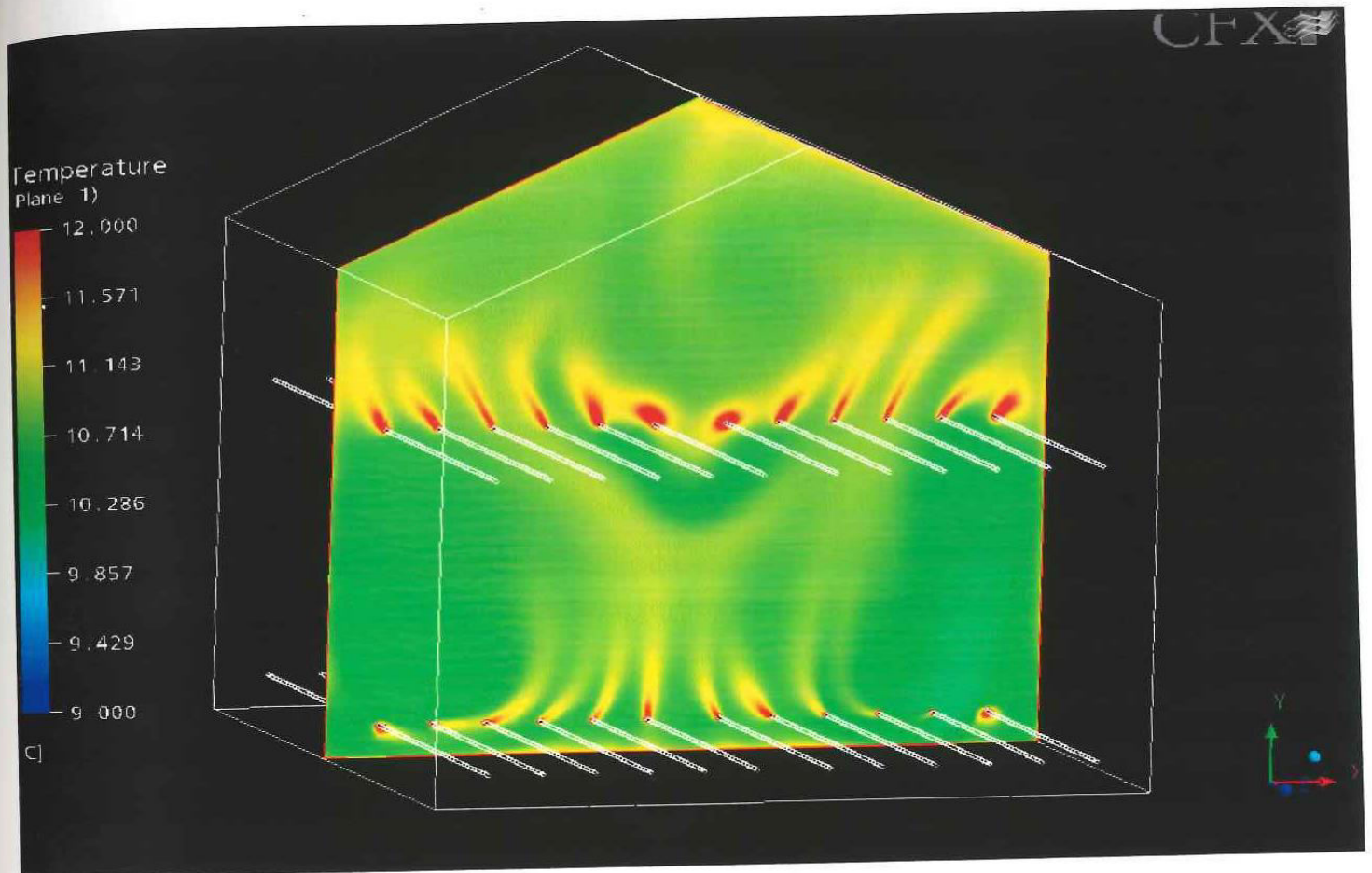
### ➤ ΔΙΑΤΑΞΗ 2:

Σε αυτή τη διάταξη, χρησιμοποιήθηκαν 24 σωλήνες: 12 σε ύψος 2m από την επιφάνεια του εδάφους, και 12 στα 0,2m. Η διάμετρος όλων θεωρήθηκε 0,027m και οι θερμοκρασία 95°C και 60°C, για τους επάνω και τους κάτω σωλήνες αντίστοιχα (σχήμα 10.11).



Σχήμα 10.11: Διάταξη 2.

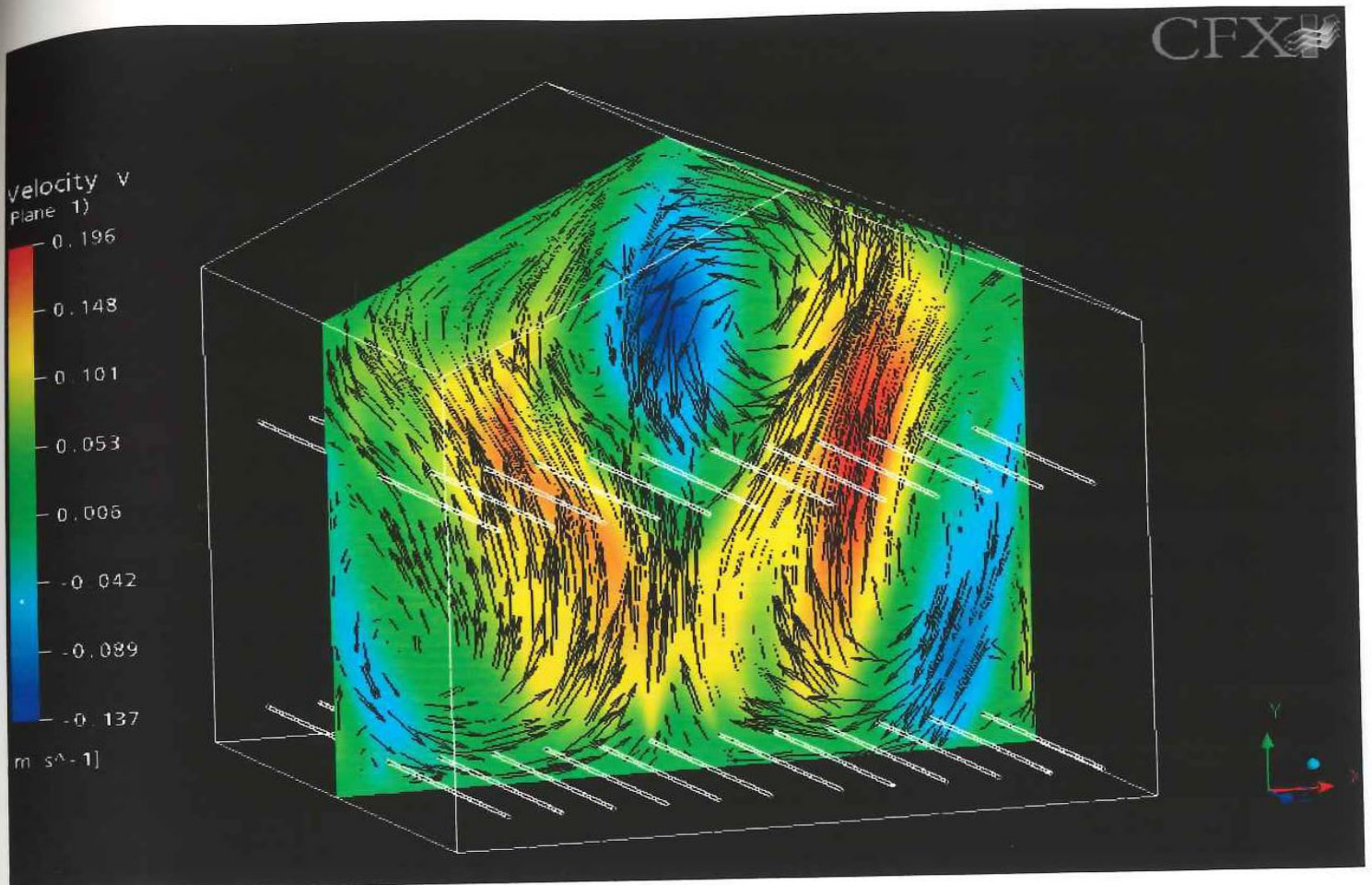
Με αυτό τον τρόπο τοποθέτησης των σωλήνων, η θερμοκρασία παρουσιάζει την κατανομή του σχήματος 10.12. Εδώ, φαίνεται καθαρά η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας σε όλο το χώρο, με τιμή πλέον γύρω στους  $11^{\circ}\text{C}$  και σαφώς περισσότερη συσώρευση θερμότητας κοντά στην οροφή. Η εφαρμογή της σχέσης (10.5) δείχνει πως η θερμότητα που αποδίδεται τώρα στο χώρο είναι περίπου 13 KW.



Σχήμα 10.12: Κατανομή θερμοκρασίας για τους 12 σωλήνες της διάταξης 2.

Στο σχήμα 10.12 φαίνεται η κυκλοφορία του αέρα στο θερμοκήπιο, καθώς και η μεταβολή της κάθετης ταχύτητας  $v$ .

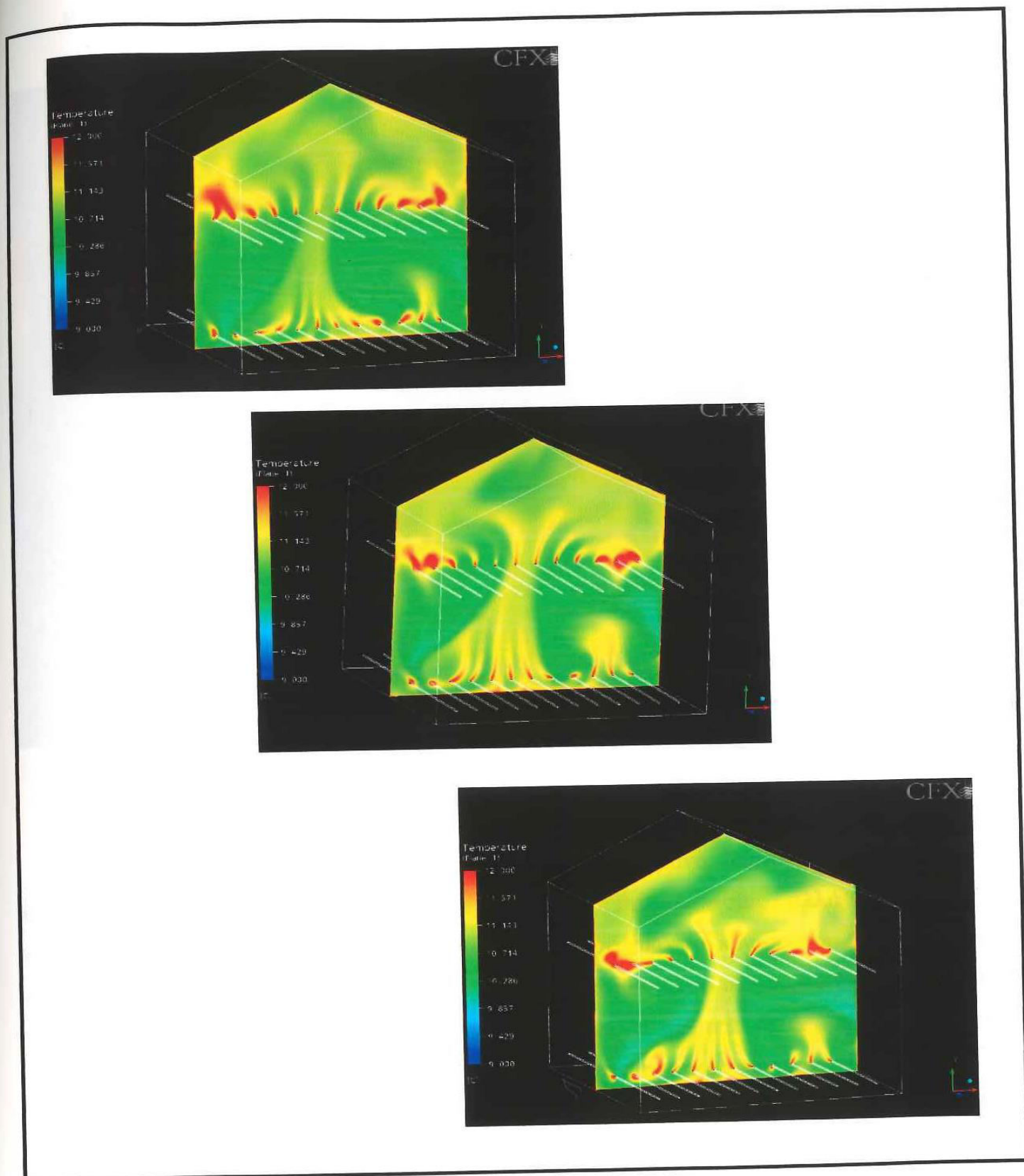




Σχήμα 10.13: Βέλη ταχυτήτων για τη διάταξη 2.

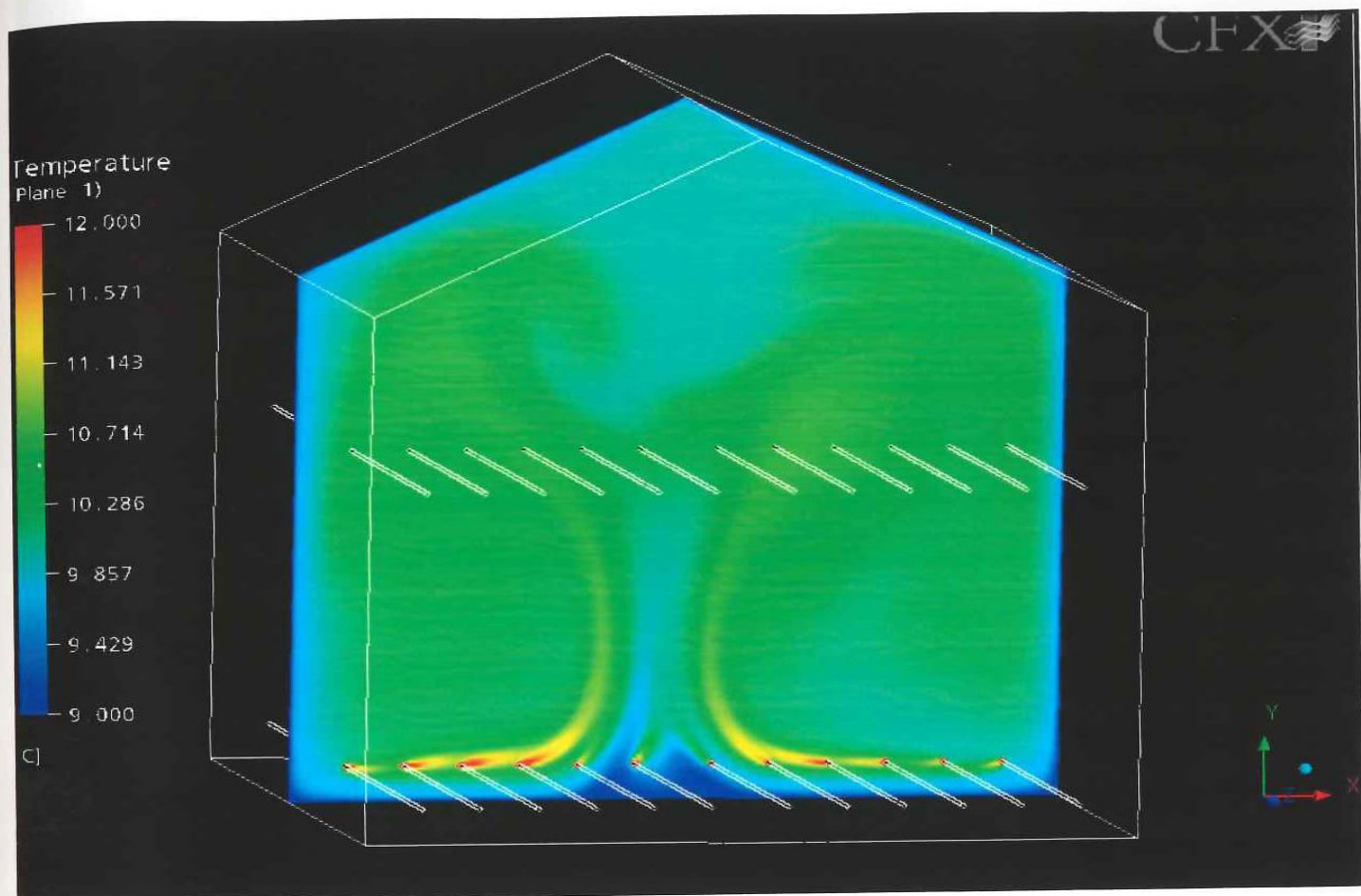
Σε αυτό το σημείο παρεμβλήθηκαν τα εξής:

1. Με σκοπό να αποδειχθεί ότι ισχύει η αρχή της ανεξαρτησίας πλέγματος, η γεωμετρία 2 πλεγματοποιήθηκε με τη χρήση 5, 8 και 10 επιπέδων κατά σειρά, στη διεύθυνση  $z$  (δηλαδή κατά μήκος των σωλήνων). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 10.14, από το οποίο διαπιστώνεται η ισχύς της παραπάνω αρχής, ιδιαίτερα πάνω από 8 επίπεδα, γεγονός αναμενόμενο λόγω του επιμήκους της γεωμετρικής διάταξης των σωλήνων.



Σχήμα 10.14: Η διάταξη 2 πλεγματοποιημένη κατά 5 (επάνω), 8 (μέση) και 10 (κάτω) επίπεδα.

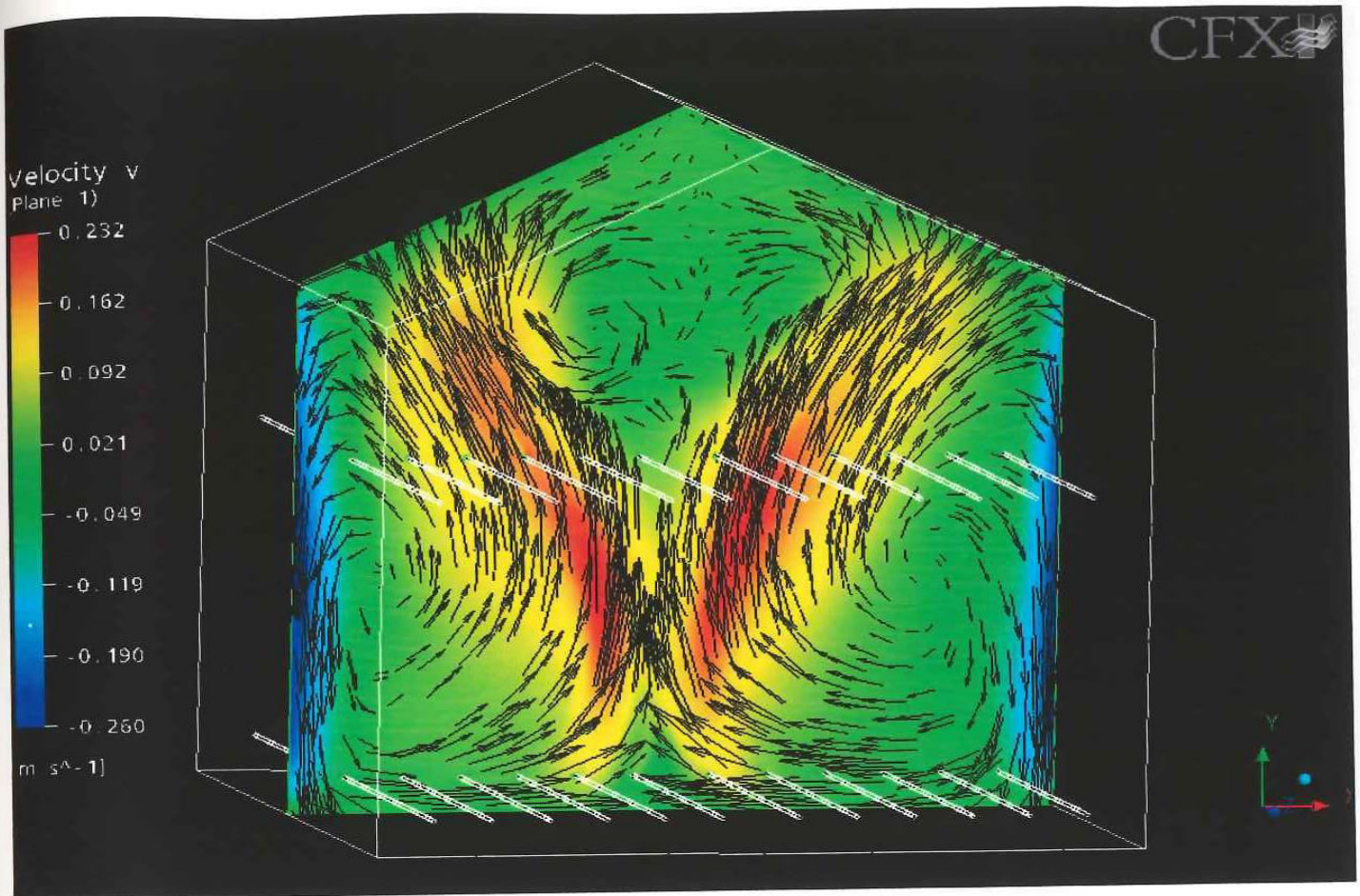
2. Μία ακόμη παραλλαγή της διάταξης 2 είναι η δοκιμή της χωρίς την εφαρμογή κάποιου μοντέλου ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 10.15.



Σχήμα 10.15: Θερμοκρασιακή κατανομή στη διάταξη 2, χωρίς μοντέλο ακτινοβολίας.

Από το σχήμα αυτό μπορεί κανείς να διακρίνει όχι μόνο διαφορετική κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο, με εμφανή μείωση της μέσης θερμοκρασίας, αλλά και μεγαλύτερη συμμετρία κατανομής ως προς την κάθετο που περνά από το κέντρο του θερμοκηπίου. Η ελαφρά ασυμμετρία που παρουσιάστηκε με τη χρήση μοντέλου ακτινοβολίας (σχήμα 10.12) οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο αυτό διακριτοποιεί χωρικά το θερμοκήπιο και στην αραιότερη διακριτοποίηση που υιοθετεί το μοντέλο αυθαίρετα. Επιπλέον, τα τοιχώματα του χώρου εμφανίζονται σαφώς ψυχρότερα, των οποίων τη θερμοκρασία επηρεάζει το μοντέλο ακτινοβολίας.

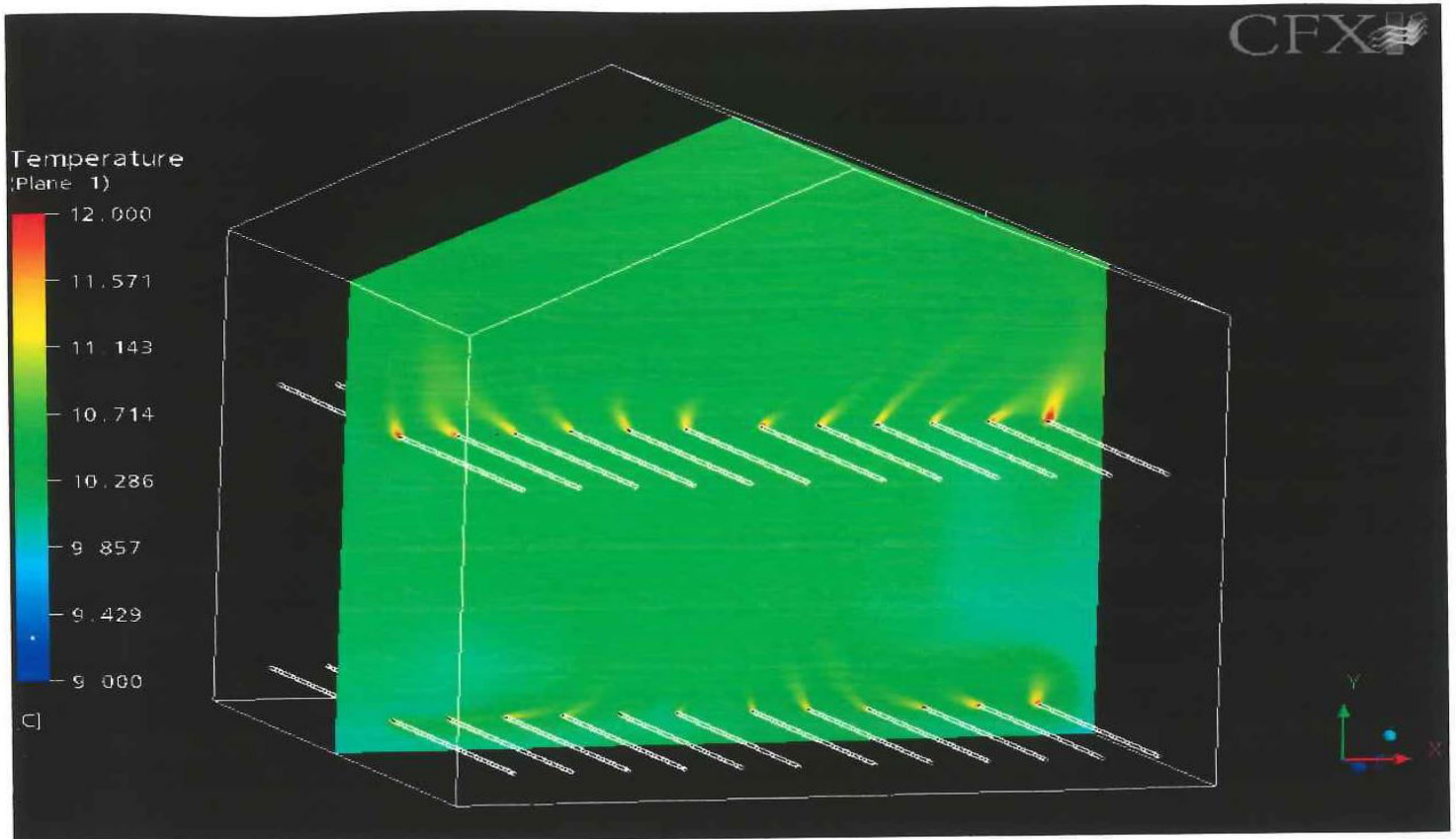
Το σχήμα 10.16 δείχνει την κυκλοφορία του αέρα μέσα στο χώρο όταν η προσομοίωση του φαινομένου γίνεται χωρίς να χρησιμοποιηθεί κάποιο μοντέλο ακτινοβολίας.



Σχήμα 10.16: Κυκλοφορία και κάθετες ταχύτητες του αέρα στην τρίτη διάταξη.

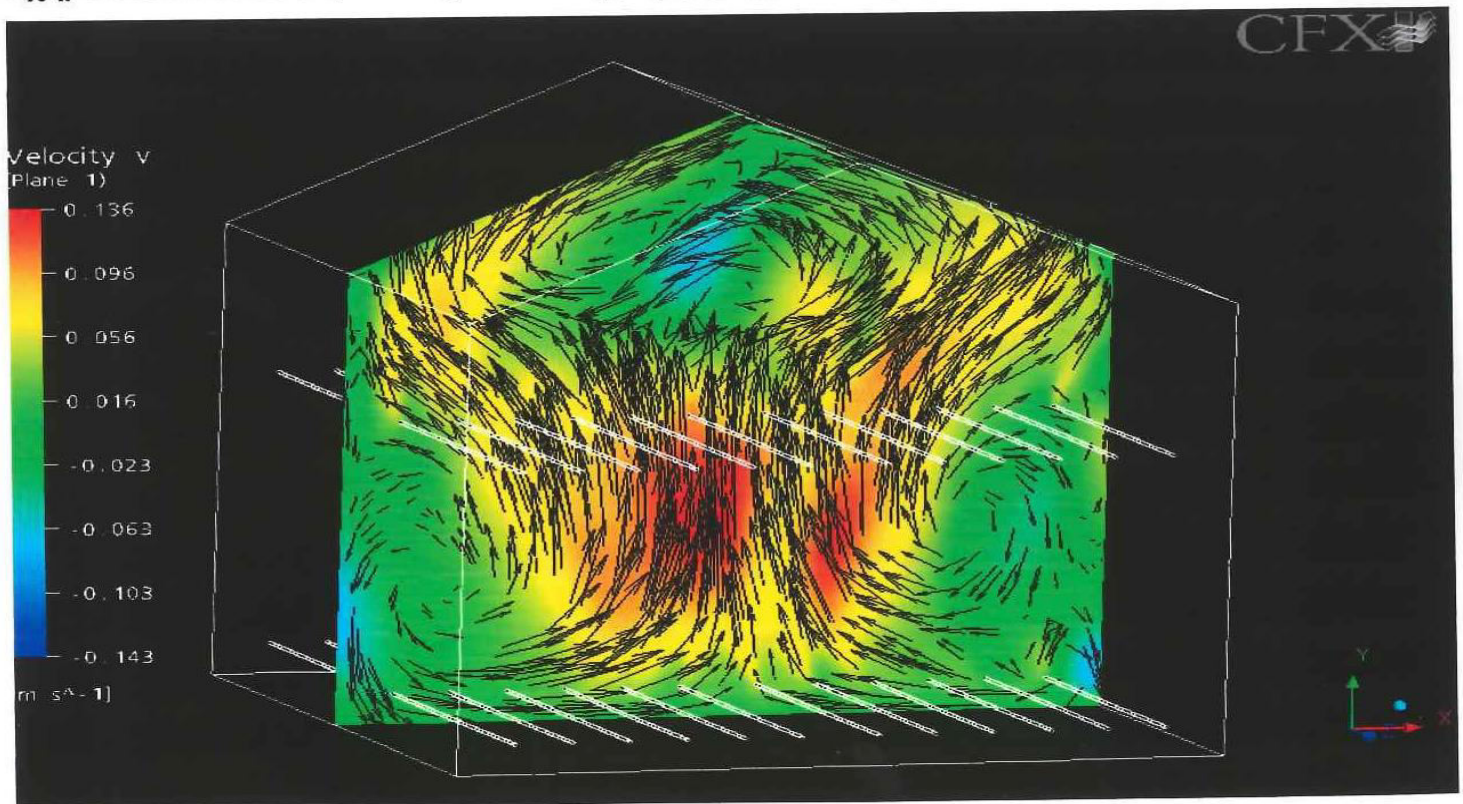
### ➤ ΔΙΑΤΑΞΗ 3:

Η γεωμετρία διατηρείται ίδια με αυτή του σχήματος 10.11, ενώ τώρα η θερμοκρασία των χαμηλά τοποθετημένων σωλήνων μειώνεται στους 38°C, σε σχέση με τους 60°C. Με τον τρόπο αυτό, το θερμοκήπιο δέχεται θερμική ενέργεια της τάξης των 10,5 KW περίπου (για την εφαρμογή της σχέσης 10.5 οι συντελεστές  $\alpha_s$  και  $\alpha_k$  για τους σωλήνες των 38°C βρέθηκαν από τους τύπους 10.3 και 10.4 αντίστοιχα). Το σχήμα 10.17 δείχνει την επίπτωση αυτής της μείωσης της θερμοκρασίας στο επίπεδο καλλιέργειας των φυτών, αλλά και κοντά στην οροφή.



Σχήμα 10.17: Θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στη διάταξη 3.

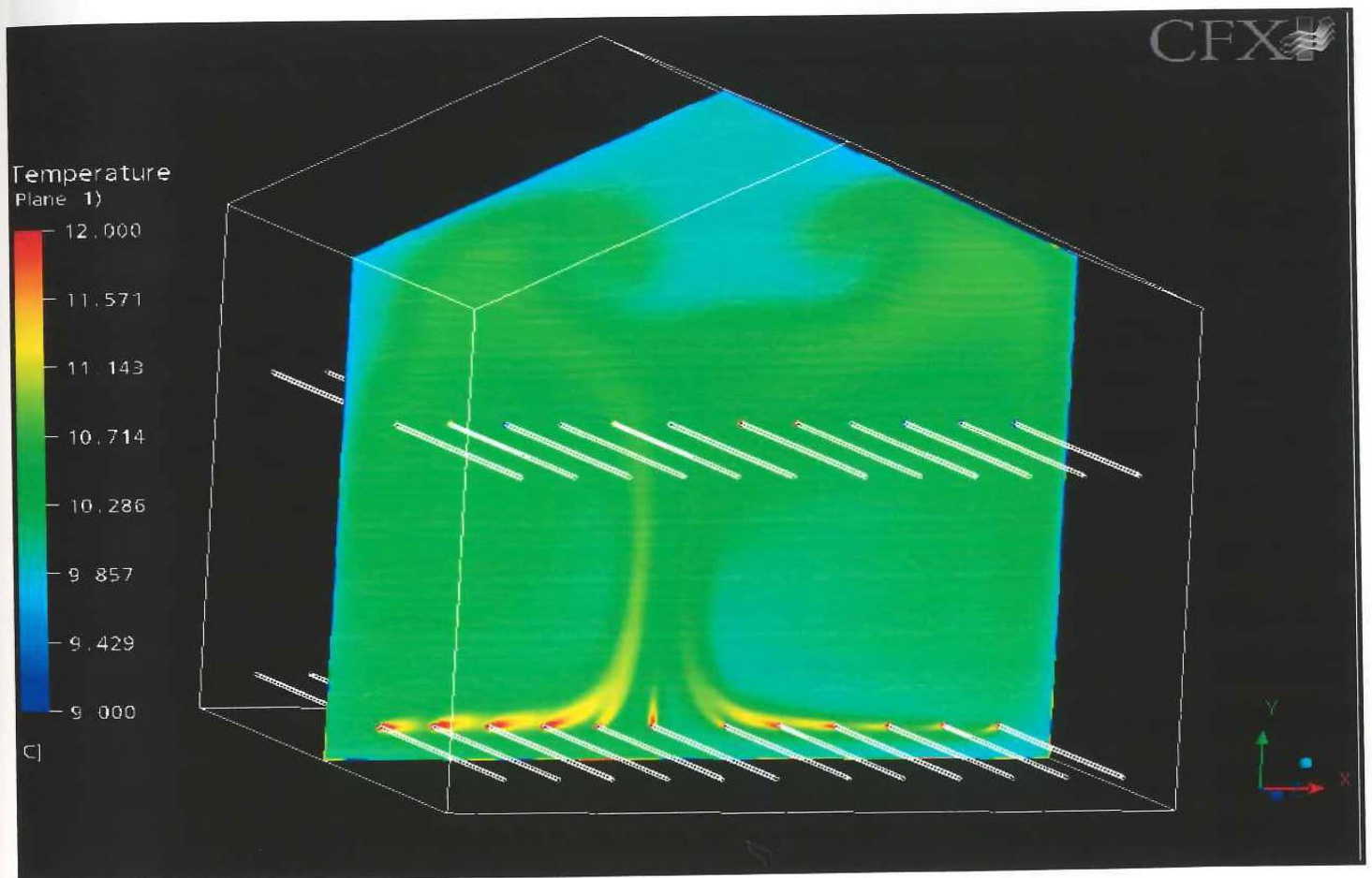
Τέλος, η κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας του αέρα παίρνει τις τιμές που φαίνονται στο σχήμα 10.18 όπου παρουσιάζεται και η μορφή της κυκλοφορίας του αέρα εντός του χώρου.



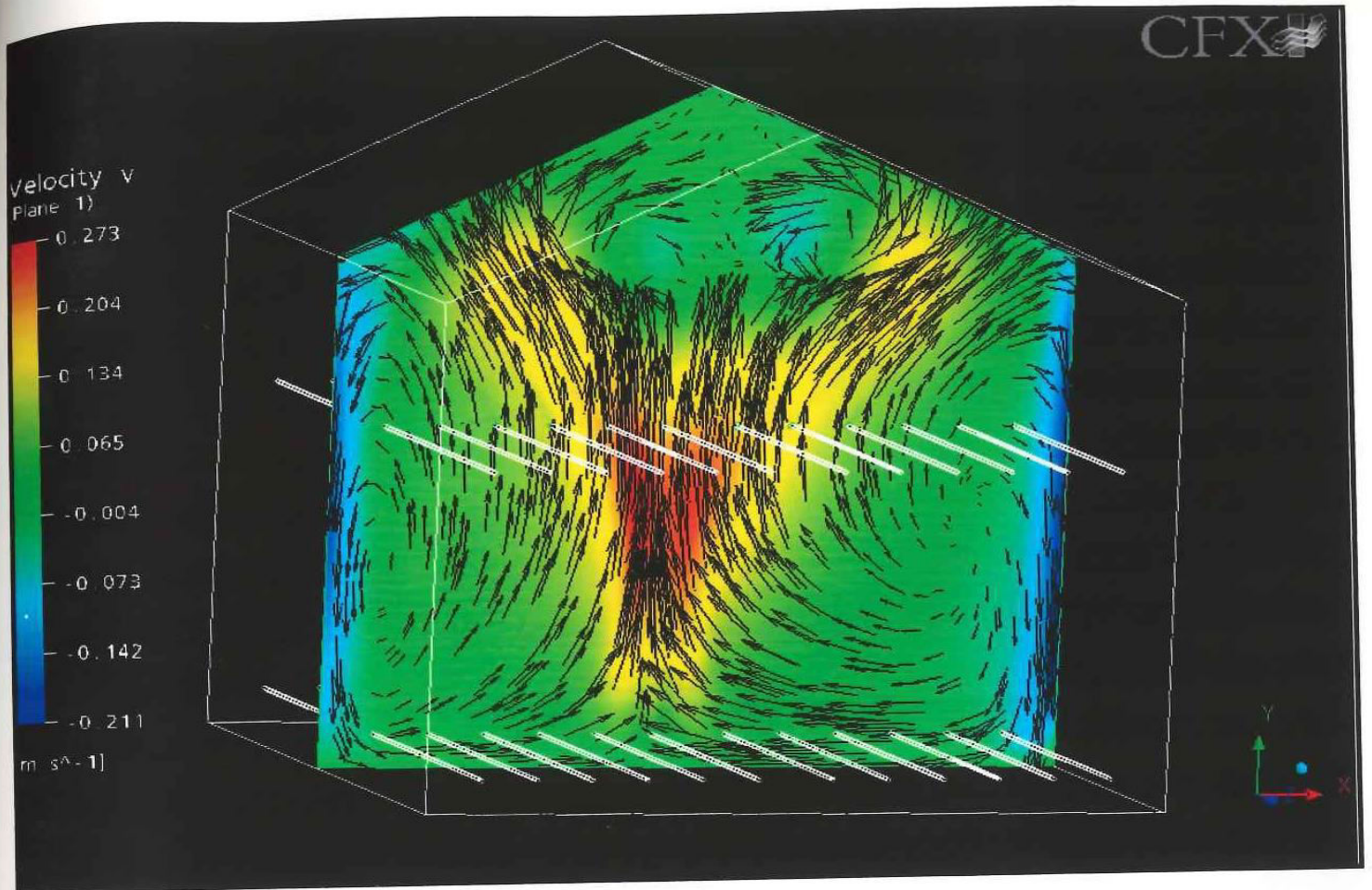
Σχήμα 10.18: Κάθετη ταχύτητα και βέλη κυκλοφορίας του αέρα.

**➤ ΔΙΑΤΑΞΗ 4:**

Το θερμοκήπιο της διάταξης αυτής θερμαίνεται μόνο από 12 σωλήνες τοποθετημένους σε ύψος 0,2m από το έδαφος, με διάμετρο 0,027m και σταθερή θερμοκρασία 60°C, με αποτέλεσμα τη μείωση της θερμότητας εντός του χώρου στα 4,28 KW. Για την προσομοίωση αυτή χρησιμοποιήθηκε και πάλι η γεωμετρία του σχήματος 10.11, μόνο που οι επάνω σειρά σωλήνων τέθηκε αδιαβατική (έτσι ώστε να μην αποδίδουν καθόλου θερμότητα). Προέκυψαν οι θερμοκρασίες του σχήματος 10.19, το οποίο δείχνει ότι η θερμότητα που συσσωρεύεται στην οροφή του θερμοκηπίου είναι σημαντικά μικρότερη από την περίπτωση στην οποία η απόδοση θερμικής ενέργειας γινόταν και από ψηλά τοποθετημένους σωλήνες, και οι ταχύτητες του σχήματος 10.20.



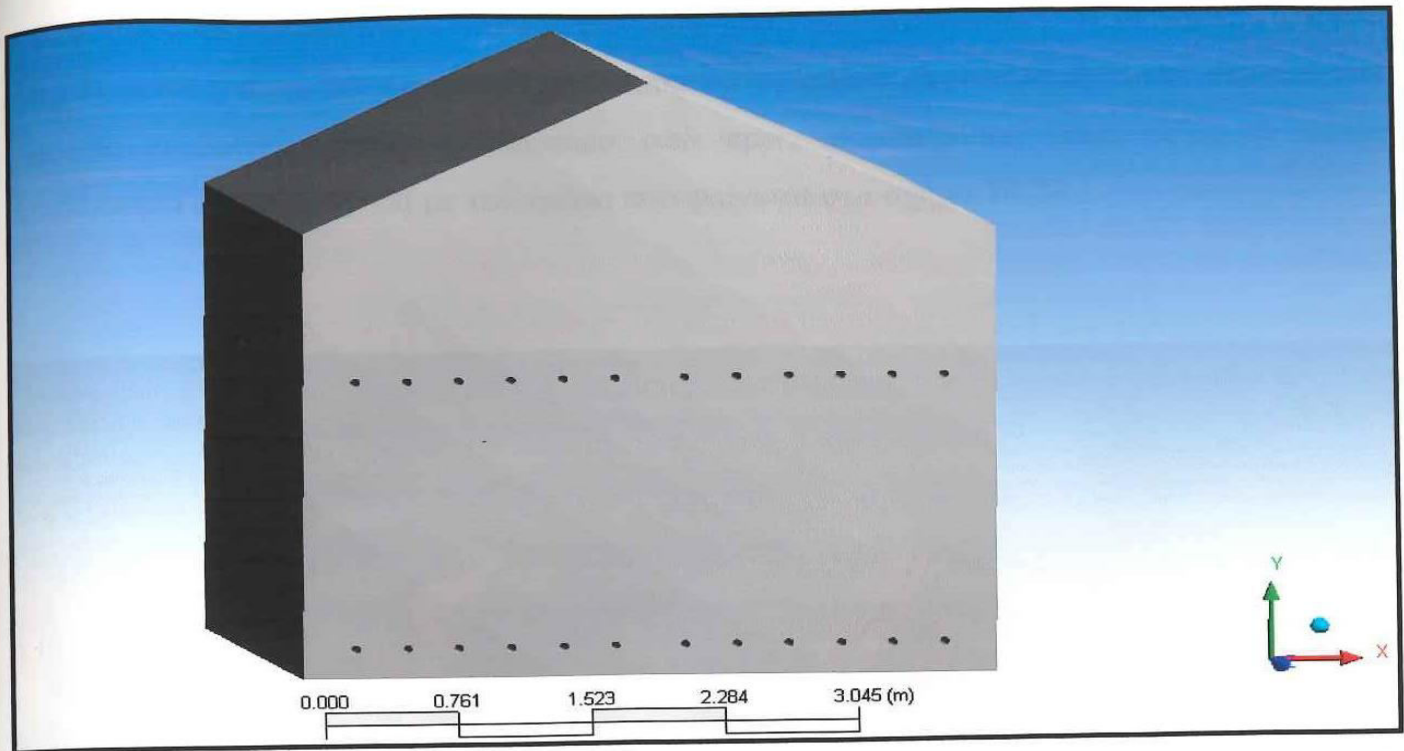
Σχήμα 10.19: Κατανομή θερμοκρασίας στη διάταξη 4.



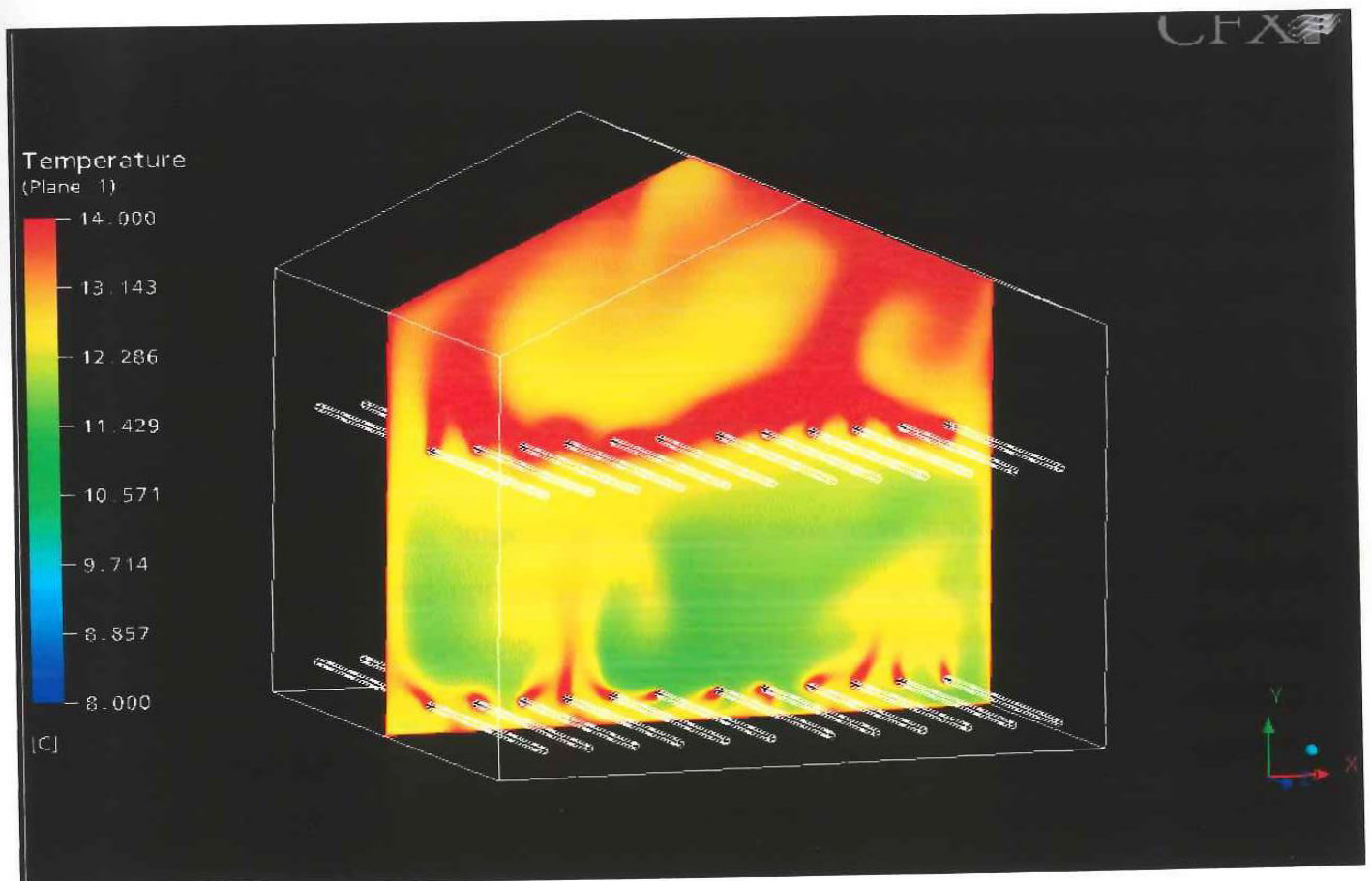
Σχήμα 10.20: Κάθετη ταχύτητα του αέρα στη διάταξη 4.

#### ➤ ΔΙΑΤΑΞΗ 5:

Στην προσπάθεια να μελετηθεί η επίδραση της διαμέτρου των σωλήνων στη θερμοκρασία του θερμοκηπίου, κατασκευάστηκε η γεωμετρία του σχήματος 10.21, με αύξηση της διαμέτρου των σωλήνων στα 0,054m. Η θερμοκρασία των επάνω (στα 2m) και κάτω (στα 0,2m) σωλήνων διατηρείται στους 95°C και 60°C αντίστοιχα. Αυτή η αύξηση της διαμέτρου οδήγησε σε αύξηση της επιφάνειας θερμότητας με αποτέλεσμα να προσδίδονται πλέον στο χώρο 22,7 KW, αντί των 13 KW που προσέδιδαν οι σωλήνες των 0,027m διαμέτρου, υπό τις ίδιες συνθήκες.



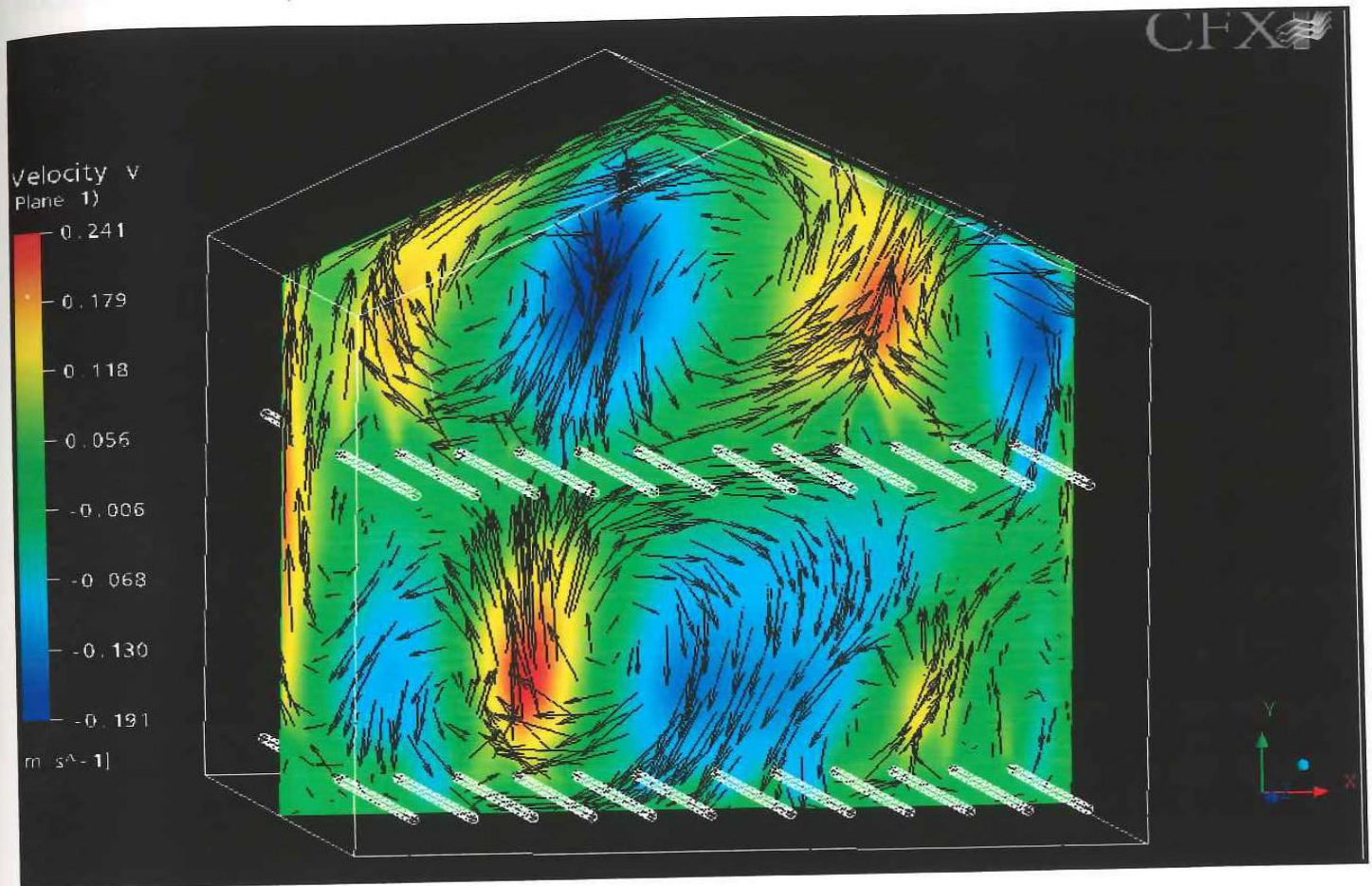
Σχήμα 10.21: Η 5<sup>η</sup> μελετούμενη διάταξη.



Σχήμα 10.22: Θερμοκρασιακή κατανομή για τη διάταξη 5.



Η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι φανερή (σχήμα 10.22), καθώς αυτή προσεγγίζει πλέον τους  $13^{\circ}\text{C}$ , ενώ η θερμοκρασία στην περιοχή της οροφής ανεβαίνει ακόμη περισσότερο από πριν, πλησιάζοντας τους  $14^{\circ}\text{C}$ . Ο αέρας κυκλοφορεί μέσα στο χώρο με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα 10.23.

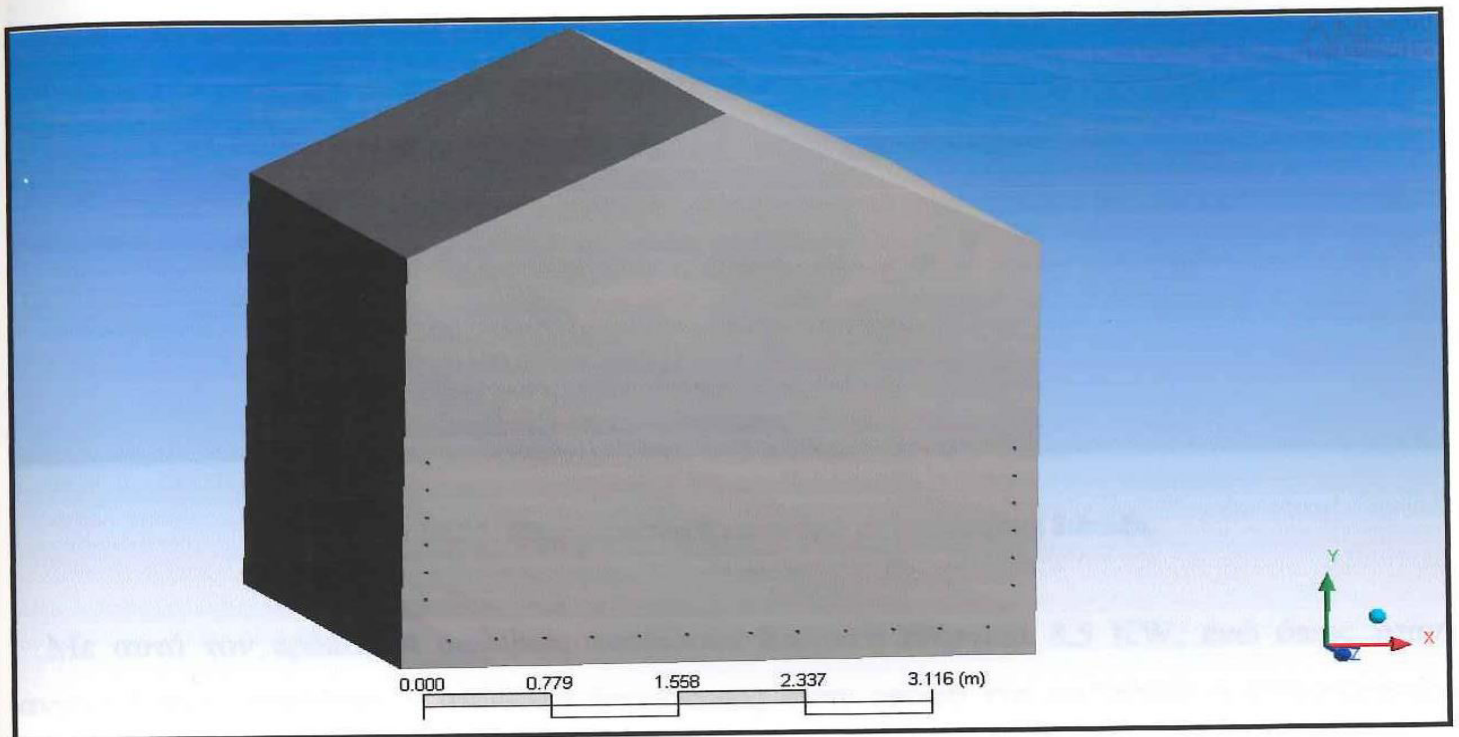


Σχήμα 10.23: Κατεύθυνση του αέρα.

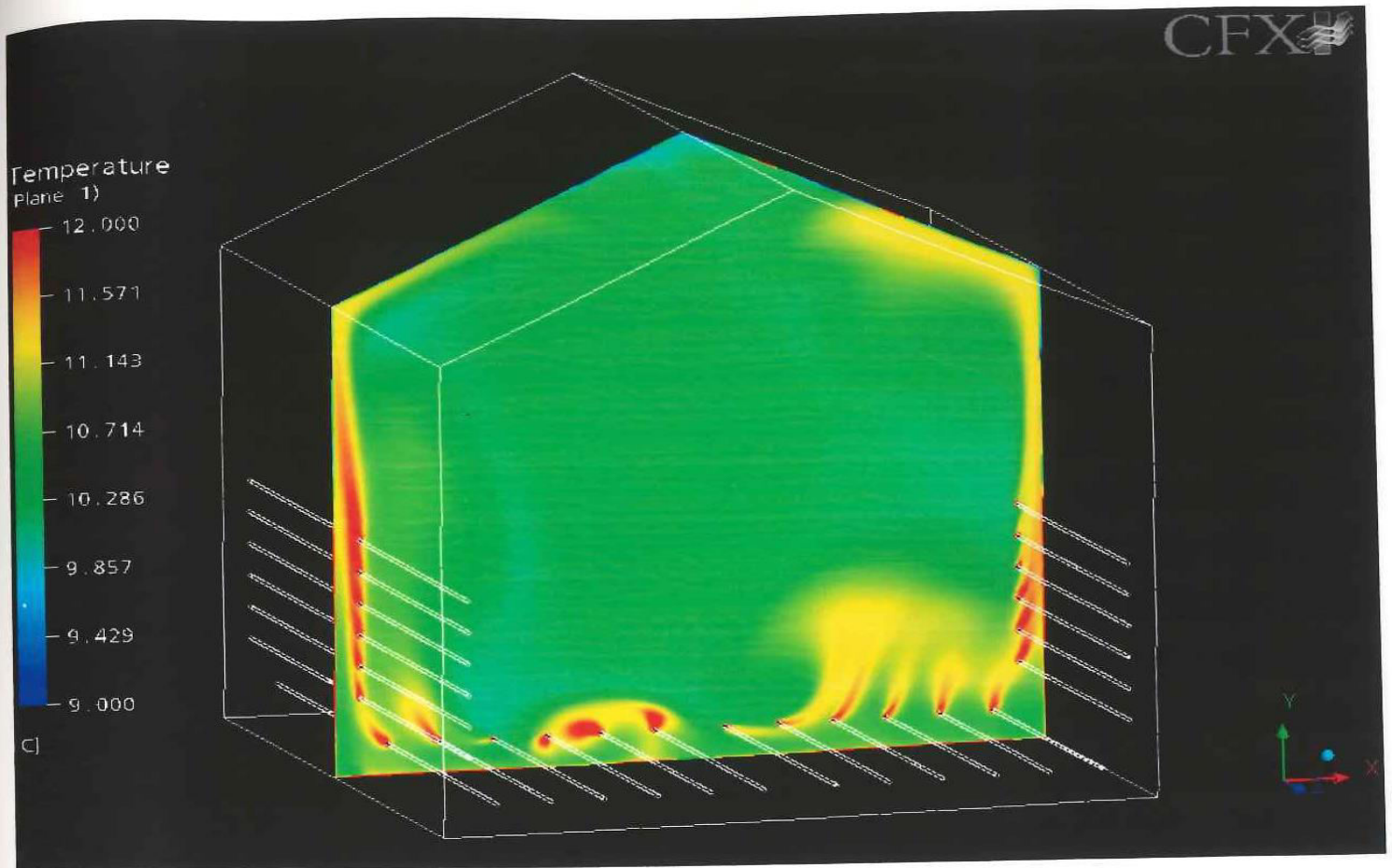
Παρατηρώντας πως όλες οι παραπάνω διατάξεις σωλήνων αποδίδουν σημαντικά ποσά θερμότητας στην περιοχή της οροφής, δηλαδή σε μια περιοχή η οποία δεν θα έπρεπε να θερμαίνεται εντατικά σε περιπτώσεις καλλιέργειας φυτών επί του εδάφους, δοκιμάστηκαν οι δύο διατάξεις που ακολουθούν, με σκοπό να δημιουργηθεί διαφορετική κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο.

**➤ ΔΙΑΤΑΞΗ 6:**

Η έκτη κατά σειρά διάταξη που δοκιμάζεται έχει μία δωδεκάδα σωλήνων (με  $d = 0,027\text{m}$  και  $\theta = 60^\circ\text{C}$ ) σε απόσταση  $0,2\text{m}$  από το έδαφος, και άλλες δύο εξάδες στους πλαϊνούς τοίχους του θερμοκηπίου, τοποθετημένες ως εξής: ο πρώτος σωλήνας κάθε εξάδας απέχει  $60\text{cm}$  από το έδαφος, και οι υπόλοιποι απέχουν μεταξύ τους  $20\text{cm}$ . Η απόστασή τους από τον πλευρικό τοίχο είναι  $15\text{cm}$ , και έχουν διάμετρο και θερμοκρασία  $0,027\text{m}$  και  $60^\circ\text{C}$  αντίστοιχα (σχήμα 10.24).

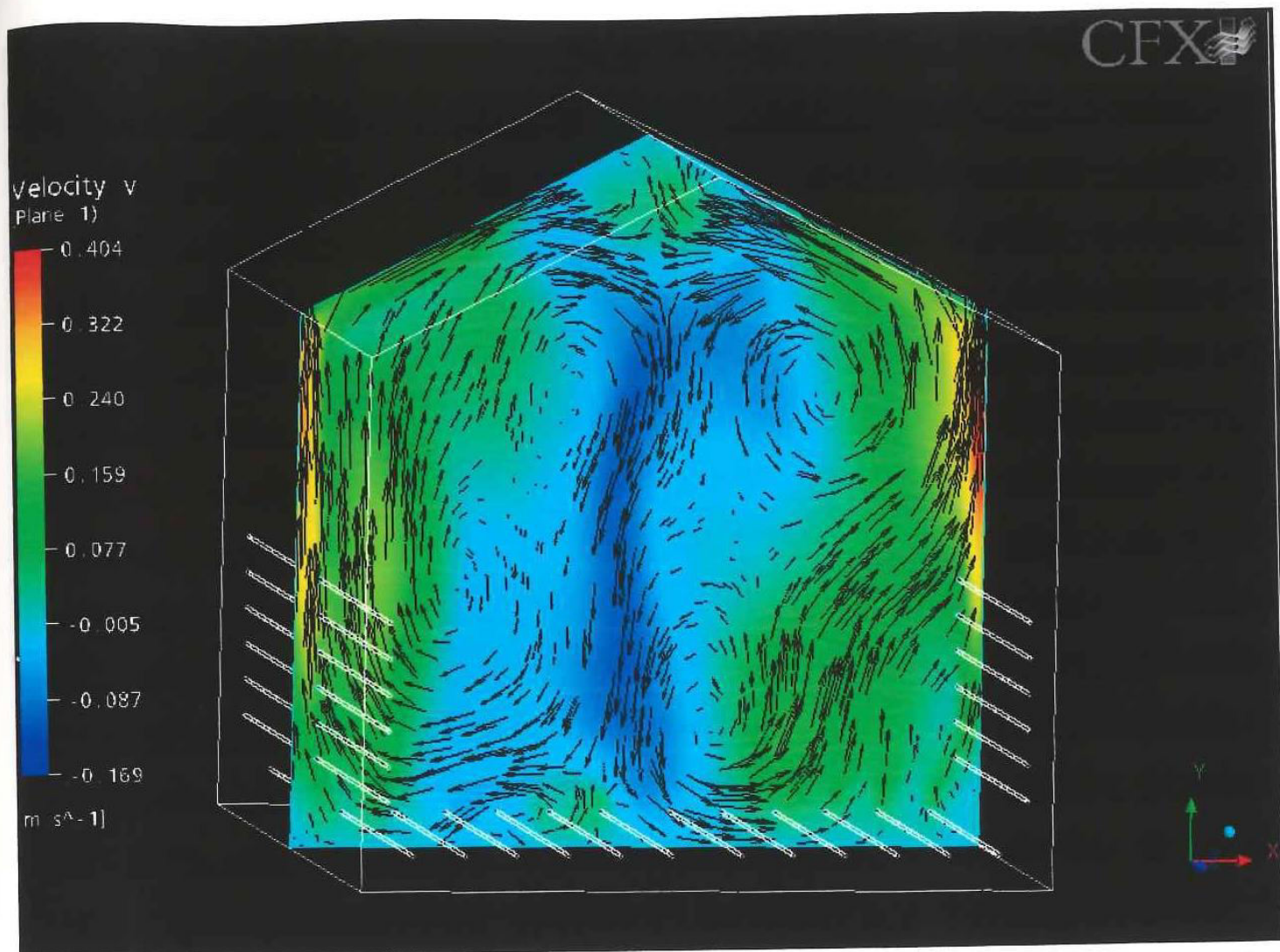


Σχήμα 10.24: Η διάταξη 6 (με περιμετρικούς σωλήνες).



Σχήμα 10.25: Θερμοκρασιακή κατανομή με περιμετρική διάταξη.

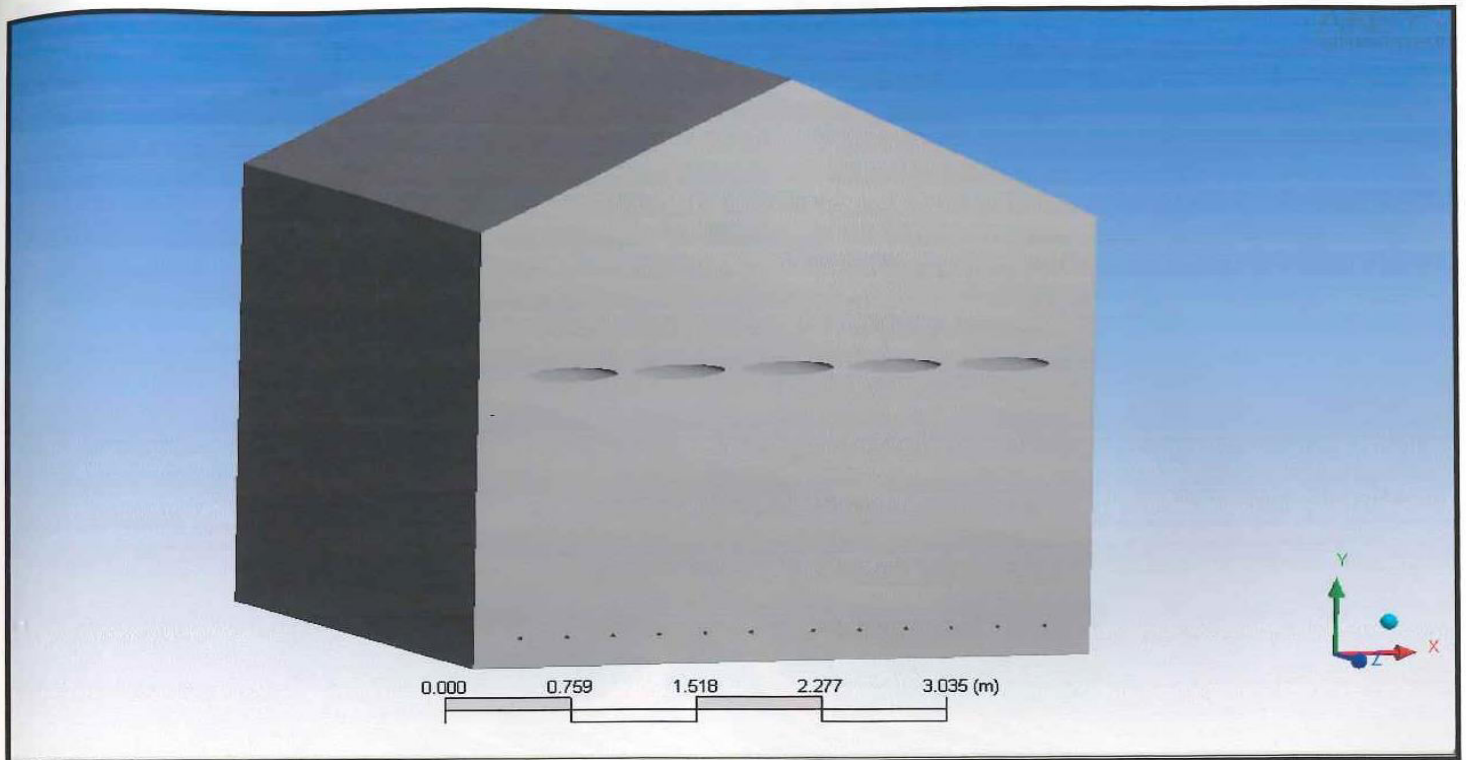
Με αυτό τον τρόπο, οι σωλήνες αποδίδουν θερμική ενέργεια 8,5 KW, ενώ όπως ήταν αναμενόμενο, μειώθηκε η απόδοση θερμότητας στην οροφή και αυξήθηκε η θερμοκρασία περιμετρικά του χώρου, γύρω από τις θέσεις των σωλήνων (σχήμα 10.25). Η θερμοκρασία στο ύψος των φυτών σχεδόν πλησιάζει τους 11°C. Η μεγάλη απόδοση θερμότητας στα πλαϊνά τοιχώματα είναι εμφανής και στο σχήμα 10.26 όπου φαίνεται ότι ο θερμαινόμενος αέρας κατευθύνεται προς αυτά.



Σχήμα 10.26: Διάταξη 6, κίνηση του αέρα προς τα τοιχώματα.

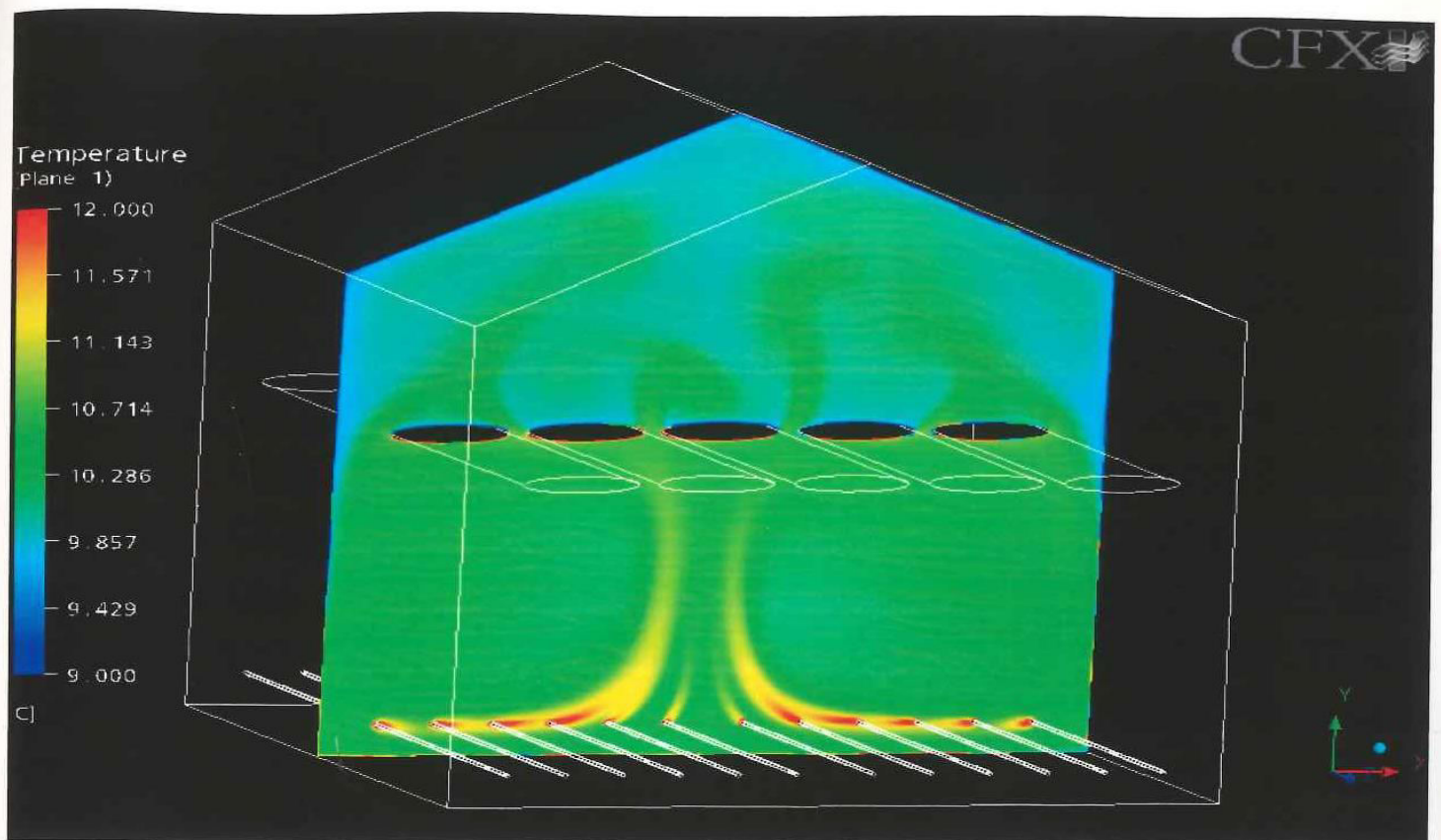
➤ **ΔΙΑΤΑΞΗ 7:**

Άλλη μία διάταξη που αναμένεται να παρουσιάσει διαφορετική κατανομή θερμοκρασίας σε σχέση με τις άλλες, είναι αυτή του σχήματος 10.27.

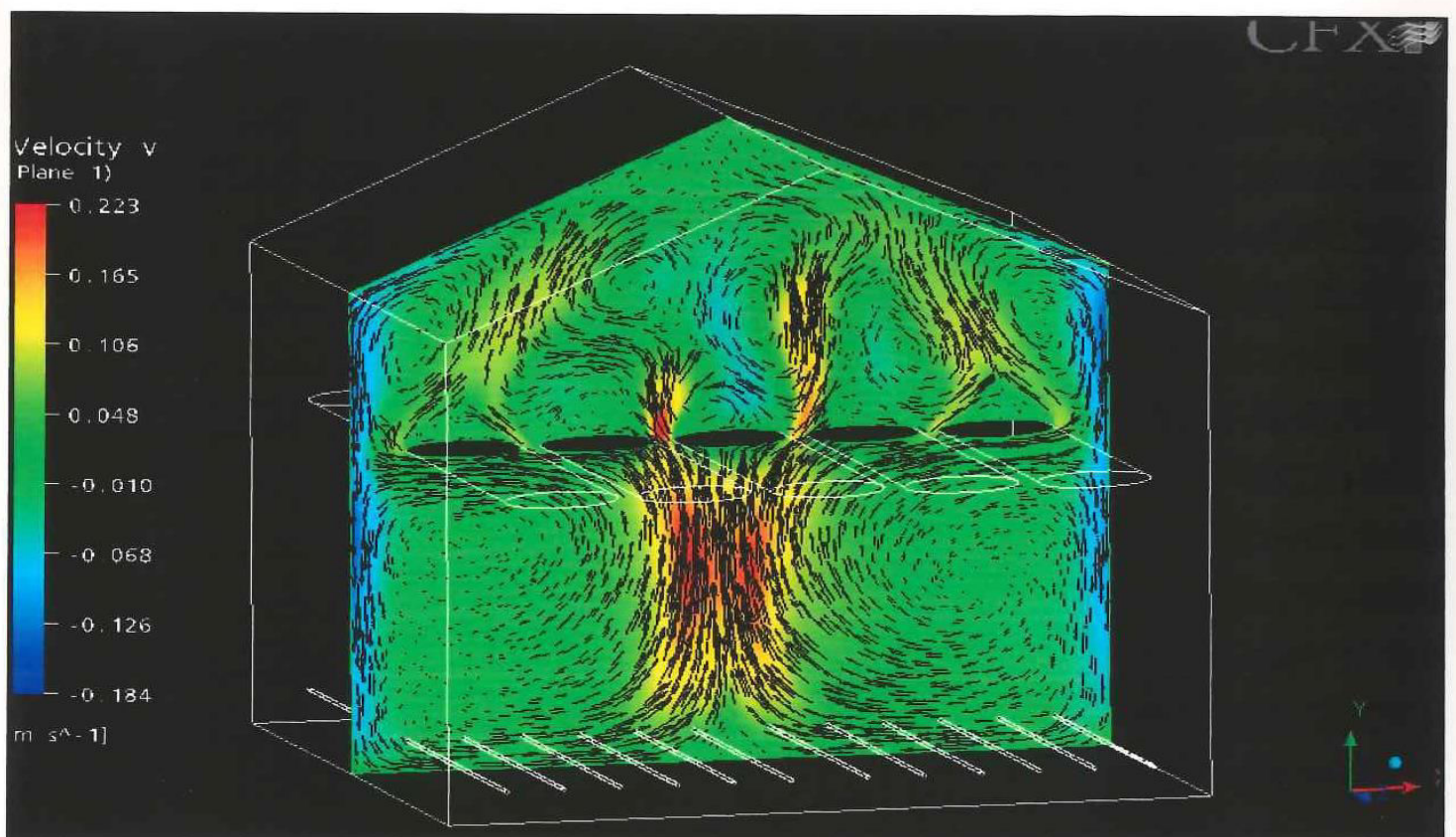


Σχήμα 10.27: Διάταξη 7.

Η διάταξη 7 αποτελείται από 12 σωλήνες σε απόσταση 0,2m από το έδαφος (με  $d = 0,027\text{m}$  και  $\theta = 60^\circ\text{C}$ ), και 5 κομμάτια από πλέξιγκλας σε ύψος 2m, πλάτους 60cm το καθένα και σε απόσταση 10cm μεταξύ τους. Αυτά λειτουργούν σαν αεροπέδη, εμποδίζοντας τη θερμότητα που εκπέμπεται από τους σωλήνες να περάσει πάνω από αυτά και να συσσωρευτεί στην οροφή, συγκρατώντας την έτσι σε ύψος κάτω των δύο μέτρων, όπως δείχνει και το σχήμα 10.28. Η αποδιδόμενη θερμότητα περιορίζεται στα 4,28 KW ενώ έντονη ανακυκλοφορία του αέρα παρατηρείται κάτω από το ύψος των “εμποδίων” (σχήμα 10.29).



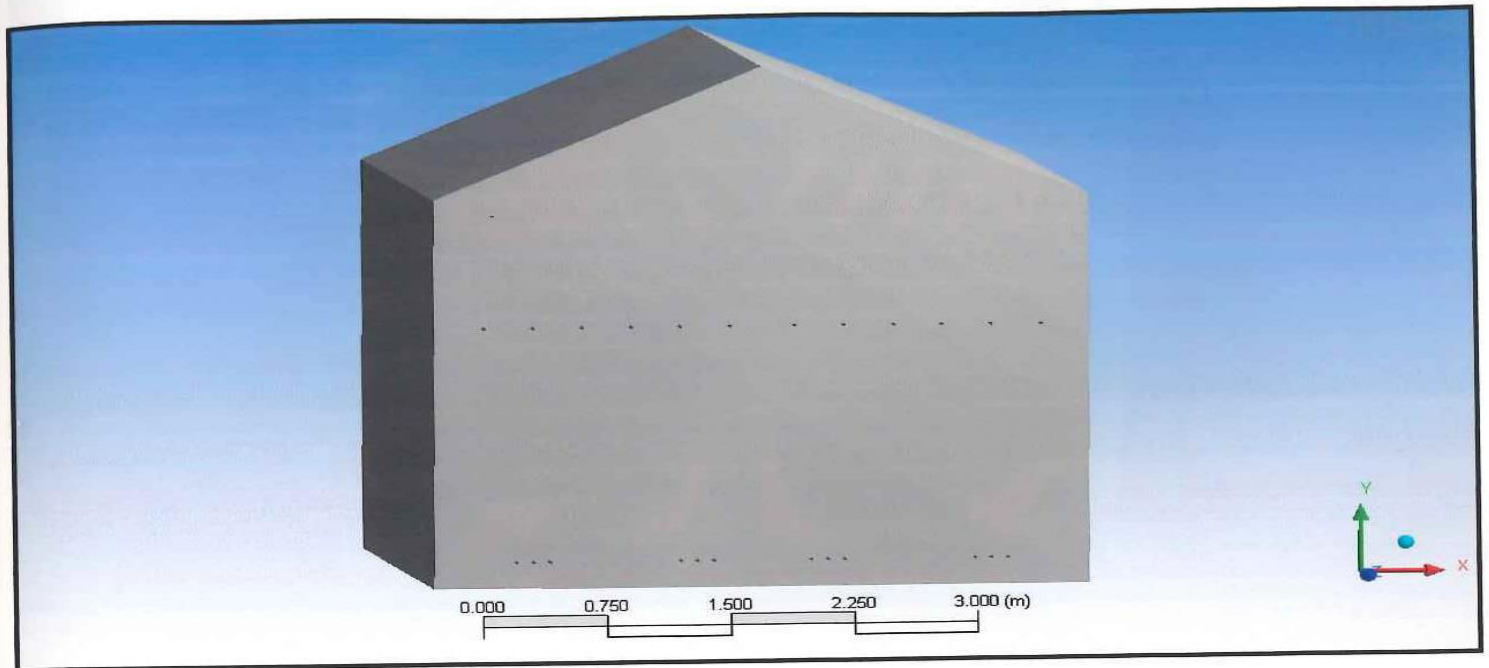
Σχήμα 10.28: Κατανομή της θερμοκρασίας μετά την προσθήκη αεροπέδης.



Σχήμα 10.29: Κατεύθυνση του αέρα στη διάταξη 7.

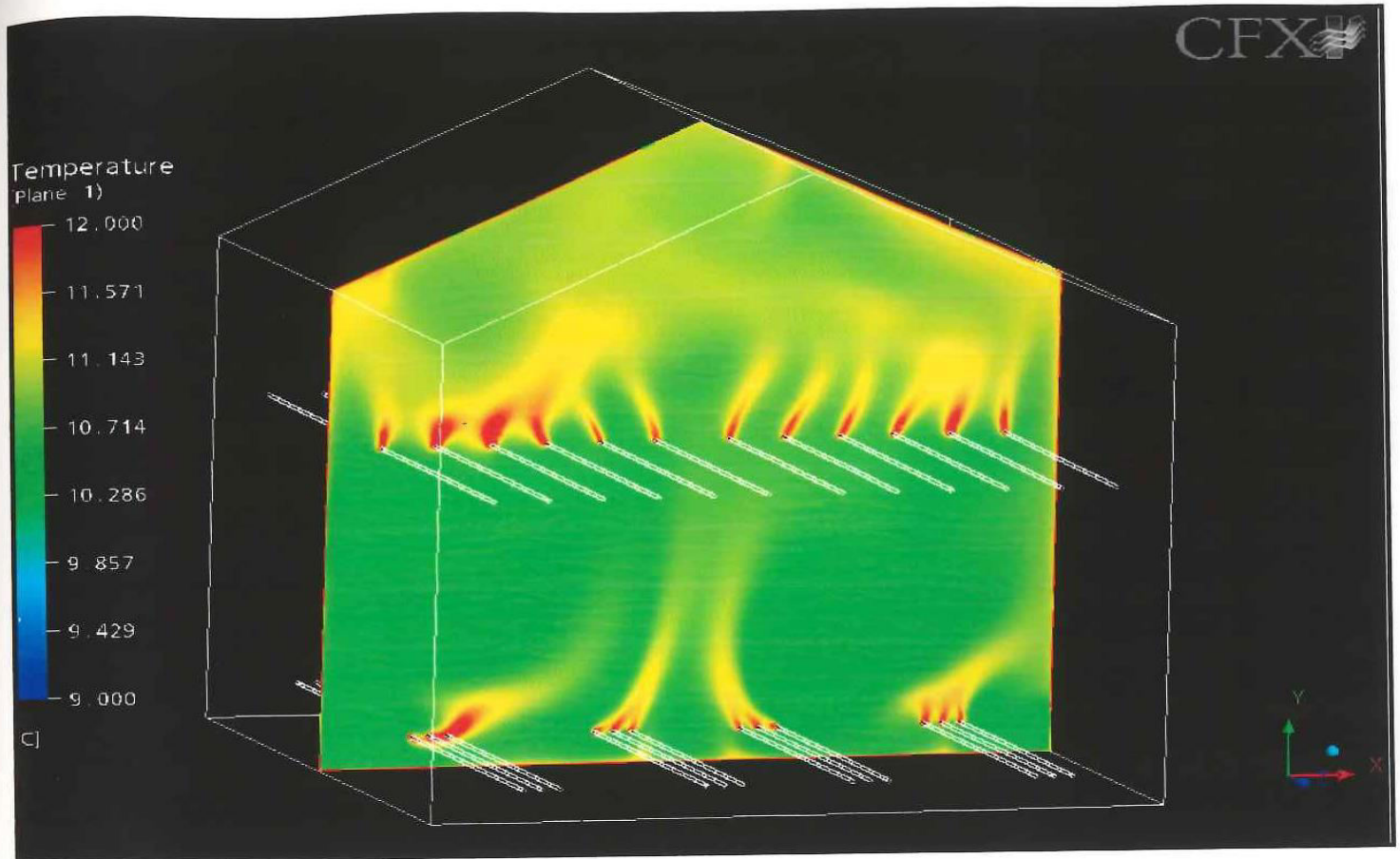
### ➤ ΕΝΝΑΛΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ:

Μία ακόμη γεωμετρία που μελετάται είναι η τοποθέτηση των κάτω σωλήνων ανά τριάδες σε οριζόντια διάταξη, όπως φαίνεται στο σχήμα 10.30.



Σχήμα 10.30: Εναλλακτική διάταξη με τους κάτω σωλήνες σε τριάδες.

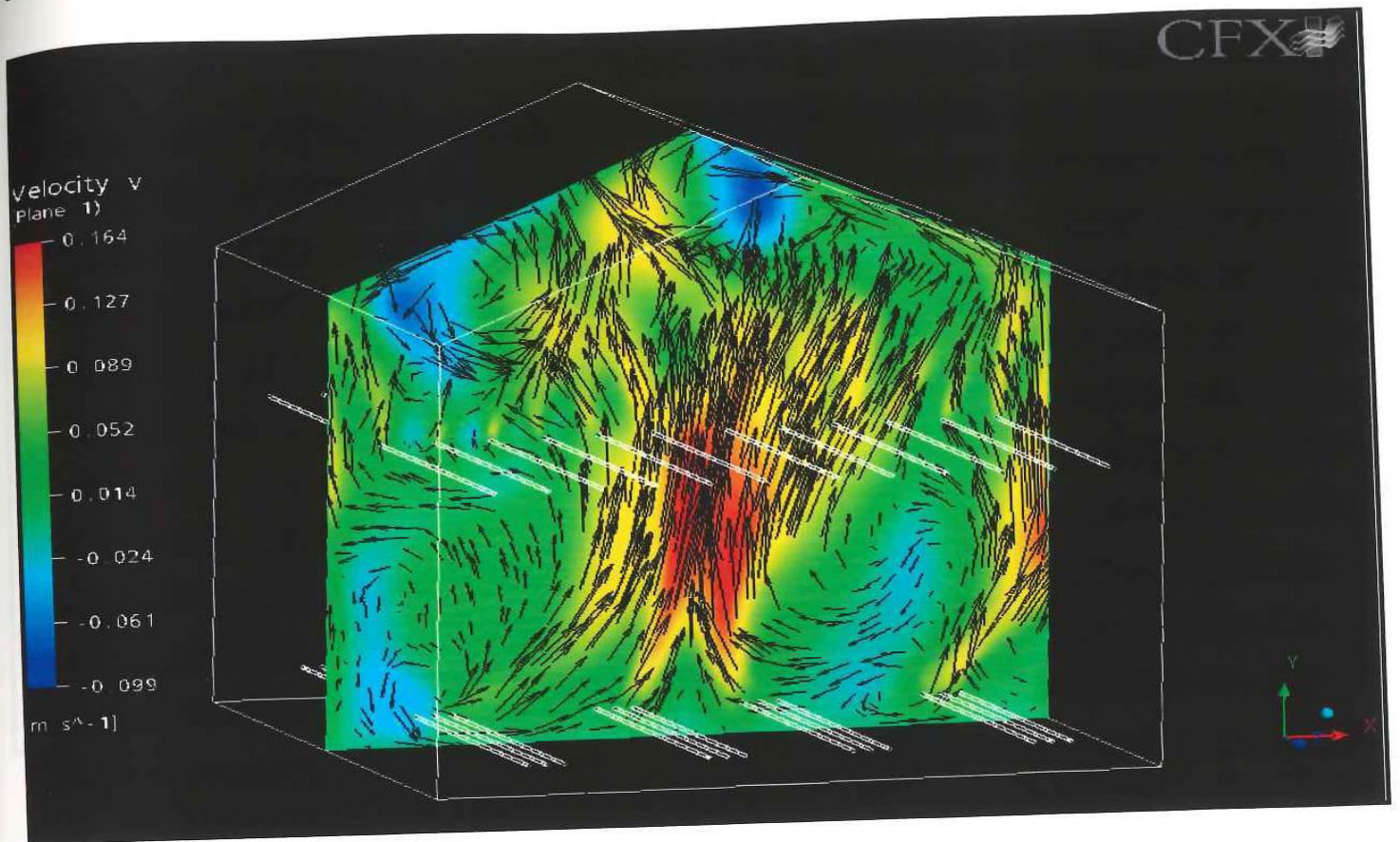
Η διάμετρος όλων των σωλήνων είναι και εδώ 0,027m και η θερμοκρασία είναι 95°C για τους επάνω και 60°C για τους κάτω. Το σχήμα 10.31 δείχνει την κατανομή της θερμοκρασίας που προέκυψε μετά τη διαδικασία της προσομοίωσης και το 10.32 την κίνηση του αέρα μέσα στο χώρο.



Σχήμα 10.31: Θερμοκρασιακή κατανομή.

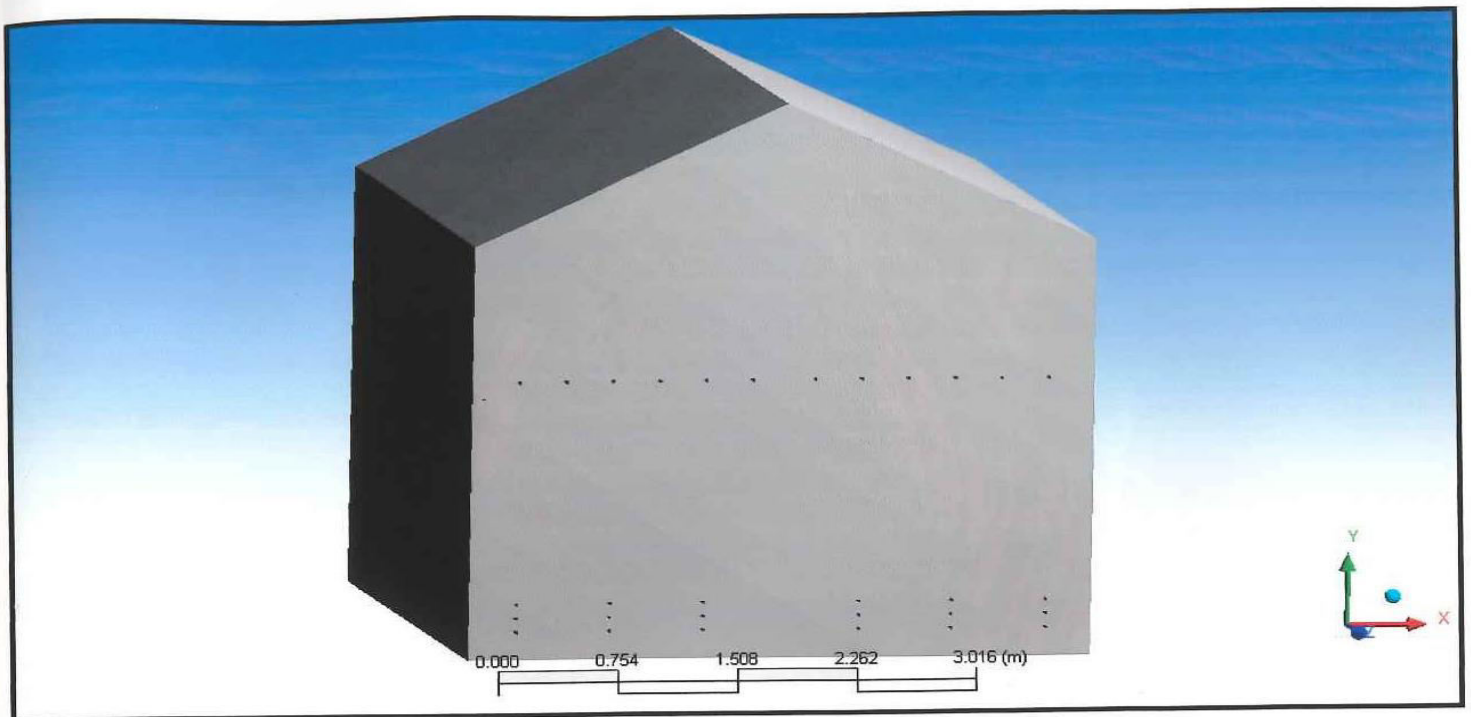
Σε αυτό, μπορεί κανείς να διακρίνει πως η μόνη διαφορά που παρουσιάζει από το σχήμα 10.12 (οι κάτω σωλήνες τοποθετημένοι ανά ένα σε ίσες αποστάσεις, και όχι ανά τρεις) είναι μια ελαφρά ανομοιομορφία στην κατανομή της θερμοκρασίας, λόγω της συγκεντρωμένης απόδοσης θερμότητας από τρεις σωλήνες μαζί. Η θερμοκρασία στα χαμηλά επίπεδα είναι γύρω στους  $10,7^{\circ}\text{C}$  και η θερμότητα μέσα στο χώρο κυμαίνεται στα 13 KW, όπως και στην περίπτωση τοποθέτησης των κάτω σωλήνων ανά ένα (γεωμετρία 2).



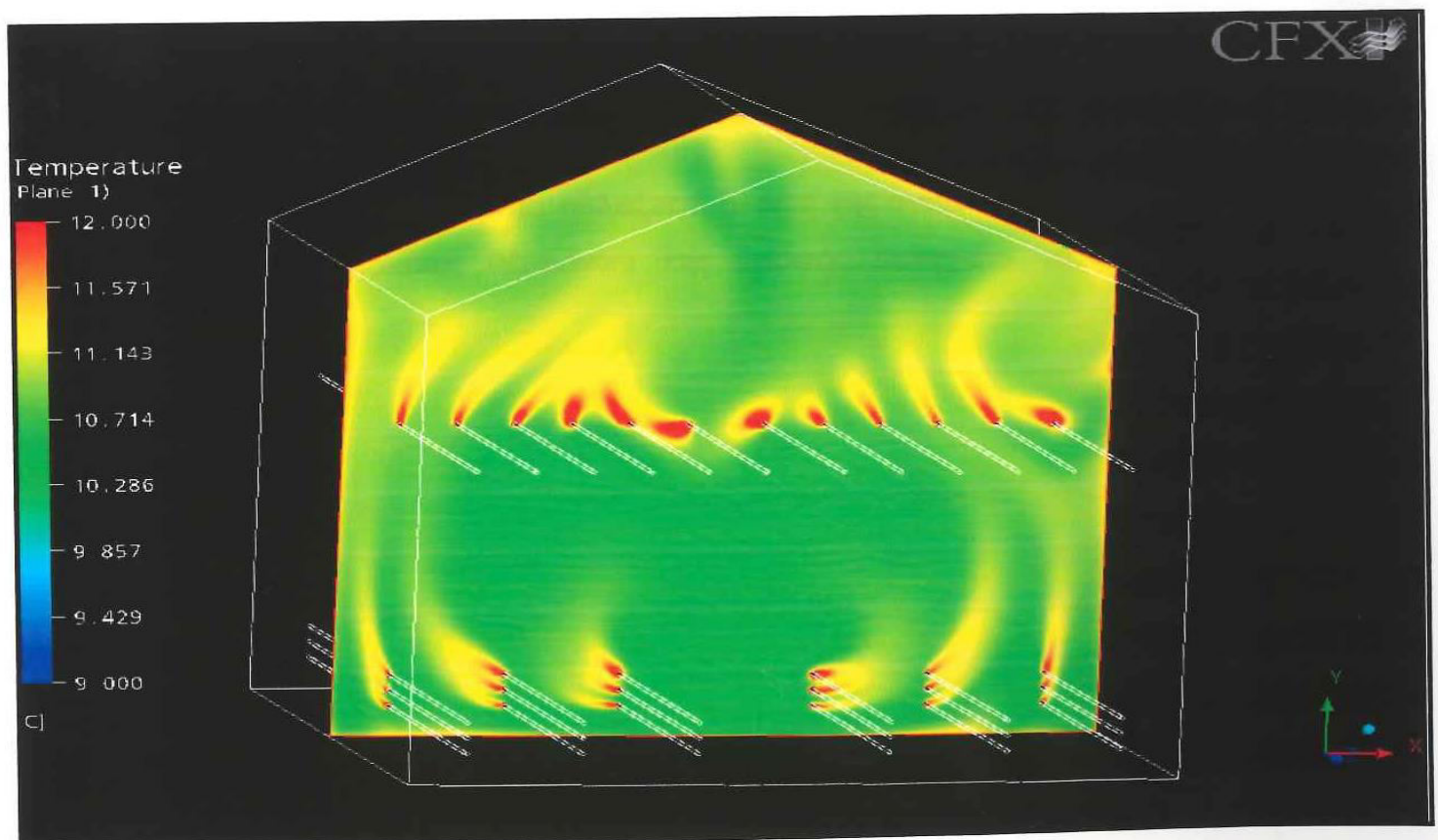


Σχήμα 10.32: Κίνηση και ταχύτητες του θερμαινόμενου αέρα.

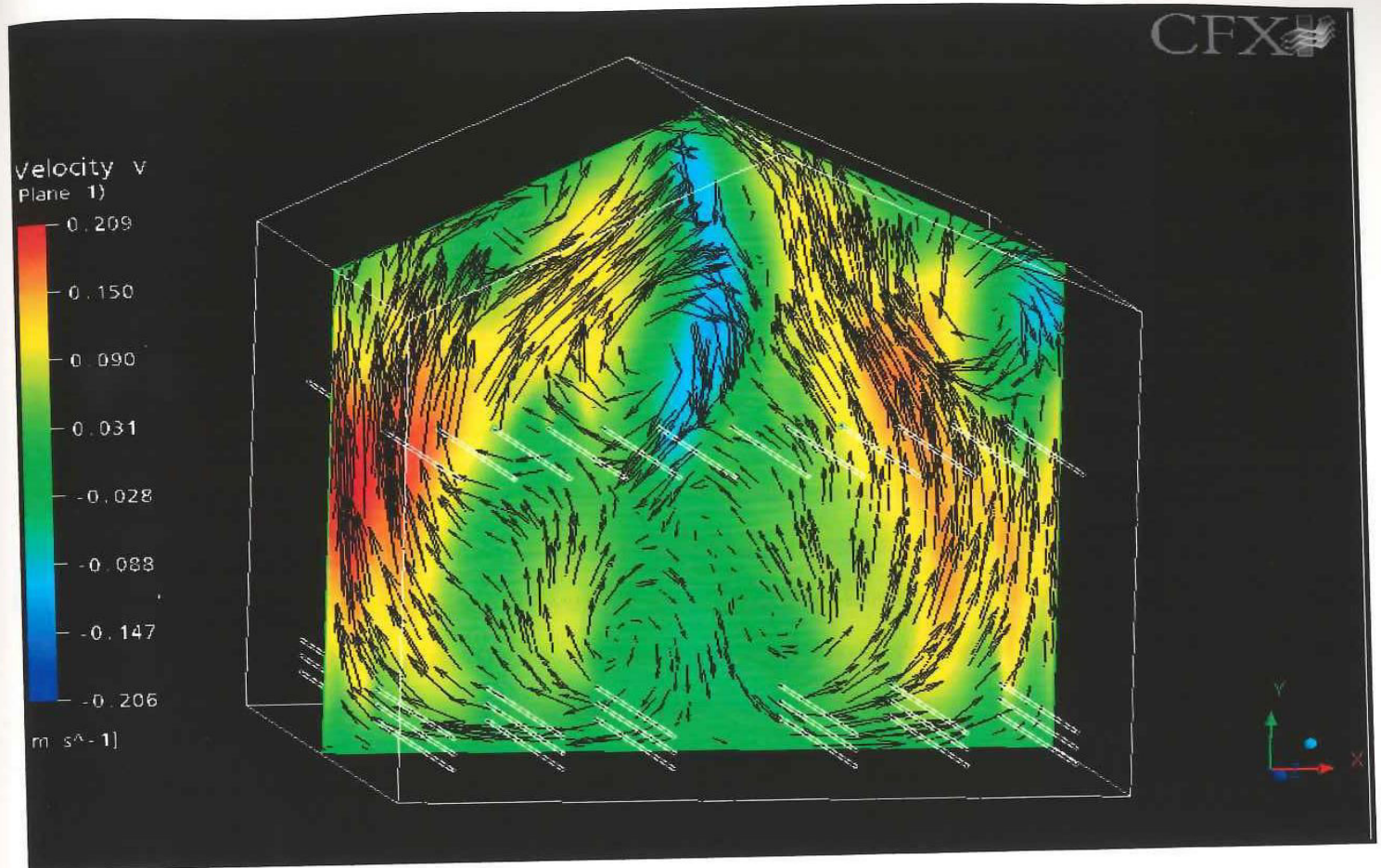
Στο σχήμα 10.33 παρουσιάζεται η τελευταία δοκιμαζόμενη διάταξη, όπου αυξάνεται ο αριθμός των κάτω σωλήνων από 12 σε 18 οι οποίοι πλέον τοποθετούνται σε κάθετες τριάδες. Αυτοί, σε συνδυασμό με τους 12 επάνω σωλήνες αποδίδουν συνολικά 15 KW, δίνοντας έτσι στο χώρο τη μέση θερμοκρασία των 11°C περίπου. Η κατανομή της θερμοκρασίας όπως διαμορφώνεται, φαίνεται στο σχήμα 10.34, ενώ το σχήμα 10.35 δείχνει τα ανερχόμενα ρεύματα αέρα, καθώς και την ταχύτητά τους.



Σχήμα 10.33: Η τελευταία διάταξη.



Σχήμα 10.34: Κατανομή της θερμοκρασίας όπως προκύπτει από αύξηση του αριθμού και της θέσης των κάτω σωλήνων.



Σχήμα 10.35: Κινήσεις του αέρα που διαμορφώνονται στην τελευταία διάταξη.

Με αυτό τον τρόπο τοποθέτησης, αλλάζει η μορφή της ανομοιομορφίας αλλά συνεχίζει να διατηρείται, ενώ η άσκοπη θέρμανση της οροφής συνεχίζει να αποτελεί πρόβλημα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 12<sup>ο</sup>: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

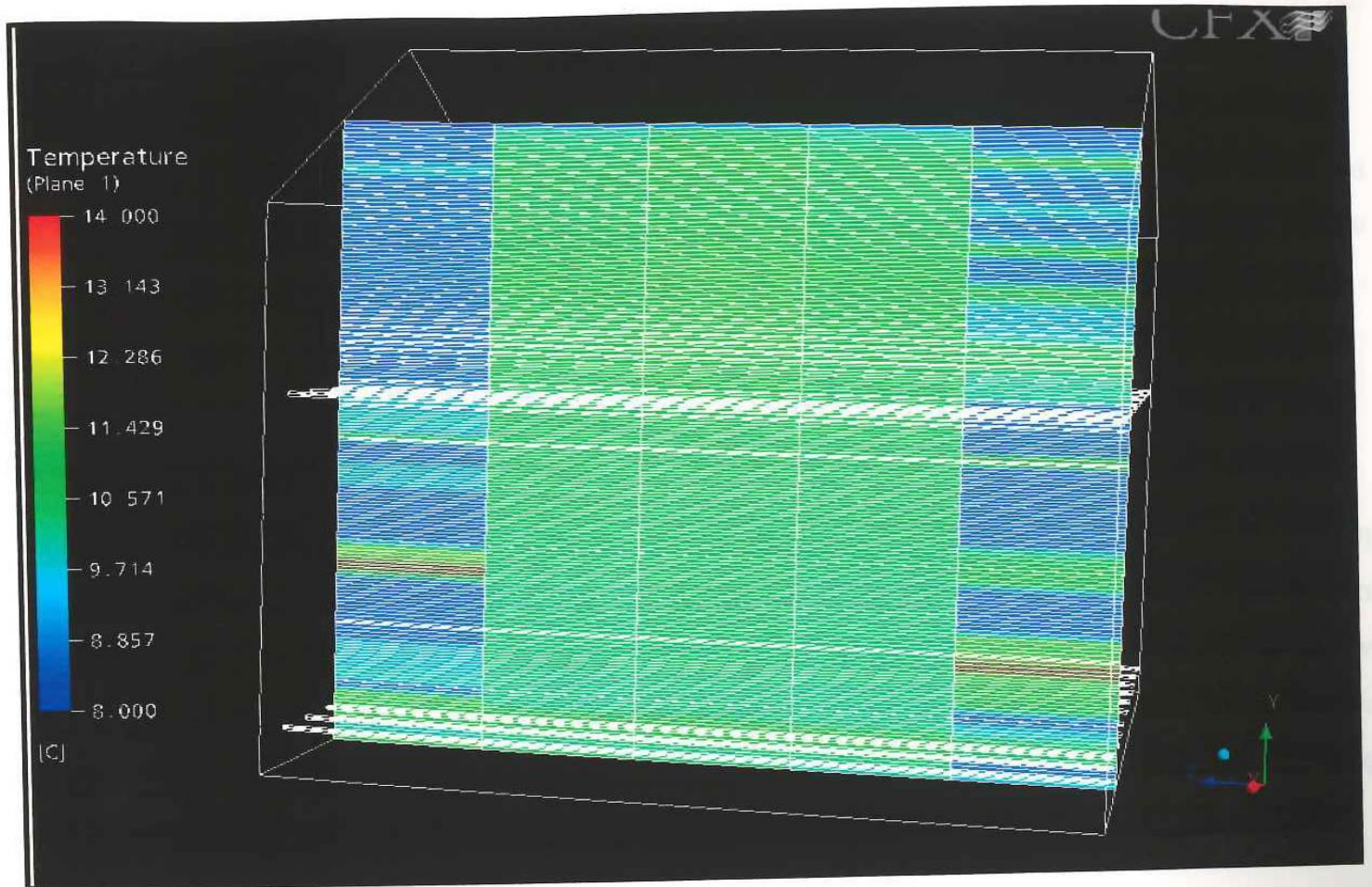
Η προηγηθείσα διαδικασία προσομοίωσης διαφόρων διατάξεων θερμοκηπίων, σε συνδυασμό με το βιβλιογραφικό μέρος της εργασίας αυτής, βοηθούν στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, η ανάλυση των οποίων ακολουθεί.

### 12.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΗ

Δεδομένου ότι η θέρμανση του θερμοκηπίου πραγματοποιείται μέσω των σωλήνων νερού με φαινόμενα αγωγής, συναγωγής και ακτινοβολίας, η προσομοίωση έπρεπε να περιλαμβάνει κάποιο μοντέλο ακτινοβολίας. Μεταξύ των άλλων λοιπόν που διατίθενται στο CFX επιλέχθηκε το μοντέλο Monte Carlo, καθώς σε αυτό, μέσω της παραμέτρου histories, μπορεί κανείς να ορίσει τον αριθμό των εκπεμπόμενων από μια επιφάνεια φωτονίων.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της ίδιας διάταξης με και χωρίς την εφαρμογή μοντέλου ακτινοβολίας, προέκυψαν τα εξής:

1. Παρόλο που δεν έγινε καμία αλλαγή στη γεωμετρία ή στη θερμοκρασία των σωλήνων, η εφαρμογή μοντέλου ακτινοβολίας έδωσε υψηλότερη μέση θερμοκρασία χώρου (11-11,5°C) αλλά και λιγότερο συμμετρική κατανομή της θερμοκρασίας, σε σχέση με την αντίθετη περίπτωση (μέση  $\theta \approx 10^\circ\text{C}$ ). Η διαφορά φαίνεται φανερά στα σχήματα 10.12 και 10.15 που προηγήθηκαν.
2. Το μοντέλο ακτινοβολίας μπορούσε να αποδώσει λογικά αποτελέσματα μόνο στην περιοχή μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου εσωτερικού επιπέδου. Όπως δείχνει δηλαδή και το σχήμα 10.36, τα αποτελέσματα ήταν αλλοιωμένα στις περιοχές που οριοθετούνται από τα ακριανά επίπεδα. Όπως έχει ειπωθεί, πιθανότερη αιτία γι' αυτό είναι η αραιή διακριτοποίηση που αυθαίρετα επιλέγει το μοντέλο ακτινοβολίας να εφαρμόσει στο χώρο.



Σχήμα 10.36: Ανακρίβεια που προέκυψε από τη χρήση μοντέλου ακτινοβολίας.

## 12.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

### 12.2.1. ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ

Η αύξηση της επιφάνειας των σωλήνων δοκιμάστηκε με δύο τρόπους:

- αύξηση του αριθμού του σωλήνων, και
- αύξηση της διαμέτρου των σωλήνων.

Αρχικά αυξήθηκε ο αριθμός των σωλήνων από τέσσερις (σχήμα 10.9) σε δώδεκα (σχήμα 10.12), γεγονός που προκάλεσε αισθητή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του θερμοκηπίου από 9,7°C σε 11°C περίπου. Κάτι τέτοιο μπορεί να είναι επιθυμητό για φυτά τα οποία

καλλιεργούνται στο έδαφος (όπως υποτέθηκε αρχικά), αλλά οι μεγάλες θερμοκρασίες στην περιοχή της οροφής αποτελούν αδικαιολόγητη σπατάλη ενέργειας ακόμη και αν τα φυτά αναπτύσσονται μέσα σε κρεμώμενες γλάστρες, καθώς αυτές δεν μπορεί να βρίσκονται σε ύψος μεγαλύτερο των 2 μέτρων.

Στην περίπτωση που η διάμετρος των συνολικά 24 τοποθετημένων σωλήνων αυξήθηκε στο διπλάσιο (σχήμα 10.22), η θερμοκρασία της οροφής πλησίασε τους 14°C, με αποτέλεσμα την ακόμα μεγαλύτερη σπατάλη θερμικής ενέργειας σε έναν χώρο όπου δεν χρειάζεται.

### 12.2.2. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ

Με βάση τη γεωμετρία των 24 σωλήνων (12 επάνω και 12 κάτω), δοκιμάστηκε η μείωση της αρχικής θερμοκρασίας των 60°C των κάτω σωλήνων, σε 38°C. Έτσι, η μέση θερμοκρασία του χώρου μειώθηκε στους 10°C (σχήμα 10.17), μειώνοντας και την αποδιδόμενη προς την οροφή θερμότητα. Η κατανομή της θερμοκρασίας σε μικρά ύψη (στο ύψος των φυτών δηλαδή) παρουσίασε ανομοιομορφία, με το σχηματισμό θερμότερων περιοχών γύρω από τους σωλήνες.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε θέρμανση μόνο από τους χαμηλά τοποθετημένους σωλήνες (σχήμα 10.19), μειώθηκε η ανώφελη απόδοση θερμότητας σε μεγάλα ύψη του χώρου, όμως η ανομοιόμορφη μετάδοση θερμότητας που παρουσιάστηκε στα χαμηλά επίπεδα, δεν επιτρέπει τον χαρακτηρισμό της διάταξης ως ικανοποιητική.

### 12.2.3. ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΩΛΗΝΩΣΕΩΝ – ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Η αλλαγή της θέσης των σωλήνων ή ο συνδυασμός τους με τη χρήση άλλων διατάξεων, αποδείχθηκε τελικά ο τρόπος με τη μεγαλύτερη επίδραση στην αλλαγή της θερμοκρασιακής κατανομής στο χώρο του θερμοκηπίου.

Μπορεί η τοποθέτηση των κάτω σωλήνων σε τέσσερις τριάδες (σχήμα 10.31) να μην απέφερε αξιοσημείωτες αλλαγές στην κατανομή της θερμοκρασίας, όμως δεν μπορεί κανείς να πει το ίδιο και για την περίπτωση τοποθέτησης των επάνω σωλήνων περιμετρικά (σχήμα

10.25). Με αυτή τη γεωμετρία, η αποδιδόμενη προς την οροφή θερμότητα είναι σημαντικά λιγότερη, η ομοιομορφία στην περιοχή του εδάφους (δηλαδή στις ρίζες των φυτών) διατηρείται, αλλά τώρα παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας των πλευρικών τοίχων, μια περιοχή η οποία επίσης δεν χρειάζεται να θερμαίνεται εντατικά.

Τα μειονεκτήματα των προηγούμενων διατάξεων έρχεται να ξεπεράσει σε μεγάλο βαθμό αυτή του σχήματος 10.28, με την προσθήκη αεροπέδης. Εδώ πλέον, μεγάλα κομμάτια από πλέξιγκλας συγκρατούν την αποδιδόμενη από τους σωλήνες θερμική ενέργεια σε ύψος κάτω των δύο μέτρων. Η ομοιομορφία στην κατανομή της θερμότητας στα μικρά ύψη μπορεί να μην βελτιώνεται κατά πολύ, όμως οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται εκεί είναι ικανοποιητικές και η εξοικονόμηση ενέργειας σημαντική.

### 12.3. ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Μετά από όλα αυτά, μπορεί κανείς να καταλάβει ότι η επιλογή διάταξης δεν είναι και τόσο εύκολη υπόθεση και φυσικά δεν μπορεί να προταθεί κάποια από όλες αυτές ως βέλτιστη, για όλα τα είδη φυτών.

Ο πίνακας 2.1 που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2, δείχνει ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασίας για την καλλιέργεια διαφόρων ειδών λαχανικών, ενώ κάτι ανάλογο συμβαίνει και από είδος σε είδος φυτών. Σε γενικές γραμμές, πρέπει να εφαρμόζεται ο κανόνας της θέρμανσης στις ρίζες των φυτών (root zone heating), καθώς με τον τρόπο αυτό η θερμότητα αποδίδεται εκεί ακριβώς που χρειάζεται, ενώ παράλληλα προλαμβάνονται τυχόν ασθένειες των φυτών και δεν δαπανάται θερμική ενέργεια σε μεγάλα ύψη. Η απόδοση θερμότητας στα υψηλά στρώματα του θερμοκηπίου είναι επιθυμητή μόνο στην περίπτωση που μέσα στο χώρο υπάρχουν κρεμώμενες γλάστρες, των οποίων όμως το ύψος τοποθέτησης δεν υπερβαίνει τα δύο μέτρα. Βέβαια, η θέρμανση σε μεγάλα ύψη μπορεί να χρησιμοποιείται για λιώσιμο του χιονιού κατά τη διάρκεια του χειμώνα, χωρίς όμως αυτό να γίνεται αυτοσκοπός και χωρίς να δικαιολογεί τις πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασίες σε σχέση με αυτές των χαμηλότερων περιοχών.

Έτσι λοιπόν, θα μπορούσε κανείς να καταλήξει στο συμπέρασμα πως η περιμετρική διάταξη του σχήματος 10.25 και η τοποθέτηση αεροπέδης στο σχήμα 10.28 αποτελούν αρκετά ικανοποιητικές γεωμετρίες, με την πρώτη διάταξη να δημιουργεί ικανοποιητικότερες

θερμοκρασίες στα χαμηλά ύψη, και τη δεύτερη να εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια από τη θέρμανση της οροφής.

#### 12.4. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Το βιβλιογραφικό μέρος της διπλωματικής αυτής εργασίας δεν εστίασε μόνο στο φαινόμενο της θέρμανσης των θερμοκηπίων αλλά επεκτάθηκε και σε άλλα θέματα όπως στις διαδικασίες αερισμού τους, στον έλεγχο των συνθηκών εντός του χώρου καθώς και σε μεθόδους για εξοικονόμηση ενέργειας. Παρόλα αυτά, το υπολογιστικό μέρος αφορούσε καθαρά στην προσομοίωση της διαδικασίας θέρμανσης θερμοκηπίου από σωλήνες ζεστού νερού και στην μελέτη της θερμοκρασιακής κατανομής εντός του χώρου.

Όμως, το πρόγραμμα CFX του οποίου έγινε χρήση, προσφέρει τη δυνατότητα προσομοίωσης πολλών ακόμη και διαφορετικών καταστάσεων που αφορούν στη διαδικασία θέρμανσης των θερμοκηπίων. Έτσι λοιπόν, σε περίπτωση που κάποιος αποφάσιζε να ασχοληθεί και πάλι με το ίδιο θέμα με σκοπό να επεκταθεί περισσότερο, προτείνεται η ενασχόλησή του με τα εξής:

1. Μία αρκετά ενδιαφέρουσα κατάσταση για προσομοίωση είναι η θέρμανση του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με την εφαρμογή αερισμού, με φυσικές ή/και τεχνητές μεθόδους. Η προσθήκη αερισμού στην όλη διαδικασία θα επιφέρει σίγουρα αλλαγή στις τιμές της θερμοκρασίας, καθώς και στην κατανομή της εντός του χώρου.
2. Η παραμετρική ανάλυση μπορεί να επεκταθεί στην εξέταση του φαινομένου υπό διαφορετικές θερμοκρασίες εξωτερικού περιβάλλοντος. Ενώ λοιπόν έχει χρησιμοποιηθεί μόνο η θερμοκρασία των 7°C ως εξωτερική, μπορεί να εξεταστεί η απόκριση του χώρου σε θερμοκρασίες 0, 5 και 10°C περιβάλλοντος, δεδομένου ότι η θέρμανση είναι επιθυμητή και χρήσιμη μόνο κατά τη διάρκεια του χειμώνα.
3. Εναλλακτικές διατάξεις σωλήνων μπορούν να δοκιμαστούν, για να δει κανείς πως θα επηρεαστεί το αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, μία διάταξη η οποία θα μπορούσε να αποδειχθεί χρήσιμη στη συγκράτηση της θερμότητας σε χαμηλά επίπεδα είναι η τοποθέτηση ανακλαστήρων πάνω από τους σωλήνες. Η διάταξη αυτή αναγκάζει την



ανερχόμενη προς τα επάνω θερμότητα να ανακλαστεί και να κατευθυνθεί και πάλι προς τα κάτω, αποφεύγοντας έτσι την άσκοπη θέρμανση της οροφής.

4. Το ύψος των τεσσάρων μέτρων χρησιμοποιήθηκε ενδεικτικά για το θερμοκήπιο αυτό. Παρόλα αυτά, θα μπορούσε να προσομοιωθεί ένας χώρος μικρότερου ύψους, διατηρώντας τις υπόλοιπες διαστάσεις σταθερές.
5. Η ανακλαστική επίστρωση των πλευρικών επιφανειών του θερμοκηπίου είναι ένα ακόμη θέμα που θα μπορούσε να μελετηθεί.
6. Χρήσιμη θα ήταν και η περαιτέρω εμβάθυνση στην ανάλυση των αποτελεσμάτων ως προς τις ταχύτητες του αέρα (σε κάθετο, οριζόντιο επίπεδο ή συνολικά) που δημιουργεί το φαινόμενο της θέρμανσης μέσα στο χώρο.
7. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένα θερμοκήπιο είναι δυνατόν να θερμανθεί με πολλούς τρόπους. Εδώ εξετάστηκε η θέρμανση με σωλήνες ζεστού νερού. Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να περιλαμβάνει τη διαδικασία θέρμανσης με αέρα.
8. Οι σωλήνες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη ήταν απλοί, ενώ υπάρχει και η εναλλακτική περίπτωση σωλήνων με πτερύγια.
9. Τέλος, μετά το αριθμητικό πρόβλημα που προέκυψε από τη χρήση μοντέλου ακτινοβολίας (καθώς αυτό διακρίτοποιεί το χώρο με δικό του αραιότερο τρόπο), ενδιαφέρουσα και χρήσιμη θα ήταν η έρευνα σχετικά με το θέμα αυτό.

Σκοπός της εργασίας αυτής δεν ήταν να ασχοληθεί με όλα τα θέματα που μόλις αναφέρθηκαν, δεδομένου ότι η πίεση χρόνου θα αποτελούσε σημαντικό εμπόδιο στη διεξοδική μελέτη τους, και για το λόγο αυτό εστίασε σε ένα συγκεκριμένο ζήτημα, αφήνοντας το ενδεχόμενο της μελέτης άλλων σχετικών ζητημάτων σε κάποιον άλλο μελετητή.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική

1. Αγιουτάντης, Ζ.Γ. και Μερτίκας, Σ.Π., (2003). *Ένας πρακτικός οδηγός για τη συγγραφή τεχνικών κειμένων*, Εκδοτικός Όμιλος Ίων, Αθήνα.
2. Μπούρης, Δ., (2005). Κανονισμός θερμομόνωσης - Θερμικές απώλειες - Δίκτυα σωληνώσεων θέρμανσης θερμού νερού, Συμπληρωματικές σημειώσεις για το μάθημα 'Θέρμανση-Ψύξη-Κλιματισμός' του 8<sup>ου</sup> εξαμήνου, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων.
3. Μπούρης, Δ. και Μπεργελές, Γ., (1997). Αριθμητική διερεύνηση ρευστομηχανικών προβλημάτων, Αλγόριθμος C.A.F.F.C.A.
4. Γούλας, Α.Κ., (1986). *Μηχανική ρευστών*, Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη.

### Διεθνής

1. ANSYS Inc., (2004). CFX manual, Version 5.7.1.
2. Bellows, B., (2003). Solar Greenhouses, Horticulture Resource List. ATTRA - National Sustainable Agriculture Information Service.
3. Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Gratraud, J., B. von Eslner, (1997). Mechanical Properties of Covering Materials for Greenhouses: Part 1, General Overview. *J. agric. Engng Res.* (1997) **67**, 81-96.
4. Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Gratraud, J., B. von Eslner, (1997). Mechanical Properties of Covering Materials for Greenhouses: Part 2, Quality Assessment. *J. agric. Engng Res.* (1997) **67**, 171-217.

5. Buffington, D.E., Bucklin R.A., Henley, R.W. and McConnell, D.B.. Heating Greenhouses, University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences Extension, <http://edis.ifas.ufl.edu/index.html>
6. Buschermohle, M.J. Greenhouse Heating and Ventilation Systems.
7. Buschermohle, M.J. and Grandle G.F. Controlling the Environment in Greenhouses Used for Tomato Production. Agricultural Extension Service, The University of Tennessee, W017.
8. Connellan, G., (2001). Controlling the Greenhouse Climate to Produce Healthy Crops. Burnley College, University of Melbourne, <http://www.sardi.sa.gov.au/index.html>
9. Denis, P., Dumont, M., Fourcy, A. and Damagnez, J., (1978). *Les Cultures Sous Abri a L'Heure Economies d'Energie*, Report CFA-R-4956, Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble, 1978.
10. Diver S. (2002). Root Zone Heating for Greenhouse Crops. ATTRA – National Sustainable Agriculture Information Service.
11. EnviroCept Greenhouses, etc. (2000). Benton City, <http://www.greenhouses-etc.net/index.html>
12. Garden Moose, (2004). Information For The Greenhouse Gardener, <http://www.gardenmoose.com/article>
13. International Greenhouse Company, (2003). What type of cooling system do I need for my greenhouse?
14. Kamenev, P.N., (1975). *Otoplenie I Ventilacija*, Strojizdat, Moskva, 1975.

15. Kessler, J.R. Starting a Greenhouse Business. Alabama Cooperative Extension System, ANR-691, Alabama A&M and Auburn Universities.
16. Latimer, J.G. (2001). Dealing with the High Cost of Energy for Greenhouse Operations. Virginia Cooperative Extension, Virginia State University, publication number 430-101, October, 2001.
17. Popovski, K., (2005). Greenhouse Climate Factors. Bitola University, Bulletin Vol. 18, No.1.
18. Prenger, J.J. and Ling, P.P. Greenhouse Condensation Control: Bottom Heating and Between-row Heating, Ohio State University, AEX-801-00.
19. Rafferty, K.D. Chapter 14, Greenhouses, OIT Geo-Heat Center, Klamath Falls, OR 97601.
20. Roberts, W.J., (1997). Environmental control of greenhouses. Center for Controlled Environmental Agriculture, Cook College, Rutgers University.
21. Ross, D.V. Planning and Building a Greenhouse. University of Maryland Cooperative Extension Service, adapted from Fact Sheet 645.
22. Runkel, E., (2001). Michigan State University Greenhouse Alert, Issue 1.
23. Teitel, M., Segal, L., Shklyar, A., Barak, M., (1999). A Comparison Between Pipe and Air Heating Methods for Greenhouses. *J. Agric. Engng Res.* (1999) **72**, 259-273.
24. Toraman Biothermal Systems Inc. (2004). <http://www.toraman.ca/Heating.htm>
25. U.S. Global Resources, (2004). <http://www.usgr.com>