

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

Ανάπτυξη Συστήματος Μείωσης της Σχετικής Υγρασίας **στο**  
**Θερμοκήπιο** με τη Χρήση Αντλίας Θερμότητας και  
Υγροσκοπικών Υλικών

Διδακτορική Διατριβή

Ιωάννη Ηλ. Λυκοσκούφη

ΑΘΗΝΑ 2011

## Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Επιβλέπων Καθηγητής  
Μαυρογιαννόπουλος Γεώργιος  
Καθηγητής  
Θερμοκηπίων και Υδροπονικών Καλλιεργειών  
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Κίττας Κωνσταντίνος  
Καθηγητής  
Γεωργικών Κατασκευών  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Λαμπρινός Γρηγόριος  
Καθηγητής  
Εφαρμογών της ψύξης στη Γεωργία  
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Κυρίτσης Σπυρίδων  
Ομότιμος Καθηγητής  
Γεωργικών Κατασκευών  
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Παπαδάκης Γεώργιος  
Καθηγητής  
Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας : Μηχανολογικός Εξοπλισμός και Γεωργικές Εφαρμογές  
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Παπλωματάς Επαμεινώνδας  
Καθηγητής  
Φυτοπαθολογίας  
Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Κατσούλας Νικόλαος  
Επίκουρος Καθηγητής  
Γεωργικών Κατασκευών με έμφαση στο Περιβάλλον Θερμοκηπίου  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Λυκοσκούφης Ηλ. Ιωάννης

«Ανάπτυξη Συστήματος Μείωσης της Σχετικής Υγρασίας  
στο Θερμοκήπιο με τη Χρήση Αντλίας Θερμότητας και  
Υγροσκοπικών Υλικών»

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διδακτορικής διατριβής, θα επιθυμούσα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στα πρόσωπα εκείνα, που με βοήθησαν και μου συμπαραστάθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της διδακτορικής μου έρευνας, τόσο κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων όσο και κατά τη συγγραφής της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον άνθρωπο εκείνον, που από τα φοιτητικά μου χρόνια, μου προκάλεσε το ενδιαφέρον να ασχοληθώ με τον τομέα των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων και καλλιεργειών, τον Καθηγητή μου κ. Γεώργιο Μαυρογιαννόπουλο. Ως επιβλέπωντας της παρούσας διατριβής, με τη συνεχή του παρότρυνση και ενθάρρυνση, το ιδιαίτερο ενδιαφέρον του για την πρόοδο του ερευνητικού θέματος με το οποίο ασχολήθηκα συνέβαλε καθοριστικά στην επιτυχή ολοκλήρωση των διδακτορικών μου σπουδών. Τον ευχαριστώ για την αγάπη και την εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής. Τον Καθηγητή κ. Γρηγόρη Λαμπρινό για τη έμπρακτη βοήθεια του τόσο κατά εκτέλεση των πειραμάτων της παρούσας διατριβής όσο και για τη συμβολή του στην επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Κίττα για την συμβολή του στην διαμόρφωση και τη διόρθωση της παρούσας διατριβής.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Φυτοπαθολογίας κ. Επ. Παπλωματά για τη βοήθεια στα πειράματα που αφορούσαν τις τεχνητές μολύνσεις των φυτών.

Σημαντική στάθηκε για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής, η οικονομική στήριξη που πρόσφερε η Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (Γ.Γ.Ε.Τ.) μέσω του υποέργου ΠΕΝΕΔ 2003. Το έργο χρηματοδοτήθηκε κατά:

- 75% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

- 25% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης - Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας
- και από τον Ιδιωτικό Τομέα (ΓΕΩ.ΛΙ.Χ. Ε.Π.Ε.)

στα πλαίσια του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα -Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αγάπη, τους κόπους, τις θυσίες τους και για όσα απλόχερα μου πρόσφερα για την ολοκλήρωση των διδακτορικών μου σπουδών.

Ιωάννης Ηλ. Λυκοσκούφης  
Αθήνα, Δεκέμβριος 2011

Στους γονείς μου

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract.....	3
Σύστημα Συμβόλων.....	5
<b>1. Εισαγωγή.....</b>	<b>9</b>
1.1 Γενική εισαγωγή.....	10
1.1.1 Θερμοκηπιακές Εγκαταστάσεις.....	11
1.1.2 Ποιότητα κατασκευών.....	14
1.2 Προβλήματα των θερμοκηπίων στην Ελλάδα.....	16
1.3 Ορισμοί υγρασίας.....	17
1.4 Η Υγρασία στο θερμοκήπιο.....	18
1.5 Δομή Διατριβής.....	22
<b>2. Ανασκόπηση βιβλιογραφίας.....</b>	<b>23</b>
2.1 Επίδραση της σχετικής υγρασίας.....	23
2.1.1 Επιδράσεις στη φωτοσυνθετική ικανότητα.....	23
2.1.2 Φυσιολογικές ανωμαλίες.....	23
2.1.3 Επίδραση στις Ασθένειες.....	25
2.1.4 Επιδράσεις στην ανάπτυξη.....	30
2.1.5 Επιδράσεις στη παραγωγή.....	31
2.2 Μέθοδοι μείωσης της υγρασίας στο θερμοκήπιο.....	33
2.2.1 Αφύγρανση με εξαερισμό.....	33
2.2.2 Αφύγρανση με ψύξη.....	36
2.2.3 Αφύγρανση με Υγροσκοπική Απορρόφηση/Προσρόφηση.....	38
2.2.3.1 Εξοπλισμοί αλληλεπίδρασης υγροσκοπικών διαλυμάτων-αέρα.....	40
2.2.4 Αφύγρανση με Υβριδικά συστήματα.....	42
2.3 Στόχοι Διατριβής.....	45
<b>3. Υλικά και Μέθοδοι.....</b>	<b>46</b>
3.1 Το θερμοκήπιο.....	47
3.2 Μετρήσεις περιβαλλοντικών παραμέτρων θερμοκηπίου.....	48

3.3 Μετρήσεις ισοζυγίου υδρατμών θερμοκηπίου.....	49
3.4 Αντλία θερμότητας.....	50
3.5 Υγροσκοπικό Σύστημα.....	52
3.6 Υβριδικό σύστημα αφύγρανσης.....	54
3.7 Καλλιέργεια.....	55
3.8 Τεχνητές μολύνσεις.....	56
<b>4. Θεωρητική Ανάλυση.....</b>	<b>59</b>
<b>4.1 Ισοζύγιο υδρατμών θερμοκηπίου.....</b>	<b>60</b>
<b>4.2 Υγροσκοπική Απορρόφηση.....</b>	<b>65</b>
<b>4.3 Αντλία θερμότητας.....</b>	<b>71</b>
<b>4.4 Υβριδικό Σύστημα.....</b>	<b>75</b>
<b>5. Αποτελέσματα – Συζήτηση.....</b>	<b>79</b>
<b>5.1 Προσδιορισμός εξατμισοδιαπνοής και απαιτήσεων αφύγρανσης στο θερμοκήπιο μέσω ενός μοντέλου ισορροπίας υδρατμών.....</b>	<b>80</b>
5.1.1 Συμπύκνωση υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος..	81
5.1.2 Ρυθμός διαφυγών αέρα.....	83
5.1.3 Εξατμισοδιαπνοή θερμοκηπίου.....	85
5.1.5 Συμπεράσματα.....	90
<b>5.2 Αφύγρανση του θερμοκηπίου με σύστημα υγροσκοπικής απορρόφησης...91</b>	
5.2.1 Ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το υγροσκοπικό τοίχωμα.....	92
5.2.2 Επαλήθευση θεωρητικού μοντέλου .....	95
5.2.3 Επίδραση της αφύγρανσης με το σύστημα της υγροσκοπικής απορρόφησης στο κλίμα του θερμοκηπίου.....	97
5.2.4 Συμπεράσματα.....	99
<b>5.3 Αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου με χρήση αντλίας θερμότητας αέρα- αέρα.....</b>	<b>100</b>
5.3.1 Ωφέλιμος Συντελεστής συμπεριφοράς.....	101
5.3.2 Συντελεστής ψυκτικής και θερμικής συμπεριφοράς.....	102
5.3.3 Ικανότητα απομάκρυνσης υδρατμών από την αντλία θερμότητας.....	105



5.3.4 Κατανάλωση ενέργειας από την αντλία θερμότητας.....	110
5.3.5 Επίδραση της αφύγρανσης με την αντλία θερμότητας στο κλίμα του θερμοκηπίου.....	113
5.3.6 Συμπεράσματα.....	115
<b>5.4 Αφύγρανση θερμοκηπίου με υβριδικό σύστημα αφύγρανσης.....</b>	<b>117</b>
5.4.1 Επίδραση της λειτουργίας του υβριδικού συστήματος στο κλίμα του θερμοκηπίου.....	118
5.4.2 Επίδραση της αφύγρανσης με το υβριδικό σύστημα στις απώλειες υδρατμών του θερμοκηπίου.....	120
5.4.3 Ικανότητα απομάκρυνσης υδρατμών από το υβριδικό σύστημα.....	122
5.4.4 Ωφέλιμος συντελεστής συμπεριφοράς υβριδικού συστήματος.....	124
5.4.5 Συμπεράσματα.....	126
<b>5.5 Επίδραση υγρασίας στην ανάπτυξη, την παραγωγή και στην ευπάθεια προσβολής από βοτρυτή.....</b>	<b>127</b>
5.5.1 Επιδράσεις της υγρασίας στην ανάπτυξη.....	128
5.5.2 Επιδράσεις της υγρασίας στην παραγωγή.....	132
5.5.3 Επιδράσεις της υγρασίας στην ευαισθησία προσβολής από βοτρυτή.....	134
5.5.4 Συμπεράσματα.....	139
<b>6. Συνολικός Σχολιασμός-Συμπεράσματα.....</b>	<b>140</b>
6.1 Έλεγχος της υγρασίας.....	141
6.2 Μέθοδοι αφύγρανσης.....	142
6.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση.....	145
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>148</b>
<b>Κατάλογος Διαγραμμάτων.....</b>	<b>154</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων.....</b>	<b>157</b>
<b>Κατάλογος Σχημάτων.....</b>	<b>158</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων.....</b>	<b>159</b>
<b>Κατάλογος Δημοσίευσεων.....</b>	<b>160</b>

## Περίληψη

Η αφύγρανση του θερμοκηπίου αποτελεί ένα ουσιαστικό μέρος του ελέγχου του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Η υψηλή σχετική υγρασία στο θερμοκήπιο είναι μια αιτία ανάπτυξης των ασθενειών των φυτών, η οποία προκαλεί σημαντική ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση της παραγωγής των θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Ο κίνδυνος της προσβολής των φυτών από μυκητολογικές ασθένειες αυξάνεται όταν υπάρχει διαθέσιμη υγρασία στις επιφάνειες των φυτών. Η σχετική υγρασία μέσα στο θερμοκήπιο εμφανίζει έντονη παραλλακτικότητα εξαιτίας της ανομοιόμορφης κατανομής της θερμοκρασίας, με αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης επιφανειακής συμπύκνωσης πάνω στα φυτά. Για το λόγο αυτό ο έλεγχος της υγρασίας είναι απαραίτητος. Ο έλεγχος της υγρασίας, όταν πραγματοποιείται με εξαερισμό και ταυτόχρονη θέρμανση, αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας του θερμοκηπίου. Στα θερμοκήπια που δεν έχουν εγκατεστημένο κάποιο σύστημα θέρμανσης δεν είναι δυνατός ο έλεγχος της υψηλής υγρασίας με εξαερισμό και θέρμανση. Με στόχο τη μείωση την εξοικονόμηση ενέργειας στα θερμαινόμενα θερμοκήπια αλλά και τη δυνατότητα ελέγχου της υγρασίας στα θερμοκήπια χωρίς συστήματα θέρμανσης, στη παρούσα διατριβή, μελετώνται συστήματα μείωσης της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο.

Πριν τη μελέτη των συστημάτων υπολογίστηκε η εξατμισοδιαπνοή θερμοκηπιακής καλλιέργειας, μέσω ενός μοντέλου ισορροπίας υδρατμών βασισμένο στις απώλειες υδρατμών του θερμοκηπίου, μέσω διαφυγών στο εξωτερικό περιβάλλον, συμπύκνωσης στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος και απωλειών από το σύστημα αφύγρανσης. Έτσι, οι απαιτήσεις αφύγρανσης του θερμοκηπίου προσδιορίστηκαν μέσω του παραπάνω ισοζυγίου υδρατμών για διατήρηση της σχετικής υγρασίας μέχρις ανώτατου ορίου.

Κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν τρία συστήματα για την αφύγρανση του θερμοκηπίου: σύστημα υγροσκοπικής απορρόφησης, σύστημα αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα και υβριδικό σύστημα με συνδυασμό αντλίας θερμότητας και υγροσκοπικής απορρόφησης.

Από τη δοκιμή του συστήματος της υγροσκοπικής απορρόφησης, βρέθηκε ότι η ικανότητα του στην απομάκρυνση υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου

καθορίζεται από τη θερμοκρασία και την ειδική υγρασία του αέρα, από το ρυθμό ροής του αέρα μέσα από το σύστημα, από την συγκέντρωση και τη θερμοκρασία του υγροσκοπικού διαλύματος. Αν μπορεί να εξασφαλιστεί χαμηλού κόστους αναγέννηση του υγροσκοπικού διαλύματος τότε το κόστος λειτουργίας είναι μικρότερο συγκριτικά με το κόστος λειτουργίας του συστήματος της αντλίας θερμότητας.

Η αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης υδρατμών από τη αντλία θερμότητας αυξάνεται με τη αύξηση της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου για σταθερό επίπεδο σχετικής υγρασίας. Ο έλεγχος της σχετικής υγρασίας με τη χρήση αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα αυξάνει την θερμοκρασία ενός μη θερμαινόμενου θερμοκηπίου μέχρι και κατά 2 °C.

Η λειτουργία των υβριδικών συστημάτων αυξάνει την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης υδρατμών από τον αέρα, όμως η τεχνολογική τους ανάπτυξη καθορίζεται από την πορεία ανάπτυξης των υγροσκοπικών συστημάτων μιας και τα συστήματα συμπίεσης ατμού έχουν ήδη τυποποιηθεί και παρουσιάζουν παγκόσμια εμπορική εξάπλωση. Για την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος αφύγρανσης του θερμοκηπίου με χρήση υγροσκοπικών υλικών απαιτείται ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση ενός ηλιακού συλλέκτη, ο οποίος θα παράγει την απαιτούμενη ενέργεια για την αναγέννηση του υγροσκοπικού υλικού.

Από την αξιολόγηση της επίδρασης του ελέγχου της σχετικής υγρασίας στην ανάπτυξη, την παραγωγή και ευαισθησία προσβολής από το βοτρώτη βγήκε το συμπέρασμα ότι, ο έλεγχος της υγρασίας στο θερμοκήπιο αυξάνει σημαντικά την παραγωγικότητα των καλλιεργειών και περιορίζει την ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών όπως ο βοτρώτης.

Συμπερασματικά, λαμβάνοντας υπόψη την παρούσα κατάσταση της τεχνολογικής προόδου, στη παρούσα χρονική στιγμή, η αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου με τη χρήση αντλίας θερμότητας μπορεί να θεωρηθεί ως η πιο ενδεδειγμένη λύση για την αφύγρανση τόσο των μη θερμαινόμενων θερμοκηπίων όσο και για την αφύγρανση των θερμαινόμενων θερμοκηπίων. Η αύξηση του εισοδήματος, λόγω της βελτίωσης της απόδοσης των καλλιεργούμενων φυτών, με τον έλεγχο της υγρασίας, διευκολύνει την απόσβεση εγκατάστασης μιας αφυγραντικής αντλίας θερμότητας.

## **Abstract**

Greenhouse dehumidification is an essential part of the environmental control of the greenhouse. High relative humidity in the greenhouse causes the development of plant diseases, which cause significant qualitative and quantitative degradation on the production of greenhouse crops. The risk of plant infection against fungal diseases increases when there is available moisture on the surfaces of the plants. The relative humidity inside the greenhouse displays intense variability due to the uneven distribution of temperature, with increased likelihood of condensation on the plants. For this reason, humidity control is necessary. Humidity control, when it occurs with ventilation and simultaneously heating, increases the energy consumption. In greenhouses without heating system is not possible to control high humidity with ventilation and heating. To increase energy saving in heated greenhouses and to control the humidity in greenhouses without heating, systems for reducing the relative humidity in the greenhouse are studied in this thesis.

Initially, evapotranspiration of the greenhouse cultivation was calculated through a vapor balance model, based on losses of vapor of greenhouse through leaks in the external environment, condensation on the cover and removal by the dehumidification system. Thus, the requirements for greenhouse dehumidifying were determined using the above vapor balance to maintain the relative humidity up to the upper desirable setpoint.

Three systems were manufactured and tested for the greenhouse dehumidification: a system of hygroscopic absorption, an air to air heat pump system and a hybrid system by the combination of heat pump and hygroscopic absorption.

From the study of hygroscopic absorption system, was found, that the capacity to remove water vapor from greenhouse air is determined by the air temperature, air specific humidity and air flow rate through the system, as well as by the concentration and the temperature of the hygroscopic solution. If low cost regeneration of the hygroscopic solution is achievable then the operating cost is less than the cost of operating the heat pump system.

The effectiveness of the removal of water vapor by the heat pump increases with the increasing temperature of the greenhouse at constant relative humidity. Humidity control by an air to air heat pump increases the temperature of a non-heated greenhouse up to 2 °C.

The operation of the hybrid systems increases the efficiency of removal of water vapor from the air, but the technological development is determined by the development course of hygroscopic systems since vapor compression systems have already been standardized and are of global trade expansion. To develop an integrated dehumidification system of the greenhouse using hygroscopic materials, designing and validation of a solar collector is needed. The collector will produce the energy required for regeneration of the hygroscopic material.

The assessment of the effect of relative humidity control in the development, production and susceptibility to infection by Botrytis, was concluded, that the control of humidity in the greenhouse significantly increases the productivity of crops and decreases the development of fungal diseases such as botrytis.

In conclusion, considering the present state of technological progress, at present time, the dehumidification of the greenhouse air using heat pump can be regarded as the most appropriate method to dehumidify both non-heated greenhouses as well as heated greenhouses. The increase in income due to improved crops yield, with humidity control, facilitates the return of a dehumidifying heat pump installation.

## Σύστημα Συμβόλων

$E_{ev}$	Ρυθμός εξατμισοδιαπνοής	$g\ m^{-2}\ s^{-1}$
$E_{con}$	Ρυθμός συμπύκνωσης υδρατμών στο κάλυμμα	$g\ m^{-2}\ s^{-1}$
$E_{inf}$	Ρυθμός διαφυγών υδρατμών στο εξωτερικό περιβάλλον	$g\ m^{-2}\ s^{-1}$
$E_{tr}$	Ρυθμός διαπνοής της καλλιέργειας	$g\ m^{-2}\ s^{-1}$
$E_s$	Ρυθμός εξάτμισης από το έδαφος του θερμοκηπίου	$g\ m^{-2}\ s^{-1}$
$E_{deh}$	Ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το σύστημα αφύγρανσης	$g\ m^{-2}\ s^{-1}$
$dE$	Ποσότητα υδρατμών που αποθηκεύονται στο αέρα του θερμοκηπίου	$g\ m^{-2}\ s^{-1}$
$w_o$	Ταχύτητα ανέμου έξω από το θερμοκήπιο	$m\ s^{-1}$
$g_{con}$	αγωγιμότητα υδρατμών από τον αέρα στο κάλυμμα	$m\ s^{-1}$
$g_{inf}$	αγωγιμότητα υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου στο εξωτερικό περιβάλλον	$m\ s^{-1}$
$h_{con}$	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$
$q$	ρυθμός ανανέωσης αέρα θερμοκηπίου	$m^3\ s^{-1}$
$h_c$	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στον αφυγραντήρα	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$
$h_m$	Συντελεστής μεταφοράς μάζας στον αφυγραντήρα	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
$T_a$	Θερμοκρασία αέρα θερμοκηπίου	$^{\circ}C$
$T_o$	Θερμοκρασία εξωτερικού αέρα	$^{\circ}C$
$T_{cl}$	Θερμοκρασία καλύμματος	$^{\circ}C$
$T_d$	Θερμοκρασία σημείου δρόσου	$^{\circ}C$
$T_{in}^{hp}$	Θερμοκρασία αέρα στην είσοδο της αντλίας θερμότητας	$^{\circ}C$
$T_{out}^{hp}$	Θερμοκρασία αέρα στην έξοδο της αντλίας θερμότητας	$^{\circ}C$
$T_{out}^{ev}$	Θερμοκρασία αέρα μετά τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας	$^{\circ}C$
$T_{sol,in}$	Θερμοκρασία υγροσκοπικού διαλύματος στην είσοδο του αφυγραντήρα	$^{\circ}C$
$T_{sol,out}$	Θερμοκρασία υγροσκοπικού διαλύματος στην έξοδο του αφυγραντήρα	$^{\circ}C$
RH	Σχετική Υγρασία Αέρα Θερμοκηπίου	%
$x_a$	απόλυτη υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου	$g\ m^{-3}$

$X_{cl}$	απόλυτη υγρασία στη θερμοκρασία του καλύμματος	$g\ m^{-3}$
$X_o$	απόλυτη υγρασία του εξωτερικού αέρα	$g\ m^{-3}$
$X_{ev,in}$	απόλυτη υγρασία του αέρα πριν τον εξατμιστή	$g\ m^{-3}$
$X_{ev,out}$	απόλυτη υγρασία του αέρα μετά τον εξατμιστή	$g\ m^{-3}$
$X_{hp,in}$	απόλυτη υγρασία του αέρα στην είσοδο της αντλίας θερμότητας	$g\ m^{-3}$
$X_{hp,out}$	απόλυτη υγρασία του αέρα στην έξοδο της αντλίας θερμότητας	$g\ m^{-3}$
$X_a$	Ειδική υγρασία αέρα θερμοκηπίου	$g\ kg^{-1}$
$X_{a,in}$	Ειδική υγρασία αέρα θερμοκηπίου στην είσοδο του αφυγραντήρα	$g\ kg^{-1}$
$X_{a,out}$	Ειδική υγρασία αέρα θερμοκηπίου στην έξοδο του αφυγραντήρα	$g\ kg^{-1}$
$X_{sol}$	Ειδική υγρασία στην πίεση υδρατμών του υγροσκοπικού διαλύματος	$g\ kg^{-1}$
$X_{int}$	Ειδική υγρασία στην επιφάνεια αλληλεπίδρασης αέρα – υγροσκοπικού διαλύματος	$g\ kg^{-1}$
$X_{ev,out}$	Ειδική υγρασία αέρα μετά τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας	$g\ kg^{-1}$
$X^*$	μέση τιμή της ειδικής υγρασίας στην είσοδο του αφυγραντήρα και της ειδικής υγρασίας στην επιφάνεια αλληλεπίδρασης	$g\ kg^{-1}$
$A_g$	επιφάνεια εδάφους θερμοκηπίου	$m^2$
$A_{cl}$	Επιφάνεια καλύμματος θερμοκηπίου	$m^2$
$A_{sp}$	Ειδική επιφάνεια αφυγραντήρα	$m^2\ m^{-3}$
$A_d$	Διατομή αφυγραντήρα	$m^2$
$A_p$	Διαβρεχόμενη επιφάνεια -Επιφάνεια αλληλεπίδρασης αέρα – υγροσκοπικού διαλύματος	$m^2$
$Z$	Πάχος αφυγραντήρα	$m$
$d_e$	Υδραυλική διάμετρος	$m$
$\rho_a$	πυκνότητα αέρα	$kg\ m^{-3}$
$\rho_{sol}$	Πυκνότητα υγροσκοπικού διαλύματος	$kg\ l^{-1}$
$\xi$	Συγκέντρωση διαλύματος	%
$\xi_{in}$	Συγκέντρωση διαλύματος στην είσοδο του αφυγραντήρα	%
$\xi_{out}$	Συγκέντρωση διαλύματος στην έξοδο του αφυγραντήρα	%

$C_{p,a}$	ειδική θερμότητα αέρα	$J kg^{-1} K^{-1}$
$C_{p,v}$	Ειδική θερμότητα υδρατμών	$kJ kg^{-1} K^{-1}$
$\lambda$	λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης νερού	$J kg^{-1}$
$R_n$	καθαρή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο	$W m^{-2}$
$R_s$	Εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία	$W m^{-2}$
LAI	δείκτης φυλλικής επιφάνειας	$m^2 m^{-2}$
$r_b$	αντίσταση επιφάνειας φύλλου	$s m^{-1}$
$r_s$	αντίσταση στοματίων φύλλων	$s m^{-1}$
$V_a$	Παροχή αέρα	$m^3 s^{-1}$
$m_a$	Παροχή μάζας αέρα	$kg^{-1} s^{-1}$
$m_{sol,in}$	Παροχή μάζας υδρατμών στην είσοδο του αφυγραντήρα	$kg^{-1} s^{-1}$
$m_{sol,out}$	Παροχή μάζας υδρατμών στην έξοδο του αφυγραντήρα	$kg^{-1} s^{-1}$
$dm$	Ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από σύστημα υγροσκοπικής απορρόφησης	$g s^{-1}$
$h$	Ενθαλπία	$kJ kg^{-1}$
$h_{a,in}$	Ενθαλπία αέρα στην είσοδο του αφυγραντήρα	$kJ kg^{-1}$
$h_{a,out}$	Ενθαλπία αέρα στην έξοδο του αφυγραντήρα	$kJ kg^{-1}$
$h_{sol,in}$	Ενθαλπία υγροσκοπικού διαλύματος στην είσοδο του αφυγραντήρα	$kJ kg^{-1}$
$h_{sol,out}$	Ενθαλπία υγροσκοπικού διαλύματος στην είσοδο του αφυγραντήρα	$kJ kg^{-1}$
$h_{int}$	Ενθαλπία αέρα στην επιφάνεια αλληλεπίδρασης	$kJ kg^{-1}$
$h_{ev,in}^a$	Ενθαλπία αέρα πριν τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας	$kJ kg^{-1}$
$h_{ev,out}^a$	Ενθαλπία αέρα μετά τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας	$kJ kg^{-1}$
Le	αριθμός Lewis	αδιάστατος
$\alpha$	θερμική διαχυτικότητα	$m^2 s^{-1}$
$D_a$	συντελεστής διάχυσης	$m^2 s^{-1}$
Sh	Αριθμός Sherwood	αδιάστατος
Sc	Αριθμός Schmidt	αδιάστατος
Re	Αριθμός Reynolds	αδιάστατος
$\nu_\alpha$	Κινηματικό ιξώδες	$m^2 s^{-1}$



$\eta_m$	Αποτελεσματικότητα μάζας	%
$\eta_h$	Αποτελεσματικότητα ενθαλπίας	%
$Q_\psi$	Ρυθμός απορρόφησης θερμικής ενέργειας στον εξατμιστή	kW
$Q_\theta$	Ρυθμός απελευθέρωσης θερμικής ενέργειας στον συμπυκνωτή	kW
$Q_{ev}$	Ρυθμός μείωσης λανθάνουσας θερμότητας στον εξατμιστή	kW
$\Delta E$	Απορροφούμενη μηχανική ισχύς από τον συμπιεστή της αντλίας θερμότητας	kW
$P_o$	Ονομαστική ισχύς συμπιεστή	kW
$q_\theta$	Ειδική θερμική παραγωγή στον συμπυκνωτή της αντλίας θερμότητας	$\text{kJ kg}^{-1}$
$q_\psi$	Ειδική ψυκτική παραγωγή στον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας	$\text{kJ kg}^{-1}$
$\Delta h^a_{evap}$	Απώλεια ενθαλπίας αέρα στον εξατμιστή	$\text{kJ kg}^{-1}$
$\Delta h^a_{cond}$	Αύξηση ενθαλπίας αέρα στον συμπυκνωτή	$\text{kJ kg}^{-1}$
SEC	Ειδική κατανάλωση ενέργειας	$\text{kWh kg}^{-1}$
$COP_{use}$	Ωφέλιμος συντελεστής απόδοσης	αδιάστατος
$COP_\theta$	Συντελεστής θερμικής συμπεριφοράς αντλίας θερμότητας	αδιάστατος
$COP_\psi$	Συντελεστής ψυκτικής συμπεριφοράς αντλίας θερμότητας	αδιάστατος
$m_R$	Παροχή μάζας ψυκτικού ρευστού	$\text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$
w	Ειδικό απορροφούμενο έργο από τον συμπιεστή	$\text{kJ kg}^{-1}$
$p_c$	Πίεση συμπύκνωσης ψυκτικού ρευστού	bar
$p_e$	Πίεση εξάτμισης ψυκτικού ρευστού	bar
$\eta_i$	Ενδεικνυόμενος βαθμός απόδοσης	αδιάστατος
$\eta_{tot}$	Ολικός βαθμός απόδοσης	αδιάστατος
$m_{hp}$	Ρυθμός συμπύκνωσης υδρατμών από την αντλία θερμότητας	$\text{kg h}^{-1}$
t	Χρονική περίοδος λειτουργίας αντλίας θερμότητας	h
$\Delta t$	Καθαρός χρόνος λειτουργίας αντλίας θερμότητας	h
St	Αριθμός κύκλων λειτουργίας αντλίας θερμότητας	αδιάστατος
St	Αριθμός κύκλων λειτουργίας συστήματος ανά ώρα	αδιάστατος
$m_{hd}$	Ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το υβριδικό σύστημα	$\text{kg h}^{-1}$

$m_{hp}$	Ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από τον εξατμιστή της αντλίας	$\text{kg h}^{-1}$
$m_s$	Ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το υγροσκοπικό διάλυμα	$\text{kg h}^{-1}$
$Q_{hd}$	Ρυθμός απομάκρυνσης από το υβριδικό σύστημα	$\text{kW}$
$Q_{hp}$	Ρυθμός συμπύκνωσης υδρατμών από τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας	$\text{kW}$
$\Delta E_{hd}$	Απορροφημένη ισχύ υβριδικού συστήματος	$\text{kW}$

# **1.Εισαγωγή**

## 1.1 Γενική εισαγωγή

Τα προϊόντα που παράγονται στο θερμοκήπιο συνιστούν σήμερα έναν από τους δυναμικότερους τομείς της ελληνικής γεωργίας, από πλευράς αγροτικού εισοδήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι, τα παραγόμενα θερμοκηπιακά προϊόντα, κηπευτικά όσο και ανθοκομικά, αποτελούν περίπου το 8,7% της συνολικής ακαθάριστης αξίας της φυτικής παραγωγής, ενώ η έκταση στην οποία καλλιεργούνται αποτελεί μόνο το 0,12% του γεωργικού εδάφους (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων). Τις τελευταίες δεκαετίες η συνεχιζόμενη αστικοποίηση του πληθυσμού, τόσο στην Ελλάδα όσο και στις Ευρωπαϊκές Χώρες, περιορίζει την παραγωγή για αυτοκατανάλωση, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται θετικά η ζήτηση των κηπευτικών προϊόντων. Επιπλέον, η στροφή του σύγχρονου ανθρώπου προς προϊόντα υψηλής διαιτητικής αξίας, πλούσια σε βιταμίνες και με λίγες θερμίδες, έχει αυξήσει τη ζήτηση των λαχανικών και των φρούτων και επομένως και προϊόντων που παράγονται στο θερμοκήπιο. Συνήθως οι τιμές των κηπευτικών προϊόντων θερμοκηπίου είναι υψηλές τα τελευταία χρόνια, διότι η ζήτηση τους είναι μεγαλύτερη από την προσφορά.

Ο σκοπός της χρησιμοποίησης των θερμοκηπίων στην παραγωγή γεωργικών προϊόντων είναι η τροποποίηση ή ρύθμιση των παραγόντων που επηρεάζουν την ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών.

Στα θερμοκήπια, που δεν διαθέτουν εξειδικευμένο εξοπλισμό και γίνεται μια απλή τροποποίηση του περιβάλλοντος των φυτών μόνο με τη κατασκευή, επιτυγχάνεται η πρώιμη ή όψιμη παραγωγή φυτικών προϊόντων και η αποφυγή ζημιών στο φυτικό κεφάλαιο από φυσικά αίτια όπως αέρα, βροχή, χαλάζι.

Στα θερμοκήπια που είναι εξοπλισμένα με συστήματα ελέγχου περιβάλλοντος και επιτυγχάνεται η ακριβής ρύθμιση των παραγόντων του περιβάλλοντος των φυτών, μπορεί να επιτευχθεί ο χρονικός προγραμματισμός της παραγωγής ανεξάρτητα από τις συνθήκες του εξωτερικού περιβάλλοντος καθώς και η αύξηση της παραγωγής και η βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων.

Τα θερμοκήπια που διαθέτουν μια κεντρική μονάδα αυτοματισμών συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή και παρέχει τη δυνατότητα δυναμικής ρύθμισης των παραγόντων ανάπτυξης των φυτών στο χώρο τους, επιτυγχάνουν

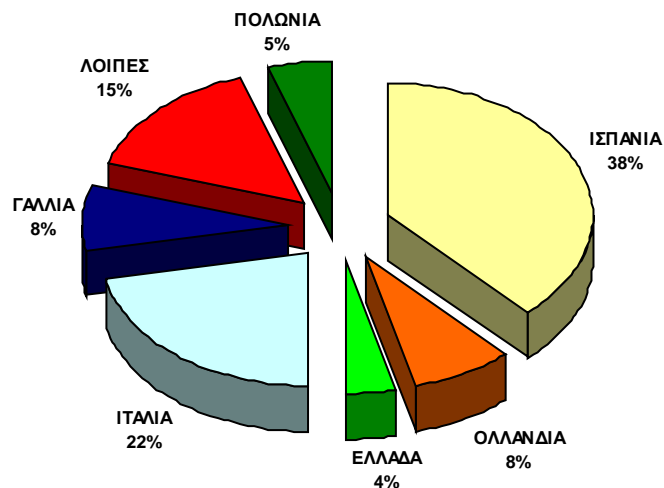
εξοικονόμηση ενέργειας, αύξηση της παραγωγής, βελτίωση της ποιότητας και μείωση του κόστους παραγωγής. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα χρησιμοποίησης στη επιχείρηση επιστημονικής γνώσης σε θέματα της φυσικής του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου και της φυσιολογίας των φυτών. Σήμερα γίνονται προσπάθειες συνδυασμού φυσικών προτύπων με δυναμικά βιολογικά πρότυπα ανάπτυξης των φυτών καθώς και με οικονομικά πρότυπα, έτσι ώστε η λειτουργία του θερμοκηπίου να γίνει πιο αποτελεσματική και περισσότερο επωφελής οικονομικά, μιας και οι αποφάσεις για τη λειτουργία του θα λαμβάνουν υπόψη, εκτός από τις φυσικές ιδιότητες του θερμοκηπίου, τις απαιτήσεις των φυτών με δυναμικό τρόπο αλλά και των οικονομικών στοιχείων της αγοράς.

#### **1.1.1 Θερμοκηπιακές Εγκαταστάσεις**

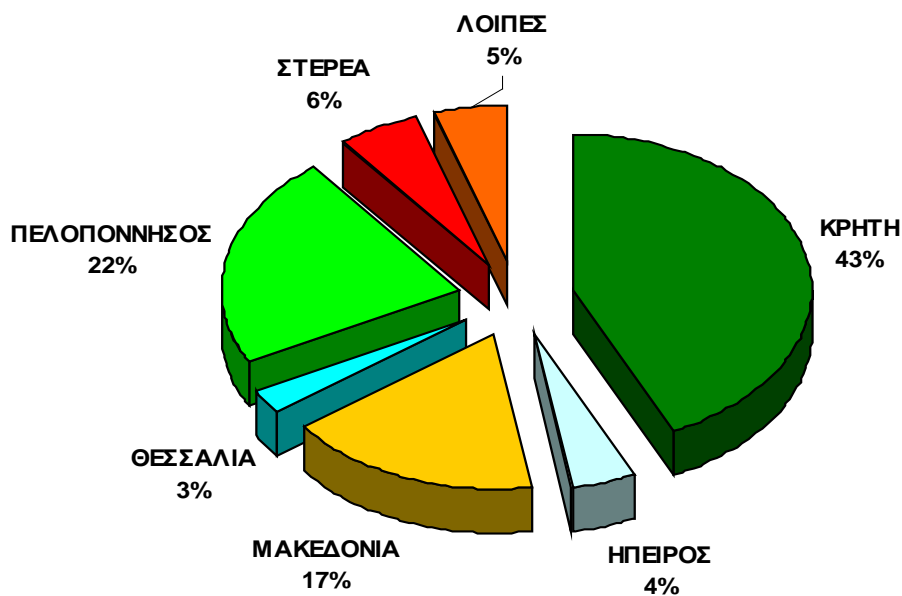
Ο τύπος θερμοκηπίων που χρησιμοποιείται στις διάφορες χώρες εξαρτάται από τις κλιματολογικές συνθήκες της κάθε χώρας, την τεχνολογική της ανάπτυξη, τα χαρακτηριστικά της οικονομίας της και από τη φύση των προϊόντων που παράγονται εκεί. Έτσι, στις βορειο-ευρωπαϊκές χώρες, όπως η Ολλανδία, κυριαρχούν τα υαλόφρακτα θερμοκήπια, ενώ στις Μεσογειακές χώρες η πλειονότητα των θερμοκηπίων είναι πλαστικής κάλυψης.

Η παγκόσμια έκταση των θερμοκηπίων το 2002 υπολογίζεται σε 2.800.000 στρέμματα (εκτός της Κίνας η οποία έχει 12.500.000 στρ. κυρίως απλές πλαστικές κατασκευές, πιθανότατα στις οποίες περιλαμβάνονται και τα χαμηλά σκέπαστρα). Οι εκτάσεις που καλύπτονται με θερμοκήπια στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2005 ανέρχονταν στο 1.260.000 στρέμματα (Eurostat, 2008).

Όσον αφορά τις εκτάσεις θερμοκηπίων, στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Σχήμα 1.1) η Ισπανία κατέχει την πρώτη θέση με 38% του συνόλου και ακολουθεί η Ιταλία με 22%, ενώ η Ελλάδα βρίσκεται στην 6<sup>η</sup> θέση κατέχοντας μόλις το 4% του συνόλου, παρόλο που έχει πολύ ευνοϊκές εδαφοκλιματικές συνθήκες για την παραγωγή θερμοκηπιακών προϊόντων. Επομένως, η Ελλάδα υστερεί σημαντικά σε εκτάσεις θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων συγκριτικά με άλλες χώρες με παρόμοιες κλιματικές συνθήκες, όπως η Ισπανία και η Ιταλία.



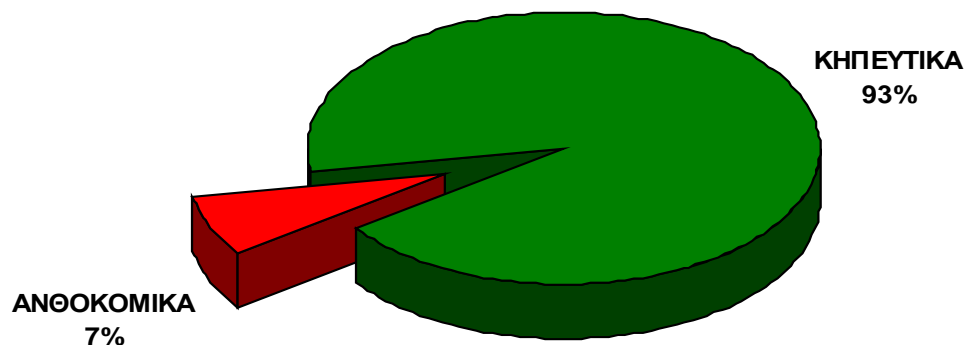
**Σχήμα 1.1.** Έκταση καλλιεργούμενων θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2005 (Πηγή: EuroStat)



**Σχήμα 1.2.** Έκταση καλλιεργούμενων θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα το 2006. (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

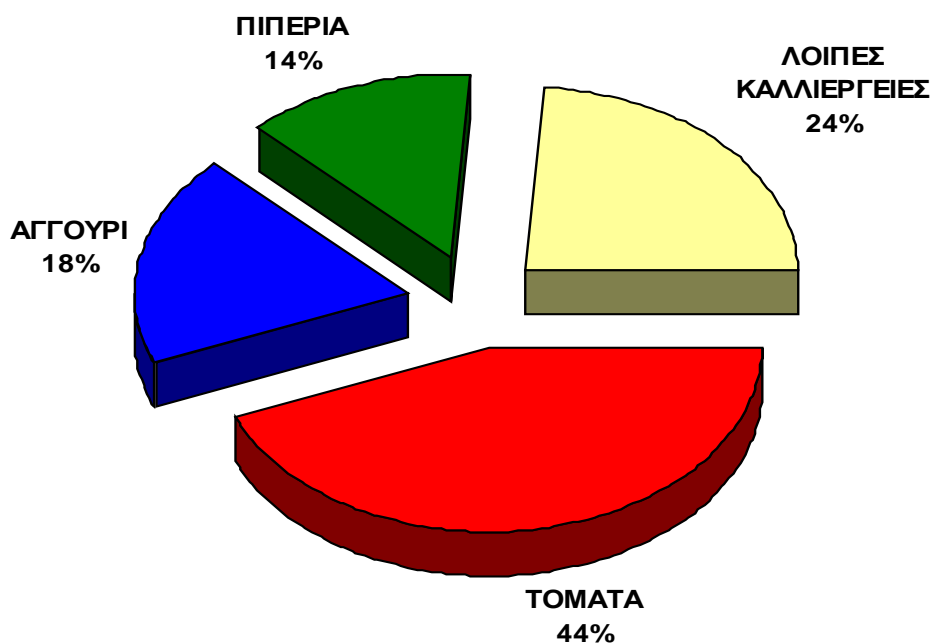
Η πλειονότητα των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα συγκεντρώνεται σε περιοχές με σχετικά ήπιο χειμώνα και υψηλή ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι, η Κρήτη και η Πελοπόννησος συγκεντρώνουν το 65% του συνόλου των θερμοκηπίων της χώρας (Σχήμα 1.2). Ο ήπιος χειμώνας της Νοτίου

Ελλάδας συνήθως επιτρέπει την παραγωγή γεωργικών προϊόντων και σε μη θερμαινόμενα θερμοκήπια, κάτι που είναι αδύνατον στη Β. Ευρώπη.



**Σχήμα 1.3.** Διαχωρισμός θερμοκηπιακών καλλιεργειών στην Ελλάδα, το 2006. (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

Όσον αφορά τα είδη των φυτών που καλλιεργούνται στα ελληνικά θερμοκήπια, τα ανθοκομικά καταλαμβάνουν μόλις το 7% του συνόλου των εκτάσεων (Σχήμα 1.3). Από τα κηπευτικά που καλλιεργούνται στα θερμοκήπια τις πρώτες θέσεις καταλαμβάνουν η τομάτα και το αγγούρι, καταλαμβάνοντας αθροιστικά μερίδιο της τάξεως του 62% (Σχήμα 1.4).

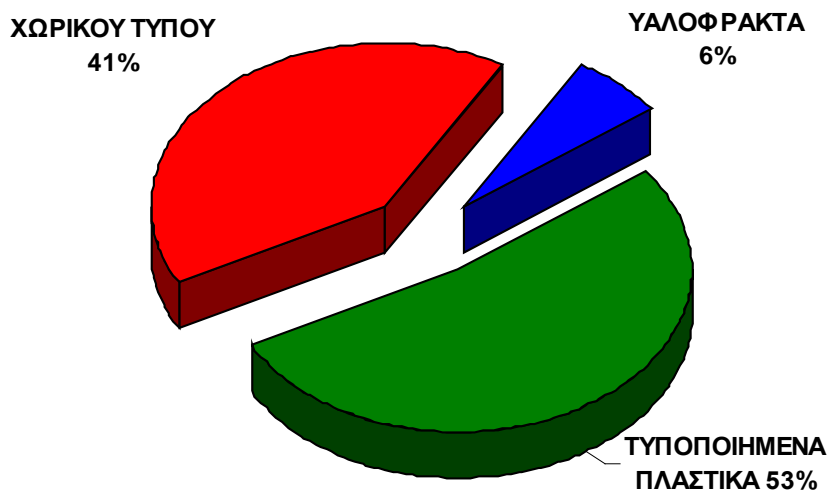


**Σχήμα 1.4.** Διαχωρισμός των θερμοκηπιακών κηπευτικών καλλιεργειών στην Ελλάδα, το 2006. (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

### 1.1.2 Ποιότητα κατασκευών

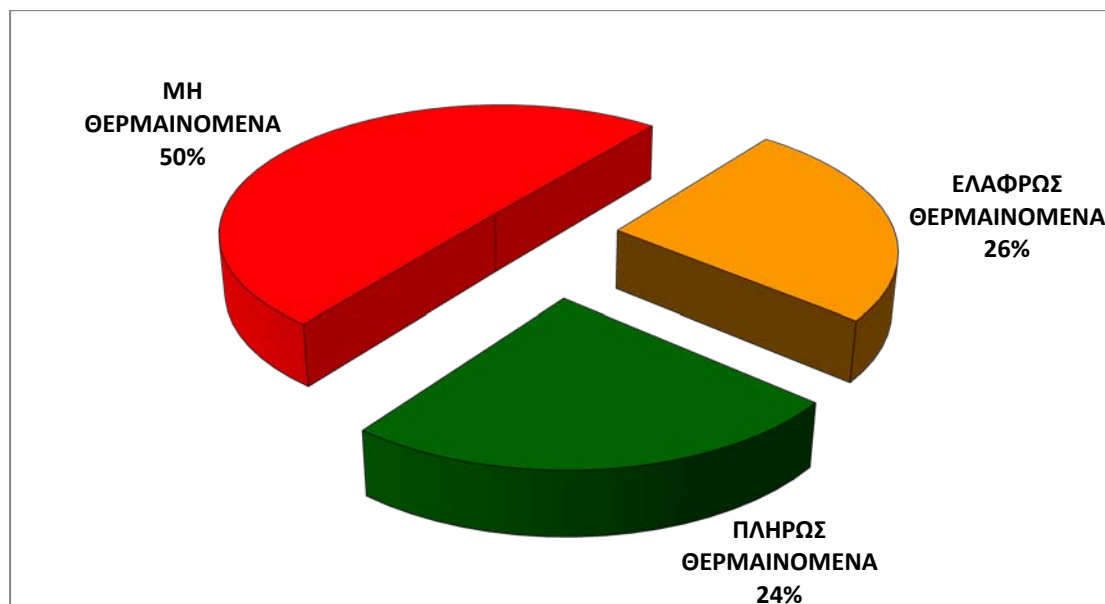
Όσον αφορά τις θερμοκηπιακές κατασκευές που απαντώνται στην Ελλάδα οι τυποποιημένες κατασκευές (δηλαδή αυτές που προέρχονται από βιοτεχνίες ή βιομηχανίες) αποτελούν το 61% του συνόλου και περιλαμβάνουν τα υαλόφρακτα θερμοκήπια και τα πλαστικά με μεταλλικό ή ξύλινο ή μικτό σκελετό. Το υπόλοιπο μέρος των θερμοκηπιακών κατασκευών αποτελείται από τα πλαστικά θερμοκήπια χωρικού τύπου, δηλαδή κατασκευές από ξύλινο ή μεταλλικό σκελετό που δημιουργηθεί από τους ίδιους τους καλλιεργητές (Σχήμα 1.5).





**Σχήμα 1.5.** Ποσοστιαία σχηματική παράσταση της έκτασης των ελληνικών θερμοκηπίων σε σχέση με το τύπο κατασκευής, το 2006. (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

Σχετικά με τη θέρμανση των ελληνικών θερμοκηπίων θα πρέπει να σημειωθεί ότι μόλις το 24% έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στα επιθυμητά επίπεδα και το 1/3 από τα μη θερμαινόμενα διαθέτουν κάποιο σύστημα θέρμανσης για αντιπαγετική προστασία (Σχήμα 1.6).



**Σχήμα 1.6.** Ποσοστιαία σχηματική παράσταση της έκτασης των ελληνικών θερμοκηπίων σε σχέση με τη δυνατότητα θέρμανσης, το 2006. (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

## 1.2 Προβλήματα των θερμοκηπίων στην Ελλάδα

Το θερμοκήπιο είναι μέσο που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών, επομένως η έρευνα στο θερμοκήπιο έχει ως κύριο στόχο τη βελτίωση (τεχνικά και οικονομικά) του περιβάλλοντος που δημιουργεί, ώστε να επιτευχθεί η αποδοτικότερη ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών.

Ακόμα και σήμερα λόγω των συνθηκών που επικρατούν στην χώρα μας (έλλειψη τεχνογνωσίας από τους παραγωγούς και κακή οργάνωση της εμπορίας των παραγόμενων προϊόντων, με αποτέλεσμα την αβεβαιότητα του εγχειρήματος), το χαμηλό κόστος επένδυσης συχνά υπερισχύει της απόφασης αγοράς σύγχρονου θερμοκηπίου με τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα εξελιγμένα θερμοκήπια. Συνέπεια αυτού είναι ότι, οι θερμοκηπιακές κατασκευές στη χώρα μας και ο εξοπλισμός τους να μην εμφανίζουν ιδιαίτερη ποιότητα, η οποία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της δυνατότητας ικανοποιητικής ρύθμισης του κλίματος του θερμοκηπίου.

Κατά συνέπεια, παρά τις ευνοϊκές εδαφοκλιματικές συνθήκες της χώρας μας, το περιβάλλον που δημιουργείται τελικά στο εσωτερικό των θερμοκηπίων απέχει πολύ από το ευνοϊκό για την ανάπτυξη και τη παραγωγή των καλλιεργειών. Έτσι, οι μέσες στρεμματικές αποδόσεις των θερμοκηπιακών καλλιεργειών στη χώρα μας υπολείπονται κατά πολύ των αντίστοιχων αποδόσεων, σε άλλες χώρες της Β. Ευρώπης με λιγότερο ευνοϊκές κλιματικές συνθήκες.

Έτσι, η πλειονότητα των ελληνικών θερμοκηπίων κατά τη χειμερινή περίοδο αντιμετωπίζει αδυναμία ρύθμισης της θερμοκρασίας, μιας και η πλειονότητα των ελληνικών θερμοκηπίων δεν διαθέτει κάποιο σύστημα θέρμανσης (Σχήμα 1.6). Το πρόβλημα των χαμηλών θερμοκρασιών στο εσωτερικό των θερμοκηπίων κατά τη διάρκεια του χειμώνα μπορεί να λυθεί με τη τοποθέτηση συστημάτων θέρμανσης στα θερμοκήπια που δεν διαθέτουν. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, λόγω της υψηλής έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας, τα ελληνικά θερμοκήπια εμφανίζουν στο εσωτερικό τους υψηλές τιμές θερμοκρασίας, με συνέπεια την υδατική και θερμική καταπόνηση των καλλιεργειών. Το πρόβλημα των υψηλών θερμοκρασιών στο εσωτερικό των θερμοκηπίων κατά τη διάρκεια του θέρους μπορεί να αντιμετωπιστεί με αύξηση του εξαερισμού, με σκίαση (βαφή

καλύμματος, κουρτίνα σκίασης) ή με συστήματα δροσισμού (υδρονέφωση, υγρό τοίχωμα).

Ένας από τους βασικούς παράγοντες της σύστασης του περιβάλλοντος των φυτών είναι η υγρασία που εμπεριέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα. Η βέλτιστη παραγωγή των φυτών εξαρτάται από ένα ειδικό εύρος υγρασίας. Η σχετική υγρασία επηρεάζει την υδατική κατάσταση των θερμοκηπιακών καλλιεργειών και συνεπώς όλες τις διαδικασίες που σχετίζονται με την διαπνοή, όπως η υδατική ισορροπία, η ψύξη του φύλλου και η μεταφορά των ιόντων. Ένα σημαντικό πρόβλημα του κλίματος των ελληνικών θερμοκηπίων, που εμφανίζεται από τα μέσα του φθινοπώρου έως τα τέλη της άνοιξης, είναι οι πολύ υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας, ιδίως κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η έρευνα έχει δείξει ότι τα πολύ υψηλά επίπεδα υγρασίας μειώνουν δραστικά τη διαπνοή των καλλιεργειών προκαλώντας την εμφάνιση φυσιολογικών ανωμαλιών, ευνοούν την ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών με τελικό αποτέλεσμα την μείωση της παραγωγής των καλλιεργούμενων φυτών στο θερμοκήπιο. Όμως, η έρευνα για αποτελεσματικές και οικονομικές μεθόδους μείωσης της υγρασίας στο θερμοκήπιο δεν είναι σημαντική.

### 1.3 Ορισμοί υγρασίας

Πριν αναφερθούμε στις επιδράσεις της υγρασίας στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι το ποσό των υδρατμών του αέρα μπορεί να εκφραστεί με διάφορους τρόπους. **Απόλυτη υγρασία** λέγεται η ποσότητα των υδρατμών που περιέχεται ανά μονάδα όγκου ( $\text{g m}^{-3}$ ) ή βάρους αέρα ( $\text{g kg}^{-1}$ ). Η απόλυτη υγρασία του αέρα όταν εκφράζεται ανά μονάδα όγκου αέρα λέγεται και **πυκνότητα υδρατμών**, ενώ όταν εκφράζεται ανά μονάδα βάρους αέρα λέγεται και **ειδική υγρασία**. Ως **σχετική υγρασία** ορίζεται ο λόγος της πραγματικής μερικής πίεσης των υδρατμών προς τη μερική πίεση των υδρατμών του κορεσμένου αέρα στην ίδια θερμοκρασία. Η σχετική υγρασία εκφράζεται επί τοις %. Η σχετική υγρασία είναι 0 για τον ξηρό αέρα και 100% για τον κορεσμένο. **Έλλειμμα πίεσης υδρατμών** λέγεται η διαφορά της απόλυτης υγρασίας του αέρα από την ποσότητα υδρατμών που θα είχε ο αέρας αν στην ίδια θερμοκρασία και πίεση ήταν κορεσμένος. Το έλλειμμα κορεσμού υδρατμών επομένως εκφράζει την ποσότητα των υδρατμών που ο αέρας μίας συγκεκριμένης θερμοκρασίας και πίεσης μπορεί

ακόμα να απορροφήσει. Το έλλειμμα πίεσης υδρατμών μπορεί να οριστεί και ως διαφορά της πραγματικής μερικής πίεσης των υδρατμών από τη μερική πίεση των υδρατμών στον κορεσμό. Οι μονάδες πιέσεις υδρατμών κερδίζουν την αποδοχή των ερευνητών. Οι Grange και Hand (1987) έχουν αναφέρει ότι το έλλειμμα πίεσης υδρατμών είναι πιθανότατα ο πιο χρήσιμος όρος για να περιγραφεί η υγρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκήπιο.

#### **1.4 Η Υγρασία στο θερμοκήπιο**

Η υγρασία αποτελεί ένα από τους καθοριστικούς παράγοντες του εναέριου περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Συνήθως τείνει να είναι υψηλή εξαιτίας της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας. Η υγρασία και η ενέργεια στο χώρο του θερμοκηπίου είναι αλληλένδετα συνδεδεμένες. Οι ανταλλαγές υγρασίας μέσα στο θερμοκήπιο συνδυάζονται με τη μεταφορά θερμότητας με την εξάτμιση και τη συμπύκνωση του νερού, παίρνοντας και δίνοντας θερμότητα αντίστοιχα υπό μορφή λανθάνουσας θερμότητας. Επιπλέον, η θερμοκρασία και η κίνηση του αέρα στο χώρο του θερμοκηπίου και επομένως, η ακτινοβολία και η συναγωγή που τα προκαλούν, επηρεάζουν πολύ τις φυσικές διεργασίες και τις καταστάσεις του νερού. Η ακτινοβολία, με την αύξηση της θερμοκρασίας που δημιουργεί στην επιφάνεια των φύλλων των φυτών, ρυθμίζει και το ρυθμό της διαπνοής.

Η πυκνότητα των υδρατμών στο χώρο του θερμοκηπίου είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια της ημέρας, γιατί τότε ο ρυθμός εξατμισοδιαπνοής είναι μεγαλύτερος από αυτόν της νύχτας, η σχετική υγρασία όμως είναι μικρότερη κατά τη διάρκεια της ημέρας, γιατί τότε η θερμοκρασία του αέρα είναι υψηλότερη και συνήθως λειτουργεί ο εξαερισμός.

Στο χώρο ενός θερμοκηπίου, όταν έχει επέλθει ισορροπία, η απόλυτη υγρασία είναι περίπου ίδια σε όλο τον ενιαίο χώρο του θερμοκηπίου, η θερμοκρασία όμως στα διάφορα σημεία του χώρου του δεν είναι ομοιόμορφη (π.χ. κοντά στο κάλυμμα είναι συνήθως χαμηλότερη), επομένως η σχετική υγρασία του αέρα συνήθως δεν έχει την ίδια τιμή σε όλα τα σημεία του χώρου του θερμοκηπίου. Συνεπώς, το πρόβλημα της υγρασίας οφείλεται μερικώς στην ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο, όπου η τοπικά υψηλή σχετική υγρασία συνδέεται με τοπικά χαμηλές θερμοκρασίες. Το πρόβλημα της πολύ υψηλής σχετικής

υγρασίας στο θερμοκήπιο παρουσιάζεται συνήθως τη νύχτα. Κατά τη διάρκεια της νύχτας ψύχεται ο αέρας, οπότε η σχετική υγρασία αυξάνει και επειδή δεν υπάρχει σημαντικός εξαερισμός (τα παράθυρα τη νύχτα είναι κλειστά), η σχετική υγρασία στο χώρο του θερμοκηπίου αυξάνει συνεχώς. Οι συνθήκες υψηλής υγρασίας αποτελούν μια κατάσταση, η οποία είναι χαρακτηριστική των κλειστών θερμοκηπίων σε μέσες νυκτερινές καιρικές συνθήκες (Seginer and Kantz, 1989).

Το επίπεδο της υγρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου προκύπτει από την ισορροπία ανάμεσα στις πηγές και της απώλειες των υδρατμών στο περιβάλλον του θερμοκηπίου. Η κύρια πηγή υδρατμών στο θερμοκήπιο είναι η διαπνοή της καλλιέργειας. Η διαπνοή εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία, τη συγκέντρωση του CO<sub>2</sub>, τη θερμοκρασία και σχετική υγρασία στο θερμοκήπιο (Stanghellini, 1987). Μια άλλη πηγή υδρατμών είναι η εξάτμιση του νερού από επιφάνειες μέσα στο θερμοκήπιο, όπως η επιφάνεια του εδάφους.

Η κύρια απώλεια των υδρατμών είναι η απομάκρυνση τους μέσω του εξαερισμού. Το επίπεδο της υγρασίας έξω από το θερμοκήπιο είναι πάντοτε χαμηλότερο από το εσωτερικό, έτσι ο εξαερισμός προκαλεί μείωση της υγρασίας στο θερμοκήπιο.

Το φαινόμενο της επιφανειακής συμπύκνωσης υδρατμών παρατηρείται πολύ συχνά σε χώρους με αυξημένη σχετική υγρασία, όπως το θερμοκήπιο. Όσο η θερμοκρασία του σημείου δρόσου είναι πλησιέστερη προς τη θερμοκρασία του αέρα σε ένα χώρο, τόσο υψηλότερη είναι η σχετική υγρασία και τόσο αυξάνει η πιθανότητα (με μια μικρή μείωση της θερμοκρασίας ή αύξηση της υγρασίας του χώρου) ο αέρας να καταστεί κορεσμένος και να συμπυκνωθούν οι υδρατμοί που περιέχει. Η συμπύκνωση αρχίζει να γίνεται πάνω σε επιφάνειες του χώρου που αποκτούν χαμηλότερη θερμοκρασία από τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου του αέρα. Τα σκελετικά στοιχεία και το κάλυμμα αποκτούν τη νύχτα, ταχύτερα από όλες τις άλλες επιφάνειες, χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτήν του αέρα του θερμοκηπίου λόγω της άμεσης επαφής τους με το ψυχρότερο εξωτερικό αέρα. Η επιφάνεια των φυτών ψύχεται επίσης πολύ γρήγορα τη νύχτα επειδή ακτινοβολούν θερμότητα. Σε μερικές περιπτώσεις, ιδιαίτερα στα θερμοκήπια με κάλυψη από πολυαιθυλένιο, όταν επικρατεί καθαρός ουρανός, τα φυτά ψύχονται ταχύτερα από

τον αέρα και συμπυκνώνονται υδρατμοί πάνω σε αυτά. Έτσι, η συμπύκνωση υδρατμών σε ψυχρές επιφάνειες μέσα στο θερμοκήπιο, όπως το κάλυμμα απομακρύνει υγρασία από τον αέρα του θερμοκηπίου. Αυτό μπορεί να είναι επιθυμητό στα υαλόφρακτα θερμοκήπια διότι η συμπύκνωση των υδρατμών γίνεται με τη μορφή μεμβράνης και το συμπύκνωμα ρέει προς τη περιφέρεια του θερμοκηπίου χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να πέσει το συμπύκνωμα πάνω στα φυτά. Όμως, στα θερμοκήπια με κάλυμμα πολυαιθυλενίου η συμπύκνωση γίνεται με μορφή σταγόνων, οι οποίες δεν απλώνουν στο κάλυμμα και δεν ρέουν στη περιφέρεια, αλλά συγκεντρώνονται συνεχώς και όσο μεγαλώνει το βάρος τους ή με τα χτυπήματα του ανέμου πέφτουν υπό μορφή βροχής πάνω στα φυτά και τα καθιστούν ευάλωτα στην προσβολή από μυκητολογικές ασθένειες. Έτσι, μείωση της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο μπορεί να συμβεί και μέσω της αναγκαστικής κίνησης του αέρα με ανεμιστήρες εντός του θερμοκηπίου, διότι έτσι αυξάνεται πολύ η συμπύκνωση υδρατμών στη ψυχρή επιφάνεια του καλύμματος. Με αυτό όμως τον τρόπο, αυξάνονται και οι απώλειες ενέργειας του θερμοκηπίου λόγω αυξημένης συναγωγής, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους θέρμανσης του θερμοκηπίου. Επιπλέον, οι υδρατμοί που συμπυκνώνονται πάνω στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος απελευθερώνουν την λανθάνουσα θερμότητα τους και αυξάνουν τις απώλειες ενέργειας του θερμοκηπίου. Πολλά θερμαινόμενα θερμοκήπια, προκειμένου να μειώσουν το κόστος θέρμανσης, έχουν βελτιώσει την μόνωση τους με την τοποθέτηση διπλού καλύμματος. Σε αυτή την περίπτωση, η συμπύκνωση υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος περιορίζεται και έτσι δεν είναι εφικτή η μείωση της σχετικής υγρασίας στον αέρα του θερμοκηπίου. Έτσι, τα θερμοκήπια με βελτιωμένη μόνωση παρουσιάζουν εντονότερο πρόβλημα υψηλής υγρασίας στο εσωτερικό τους, συγκριτικά με τα θερμοκήπια με απλό κάλυμμα.

Η ανομοιομορφία στην κατανομή της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο προκαλεί όχι μόνο διάφορες στη διαπνοή των φυτών στις διάφορες θέσεις αλλά και διαφορετική συχνότητα συμπύκνωσης υδρατμών πάνω στα φυτά.

Επομένως, για να αποφύγει κανείς τη συμπύκνωση θα πρέπει η θερμοκρασία του σημείου δρόσου να βρίσκεται αρκετά χαμηλότερα από αυτή του αέρα. Αυτό επιτυγχάνεται ή με τη μείωση της περιεκτικότητας του αέρα σε υδρατμούς είτε με

την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα και των επιφανειών κατασκευής ή με όλα μαζί.

Όταν οι αναπτυσσόμενες καλλιέργειες στο θερμοκήπιο είναι ευαίσθητες σε μυκητολογικές ασθένειες, οι καλλιεργητές επιδιώκουν να διατηρήσουν στα θερμοκήπια τους όχι μόνο κατάλληλη θερμοκρασία αλλά και ένα όχι πολύ υψηλό επίπεδο υγρασίας. Οι καλλιεργητές για να εμποδίσουν την εμφάνιση τοπικά υψηλής υγρασίας ορίζουν το όριο της μέγιστης σχετικής υγρασίας σε χαμηλότερο επίπεδο από αυτό που απαιτείται για ομοιόμορφες συνθήκες στο θερμοκήπιο.

Επιπλέον, οι καλλιεργητές για να περιορίσουν τις αρνητικές επιπτώσεις της πολύ υψηλής υγρασίας είναι υποχρεωμένοι, είτε θα αυξήσουν τη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων, είτε να αφυγράνουν το αέρα του θερμοκηπίου τους. Η απαίτηση όμως των καταναλωτών, για προϊόντα απαλλαγμένα από χημικά υπολείμματα, η οποία γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη, οδηγεί στην αναζήτηση φυτοϋγειονομικά και ενεργειακά φιλικών μεθόδων για τη ρύθμιση των υψηλών επιπέδων υγρασίας.

Επομένως, κατά τη διάρκεια των ψυχρών ωρών υπάρχει ανάγκη να μειωθεί η σχετική υγρασία στο χώρο του θερμοκηπίου, ώστε να διατηρηθεί ένα κατάλληλο περιβάλλον για την υγιεινή ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών.

## 1.6 Δομή Διατριβής

Η παρούσα διατριβή αποτελείται από 6 κεφάλαια. Στο **1<sup>ο</sup> κεφάλαιο** αναφέρεται στην κατάσταση των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στον ελλαδικό χώρο, στα κύρια προβλήματα που αντιμετωπίζουν, και περιγράφεται το σοβαρό πρόβλημα της υψηλής υγρασίας που αναπτύσσεται στο εσωτερικό των θερμοκηπίων. Στο **2<sup>ο</sup> κεφάλαιο** πραγματοποιείται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας όσον αφορά: i) τις επιδράσεις της υγρασίας στις καλλιέργειες και ii) στις μεθόδους αφύγρανσης των θερμοκηπίων. Στο **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο** περιγράφονται οι πειραματικές μέθοδοι και ο πειραματικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της παρούσας διατριβής. Στο **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο** αναπτύσσεται ένα μοντέλο ισοζυγίου υδρατμών του θερμοκηπίου και αναλύονται οι αρχές λειτουργίας των συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την μείωση της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο. Πρώτα, αναπτύσσεται το θεωρητικό μοντέλο λειτουργίας ενός συστήματος υγροσκοπικής απορρόφησης με υγροσκοπικό διάλυμα  $\text{CaCl}_2$ . Στην συνέχεια περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας της αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα και ενός υβριδικού συστήματος μείωσης της υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου. Στο **5<sup>ο</sup> κεφάλαιο** παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Αρχικά, μέσω του μοντέλου υδρατμών του θερμοκηπίου προσδιορίζονται οι απαιτήσεις αφύγρανσης του θερμοκηπίου, ώστε η σχετική υγρασία να μην υπερβαίνει το επιθυμητό επίπεδο. Ακολούθως, προσδιορίστηκαν οι ικανότητες απομάκρυνσης υδρατμών από τα δοκιμαζόμενα συστήματα. Στο τελευταίο υποκεφάλαιο του 5<sup>ου</sup> κεφαλαίου αναλύθηκαν τα αποτελέσματα της επίδρασης της αφύγρανσης του αέρα του θερμοκηπίου στην ανάπτυξη, την παραγωγή και την ευαισθησία προσβολής από τον βοτρυτή. Στο **6<sup>ο</sup> κεφάλαιο** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής και αναφέρονται τα θέματα που σχετίζονται με τα αντικείμενα της παρούσας διατριβής και χρήζουν περαιτέρω διερεύνηση. Τέλος, παρατίθενται οι βιβλιογραφικές πηγές, οι κατάλογοι διαγραμμάτων, σχημάτων, εικόνων, καθώς και, ο κατάλογος δημοσιευμένων εργασιών που προήλθαν από την παρούσα διατριβή.



## **2.0 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας**

### **2.1 Επιδράσεις της σχετικής υγρασίας στις καλλιέργειες**

#### **2.1.1 Επιδράσεις στη φωτοσυνθετική ικανότητα**

Τα φυτά μπορεί να εμφανίζουν ένα αυξημένο ρυθμό φωτοσύνθεσης με την αύξηση της υγρασίας επειδή η απορρόφηση του νερού από ολόκληρο το φυτό δεν μπορεί πάντα να ικανοποιήσει τη διαπνοή τους στις χαμηλότερες υγρασίες. Οι Acock et al. (1976) μέτρησαν τους ρυθμούς καθαρής φωτοσύνθεσης σε φυτά τομάτας σε διάφορες συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα και σε διαφορετικά επίπεδα υγρασιών, τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι, η φωτοχημική ικανότητα του φύλλου στα 0,5 kPa ελλείμματος κορεσμού ήταν κατά 18% μεγαλύτερη από αυτή στο 1 kPa και στα 400 ppm CO<sub>2</sub>, αλλά μόνον 5% μεγαλύτερη στα 1200 ppm CO<sub>2</sub>. Η λεπτομερής ανάλυση των δεδομένων έδειξε ότι, η μεταφορά του CO<sub>2</sub> επηρεάζεται από την στοματική αγωγιμότητα η οποία με τη σειρά της επηρεάζεται από την υγρασία. Παρόλα αυτά, τα δεδομένα εμφάνιζαν διακύμανση και η αύξηση της φωτοχημικής ικανότητας πρέπει να αντιμετωπίζεται με προσοχή.

Σε πιο πρόσφατες έρευνες αναφέρεται ότι η φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών μειώνεται στις πολύ υψηλές υγρασίες εξαιτίας της χαμηλότερης επάρκειας της καρβοξυλάσης (Mulholland et al., 2000). Οι Xu et al. (2006) αναφέρουν ότι στα υψηλότερα ελλείμματα κορεσμού, η φωτοσυνθετική ικανότητα των φυτών αυξάνει, λόγω της αυξημένης περιεκτικότητας των φύλλων σε χλωροφύλλη, αυξημένης περιεκτικότητας διαλυτών πρωτεϊνών και υψηλότερης δραστηριότητας της Rubisco.

#### **2.1.2 Φυσιολογικές ανωμαλίες**

Το ασβέστιο είναι ένα απαραίτητο θρεπτικό στοιχείο το οποίο είναι αναγκαίο σε σχετικά υψηλές ποσότητες για τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας των κυττάρων και για τη ρύθμιση διαφόρων μεταβολικών διαδικασιών. Τα ώριμα φύλλα των φυτών κανονικά περιέχουν περίπου 1-3% ασβέστιο ανά μονάδα ξηρού βάρους. Οι ανωμαλίες που σχετίζονται με το ασβέστιο είναι πολλές και ποικίλλουν, ξηρά κορυφή στη τομάτα και την πιπεριά, στο μαρούλι, στο λάχανο, στο

χρυσάνθεμο. Επιπλέον, υπάρχουν παραδείγματα ανωμαλιών που σχετίζονται με το ασβέστιο για σχεδόν κάθε φρούτο και κηπευτικό. Συμπτώματα έλλειψης ασβεστίου συνήθως παρατηρούνται όταν η περιεκτικότητα ασβεστίου πέφτει κάτω από 1% του ξηρού βάρους στον αντίστοιχο ευαίσθητο ιστό. Παραδόξως, συχνά παρατηρούνται τροφοπενίες ασβεστίου ενώ δεν υπάρχει έλλειψη του στοιχείου είτε στο φυτό είτε στο υπόστρωμα των ριζών. Το ουσιαστικό πρόβλημα είναι η ανεπαρκής κατανομή του ασβεστίου στο φυτό και συμβαίνει επειδή η κίνηση του στοιχείου στον ευαίσθητο ιστό είναι πολύ αργή και δεν επαρκεί για να καλύψει τις απαιτήσεις (Hand, 1988). Φαίνεται ότι, μια μεγάλη αναλογία της ποσότητας του ασβεστίου που απορροφάται από τους καρπούς παραμένει στο ποδίσκο και στον κάλυκα με πολύ μικρή κίνηση προς το άκρο του καρπού (Hand, 1988).

Πολλές φυσιολογικές και μορφολογικές ανωμαλίες, που σχετίζονται με τα επίπεδα ασβεστίου στους φυτικούς ιστούς, συνήθως, συνδέονται με τις περιβαλλοντικές συνθήκες (σχετική υγρασία) ή με την ανεπαρκή τροφοδοσία των ριζών με ασβέστιο. Παρόλα αυτά, η επίδραση στην ανάπτυξη των φυτών ως μιας διαδικασίας σχετιζόμενης με το νερό και την απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων έχει αναλυθεί. Οι Grange and Hand (1987) αναφέρουν ότι, η υγρασία του αέρα με έλλειμμα κορεσμού υδρατμών από 0,3 έως 1 kPa έχει μικρή επίδραση στη φυσιολογία των φυτών. Παρόλα αυτά, ελλείμματα κορεσμού υψηλότερα ή χαμηλότερα από αυτές τις τιμές μπορούν συχνά να απαντηθούν στα θερμοκήπια. Στη βόρεια Ευρώπη, η μειωμένη ανταλλαγή αέρα του θερμοκηπίου συχνά έχει ως αποτέλεσμα μια αύξηση της υγρασίας στο εσωτερικό των θερμοκηπίων, που οδηγεί σε μείωση της διαπνοής (Stanghellini, 1987). Αντίθετα, στη νότια Ευρώπη, που τα θερμοκήπια χαρακτηρίζονται από υψηλούς ρυθμούς εξαερισμού, οι υψηλότερες θερμοκρασίες την άνοιξη και το καλοκαίρι συχνά συνοδεύονται από υψηλά ελλείμματα κορεσμού κατά τη διάρκεια του μεσημεριού (Romero-Aranda και Longuenese, 1995). Οι υψηλές υγρασίες προωθούν τις φυσιολογικές ανωμαλίες εξαιτίας της μειωμένης διαπνοής και επομένως, μειώνουν την απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων (Gislerod et al., 1987). Υπάρχουν αρκετές αναφορές που συνδέουν τις παρατηρούμενες μειωμένες συγκεντρώσεις ασβεστίου σε συνθήκες αυξημένης υγρασίας, με τα αρνητικά συμπτώματα στην ανάπτυξη των φυτών (Holder και Cockshull, 1990). Για να διατηρηθεί η επιμήκυνση των φύλλων και για

να αποφευχθούν οι οποιοσδήποτε απώλειες παραγωγής σε συνθήκες αυξημένης υγρασίας, λόγω έλλειψης Ca, απαιτούνται τουλάχιστον  $8,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  ολικής ηλιακής ενέργειας (Aikman και Houter, 1990). Παρόλα αυτά, η σημαντικότητα της διαπνοής στη μεταφορά του ασβεστίου σε μεγάλες αποστάσεις τίθενται υπό αμφισβήτηση (Tanner και Beevers, 2001). Έτσι, οι Mulholland et al. (2000, 2001) και οι del Amor και Marcelis (2006) διεξάγοντας συνδυαστικά πειράματα με διαφορετικά επίπεδα υγρασίας και διαφορετικές συγκεντρώσεις Ca στο θρεπτικό διάλυμα κατέληξαν ότι δεν ευθύνονται οι χαμηλές περιεκτικότητες Ca των φύλλων για τις αρνητικές επιπτώσεις στην ανάπτυξη των φυτών σε συνθήκες αυξημένης υγρασίας.

Σε ακραίες συνθήκες, υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας και υψηλής υγρασίας η μείωση της διαπνοής μπορεί να προκαλέσει υψηλή θερμοκρασία φύλλου και συνεπώς ζημιά στα φύλλα.

### **2.1.3 Επίδραση στις Ασθένειες**

Ενώ οι βιολογικοί παράγοντες ελέγχου των περισσότερων εντομολογικών εχθρών των θερμοκηπιακών καλλιεργειών έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία τα τελευταία χρόνια, ο βιολογικός έλεγχος των ασθενειών είναι πολύ λιγότερο ανεπτυγμένος. Πρόσφατες έρευνες για τη τοξικολογική επίδραση στα θερμοκηπιακά προϊόντα έδειξε ότι η αντιμετώπιση των ασθενειών βασίζεται ακόμα σε μεγάλο βαθμό στα μυκητοκτόνα. Τα περισσότερα αερομεταφερόμενα μυκητολογικά παθογόνα, και ιδιαίτερα ο βοτρυτής, θεωρούνται ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα για τις θερμοκηπιακές καλλιέργειες.

Οι μυκητολογικές ασθένειες είναι μεταξύ των πιο επιθετικών παθογόνων των θερμοκηπιακών καλλιεργειών. Η ατμοσφαιρική υγρασία και η διαθεσιμότητα του νερού είναι ιδιαίτερες σημαντικές για τις μυκητολογικές ασθένειες, επειδή χρειάζονται σημαντικές ποσότητες νερού για την εξάπλωσή τους και για την απελευθέρωση των σπορίων τους. Τα περισσότερα μυκητολογικά παθογόνα χρειάζονται νερό γύρω από τα σπόρια τους για να βλαστήσουν. Οι υψηλές ατμοσφαιρικές υγρασίες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου συχνά οδηγούν σε συμπύκνωση υγρασίας στα φύλλα. Επιπλέον, σε υψηλά επίπεδα υγρασίας, όταν η θερμοκρασία του καλύμματος πέσει κάτω από το σημείο δρόσου έχει ως

αποτέλεσμα τη συμπύκνωση υδρατμών πάνω του, οι σταγόνες που δημιουργούνται πάνω στο κάλυμμα μπορούν να πέσουν πάνω στα φυτά. Αυτές οι συνθήκες δεν είναι ασυνήθιστες στα θερμοκήπια και η προστασία των καλλιεργειών απαιτεί τη μείωση της υγρασίας. Παρόλα αυτά, ο έλεγχος της υγρασίας αποτελεί έναν περιοριστικό παράγοντα σε αυτές τις πρακτικές εξοικονόμησης ενέργειας και οι καλλιεργητές συχνά υιοθετούν μια ριψοκίνδυνη στρατηγική διαχείρισης, με συχνές εφαρμογές μυκητοκτόνων (De Kraker et al., 2000). Στην πράξη ο έλεγχος του βοτρύτη στα ανθοκομικά, έρχεται μετά από τον έλεγχο του κλίματος, και συνήθως ελέγχεται με μυκητοκτόνα. Η έρευνα κατέληξε σε μοντέλα βασισμένα σε συστήματα λήψης αποφάσεων (DSS) (De Kraker et al., 2000, De Kraker et al., 1999, Tantau and Lange, 2003). Αυτές οι προσεγγίσεις χρησιμοποίησαν μοντέλα της επιδημιολογίας του βοτρύτη, από τα οποία λαμβάνονταν αποφάσεις για διάφορα μέτρα ελέγχου. Παρόλα αυτά, η εστίαση αυτών των συστημάτων λήψης αποφάσεων ήταν προσανατολισμένη σε μια πιο άμεση εφαρμογή των μυκητοκτόνων, παρά σε μια βελτίωση των στρατηγικών ελέγχου του κλίματος (Korner and Holst, 2005).

Επιπροσθέτως, η χρήση των μυκητοκτόνων περιορίζεται μέσω της ανάπτυξης ανθεκτικότητας των παθογόνων στα μυκητοκτόνα (Kohl et al., 2000), της αρνητικής επίπτωσης των μυκητοκτόνων στην ανάπτυξη των φυτών, των ορατών υπολειμμάτων στις επιφάνειες των φυτών (Henseler, 1981, Kohl et al., 2000) και των περιβαλλοντικών θεμάτων.

Η προστασία των φυτών από ασθένειες με έλεγχο του περιβάλλοντος γίνεται πολύ σημαντική, καθώς οι καταναλωτές επιθυμούν, είτε τρόφιμα απαλλαγμένα από υπολείμματα χημικών μυκητοκτόνων, είτε προϊόντα στα οποία δεν έχουν χρησιμοποιηθεί καθόλου μυκητοκτόνα. Επιπροσθέτως, η δημιουργία μιας ατμόσφαιρας, η οποία είναι λιγότερο ευνοϊκή για τις ασθένειες, θα μειώσει και την πίεση επιλογής για την ανάπτυξη ανθεκτικότητας των παθογόνων στα χημικά μυκητοκτόνα. Ένα εναέριο περιβάλλον, που εμποδίζει τη γρήγορη εξάπλωση και εγκατάσταση μιας ασθένειας, θα βοηθήσει στην επέκταση της χρήσιμης εμπορικής ζωής των φυτοπροστατευτικών προϊόντων.

Οι παράμετροι του μικροκλίματος έχουν αναγνωρισθεί από καιρό ως οι σημαντικότεροι παράγοντες στην εξάπλωση των μυκητολογικών ασθενειών και τη διαχείριση του κλίματος του θερμοκηπίου, για τον έλεγχο των ασθενειών. Οι

παράμετροι του μικροκλίματος του θερμοκηπίου, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η σχετική υγρασία, η θερμοκρασία των φύλλων, καθώς και, η διάρκεια διατήρησης της υγρασίας πάνω στο φύλλο επηρεάζουν την αύξηση και την ανάπτυξη των καλλιεργειών, καθώς και την ταχύτητα εξάπλωσης των ασθενειών που προκαλούνται από μύκητες, όπως ο βοτρυτής. Αυτό σημαίνει ότι, ο έλεγχος του περιβάλλοντος θα πρέπει να καθοριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η καλή ανταπόκριση του καλλιεργειών και ταυτόχρονα να αποφεύγονται οι ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη των ασθενειών.

Δεν είναι εύκολο να καθοριστεί η επιθυμητή η υγρασία που πρέπει να υπάρχει στον αέρα του θερμοκηπίου. Επίσης, είναι γνωστό, ότι υπάρχει μεγάλη παραλλακτικότητα σχετικής υγρασίας μέσα στο θερμοκήπιο, και ειδικά κοντά στο επιφανειακό στρώμα των καλλιεργειών, δηλαδή στις συνθήκες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της καλλιέργειας και των παθογόνων. Αν υποθέσουμε ότι οι τιμές ελλείμματος κορεσμού υδρατμών ανάμεσα στο 0,3 έως 1 kPa, δεν επηρεάζουν την ανάπτυξη της καλλιέργειας, το ερώτημα παραμένει ποιο είναι το επιθυμητό επίπεδο υγρασίας για τον έλεγχο του βοτρυτή. Είναι αποδεκτό από την πλειονότητα των ερευνητών ότι, η μόλυνση και εξάπλωση του βοτρυτή ευνοείται σε συνθήκες υψηλής υγρασίας. Πολλές διαφορετικές τιμές υγρασίας αναφέρονται στην βιβλιογραφία ως επιθυμητές. Ο Nederhoff (1997) και ο Langston (2001) προτείνουν ως ασφαλές μέτρο για την αποφυγή του βοτρυτή, τη διατήρηση της σχετικής υγρασίας κάτω από το 85%. Οι Zhang et al. (1997), σε ένα μη θερμαινόμενο θερμοκήπιο, χρησιμοποίησε ένα απλό κριτήριο: όταν η σχετική υγρασία είναι μεγαλύτερη του 90% υπάρχει διαθέσιμο νερό στην επιφάνεια των φυτών. Οι Korner και Challa (2003) περιόρισαν τη σχετική υγρασία σε ένα μέγιστο του 93% για ένα μέγιστο διάστημα 48 συνεχόμενων ωρών.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του βοτρυτή είναι η εξάρτηση του για βλάστηση και μόλυνση από τη διάρκεια της υγρασίας πάνω στα φύλλα των φυτών. Με στόχους την αποφυγή της ενθάρρυνσης του βοτρυτή με έλεγχο του περιβάλλοντος, τη μείωση της συμμετοχής των μυκητοκτόνων στα θερμοκήπια και τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από τη χρήση χαμηλού επιπέδου σχετικής υγρασίας δημιουργήθηκε ένα μοντέλο για να ρυθμίζει το άνοιγμα των παραθύρων των θερμαινόμενων θερμοκηπίων με βάση τη διάρκεια υγρασίας πάνω στα φύλλα

(Korner and Holst, 2005).

### **2.1.3.1 Ο Βοτρύτης**

Ο βοτρύτης είναι ένα ευρέως διαδεδομένο παθογόνο που προκαλεί σοβαρές απώλειες σε καλλιέργειες φρούτων, κηπευτικών, ανθοκομικών και γλαστρικών φυτών, και ειδικότερα σημαντικές σε θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Το παθογόνο προσβάλλει όλα τα υπέργεια φυτικά μέρη : άνθη, καρπούς, φύλλα, βλαστούς. Συνήθως, δεν προσβάλλει πράσινους υγιείς ιστούς, όπως φύλλα και βλαστούς, ακόμα και σε συνθήκες πολύ υψηλής σχετικής υγρασίας, εκτός αν υπάρχουν τραυματισμένες ή νεκρές περιοχές. Η διείσδυση πραγματοποιείται από πληγές και από ιστούς με χαμηλή αντίσταση, όπως πέταλα ανθέων (Kamoen, 2000, Elad και Yunis, 1993). Στα συμπτώματα περιλαμβάνονται καφέ κηλίδες, στίγματα, μαράνσεις και νέκρωση φυτικών μερών, με μεγάλο αριθμό σπορίων να αναπτύσσεται πάνω τους νεκρούς ιστούς. Μερικές φορές τα συμπτώματα εμφανίζονται μετά τη συγκομιδή, ως μετασυλλεκτική ασθένεια (ten Haven, 2007).

Ο κίνδυνος και η έκταση της μόλυνσης εξαρτώνται από δύο παράγοντες: πρώτα από τον αριθμό των σπορίων του μύκητα που βρίσκονται στο θερμοκήπιο και δευτερευόντως από τις συνθήκες του περιβάλλοντος (Nederhoff, 1997).

Στο περιβάλλον του θερμοκηπίου, τα κονίδια του βοτρύτη είναι πάντα παρόντα (Keressies, 1994) κι όταν οι συνθήκες είναι κατάλληλες κάποια σπόρια εγκαθίστανται και πολλαπλασιάζονται. Ειδικότερα, τα πληγωμένα φυτά ή τα παλιά φύλλα που βρίσκονται στο έδαφος του θερμοκηπίου αποτελούν πηγή για εκατομμύρια σπόρια βοτρύτη. Οι Boulard et al. (2008) θεωρώντας τη συγκέντρωση των κονιδίων του μύκητα ως ιδιαίτερο φυσικό μέγεθος, προσπάθησαν να προσδιορίσουν την προέλευση τους σε νεαρή θερμοκηπιακή καλλιέργεια τριανταφυλλιάς, δηλαδή αν προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου ή αν παράγονται στο εσωτερικό του. Τα αποτελέσματα τους έδειξαν ότι η προέλευση των μολυσμάτων είναι κυρίως εσωτερική, περίπου τα 2/3 της συνολικής ποσότητας των κονιδίων. Παρόλα αυτά, εξαιτίας του εξωτερικού κλίματος και των ανοιγμάτων των παραθύρων του θερμοκηπίου, η προέλευση μπορεί να ποικίλλει ευρέως από την μία περίοδο στην άλλη, με την τάση να γίνεται ολοένα και πιο εσωτερική καθώς αναπτύσσεται η καλλιέργεια.

Τα σπόρια του βοτρυτή περιέχουν πολύ λίγο νερό και χρειάζονται να απορρόφησαν νερό από το περιβάλλον για να βλαστήσουν. Αυτό εξηγεί γιατί η ασθένεια έχει συνδεθεί με την πολύ υψηλή σχετική υγρασία. Τα σπόρια βλαστάνουν καλά σε ελεύθερο νερό, ειδικά αν το νερό περιέχει θρεπτικά στοιχεία (σάκχαρα). Η συμπύκνωση των υδρατμών στα φύλλα των φυτών αποτελεί ευνοϊκό περιβάλλον για την βλάστηση των σπορίων (Horst and Nelson, 1997). Επιπλέον, μια ελάχιστη διάρκεια ύγρανσης των φύλλων μπορεί να ερεθίσει την αύξηση και την ανάπτυξη και μετά τη διείδυση του μύκητα. Έχει αναφερθεί ότι νεκρωτικές βλάβες του βοτρυτή συμβαίνουν στους βλαστούς και τα πέταλα των ανθέων, όταν η σχετική υγρασία είναι υψηλότερη από 95% (Kerssies, 1994).

Το ευνοϊκότερο εύρος θερμοκρασιών για μόλυνση είναι 10-20 °C, αλλά μολύνσεις μπορούν να συμβούν ακόμα και στους 2 °C και πάνω από τους 25 °C (Elad et al., 1989, Salinas et al. 1989). Παρόλα αυτά, τα σπόρια είναι ευαίσθητα στην αφυδάτωση και πεθαίνουν μετά από μακρά διάρκεια συνθηκών χαμηλής υγρασίας της τάξεως του 60% (Nederhoff, 1997), αλλά μετά από μικρές περιόδους αφυδάτωσης (μικρότερες των δύο ωρών) τα σπόρια συνεχίζουν να βλαστάνουν, όταν υγρανθεί πάλι η επιφάνεια του φύλλου (Nederhoff, 1997) και αυτή η επίδραση είναι σωρευτική (Eden et al., 1996). Τα σπόρια σχηματίζονται σε πολύ υψηλή σχετική υγρασία και θερμοκρασίες 15-25 °C είναι ιδανικές (Nederhoff, 1997), παρόλα αυτά, ο βοτρυτής μπορεί να αναπτυχθεί και σε χαμηλότερες ή υψηλότερες θερμοκρασίες.

Τα σπόρια του βοτρυτή απελευθερώνονται όταν οι προσβεβλημένοι φυτικοί ιστοί διαταραχθούν ή όταν η σχετική υγρασία αλλάζει απότομα, παραδείγματος χάριν το πρωί ή αργά το απόγευμα. Τα σπόρια μεταδίδονται με το ρεύμα του αέρα ή να παραμένουν άθικτα στα προσβεβλημένα φυτά.

Οι μολύνσεις των βλαστών είναι διαφορετικές. Οι βλαστοί των φυτών μπορεί να μολυνθούν είτε από εισβολή του μύκητα από ήδη μολυσμένους μίσχους και ποδίσκους ή από άμεση προσβολή των πληγών μετά από κλάδεμα και συγκομιδή (O'Neill et al., 1997). Οι φρέσκιες πληγές τροφοδοτούν με αρκετή υγρασία (φυτικούς χυμούς) τα σπόρια του μύκητα ώστε να γίνουν ικανά για βλάστηση. Η περαιτέρω ανάπτυξη της μόλυνσης του βλαστού ευνοείται από την υψηλή σχετική υγρασία, επειδή σε συνθήκες υψηλής σχετικής υγρασίας χρειάζεται περισσότερος

χρόνος για να στεγνώσουν οι πληγές (Nederhoff, 1997). Η μόλυνση του βλαστού από βοτρυτή μπορεί τελικά να περιβάλλει το βλαστό και να νεκρώσει ολόκληρο το φυτό προκαλώντας σημαντικές απώλειες παραγωγής (Jarvis, 1989, Yunis et al., 1990).

#### **2.1.4 Επιδράσεις στην ανάπτυξη**

Η ανάπτυξη των φυτών και των καλλιεργειών μπορεί να επηρεαστεί από την υγρασία, αν η υγρασία επηρεάσει είτε το λόγο της φυλλικής επιφάνειας ή το ρυθμό της καθαρής φωτοσύνθεσης. Τέτοιες επιδράσεις μπορεί να συμβούν σε υπερβολικές τιμές ατμοσφαιρικής υγρασίας πέραν του κανονικού εύρους (0,3 - 1 kPa) που απαντώνται στα θερμοκήπια. Για παράδειγμα πολύ χαμηλές υγρασίες (vrd μεγαλύτερο από 1 kPa) μπορούν να προκαλέσουν υδατικό stress των φύλλων, όταν υπάρχει καθυστέρηση ανάμεσα στην απορρόφηση του νερού από τις ρίζες και της διαπνοής από τα φύλλα. Ο Hoffman (1979) αναφέρει ότι η ανάπτυξη επηρεάζεται αρνητικά, όταν το έλλειμμα κορεσμού είναι πάνω από 1 kPa. Υπάρχει μικρή ή δεν υπάρχει καθόλου επίδραση της υγρασίας στην ανάπτυξη σε ελλείμματα κορεσμού 0,3 - 1 kPa (Grange and Hand, 1987). Ο Van de Sanden (1985) δεν βρήκαν καμία σημαντική επίδραση της υγρασίας στο εύρος 0,3 έως 1,2 kPa στην ανάπτυξη φυταρίων αγγουριού.

Αντίθετα, οι πολύ υψηλές υγρασίες μπορούν να έχουν καταστροφικές συνέπειες για πολλές καλλιέργειες, όπου οι επιπτώσεις στην ανάπτυξη συχνά ποικίλλουν. Για παράδειγμα οι Swalls και O' Leary (1975, 1976) αναφέρουν το ξηρό βάρος των φυτών που αναπτύχθηκαν σε θερμοκήπιο με υψηλή υγρασία μειώθηκε σημαντικά, αλλά το αντίθετο παρατηρήθηκε όταν αναπτύχθηκαν σε ελεγχόμενο περιβάλλον θαλάμων με παρόμοιες υγρασίες (Acock et al., 1976). Οι del Amor και Marcelis (2006) χρησιμοποιώντας φυτά τομάτας σε θαλάμους ελεγχόμενων συνθηκών βρήκαν ότι τα φυτά που αναπτύχθηκαν σε υψηλή υγρασία (vrd 0,13 kPa) παρουσίασαν μειωμένο ολικό ξηρό βάρος και μειωμένη φυλλική επιφάνεια. Μειωμένο μέγεθος φύλλων παρατήρησαν και οι Holder και Cockshull (1990) σε φυτά τομάτας που αναπτύχθηκαν στο θερμοκήπιο σε υψηλές υγρασίες (vrd 0,15 kPa). Οι Munholland et al. (2001), εκτός από μείωση στο μέγεθος των φύλλων, αναφέρουν και μειωμένο αριθμό φύλλων ανά φυτό τομάτας σε συνθήκες



αυξημένης υγρασίας (vpd 0,1 kPa). Μειωμένη ολική φυλλική επιφάνεια και μειωμένο ξηρό βάρος φύλλων στα χρυσάνθεμα σε συνθήκες αυξημένης υγρασίας (vpd 0,13 kPa) αναφέρουν οι Hand et al. (1996).

Οι Bakker et al. (1987) ερεύνησαν τις επιδράσεις διαφορετικών επιπέδων υγρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύχτας σε καλλιέργεια αγγουριάς. Τα επίπεδα του ελλείμματος κορεσμού κατά τη διάρκεια της ημέρας ήταν από 0,57 έως 0,91 kPa, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας 0,26 έως 0,66 kPa. Η βλαστική ανάπτυξη αυξήθηκε από την υψηλή υγρασία της ημέρας ή της νύχτας, αλλά η πρώιμη παραγωγή δεν επηρεάστηκε από τις διαφορετικές μεταχείρισης της υγρασίας.

Η υψηλή υγρασία εμφανίζεται να επηρεάζει τη μορφολογία των φυτών πιθανότατα μέσω της αλλαγής της ορμονικής τους ισορροπίας (Bakker, 1984). Οι επιδράσεις είναι μικρές εκτός αν η υγρασία είναι πολύ υψηλή (έλλειμμα κορεσμού μικρότερο από τα 0,2 kPa) για το μεγαλύτερο διάστημα της περιόδου ανάπτυξης. Οι Lipton (1970) και ο Acock (1980) αναφέρουν ότι η διατήρηση υψηλών υγρασιών έχει καταστροφικές επιδράσεις στην ανάπτυξη του υπέργειου τμήματος της τομάτας, προκαλώντας μειωμένη ανάπτυξη ή νέκρωση της κόμης, ζημιές στα φύλλα και ξυλοποίηση του βλαστού. Ο Bakker (1984) αναφέρει παρόμοιες ζημιές σε φυτάρια αγγουριού, με σποραδικό σχηματισμό ριζών στο βλαστό.

### **2.1.5 Επιδράσεις στη παραγωγή**

Η αναπαραγωγική ανάπτυξη των καλλιεργειών μπορεί να επηρεαστεί από την υγρασία. Στη τομάτα υπάρχει μικρή αλλά εμφανής άμεση επίδραση της υγρασίας στην ανάπτυξη των ανθέων, αλλά σημαντικές επιδράσεις στην επικονίαση έχουν παρατηρηθεί. Ο Picken (1984) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η επικονίαση επηρεάζεται μόνο όταν η υγρασία είναι εκτός του εύρους 0,2 - 1 kPa ελλείμματος κορεσμού. Παρόλα αυτά, αν η υγρασία είναι πολύ υψηλή τότε η γύρη είναι λιγότερο πιθανόν να εκτοξευθεί από τους ανθήρες και όταν το έλλειμμα κορεσμού είναι μεγαλύτερο από 1 kPa τότε υπάρχει ο κίνδυνος η γύρη να μην κολλήσει στο στίγμα.

Έτσι, οι Holder και Cockshull (1990) αναφέρουν ότι οι ταξικαρπίες που σχετίζονται με τα μικρότερα φύλλα (στα υψηλά επίπεδα υγρασίας) παρήγαγαν μικρότερους καρπούς και επομένως, μικρότερη παραγωγή συγκριτικά με της

επεμβάσεις με την χαμηλή υγρασία.

Εκτός των άλλων, η σχετική υγρασία στο χώρο του θερμοκηπίου επηρεάζει και την ποιότητα των παραγόμενων κηπευτικών όπως της τομάτας (Holder και Cockshull, 1990, Munholland et al. 2001, Xu et al., 2006) και του αγγουριού (Bakker, 1987, Fricke και Krug, 1997).

## 2.2 Μέθοδοι μείωσης της υγρασίας στο θερμοκήπιο

### 2.2.1 Αφύγρανση με εξαερισμό

Η συνήθης πρακτική, όταν επικρατεί πολύ υψηλή σχετική υγρασία μέσα στο θερμοκήπιο, είναι να πραγματοποιείται εξαερισμός. Στα θερμαινόμενα θερμοκήπια, ακόμα και με κρύο καιρό, όταν η σχετική υγρασία είναι υπερβολικά υψηλή μέσα στο θερμοκήπιο, είναι αναγκαίο να ανοιχτούν λίγο τα παράθυρα για μικρό χρονικό διάστημα. Έτσι, βγαίνει ο υγρός αέρας και αντικαθίσταται με τον εξωτερικό που λόγω της χαμηλότερης θερμοκρασίας έχει μικρότερη απόλυτη υγρασία. Όταν ο εξωτερικός αέρας ανακατευτεί με το θερμότερο εσωτερικό, αυξάνεται τη χωρητικότητα του σε υδρατμούς και μειώνεται στο σύνολο η σχετική υγρασία, έστω και αν χάνεται ένα ποσό θερμότητας, που όμως συμπληρώνεται από το σύστημα θέρμανσης. Όταν ο εξαερισμός εφαρμόζεται για ψύξη του θερμοκηπίου, δεν υπάρχει πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας, όταν όμως, χρησιμοποιείται θέρμανση, είναι προφανές ότι ο εξαερισμός από ενεργειακής άποψης αποτελεί σπατάλη ενέργειας, αφού ο υψηλής ενθαλπίας εσωτερικός αέρας αντικαθίσταται συνεχώς από χαμηλής ενθαλπίας εξωτερικό αέρα. Επομένως, κατά τη χειμερινή περίοδο και όταν απαιτείται θέρμανση, η αφύγρανση με εξαερισμό έχει ως συνέπεια την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας.

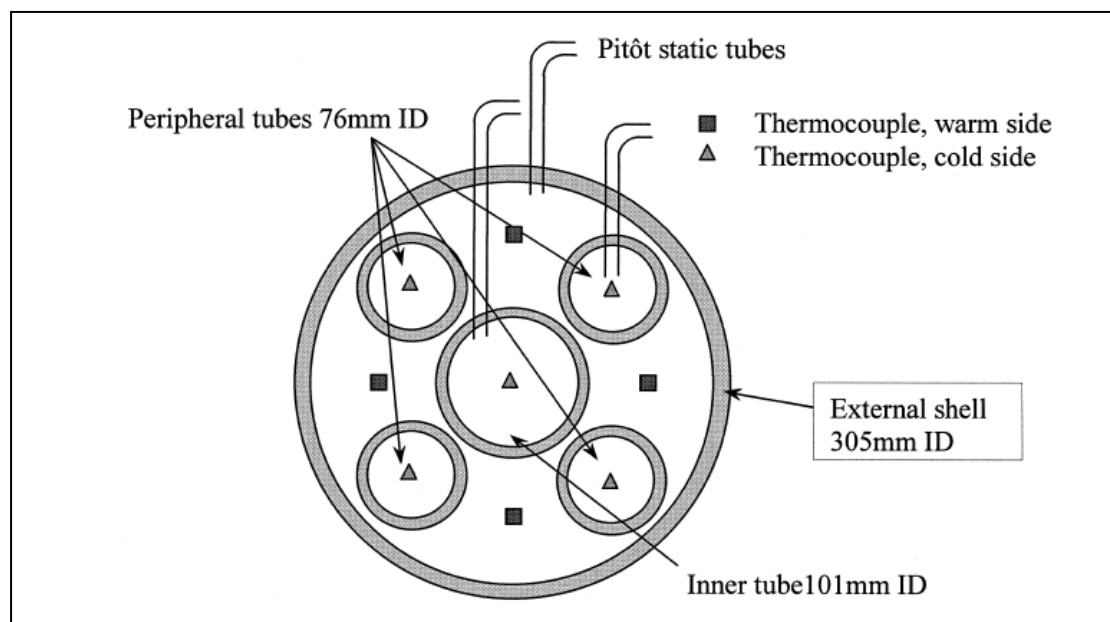
Στα σύγχρονα θερμοκήπια, τα συστήματα ελέγχου περιβάλλοντος διαθέτουν λειτουργίες για εξοικονόμηση ενέργειας με δυναμικό έλεγχο του περιβάλλοντος. Σε αυτές τις πρακτικές ο εξαερισμός του θερμοκηπίου μειώνεται στο ελάχιστο, με αποτέλεσμα η σχετική υγρασία στο εσωτερικό τους να φθάνει σε υψηλά επίπεδα (μέχρι και 100%), εξαιτίας της διαπνοής των φυτών. Αυτό σημαίνει ότι, ο έλεγχος της υγρασίας μπορεί να εξουδετερώσει την εξοικονόμηση ενέργειας από τη δυναμική ρύθμιση της θερμοκρασίας (Korner and Challa, 2003).

Ο De Zwart (1996) αναφέρει ότι ο έλεγχος της υγρασίας με τη παραπάνω μέθοδο αυξάνει το κόστος θέρμανσης κατά 20%, οι De Halleux και Gauthier (1998) αναφέρουν ότι η αύξηση αυτή κυμαίνεται από 12,6% - 18,4% ανάλογα με την ακολουθούμενη στρατηγική εξαερισμού ενώ, ο Campen (2009) αναφέρει ότι η απώλειες αισθητής θερμότητας αυξάνονται από 5% - 20,5% ανάλογα με την καλλιέργεια. Επομένως, ο έλεγχος της υγρασίας αποτελεί έναν περιοριστικό

παράγοντα της εξοικονόμησης ενέργειας στο θερμοκήπιο. Οι Kittas και Bartzanas (2007) μελετώντας την επίδραση του τύπου του ανοίγματος των παραθύρων, στην κατανάλωση ενέργειας, κατά την αφύγρανση του θερμοκηπίου με εξαερισμό και ταυτόχρονη θέρμανση, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, τα θερμοκήπια με τυλιγόμενο πλευρικό παράθυρο παρουσιάζουν μικρότερη κατανάλωση ενέργειας συγκριτικά με τα θερμοκήπια με άνοιγμα πλευρικών παραθύρων με οδοντωτό βραχίονα.

Με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας που δαπανάται κατά την αφύγρανση έχει μελετηθεί η χρήση του μηχανικού εξαερισμού σε συνδυασμό με κάποιο ανακτητή θερμότητας. Σε αυτή τη περίπτωση, ο εσωτερικός θερμός αέρας, εξερχόμενος αφήνει μέρος της θερμότητας του στον ψυχρό αέρα που εισέρχεται για να τον αντικαταστήσει. Έτσι, η θερμοκρασία του εισερχόμενου αέρα είναι σε θερμοκρασία ενδιάμεση αυτής του εξωτερικού και του εσωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Οι Albright και Behler (1984) δοκίμασαν ένα τέτοιο εναλλάκτη θερμότητας για τον έλεγχο της υγρασίας του θερμοκηπίου και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι περίπου το ένα τρίτο της ενθαλπίας θα μπορούσε να επανακτηθεί από τον αέρα του εξαερισμού. Οι De Halleux και Gauthier (1998) μελέτησαν με προσομοίωση αυτό το σύστημα και συμπέραναν ότι η χρήση ανακτητών θερμότητας θα μπορούσε να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας κατά 40-60%, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του εξαερισμού (on-off ή μηχανικό). Παρόλα αυτά, αυτή η εξοικονόμηση ενέργειας δεν δικαιολογούσε το κόστος του συγκεκριμένου εξοπλισμού. Η συνήθης απόδοση ενός ανακτητή αέρα-αέρα είναι της τάξεως του 40%. Σε πιο πρόσφατη μελέτη, ο Rousse et al. (2000) μελέτησαν μια μονάδα ανάκτησης θερμότητας στο Καναδά, η οποία αποτελούνταν από ένα σύστημα πολυαγωγού μέσα σε άλλο πλαστικό αγωγό (Εικόνα 2.1). Στους σωλήνες που αποτελούσαν τον πολυαγωγό κυκλοφορούσε ο εξωτερικός ψυχρός αέρας, ενώ στον εξωτερικό αγωγό που εσώκλεινε τον πολυαγωγό κυκλοφορούσε ο θερμός και υγρός του θερμοκηπίου. Το συνολικό μήκος του εναλλάκτη ήταν 24,3 m, και χρησιμοποιήθηκε για την αφύγρανση ενός θερμοκηπίου έκτασης 220 m<sup>2</sup>. Η μονάδα αυτή είχε απόδοση γύρω στο 80%. Μια ροή εξαερισμού με 0,9 αλλαγές (του όγκου του αέρα του θερμοκηπίου) ανά ώρα δεν ήταν αρκετή να αφυγράνει το θερμοκήπιο. Η απόδοση του συστήματος προσδιορίστηκε από το πηλίκο της

ανακτώμενης θερμικής ισχύος προς την καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύ του ανεμιστήρα και κυμάνθηκε ανάμεσα στο 1,4 και το 4,8 στη συγκεκριμένη μελέτη.



Σχήμα 2.1. Η σχηματική αναπαράσταση του ανακτητή θερμότητας που χρησιμοποίησαν οι Rouse et al. (2000), σε εγκάρσια τομή.

Τέλος, οι Campen et al. (2003) σε μία οικονομοτεχνική προσέγγιση αναφέρουν ότι η αφύγρανση του θερμοκηπίου με χρήση ανακτητή θερμότητας συγκριτικά με την κλασική μέθοδο αφύγρανσης μειώνει την κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση κατά 4,5% - 13%. Επομένως, τα συστήματα που μελετήθηκαν για την ανάκτηση θερμότητας είτε είχαν μικρή απόδοση, είτε παρουσίαζαν αδυναμία μείωσης της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο και το κόστος εγκατάστασης τους δεν δικαιολογούσε την επιτευχθείσα εξοικονόμηση ενέργειας.

Υπάρχουν τρεις εναλλακτικές μέθοδοι απομάκρυνσης της υγρασίας από τον αέρα: α. μέσω ψύξης του σε θερμοκρασία κάτω από το σημείο δρόσου, για να προκληθεί συμπύκνωση υδρατμών, β. μέσω της αλληλεπίδρασης του αέρα με κάποιο υγροσκοπικό υλικό, το οποίο απορροφά ή προσροφά την υγρασία από τον αέρα εξαιτίας της διαφοράς μερικής πίεσης υδρατμών ή γ. μέσω αύξησης της πίεσης του, ώστε στη δεδομένη θερμοκρασία του χώρου να προκληθεί συμπύκνωση υδρατμών. Η μέθοδος της αύξησης της πίεσης του αέρα ώστε να

προκληθεί συμπύκνωση υδρατμών σε αναλυτικές, επιστημονικές συσκευές η εφαρμογή της όμως για την αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου θεωρείται αντιοικονομική. Επομένως, οι μέθοδοι ενεργητικής μείωσης της υγρασίας, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο θερμοκήπιο, βασίζονται είτε στη μείωση της υγρασίας του αέρα μέσω της ψύξης του κάτω από το σημείο δρόσου, είτε στην υγροσκοπική απορρόφηση. Οι μέθοδοι αυτές απομακρύνουν την υπερβολική υγρασία από τον αέρα του θερμοκηπίου μετατρέποντας την λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών σε αισθητή.

### **2.2.2 Αφύγρανση με ψύξη**

Όταν ο αέρας έρχεται σε επαφή με μία επιφάνεια με θερμοκρασία κάτω από το σημείο δρόσου, η πλεονάζουσα απόλυτη υγρασία του συμπυκνώνεται στην επιφάνεια αυτή, έτσι, ο αέρας αφυγραίνεται. Το ποσό της υγρασίας, που απομακρύνεται, εξαρτάται από τη διαφορά απόλυτης υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου από την απόλυτη υγρασία στο σημείο δρόσου, το οποίο σημειωτέον δεν πρέπει να είναι χαμηλότερο των 0 °C, ώστε η συμπύκνωση να πραγματοποιείται σε υγρή μορφή. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος αφύγρανσης είναι η χρήση ψυχόμενων εναλλακτών. Αυτή η μέθοδος συνήθως περιλαμβάνει έναν εναλλάκτη σε ένα ρεύμα αέρα με ένα ψύχον μέσο να επανακυκλοφορεί μέσα στον εναλλάκτη σε μια θερμοκρασία κάτω από το σημείο δρόσου του αέρα. Το ποσό της υγρασίας, που απομακρύνεται, εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την υγρασία του αέρα, την θερμοκρασία του εναλλάκτη και την παροχή μάζας του διερχόμενου αέρα. Στα συνήθη χρησιμοποιούμενα ψυχόμενα μέσα περιλαμβάνονται το παγομένο νερό, και τα διαλύματα γλυκόλης. Όταν ο εναλλάκτης είναι ο εξατμιστής μιας αντλίας θερμότητας τότε η θερμοκρασία του καθορίζεται από το ψυκτικό ρευστό. Επειδή η θερμοκρασία του εναλλάκτη είναι κάτω από το σημείο δρόσου του αέρα, η υγρασία συμπυκνώνεται πάνω της, συλλέγεται σε ένα δοχείο και απομακρύνεται. Αυτό το νερό μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.

Συνήθως, η αφύγρανση του αέρα μέσω της ψύξης κάτω από το σημείο δρόσου διενεργείται από συμβατικά συστήματα συμπίεσης ατμού. Οι Boulard et al. (1989) και ο Chasseriaux (1987) χρησιμοποίησαν αντλία θερμότητας αέρα – αέρα

για την αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου, όπου ο υγρός αέρας του θερμοκηπίου περνούσε πρώτα από τον εξατμιστή της αντλίας, ψυχόταν και άφηνε ένα μέρος της υγρασίας του και στην συνέχεια μέσω του συμπυκνωτή της αντλίας διοχετευόταν στο χώρο του θερμοκηπίου σε υψηλότερη θερμοκρασία. Ο Chasseriaux (1987) προσπάθησε να αφυγράνει ένα θερμοκήπιο παραγωγής δρεπτών τριαντάφυλλων, με διπλό κάλυμμα πολυαιθυλενίου έκτασης 3000 m<sup>2</sup> με χρήση μιας αντλίας θερμότητας ηλεκτρικής ισχύος 2,8 kW. Η συγκεκριμένη αντλία θερμότητας μπορούσε να απομακρύνει περίπου 5 λίτρα νερού ανά ώρα. Αυτό όμως, δεν επαρκούσε για να βελτιώσει το περιβάλλον του θερμοκηπίου από πλευράς υγρασίας. Ομοίως, το περιβάλλον του θερμοκηπίου δεν επηρεάστηκε σημαντικά από μια παρόμοια αντλία θερμότητας ισχύος (2kW) που χρησιμοποιήθηκε σε ένα θερμοκήπιο 7,5 φορές μικρότερο από το πρώτο (400 m<sup>2</sup>) κατά τη διάρκεια της νύχτας (Boulard et al., 1989). Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση μειώθηκε η συμπύκνωση υδρατμών στο κάλυμμα.

Οι Campen και Bot, (2002) παρουσίασαν ένα σύστημα απομάκρυνσης υγρασίας από τον αέρα του θερμοκηπίου το οποίο βασιζόταν στη συμπύκνωση υδρατμών πάνω σε ψυχρούς πτερυγιοφόρους μεταλλικούς αγωγούς, οι οποίοι ψύχονταν από νερό χαμηλής θερμοκρασίας περίπου 5 °C. Οι σωλήνες διέτρεχαν όλο το μήκος του θερμοκηπίου και ήταν τοποθετημένοι κοντά στο κάτω μέρος της υδροροής, ο αέρας του θερμοκηπίου παθητικά ερχόταν σε επαφή με τους ψυχόμενους σωλήνες, ψυχόταν και άφηνε ένα μέρος της υγρασίας του. Στο θερμοκήπιο η επιθυμητή θερμοκρασία είχε οριστεί στους 20,5 °C και το σύστημα λειτουργούσε όταν το έλλειμμα υγρασίας του αέρα ήταν μικρότερο από 4 g kg<sup>-1</sup> (δηλαδή 75%). Για να επιτευχθεί ομοιομορφία της θερμοκρασίας κατά μήκος των πτερυγιοφόρων αγωγών η παροχή του νερού στο εσωτερικό τους ήταν μεγάλη (8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>). Παρόλα αυτά, η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου δεν ήταν δυνατόν να διατηρηθεί στο επιθυμητό επίπεδο, φθάνοντας το 90%. Το παραπάνω σύστημα σε θερμοκρασία αέρα θερμοκηπίου 20,5 °C και σχετική υγρασία 90% μπορούσε να απομακρύνει 36 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Η μελέτη του συστήματος έδειξε ότι το ποσοστό απομακρυνόμενης λανθάνουσας θερμότητας προς την ολική απομακρυνόμενη ενέργεια ήταν μικρότερη από το 50%, εξαρτώμενο από τη σχετική υγρασία μέσα στο θερμοκήπιο έτσι, η ολική απομακρυνόμενη ενέργεια από

θερμοκήπιο ήταν παραπάνω από τη διπλάσια ενέργεια που απαιτείται για τη αφύγρανση. Με τη χρήση αντλίας θερμότητας η λανθάνουσα και η αισθητή θερμότητα, που συλλέγονταν στην ψυχρή επιφάνεια, μπορούσαν να επανέλθουν στο θερμοκήπιο μαζί με την ισχύ που απαιτείται για τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας, όμως σε αυτή τη μελέτη δεν μελετήθηκε η δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας. Η εγκατάσταση του συστήματος αυτού προκαλούσε μείωση της έντασης του φωτός στο θερμοκήπιο της τάξεως του 3%. Οι Gao et al. (2011) μελέτησαν αυτό το σύστημα και το συνέκριναν με τη μέθοδο του δυναμικού εξαερισμού και με τη μέθοδο του εξαερισμού με ανακτητή θερμότητας, τελικά κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος αφύγρανσης με τους ψυχόμενους πτερυγιοφόρους αγωγούς ήταν λιγότερο ανταγωνιστική μέθοδος από τις άλλες μεθόδους κυρίως λόγω υψηλότερου ενεργειακού κόστους.

### **2.2.3 Αφύγρανση με Υγροσκοπική Απορρόφηση/Προσρόφηση**

Μία εναλλακτική μέθοδος μείωσης της υγρασίας του αέρα αποτελεί η απορρόφηση/προσρόφηση της υγρασίας από ένα στερεό ή ένα υγρό υγροσκοπικό υλικό. Τα υγροσκοπικά είναι υλικά που έχουν υψηλή συνάφεια με τους υδρατμούς (Jain and Bansal, 2007).

Η έρευνα σχετικά με την εφαρμογή της υγροσκοπικής αφύγρανσης του θερμοκηπίου είναι ελάχιστη (Campren et al., 2003). Οι Seginer and Kantz (1989) υπολογίζοντας την ισορροπία των υδρατμών για θερμοκήπιο με απλό ή διπλό κάλυμμα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σε μέσες καιρικές συνθήκες πλεονεκτούν από ενεργειακής άποψης οι αφυγραντές με υγροσκοπική απορρόφηση έναντι της ταυτόχρονης θέρμανσης και του εξαερισμού σε καλά μονωμένα θερμοκήπια. Οι Campren et al. (2003) χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο προσομοίωσης συγκρίνοντας διαφορετικές μεθόδους αφύγρανσης του αέρα του θερμοκηπίου κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η υγροσκοπική αφύγρανση έχει το πλεονέκτημα ότι η λανθάνουσα θερμότητα άμεσα μετατρέπεται σε αισθητή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση του θερμοκηπίου.

Η απομάκρυνση της υγρασίας από τον αέρα εξαρτάται από την διαφορά πίεσης υδρατμών που υπάρχει ανάμεσα στο υγροσκοπικό και στον αέρα. Η



απορρόφηση πάντα εκλύει θερμότητα που περιλαμβάνει τη λανθάνουσα θερμότητα των απορροφούμενων υδρατμών από το αφυγραντικό και μια πρόσθετη θερμότητα απορρόφησης που κυμαίνεται ανάμεσα στο 5% - 25% της λανθάνουσας (Jain and Bansal, 2007), αυτή η πρόσθετη θερμότητα ονομάζεται και διαφορική ενθαλπία διάλυσης (Conde, 2004). Αυτή η θερμότητα μεταφέρεται στο αφυγραντικό και στον αέρα. Η διαδικασία της έλξης και της συγκράτησης της υγρασίας περιγράφεται είτε ως προσρόφηση ή ως απορρόφηση, όπου η απορρόφηση οδηγεί σε μια χημική αλλαγή του αφυγραντικού, ενώ η προσρόφηση λαμβάνει χώρα μόνο στην επιφάνεια του αφυγραντικού, χωρίς καμία χημική αλλαγή. Τα περισσότερα απορροφητικά είναι υγρά, ενώ τα περισσότερα προσροφητικά είναι στέρεα. Τα πιο συνήθη απορροφητικά που χρησιμοποιούνται είναι τα υδατικά διαλύματα του LiCl, CaCl<sub>2</sub>, LiBr, και η τριαιθυλική γλυκόλη. Το διάλυμα αραιώνεται κατά την διαδικασία της αφύγρανσης, και απαιτείται να αναγεννηθεί πριν ξανάχρησιμοποιηθεί. Στα συνήθη στερεά υγροσκοπικά υλικά περιλαμβάνεται το silica gel και το molecular sieves. Τα υγροσκοπικά διαλύματα έχουν μικρότερη αφυγραντική ικανότητα συγκριτικά με τα στερεά υγροσκοπικά υλικά. Παρόλα αυτά, τα συστήματα που χρησιμοποιούν υγροσκοπικά διαλύματα παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα όπως η ευκολία χειρισμού, η χαμηλή πτώση πίεσης στις συσκευές αλληλεπίδρασης με τον αέρα και επιπλέον, απαιτούν χαμηλότερες θερμοκρασίες για την αναγέννηση τους (Factor and Grossman, 1980). Η αναγέννηση του διαλύματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση ηλιακής ενέργειας, απορριπτόμενης ενέργειας ή άλλης χαμηλής στάθμης πηγής θερμότητας (Liu et al., 2007b). Ο Yao (2010) μελέτησε τη χρήση υπερήχων για την αναγέννηση υγροσκοπικών υλικών και πέτυχε μέχρι και 45% εξοικονόμηση ενέργειας κατά την αναγέννηση τους.

Τα συστήματα κλιματισμού του αέρα με υγροσκοπικά διαλύματα αναπτύσσονται γρήγορα τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας των πλεονεκτημάτων τους στην αντιμετώπιση του φορτίου λανθάνουσας θερμότητας των κτιρίων, της θετικής τους επίδρασης στο περιβάλλον (μείωση εκπομπών αερίων του φαινομένου του «θερμοκηπίου», περιορισμός χλωριωμένων ψυκτικών ρευστών και μειωμένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας) (Moon et al., 2009) καθώς και στην βελτίωση της ποιότητας του αέρα μέσω της απομάκρυνσης ενός αριθμού ρυπαντών από τον αέρα (Liu et al., 2007b), της εντομοαπωθητικής τους δράσης (Jain and Bansal, 2007)

και της αδρανοποίησης αερομεταφερόμενων μυκήτων (Wang et al., 2011). Επιπροσθέτως, η καθαριστική τους δράση σε νοσοκομειακό περιβάλλον θεωρείται ότι μπορεί να μειώσει τα αερομεταφερόμενα βακτήρια και να απομακρύνει τα μικροσωματίδια (Χυ, 2010)

Εκτός από τη χαμηλή πίεση υδρατμών, τα υγροσκοπικά διαλύματα έχουν χαμηλό ιξώδες και καλά χαρακτηριστικά μεταφοράς θερμότητας. Η επιφανειακή τάση των αφυγραντικών διαλυμάτων είναι επίσης σημαντική, καθώς επηρεάζει άμεσα τη στατική συγκράτηση και διαβροχή της επιφάνειας επαφής αφυγραντικού-αέρα. Ουσιαστικά, τα συστήματα υγροσκοπικών διαλυμάτων αποτελούνται από έναν απορροφητή για την αφύγρανση του αέρα, έναν αναγεννητή για την αναγέννηση του διαλύματος και μεταλλάκτες θερμότητας για την πρόψυξη και προθέρμανση του υγροσκοπικού διαλύματος.

### **2.2.3.1 Εξοπλισμοί αλληλεπίδρασης υγροσκοπικών διαλυμάτων-αέρα**

Τα αφυγραντικά συστήματα χρησιμοποιούν εξοπλισμούς παρόμοιους με αυτούς της χημικής βιομηχανίας για αλληλεπιδράσεις υγρού-αερίου (συσκευασμένες στρώσεις, πύργους ψεκασμού και στήλες καθοδικής μεμβράνης). Αλλά, αυτοί οι μηχανισμοί είναι σχεδιασμένοι για μεγάλες ροές αέρα και χαμηλούς ρυθμούς ροής αφυγραντικού. Μια σημαντική απόφαση στο σχεδιασμό του εξοπλισμού επαφής (τόσο στον απορροφητή όσο και στον αναγεννητή) είναι ότι η πτώση πίεσης μέσω του απορροφητή πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, ενώ ταυτόχρονα να εξασφαλίζει μεγάλη επιφάνεια ανά μονάδα όγκου για επαφή ανάμεσα στον αέρα και το αφυγραντικό.

#### **Πύργοι Ψεκασμού**

Στον τύπο με ψεκασμό του υγρού αφυγραντικού η επίτευξη μεγάλων επιφανειών επαφής για μεταφορά θερμότητας και μάζας πραγματοποιείται με το διαχωρισμό του υγρού σε μικρές σταγόνες με τη βοήθεια μπεκ στο θάλαμο ψεκασμού. Αν και οι πύργοι ψεκασμού είναι γνωστοί για την απλότητα τους, τη χαμηλή πτώση πίεσης του αέρα, του χαμηλού κόστους και του συμπαγούς μεγέθους, η αποδοτικότητα τους στην απορρόφηση δεν είναι μεγάλη (Jain and Bansal, 2007).

### **Στήλη διαβρεχόμενου τοίχου**

Η στήλη διαβρεχόμενου τοίχου είναι ένας κατακόρυφος αγωγός ή πλάκα πάνω στο οποίο το υγροσκοπικό διάλυμα ρέει με τη βαρύτητα. Ο αέρας έρχεται σε επαφή με τη μεμβράνη του ρέοντος διαλύματος. Το διάλυμα ρέει ως μια λεπτή μεμβράνη πάνω στις κατακόρυφες επιφάνειες αποτελούμενες από αγωγούς ή πλάκες. Αυτές οι στήλες χαρακτηρίζονται από χαμηλή πτώση πίεσης, χαμηλό αρχικό κόστος και υψηλή επιφάνεια επαφής ανά μονάδα όγκου. Δυσκολία προκύπτει στην επίτευξη μιας λεπτής μεμβράνης πάνω σε ολόκληρη την επιφάνεια των μεγάλων πύργων (Jain and Bansal, 2007).

### **Πύργοι συσκευασμένων στρώσεων**

Αν και πολλά σχέδια υγροσκοπικών αφυγραντήρων είναι διαθέσιμα, η διαμόρφωση συμπιεσμένων πύργων έχει τύχει ιδιαίτερης προσοχής εξαιτίας της υψηλής της αποδοτικότητας (Moon et al., 2009). Οι πύργοι συσκευασμένων στρώσεων εξασφαλίζουν μεγάλες επιφάνειες επαφής του αφυγραντικού με τον αέρα. Αυτοί οι πύργοι είναι γνωστοί για τη συμπαγή κατασκευή τους, την μεγάλη αποδοτικότητα τους, τις μεγάλες επιφάνειες επαφής και την μεγάλη διάρκεια επαφής. Αυτοί οι πύργοι μπορεί να έχουν τυχαία ή δομημένη συσκευασία με διαφορετικά μεγέθη και υλικά όπως μέταλλα, πλαστικά, κεραμικά, ξύλο και άλλα. Οι τυχαίας συσκευασίας πύργοι εξασφαλίζουν μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής σε σχετικά μικρότερο όγκο, όμως η πτώση πίεσης μέσω της στοιβάδας είναι γενικώς υψηλή (Abdul-Wahab et al., 2004) και ο απαιτούμενος ρυθμός ροής του αφυγραντικού για καλή διαβροχή είναι μεγάλος (Patnaik et al., 1990). Οι περισσότεροι ερευνητές στο παρελθόν εστίαζαν στους πύργους με τυχαία κατανομή (Lazzarin et al., 1999, Fumo and Goswami, 2002). Παρόλα αυτά, οι πύργοι με δομημένη συσκευασία, όπως συμπιεσμένα τοιχώματα κυτταρίνης φαίνεται να κερδίζουν δημοφιλία εξαιτίας της μεγάλης τους επιφάνειας για μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα όγκου, ενώ διατηρούν χαμηλή πτώση πίεσης (Moon et al., 2009).

Τα πρόσφατα σχέδια χρησιμοποιούν δομημένη κατανομή με αντίθετη ή κάθετη διεύθυνση ροών αφυγραντικού-αέρα. Οι περισσότεροι ερευνητές μέχρι

τώρα διεξήγαγαν πειράματα με αντίθετης ροής συστήματα υγροσκοπικής αφύγρανσης διότι, οι αφυγραντήρες αντίθετης ροής παρουσιάζουν υψηλότερη αποτελεσματικότητα στη μεταφορά θερμότητας και μάζας συγκριτικά με τους αφυγραντήρες κάθετης ροής (Liu et al. 2006b) . Παρόλα αυτά, η διευθέτηση κάθετων ροών μπορεί να είναι πιο χρήσιμη για την βελτίωση της εγκατάστασης σε περιορισμένο χώρο και για καλύτερη διατήρηση στο πεδίο, καθώς μειώνει το ύψος του πύργου και ενσωματώνεται εύκολα στο αγωγό σύστημα. Ο κύριος περιορισμός είναι ότι το ύψος και το βάθος των πολύ καινούργιων συσκευασιών απαιτεί τροποποιήσεις στο αγωγό σύστημα. Πολλοί ερευνητές έχουν αναφέρει αυτή την διευθέτηση (Liu et al. 2006a, Liu et al., 2007), αλλά πολύ περιορισμένα δεδομένα πειραματικής λειτουργίας είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία για συστήματα υγροσκοπικών διαλυμάτων κάθετων ροών (Moon et al., 2009).

#### **2.2.4 Αφύγρανση με Υβριδικά συστήματα**

Η υγροσκοπική αφύγρανση παρουσιάζει πλεονεκτήματα στη μεταχείριση της λανθάνουσας θερμότητας, ευκολία στην αναγέννηση των χρησιμοποιούμενων υγροσκοπικών υλικών με την αξιοποίηση χαμηλής στάθμης ενέργεια, όπως ηλιακή ενέργεια και αποβαλλόμενη θερμότητα. Τα συμβατικά συστήματα συμπίεσης ατμού χαρακτηρίζονται από την υψηλή αποτελεσματικότητα στη μεταφορά θερμότητας, την συμπάγια του μεγέθους τους, την τεχνολογική τους αρτιότητα και την ευκολία στη λειτουργία (Dai et al., 2001). Παρόλα αυτά, παρουσιάζουν αδυναμίες όπως, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας, λόγω της αναγκαιότητας της βαθιάς ψύξης (κάτω από το σημείο δρόσου) για να είναι δυνατή η απομάκρυνση της λανθάνουσας θερμότητας.

Οι αφυγραντήρες υγροσκοπικών διαλυμάτων μπορούν να συνδυαστούν με συμβατικά συστήματα συμπίεσης ατμού για να επιτευχθεί καλύτερος χειρισμός της υγρασίας του αέρα σε κλιματιζόμενους χώρους και για τη βελτίωση της λειτουργίας των συστημάτων συμπίεσης ατμού. Για την μείωση της υγρασίας του αέρα σε βιομηχανικές, εμπορικές και οικιακές εγκαταστάσεις έχει ερευνηθεί η δυνατότητα αφύγρανσης του αέρα από υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν συστήματα υγροσκοπικής απορρόφησης και συστήματα συμπίεσης ατμού (αντλίες

θερμότητας). Οι συνδυασμοί που έχουν προταθεί διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τη διάταξη των συνδυαζόμενων συστημάτων λόγω διαφορετικών επιδιώξεων. Βασική επιδίωξη των υβριδικών συστημάτων είναι η αφύγρανση του αέρα, αλλά μπορεί να είναι και η ταυτόχρονη αφύγρανση και ψύξη του αέρα, που είναι απαραίτητη σε θερμά και υγρά κλίματα. Από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας οι διατάξεις των υβριδικών συστημάτων μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες. Στη πρώτη ομάδα η αφύγρανση του αέρα πραγματοποιείται μόνο από το υγροσκοπικό σύστημα, ο εξατμιστής της αντλίας θερμότητας χρησιμοποιείται για να ψύχει το υγροσκοπικό διάλυμα ώστε να διατηρείται διαφορά πίεσης υδρατμών ανάμεσα στο υγροσκοπικό υλικό και τον αέρα, αν η διαφορά θερμοκρασίας είναι μεγάλη ο αφυγραμένος αέρας θα έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από τον εισερχόμενο στο σύστημα και έτσι επιτυγχάνεται και ψύξη. Ο συμπυκνωτής χρησιμοποιείται για θερμαίνει το υγροσκοπικό διάλυμα ώστε να διευκολύνεται η αναγέννηση του (Jain and Bansal, 2007). Ένα τέτοιο σύστημα προτάθηκε για την αφύγρανση του θερμοκηπίου αλλά χωρίς να δοθούν πληροφορίες για το είδος του υγροσκοπικού διαλύματος που χρησιμοποιούσε ούτε για τη συγκέντρωση του (Assaf, 1986). Στην δεύτερη κατηγορία ο στόχος είναι η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από την αντλία θερμότητας για την επίτευξη ταυτόχρονης αφύγρανσης και ψύξης. Ο αέρας αρχικά αφυγραίνεται από το υγροσκοπικό διάλυμα και συνέχεια περνά από τον εξατμιστή της αντλίας όπου ψύχεται και τελικά εισέρχεται στον κλιματιζόμενο χώρο (Dai et al., 2001).

Επιπλέον, η κλασική μέθοδος αφύγρανσης του θερμοκηπίου με εξαερισμό και θέρμανση όσο και η μέθοδος του μηχανικού εξαερισμού με ανακτητή θερμότητας, προϋποθέτουν ότι το θερμοκήπιο διαθέτει κάποιο σύστημα θέρμανσης. Αν πραγματοποιηθεί εξαερισμός για την αφύγρανση του θερμοκηπίου και δε λειτουργήσει το σύστημα θέρμανσης, θα μειωθεί γρήγορα η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Σε αυτή την περίπτωση, ενώ θα μειωθεί η απόλυτη υγρασία του χώρου, η σχετική υγρασία δεν είναι βέβαιο ότι θα μειωθεί με τον εξαερισμό.

Το άνοιγμα των παραθύρων τη νύχτα σε μη θερμαινόμενα θερμοκήπια καλυμμένα με κοινό πολυαιθυλένιο, μπορεί να έχει ευνοϊκά αποτελέσματα, όταν η

θερμοκρασία των φυτών συμβαίνει να είναι χαμηλότερη από αυτήν του εξωτερικού αέρα. Αυτό συμβαίνει συχνά την άνοιξη τις νύχτες με καθαρό ουρανό.

Στις μεσογειακές χώρες, όπως η Ελλάδα, τα περισσότερα θερμοκήπια είναι πολύ απλές κατασκευές καλυμμένες με πολυαιθυλένιο και χωρίς συστήματα θέρμανσης, άρα η αφύγρανση με εξαερισμό δεν είναι σίγουρο ότι θα μειώσει επαρκώς τα επίπεδα υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Ο έλεγχος του περιβάλλοντος ουσιαστικά επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές εξαερισμού για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και της υγρασίας ο οποίος απέχει πολύ από τον ιδανικό και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εξωτερικές συνθήκες. Όμως, το πρόβλημα της υψηλής υγρασίας δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με την παραπάνω μέθοδο σε θερμοκήπια που δεν διαθέτουν κάποιο σύστημα θέρμανσης. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ένα μεγάλο ποσοστό των ελληνικών θερμοκηπίων δεν διαθέτει κάποιο σύστημα θέρμανσης και έτσι, οι καλλιεργητές για να αποφύγουν τις φυτασθένειες, χρησιμοποιούν χημικά (φυτοφάρμακα) για τον περιορισμό και την αντιμετώπιση τους. Επιπλέον, στα μη θερμαινόμενα θερμοκήπια η μείωση της σχετικής υγρασίας του αέρα μέσω της συμπύκνωσης υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος των θερμοκηπίων είναι μικρότερη από τα θερμαινόμενα, εξαιτίας της μικρής διαφοράς θερμοκρασίας αέρα θερμοκηπίου και καλύμματος. Επιπροσθέτως, μείωση της υγρασίας στο θερμοκήπιο μέσω των διαφυγών του αέρα είναι επίσης μικρή στα μη θερμαινόμενα θερμοκήπια εξαιτίας της μικρής διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού εξωτερικού αέρα. Άρα, είναι απαραίτητη η εφαρμογή μιας ενεργητικής μεθόδου μείωσης της υγρασίας του αέρα μέσα στα θερμοκήπια αυτά.

Από την μία λοιπόν, η αναγκαιότητα της μείωσης του κόστους αφύγρανσης των σύγχρονων θερμοκηπίων και από την άλλη η απαίτηση εξεύρεσης μιας οικονομικής μεθόδου αφύγρανσης των μη θερμαινόμενων θερμοκηπίων καθιστά επιτακτική την αναζήτηση μεθόδων ενεργητικής αφύγρανσης στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, οι οποίες θα είναι ενεργειακά φιλικότερες συγκριτικά με την κλασική μέθοδο αφύγρανσης. Έτσι, κερδίζουν έδαφος οι ενεργητικές μέθοδοι μείωσης της σχετικής υγρασίας, που βασίζονται στην μετατροπή της λανθάνουσας θερμότητας των υδρατμών του αέρα του θερμοκηπίου σε αισθητή. Η αισθητή θερμότητα, που παράγεται με αυτές τις μεθόδους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για την

θέρμανση του θερμοκηπίου ή να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση. Έτσι η αρχή είναι εφαρμόσιμη σε περιόδους όπου απαιτείται ή δεν απαιτείται θέρμανση αλλά χρειάζεται αφύγρανση.

### **2.3 Στόχοι της διατριβής**

Οι αβεβαιότητες που προκύπτουν από τις πρόσφατες μεγάλες αλλαγές στο κόστος της ενέργειας, η απαίτηση για μείωση των εκπομπών ρύπων και η ανάγκη για μείωση του κόστους παραγωγής των θερμοκηπιακών προϊόντων επιβάλλει την υιοθέτηση στρατηγικών μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας στα θερμοκήπια. Στα πλαίσια αυτά, η μείωση του κόστους αφύγρανσης του θερμοκηπίου αποτελεί ένα ερευνητικό πεδίο υψηλού ενδιαφέροντος.

Οι **στόχοι της παρούσας διατριβής** οριοθετούνται ως ακολούθως:

Α) Δημιουργία ενός απλού μοντέλου ισοζυγίου υδρατμών στο θερμοκήπιο από το οποίο θα υπολογίζεται ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το θερμοκήπιο ώστε τα επίπεδα της υγρασίας να διατηρούνται εντός των επιθυμητών ορίων.

Β) Μελέτη της αφύγρανσης του θερμοκηπίου με τη χρήση αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα.

Γ) Διερεύνηση της δυνατότητας αφύγρανσης του θερμοκηπίου με υγροσκοπικά υλικά.

Δ) Ανάπτυξη ενός υβριδικού συστήματος αντλίας θερμότητας υγροσκοπικού υλικού για την αφύγρανση του θερμοκηπίου.

Ε) Μελέτη της επίδρασης της ανεξέλεγκτης και ελεγχόμενης σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στην ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών, καθώς και η αξιολόγηση της έντασης προσβολής των φυτών από Βοτρύτη.

### **3. Υλικά και Μέθοδοι**



### 3.1 Το θερμοκήπιο

Τα πειράματα διενεργήθηκαν σε τοξωτό θερμοκήπιο, 126 m<sup>2</sup> με κάλυμμα πολυαιθυλενίου, του εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Ο προσανατολισμός του θερμοκηπίου ήταν Ανατολή-Δύση. Το θερμοκήπιο χωρίστηκε σε δύο ίσα διαμερίσματα. Έτσι, το κάθε διαμέρισμα είχε έκταση 63 και όγκο 135 m<sup>3</sup> το καθένα. Τα πειράματα διενεργήθηκαν σε δύο χρονιές, δηλαδή, από τον Οκτώβριο του 2006 έως τον Απρίλιο του 2007 και από τον Οκτώβριο του 2007 έως τον Μάρτιο του 2008 (δηλαδή κατά τη διάρκεια της ψυχρής περιόδου του έτους). Στα θερμοκήπια αναπτύχθηκε καλλιέργεια αγγουριάς. Τα δύο θερμοκήπια δεν ήταν πλήρως θερμαινόμενα αλλά, υπήρχε προστασία των φυτών από τις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία στο εσωτερικό τους δεν αφέθηκε να πέσει κάτω από τους 8 °C, με δύο όμοια συνδεδεμένα αερόθερμα που λειτουργούσαν ταυτόχρονα.



Εικόνα 3.1. Εξωτερική άποψη του πειραματικού θερμοκηπίου.

Στο ένα θερμοκήπιο, που χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας, κατά τη διάρκεια της ημέρας άνοιγαν τα παράθυρα για την ρύθμιση της θερμοκρασίας, ενώ κατά τη

διάρκεια της νύχτας τα παράθυρα παρέμεναν κλειστά χωρίς να ακολουθείται κάποια μέθοδος μείωσης της υγρασίας. Το άλλο θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή συστημάτων ενεργητικής μείωσης της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του. Τα συστήματα που δοκιμάστηκαν ήταν α. αντλία θερμότητας αέρα – αέρα, β. σύστημα αφύγρανσης με υγροσκοπικό διάλυμα  $\text{CaCl}_2$  και γ. υβριδικό σύστημα αφύγρανσης με τον συνδυασμό της αντλίας θερμότητας με το υγροσκοπικό διάλυμα  $\text{CaCl}_2$ . Η αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου πραγματοποιούνταν κατά τη διάρκεια της νύχτας (κλειστά παράθυρα) και όταν η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου περνούσε το όριο το 80%.

### **3.2 Μετρήσεις περιβαλλοντικών παραμέτρων θερμοκηπίου**

Η θερμοκρασία στο χώρο των θερμοκηπίων και του εξωτερικού περιβάλλοντος μετρούνταν με θερμοζεύγη χαλκού-κωνσταντάνης (0,2 mm, διακριτικής ικανότητας 0,01 °C και ακρίβειας 0,1 °C), τα οποία είχαν τοποθετηθεί μέσα σε αεριζόμενο κλωβό στο κέντρο του κάθε θερμοκηπίου και σε ύψος 1,5 m από το έδαφος. Στον ίδιο κλωβό είχαν τοποθετηθεί και αισθητήρες μέτρησης της σχετικής υγρασίας (Thermometriks, NA 1015) ακρίβειας ±3%. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του καλύμματος τοποθετήθηκαν στην εσωτερική του επιφάνεια και σε ύψος 2 m από το έδαφος θερμοζεύγη χαλκού-κωνσταντάνης (0,1 mm, διακριτικής ικανότητας 0,01 °C και ακρίβειας 0,1 °C), ίδια θερμοζεύγη χρησιμοποιήθηκαν και για τη μέτρηση της θερμοκρασίας των φύλλων, όπου τοποθετήθηκαν στην κάτω επιφάνεια τους. Σε κάθε θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκαν τρία θερμοζεύγη για την μέτρηση της θερμοκρασίας του καλύμματος και άλλα τρία θερμοζεύγη για τη μέτρηση της θερμοκρασίας φύλλων. Η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία εσωτερικά και εξωτερικά από τα θερμοκήπια καταγράφονταν με τη βοήθεια πυρανομέτρων (CM 3, KIPP & ZONEN, Holland). Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου έξω από τα θερμοκήπια καταγράφονταν με τη χρήση αισθητήρα (A100R, Vector). Κάθε λεπτό οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων καταγράφονταν σε καταγραφικό σύστημα (DL 2e, Delta-T Devices, England).

### 3.3 Μετρήσεις ισοζυγίου υδρατμών θερμοκηπίου

Για να υπολογιστεί το ισοζύγιο υδρατμών του θερμοκηπίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε διαφορετικά εύρη ελλείμματος κορεσμού υδρατμών και με διαφορετικούς ρυθμούς εξατμοσσοδιαπνοής. Για τον προσδιορισμό των διαφυγών του αέρα του θερμοκηπίου ( $q$ ) προς το εξωτερικό περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του ρυθμού μείωσης της συγκέντρωσης του  $N_2O$ , που μετρούνταν με τη βοήθεια αναλυτή αερίων (model 7000, ADC gas analyser, με μέγιστη συγκέντρωση μέτρησης τα 200 ppm, και ακρίβεια  $\pm 5$  ppm).



Εικόνα 3.2. Μέτρηση μετεωρολογικών παραμέτρων α) σε αεριζόμενο κλωβό μέσα στο θερμοκήπιο και β) σε ιστό έξω από το θερμοκήπιο.

Κάθε πρωί καταγράφονταν η ποσότητα των συμπυκνωμένων υδρατμών στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος κατά τη διάρκεια της νύχτας με τη λήψη τεσσάρων δειγμάτων, δύο σε κάθε πλευρά του θερμοκηπίου, με τη χρησιμοποίηση απορροφητικού χαρτιού συγκεκριμένων διαστάσεων για τη συλλογή του συμπυκνωμένου νερού στο κάλυμμα. Για την αποφυγή της κατακρήμνισης ποσότητας συμπυκνωμένου νερού από τις θέσεις δειγματοληψίας, οι θέσεις δειγματοληψίας προστατεύονταν με οριζόντιους πήχεις σιλικόνης. Στο θερμοκήπιο στο οποίο η υγρασία δεν επιτρεπόταν να ξεπεράσει το όριο του 80% καταγράφονταν και η ποσότητα του αφαιρούμενου νερού από τα συστήματα αφύγρανσης.

Για την απλοποίηση της μελέτης, το ισοζύγιο υδρατμών κατά τη διάρκεια της νύχτας θα παρουσιαστεί χωριστά από το ισοζύγιο υδρατμών κατά τη διάρκεια της

ημέρας. Το ισοζύγιο υδρατμών κατά τη διάρκεια της νύχτας θα υπολογιστεί για χειμωνιάτικες νύχτες (06/12/2007, 12/12/2007, 13/12/2007, 14/12/2007, 17/12/2007, 18/12/2007 και 20/12/2007) και για ανοιξιάτικες νύχτες (14 – 22/05/2008). Το ισοζύγιο υδρατμών κατά τη διάρκεια της ημέρας θα υπολογιστεί μόνο για ψυχρές ημέρες με χαμηλή ένταση ακτινοβολίας που τα παράθυρα παρέμεναν κλειστά (30/11/2007, 05/12/2007 και 17/12/2007), η μέση εξωτερική θερμοκρασία ημέρας ήταν 11,4 °C και η μέση εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου 76 W m<sup>-2</sup>.



Εικόνα 3.3. Άποψη α) του αεροθέρμου θερμοκηπίου και β) του καταγραφικού συστήματος

### 3.4 Αντλία Θερμότητας

Για τον έλεγχο της υγρασίας στο θερμοκήπιο χρησιμοποιήθηκε μια αντλία θερμότητας αέρα-αέρα, με ισχύ συμπιεστή 1,6 kW και μέγιστη παροχή αέρα 2100 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, και με ψυκτικό ρευστό της αντλίας το R404A. Η αντλία θερμότητας ξεκινούσε τη λειτουργία της όταν η σχετική υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου περνούσε το όριο του 80%. Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας της αντλίας θερμότητας. Ο αέρας του θερμοκηπίου εξαναγκάζεται, με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα, να περάσει από τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας (FRIGA-BOHN, διατομής 38cm\*67cm), όπου η υγρασία του αέρα συμπυκνώνεται και έτσι μειωνόταν η σχετική υγρασία, ενώ η αντίστοιχη αισθητή και η λανθάνουσα θερμότητα αποδιδόταν πάλι στο χώρο του θερμοκηπίου ως αισθητή μέσω της μονάδας συμπιεστή-συμπυκνωτή (διατομής 44cm\*40cm, εταιρείας L'UNITE HERMETIQUE) της αντλίας.



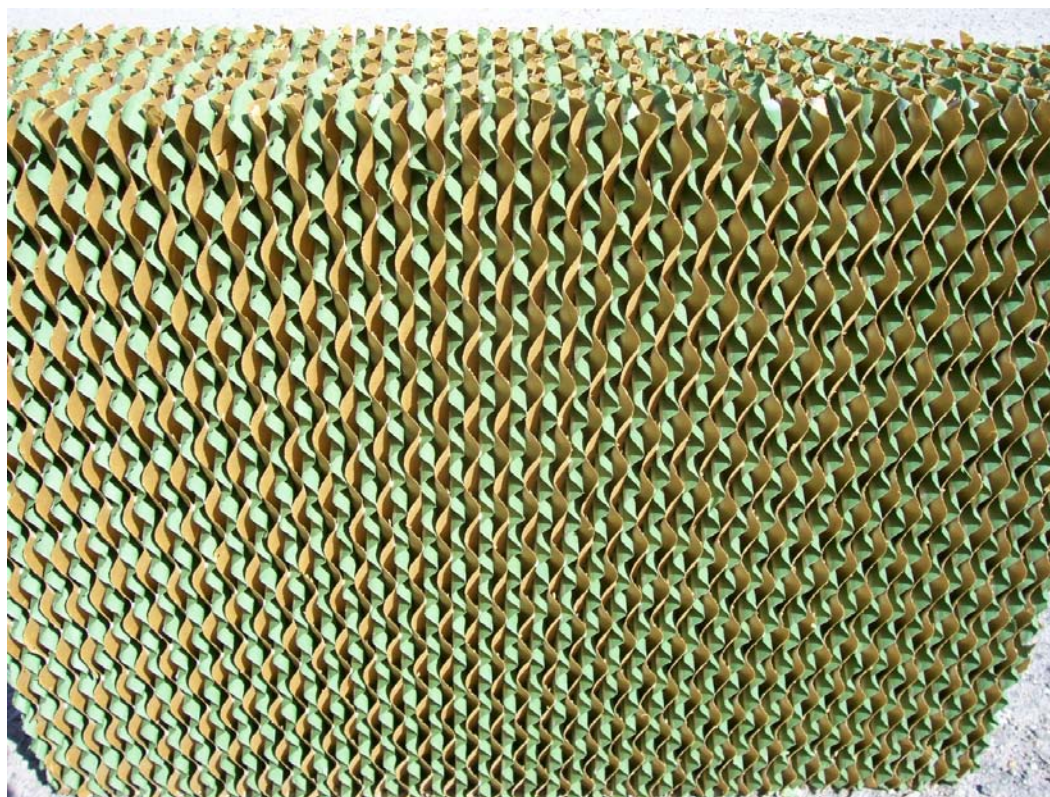
Εικόνα 3.4. Άποψη της αντλίας θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε για την αφύγρανση του θερμοκηπίου.

Όμοια θερμοζεύγη με αυτά μετρούταν η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του ξηρού και υγρού βολβού μετά τη διέλευση του αέρα από τον εξατμιστή της αντλίας και της θερμοκρασίας ξηρού βολβού μετά από τη διέλευση του αέρα από τον συμπυκνωτή της αντλίας. Τέλος, όμοια θερμοζεύγη χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση της θερμοκρασίας των διαφόρων σημείων του κυκλώματος της αντλίας, προκειμένου να γίνουν στην συνέχεια υπολογισμοί των κύκλων της αντλίας θερμότητας με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος CoolPack. Στην αντλία θερμότητας είχαν τοποθετηθεί και μανόμετρα για μέτρηση της πίεσης εξάτμισης και συμπύκνωσης. Από τους κύκλους, που εκτιμήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος CoolPack, θα παρουσιαστούν στο κεφάλαιο 5.3, ενδεικτικά, οι κύκλοι λειτουργίας για δύο επίπεδα θερμοκρασίας ( $11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $18,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) λειτουργίας της αντλίας θερμότητας. Αρχικά, εκτιμήθηκαν η ειδική ψυκτική και θερμική ισχύς, καθώς και, το ειδικό μηχανικό έργο του κύκλου της αντλίας. Κατόπιν, ήταν δυνατή η εκτίμηση της παροχής του ψυκτικού ρευστού στο κύκλωμα της αντλίας, η μηχανική ισχύς και ο ολικός βαθμός απόδοσης. Τελικά, προσδιορίστηκαν οι συντελεστές θερμικής και

ψυκτικής συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας και συγκρίθηκαν με αντίστοιχους συντελεστές που προσδιορίστηκαν από τη καταγραφή της απορροούμενης ισχύος και των μετρήσεων διαφορών ενθαλπίας του αέρα. Η κατανάλωση ενέργειας από την αντλία θερμότητας και η ποσότητα του νερού, που συμπυκνωνόταν στον εξατμιστή της αντλίας, συλλεγόταν σε ένα δοχείο και μετρούταν στο τέλος κάθε δοκιμής.

### 3.5 Υγροσκοπικό Σύστημα

Χρησιμοποιήθηκε υγροσκοπικό διάλυμα  $\text{CaCl}_2$  το οποίο παρασκευαζόταν μετά από διάλυσης στερεού  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (SOLVAY CASO®, Italy) σε νερό. Για την αύξηση της επιφάνειας επαφής και αλληλεπίδρασης του υγροσκοπικού διαλύματος με τον αέρα του θερμοκηπίου χρησιμοποιήθηκε αυλακωτό, άκαμπτο τοίχωμα από συμπιεσμένη κυτταρίνη και με σταθερή δομή. Το ύψος (H), το πλάτος (L) και το πάχος (Z) του τοιχώματος ήταν 0,4 m, 0,6 m και 0,1 m, αντίστοιχα, ενώ η ειδική του επιφάνεια ( $A_d$ ) ήταν  $396 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ .



Εικόνα 3.5. Άποψη τοιχώματος από συμπιεσμένη κυτταρίνη που χρησιμοποιήθηκε για την αύξηση της επιφάνειας αλληλεπίδρασης υγροσκοπικού διαλύματος και αέρα.

Το διάλυμα του  $\text{CaCl}_2$  ήταν τοποθετημένο σε ένα πλαστικό δοχείο συνολικής χωρητικότητας 50 l στο οποίο προσαρμόστηκε αλφαδολάστιχο για τον έλεγχο της στάθμης. Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση της στάθμης ως προς τον περιεχόμενο όγκο διαλύματος. Με την βοήθεια μιας μικρής αντλίας (50 W) το διάλυμα του  $\text{CaCl}_2$  διοχετευόταν στο πάνω μέρος του τοιχώματος, έρεε προς τα κάτω λόγω της βαρύτητας και επέστρεφε στο δοχείο μαζί με τους υδρατμούς που είχε απορροφήσει, ενώ ο αέρας του θερμοκηπίου με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα (100 W) αναγκάζοταν να περάσει μέσα από το τοίχωμα και να αφήσει ένα μέρος της υγρασίας του. Η παροχή του διαλύματος στο τοίχωμα ήταν 4,5 l/min. Το σύστημα δοκιμάστηκε για 24 νύχτες. Το προηγούμενο απόγευμα πριν κάθε δοκιμή στο δοχείο του  $\text{CaCl}_2$  παρασκευαζόταν διάλυμα με συγκέντρωση 54%, με το οποίο λειτουργούσε το σύστημα κατά τη διάρκεια της νύχτας. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι στο θερμοκρασιακό εύρος που απαντάται συνήθως στο θερμοκήπιο το όριο διαλυτοποίησης του  $\text{CaCl}_2$  είναι 54% (Conde, 2004). Το επόμενο πρωί μετρούταν η στάθμη του διαλύματος και προσδιοριζόταν ο τελικός του όγκος καθώς επίσης και η πυκνότητα του διαλύματος ( $\rho_{sol}$ ). Από την πυκνότητα του διαλύματος ( $\rho_{sol}$ ) προσδιοριζόταν η συγκέντρωση του ( $\xi$ ) από τη σχέση:

$$\xi = 1,012 * \rho_{sol} - 0,998, \quad R^2 = 0,9952 \quad (3.1)$$

Έτσι ως συγκέντρωση λειτουργίας θεωρείτο ο μέσος όρος της αρχικής και τελικής τιμής της συγκέντρωσης. Από τη συγκέντρωση του διαλύματος προσδιοριζόταν το ισοδύναμο ειδικής υγρασίας του διαλύματος κατά Conde (2004).

Ο ανεμιστήρας τροφοδοτούταν μέσω ενός inverter, το οποίο μπορούσε να ρυθμίζει την συχνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος άρα τη ταχύτητα περιστροφής του ανεμιστήρα. Χρησιμοποιήθηκαν 4 διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής και για κάθε μία μετρήθηκε η ταχύτητα με την οποία περνούσε ο αέρας του θερμοκηπίου από το τοίχωμα του  $\text{CaCl}_2$  με τη βοήθεια ενός ανεμομέτρου θερμαινόμενου νήματος (Lutron, AM-4204) και συγκλίνοντα αγωγού.

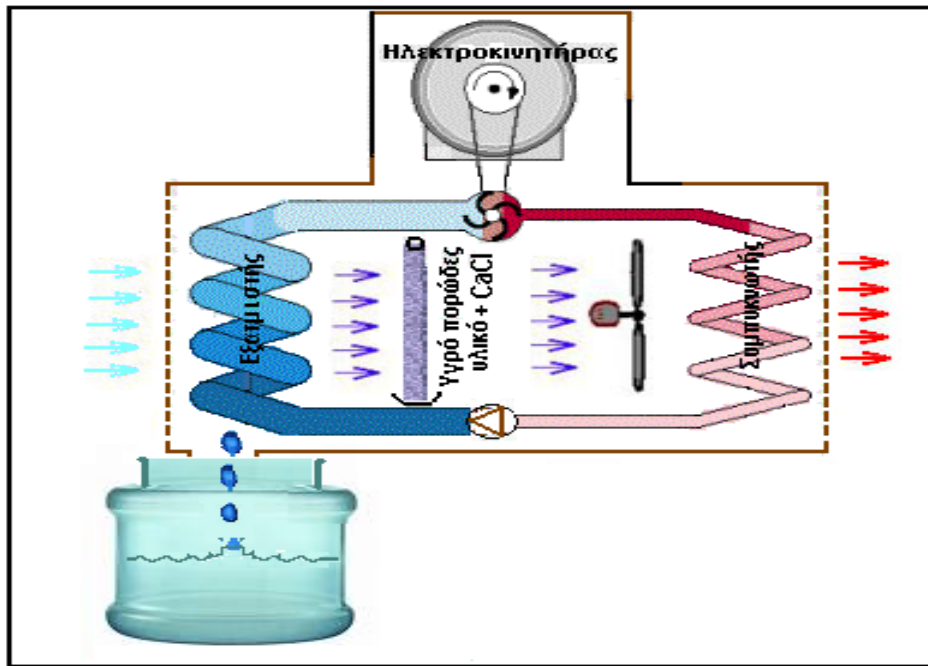
Η θερμοκρασία αέρα ξηρού και υγρού βολβού πριν και μετά από το τοίχωμα του  $\text{CaCl}_2$  καθώς και η θερμοκρασία του διαλύματος μετρούνταν με θερμοζεύγη χαλκού-κονσταντάνης (0,2 mm).

### 3.6 Υβριδικό σύστημα αφύγρανσης

Το δοκιμαζόμενο υβριδικό σύστημα αφύγρανσης αποτελούνταν από μια αντλία θερμότητας αέρα-αέρα, με ισχύ συμπιεστή 1,6 kW και σύστημα υγροσκοπικού διαλύματος  $\text{CaCl}_2$ . Η αντλία θερμότητας λειτουργούσε με ψυκτικό ρευστό το R404A, εξατμιστή FRIGA-BOHN (διατομής 38cm\*67cm) και συμπυκνωτή L'UNITE HERMETIQUE (διατομής 44cm\*40cm). Ανάμεσα στον εξατμιστή και τον συμπυκνωτή της αντλίας θερμότητας παρεμβαλλόταν αυλακωτό, άκαμπτο τοίχωμα από συμπιεσμένη κυτταρίνη και με σταθερή δομή το οποίο αποτελούσε την επιφάνεια επαφής και αλληλεπίδρασης του υγροσκοπικού διαλύματος με τον αέρα. Το ύψος (H), το πλάτος (L) και το πάχος (Z) του τοιχώματος ήταν 0,4 m, 0,6 m και 0,1 m, αντίστοιχα, ενώ η ειδική του επιφάνεια ( $A_d$ ) ήταν  $396 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Το υγροσκοπικό διάλυμα του  $\text{CaCl}_2$  ήταν τοποθετημένο σε ένα πλαστικό δοχείο συνολικής χωρητικότητας 50 l στο οποίο προσαρμόστηκε αλφαδολάστιχο για τον έλεγχο της στάθμης. Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση της στάθμης ως προς τον περιεχόμενο όγκο διαλύματος.

Με την βοήθεια μιας μικρής αντλίας (100W) το διάλυμα του  $\text{CaCl}_2$  διοχετευόταν στο πάνω μέρος του τοιχώματος, έρεε προς τα κάτω λόγω της βαρύτητας και επέστρεφε στο δοχείο μαζί με τους υδρατμούς που είχε απορροφήσει, ενώ ο αέρας του θερμοκηπίου με τη βοήθεια του ανεμιστήρα της αντλίας θερμότητας αναγκαζόταν να περάσει αρχικά από τον εξατμιστή της αντλίας, στη συνέχεια από το τοίχωμα του υγροσκοπικού διαλύματος και τελικά από τον συμπυκνωτή της αντλίας.





Σχήμα 3.1 Σχηματική αναπαράσταση προτεινόμενου υβριδικού συστήματος αφύγρανσης θερμοκηπίου.

### 3.7 Καλλιέργεια

Για τη καλλιέργεια χρησιμοποιήθηκαν σπορόφυτα υβριδίου αγγουριάς (PREVELLI F1), τα οποία μεταφτεύθηκαν στα θερμοκήπια στις 10/10/2007. Κατά τη μεταφύτευση τα φυτά ήταν ομοιόμορφης ανάπτυξης, είχαν αναπτύξει 4 πραγματικά φύλλα. Η μεταφύτευση πραγματοποιήθηκε σε γραμμές φύτευσης 66x75 cm. Τα φυτά κλαδεύτηκαν ώστε να σχηματίσουν ένα βλαστό, ο οποίος υποστυλώθηκε με σχοινί σε εγκατεστημένο οριζόντιο σύρμα πάνω από τις γραμμές των φυτών σε ύψος 2 m. Ο έλεγχος της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στο ένα από τα δύο διαμερίσματα του θερμοκηπίου, ξεκίνησε ένα μήνα μετά τη φύτευση των φυτών, δηλαδή στις 20/11/2007.

Σε έντεκα (11) τυχαία επιλεγμένα φυτά ανά θερμοκήπιο προσδιορίστηκε το ύψος των φυτών, ο αριθμός των φύλλων, το μέσο μήκος και πλάτος των φύλλων σε επτά (7) διαφορετικές ημερομηνίες από την έναρξη λειτουργίας της αφύγρανσης. Μέσω προγράμματος Η/Υ προσδιορίστηκε το εμβαδόν φύλλων γνωστών διαστάσεων (μήκος, πλάτος) και έτσι υπολογίστηκε η εξίσωση που δίνει το εμβαδόν του φύλλου συναρτήσει των διαστάσεων του. Έτσι, γνωρίζοντας την εξίσωση, το μέσο μήκος και πλάτος, και τον αριθμό των φύλλων ανά φυτό ήταν δυνατή η

εκτίμηση της φυλλικής επιφάνειας κάθε φυτού. Στα ίδια παραπάνω έντεκα φυτά προσδιορίστηκε και η παραγωγή τους κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, μέσω της μέτρησης του αριθμού των παραγόμενων καρπών ανά φυτό και του βάρους του κάθε καρπού. Για την ανάλυση των δεδομένων της ανάπτυξης και της παραγωγής των φυτών χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, και πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου Statistica version 7.0.



Εικόνα 3.6. Άποψη των φυτών της καλλιέργειας αγγουριάς στο θερμοκήπιο του πειράματος

### **3.8 Τεχνητές μολύνσεις**

Κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας πραγματοποιήθηκε και συγκριτική αξιολόγηση της έντασης της προσβολής των φυτών από το βοτρύτη, ανάμεσα στο θερμοκήπιο με υψηλή σχετική υγρασία και σε αυτό που η σχετική υγρασία του αέρα ελεγχόταν με αφύγρανση με τα παραπάνω δοκιμαζόμενα συστήματα. Η συγκριτική αξιολόγηση της έντασης προσβολής πραγματοποιήθηκε μέσω τεχνητών μολύνσεων σε καρπούς αγγουριάς, κοντά στην απόληξη του άνθους του καρπού, με μυκήλιο καλλιέργειας βοτρύτη σε PDA, ύστερα από τραυματισμό του καρπού. Στις 23/01/07 και στις 16/02/07 πραγματοποιήθηκαν τεχνητές μολύνσεις στα δύο

θερμοκήπια, στο θερμοκήπιο, στο οποίο πραγματοποιούνταν αφύγρανση, η σχετική υγρασία του αέρα δεν αφηνόταν να ξεπεράσει το όριο του 80%. Επιπλέον, στις 10/03/07 πραγματοποιήθηκαν τεχνητές μολύνσεις, ενώ το όριο της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο, στο οποίο πραγματοποιούνταν αφύγρανση, ήταν 90%. Σε κάθε ομάδα τεχνητών μολύνσεων οι τεχνητές μολύνσεις γίνονταν σε 11 καρπούς από το κάθε θερμοκήπιο.



Εικόνα 3.7. Τεχνητές μολύνσεις στην απόληξη του άνθους σε νεαρούς καρπούς αγγουριάς.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στην ταχύτητα εξάπλωσης του βοτρυτή σε καρπούς αγγουριάς, πραγματοποιήθηκαν τεχνητές μολύνσεις (06/12/07) και στη συνέχεια οι μολυσμένοι καρποί κλείστηκαν σε σακούλα, η οποία είχε διαβρεχτεί εσωτερικά ώστε να δημιουργεί αέρα σχετικής υγρασίας 100%. Οι σακούλες ανοίχθηκαν 7 ημέρες αργότερα (13/12/07) και μετρήθηκε το ποσοστό της προσβολής ως μήκος προσβολής προς συνολικό μήκος καρπού. Η μέτρηση του ποσοστού της προσβολής επαναλήφθηκε 11 και 15 ημέρες μετά τις τεχνητές μολύνσεις.



Εικόνα 3.8. Τεχνητές μολύνσεις και κλείσιμο καρπών μέσα σε σακούλα ώστε να προχωρήσει η προσβολή.

Για τον έλεγχο των διαφορών ανάμεσα στις τεχνητές μολύνσεις στο θερμοκήπιο στο οποίο γινόταν αφύγρανση και στις τεχνητές μολύνσεις του θερμοκηπίου χωρίς αφύγρανση χρησιμοποιήθηκε η προσημική δοκιμασία.

## 4. Θεωρητική Ανάλυση

## 4.1 Ισοζύγιο υδρατμών θερμοκηπίου

Πριν την ανάπτυξη του οποιουδήποτε συστήματος μείωσης της υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου πρέπει να καθοριστεί ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το θερμοκήπιο ώστε τα επίπεδα της υγρασίας να διατηρούνται εντός των επιθυμητών ορίων.

Ο επιθυμητός ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το θερμοκήπιο μπορεί να προσδιοριστεί, όταν ληφθούν υπόψη οι διαδικασίες, που καθορίζουν την ισορροπία των υδρατμών του θερμοκηπίου. Αυτό απαιτεί μια μαθηματική περιγραφή της αλληλεπίδρασης της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας με το μικροκλίμα του θερμοκηπίου, καθώς και των διαδικασιών συμπύκνωσης υδρατμών και εξαερισμού.

Η διαπνοή της καλλιέργειας μπορεί να μετρηθεί με αρκετή ακρίβεια μέσω της μεθόδου της ενεργειακής ισορροπίας. Στα απλά ενεργειακά μοντέλα χρησιμοποιούνται σχέσεις που συνδέουν την εξωτερική ακτινοβολία με την διαπνοή, ενώ πιο πρόσφατα ενσωματώθηκαν η ενέργεια από το σύστημα θέρμανσης και η ανάπτυξη των φυτών (Jolliet et al., 1991).

Τα πιο σύνθετα μοντέλα διαπνοής βασίζονται στη διαπνοή της καλλιέργειας και στην ενεργειακή ισορροπία του φύλλου στα οποία η διαπνοή χαρακτηρίζεται από την αντίσταση της κόμης (Stanghellini και De Jong, 1995, Jolliet, 1994, Seginer et al., 1990, Boulard et al., 1989). Για τον ακριβή υπολογισμό της διαπνοής απαιτείται ακριβής μέτρηση ή υπολογισμός της θερμοκρασίας του φύλλου, της αντίστασης των φύλλων (στοματικής και επιφανειακής), της αντίστασης του αέρα στη διάχυση των υδρατμών και του δείκτη φυλλικής επιφάνειας.

Οι περισσότερες εργασίες, που έχουν ασχοληθεί με τη μελέτη του ισοζυγίου υδρατμών του θερμοκηπίου, έχουν πραγματοποιηθεί σε υδροπονικά καλλιεργούμενα θερμοκήπια. Στα θερμοκήπια αυτά το έδαφος του θερμοκηπίου απομονώνεται από το εναέριο περιβάλλον με κάλυψη συνήθως με φύλλο πολυαιθυλενίου και η καλλιέργεια αναπτύσσεται σε πλαστικούς σάκους υποστρωμάτων. Έτσι, στις μελέτες αυτές η εξάτμιση από το έδαφος ή από τις οπές

των σάκων θεωρείται αμελητέα (Stanghellini και De Jong, 1995, Jolliet, 1994). Παρόλα αυτά, έχουν αναφερθεί σφάλματα μέχρι 50% σε υπολογισμένη διαπνοή καλλιέργειας (Seginer, 1984). Οι Boulard et al., (1989) υπολόγισαν την εξάτμιση από τα ανοίγματα των σάκων του υποστρώματος και βρήκαν ότι η εξάτμιση αυτή αποτελεί περίπου το 32% της συνολικής εξατμισοδιαπνοής. Επιπλέον, αναφέρουν ότι ο προσδιορισμός της διαπνοής, κατά τη διάρκεια της νύχτας, μέσω της άμεσης μέτρησης της θερμοκρασίας των φυτών δεν ήταν τόσο ακριβής ( $R^2=0,61$ ), και ότι ένα σφάλμα της τάξεως των  $\pm 0,1$  °C στη μέτρηση της θερμοκρασίας των φυτών προκαλεί σφάλμα στον προσδιορισμό της διαπνοής της τάξεως των  $2,5 \text{ W m}^{-2}$  τη στιγμή που η μέση συνολική διαπνοή υπολογίστηκε στα  $10 \text{ W m}^{-2}$ .

Στην πλειονότητα των ελληνικών θερμοκηπίων η καλλιέργεια πραγματοποιείται στο έδαφος και δεν εφαρμόζεται κάλυψη του εδάφους. Έτσι, η συνεισφορά της εξάτμισης από το έδαφος στην εξατμισοδιαπνοή είναι μεγαλύτερη στα ελληνικά θερμοκήπια συγκριτικά με τα θερμοκήπια των βόρειων χωρών. Επομένως, ο προσδιορισμός της εξατμισοδιαπνοής μέσω της θερμοκρασίας των φύλλων ή της μεθόδου της ενεργειακής ισορροπίας καθίσταται δύσκολος και επισφαλής.

Ο Bakker (1986) έδειξε πειραματικά ότι η διαπνοή της καλλιέργειας μπορεί να προσδιοριστεί από τις ροές των κύριων απωλειών υδρατμών του θερμοκηπίου (συμπύκνωση, εξαερισμός). Στη διατριβή αυτή, από την ισορροπία αυτών των ροών (απωλειών), θα αναπτυχθεί ένα θεωρητικό μοντέλο υγρασίας του θερμοκηπίου και η πειραματική του επιβεβαίωση.

Η υγρασία στον αέρα του θερμοκηπίου προκύπτει εξαιτίας της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας ( $E_{ev}$ ), δηλαδή από το άθροισμα των υδρατμών από τη διαπνοή των φύλλων της καλλιέργειας ( $E_{tr}$ ) και της εξάτμισης από το έδαφος του θερμοκηπίου ( $E_s$ ):

$$E_{ev} = E_{tr} + E_s \quad [\text{g m}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (4.1.1)$$

Το νερό που αφαιρείται από το έδαφος του θερμοκηπίου με την εξατμισοδιαπνοή  $E_{ev}$ , όταν τα παράθυρα είναι κλειστά, συμπυκνώνεται κυρίως στο κάλυμμα του θερμοκηπίου  $E_{con}$ , διαφεύγει στο εξωτερικό περιβάλλον  $E_{inf}$ ,

αφαιρείται από το σύστημα αφύγρανσης  $E_{deh}$  ή μεταβάλλει την συγκέντρωση των υδρατμών στον αέρα του θερμοκηπίου  $dE$ :

$$E_{ev} = E_{con} + E_{inf} + E_{deh} + dE \quad [g \ m^{-2}s^{-1}] \quad (4.1.2)$$

Στην περίπτωση που δεν εφαρμόζεται κάποια μέθοδος αφύγρανσης στο χώρο του θερμοκηπίου τότε η παράμετρος  $E_{deh}$  είναι μηδενική.

Η διαπνοή της καλλιέργειας υπολογίζεται συναρτήσει της καθαρής ακτινοβολίας ( $R_n$ ) που είναι διαθέσιμη στη καλλιέργεια και από την διαφορά της απόλυτης υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου ( $x_a$ ) από την απόλυτη υγρασία στον κορεσμό ( $x_a^*$ ) από την παρακάτω σχέση (Stanghellini και De Jong, 1995):

$$E_{trans} = \frac{\frac{\epsilon r_b R_n}{\lambda} + 2LAI(x_a^* - x_a)}{(1 + \epsilon)r_b + r_s} \quad [g \ m^{-2}s^{-1}] \quad (4.1.3)$$

Όπου  $\epsilon$ : ο λόγος της λανθάνουσας θερμότητας του αέρα προς τη αισθητή στον κορεσμό

$r_b$ : η αντίσταση του επιφανειακού στρώματος του φύλλου

$r_s$ : η αντίσταση των στοματίων του φύλλου

LAI: ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας

$\lambda$ : η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού

Η συμπύκνωση υδρατμών στο κάλυμμα του θερμοκηπίου εξαρτάται από την αγωγιμότητα μεταφοράς μάζας ( $g_{con}$ ) και την διαφορά της απόλυτης υγρασίας στο κορεσμό στη θερμοκρασία του καλύμματος από την υφιστάμενη απόλυτη υγρασία, και υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_{con} = g_{con}(x_a - x_{cl}) \quad [g \ m^{-2}s^{-1}] \quad (4.1.4)$$

Η αγωγιμότητα μεταφοράς μάζας ( $g_{con}$ ) μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια από τον συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h_{con}$ , μέσω της σχέσης:



$$g_{\text{con}} = \frac{h_{\text{con}}}{\rho_a * C_p * Le} \quad [\text{m s}^{-1}] \quad (4.1.5)$$

Στην οποία  $h_{\text{con}}$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή, σε  $\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\rho_a$  είναι η πυκνότητα του αέρα σε  $\text{kg m}^{-3}$ ,  $C_p$  είναι η ειδική θερμότητα του αέρα, σε  $\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , και  $Le$  είναι ο αριθμός Lewis, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$Le = \left(\frac{\alpha}{D}\right)^{0,66} \quad (4.1.6)$$

Όπου  $\alpha$  η θερμική διαχυτικότητα που υπολογίζεται σε  $2,216 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  και  $D$  ο συντελεστής διάχυσης σε  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Υπάρχουν αρκετές μελέτες που αναφέρονται στον προσδιορισμό το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή στην εσωτερική πλευρά το καλύμματος του θερμοκηπίου συναρτήσει της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στο κάλυμμα και τον αέρα του θερμοκηπίου. Οι περισσότερες σχέσεις που έχουν προταθεί για τον προσδιορισμό του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή ( $h_{\text{con}}$ ) είναι της μορφής:

$$h_{\text{con}} = \frac{A_{\text{cl}}}{A_g} * c * (T_a - T_{\text{cl}})^{1/3} \quad [\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}] \quad (4.1.7)$$

Επειδή η επίδραση της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στο κάλυμμα και τον αέρα στη σχέση (4.1.7) είναι σχετικά μικρή (Stanghellini και De Jong, 1995), η τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή ( $h_{\text{con}}$ ) μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερή. Έτσι, ο Jolliet (1994) αναφέρει ότι, η τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή μπορεί να θεωρηθεί ίση με  $3,5 * A_c / A_g$ .

Οι διαφυγές των υδρατμών στο εξωτερικό περιβάλλον εξαρτώνται από την αγωγιμότητα των διαφυγών και την διαφορά της απόλυτης υγρασίας του εξωτερικού αέρα από την απόλυτη υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου, και υπολογίζονται από την σχέση:

$$E_{\text{inf}} = g_{\text{inf}}(x_a - x_o) \quad [\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}] \quad (4.1.8)$$

Η αγωγιμότητα των διαφυγών  $g_{inf}$  προσδιορίζεται από ρυθμό ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου  $q$  ( $m^3 s^{-1}$ ) και την έκταση του θερμοκηπίου  $A_g$  ως εξής:

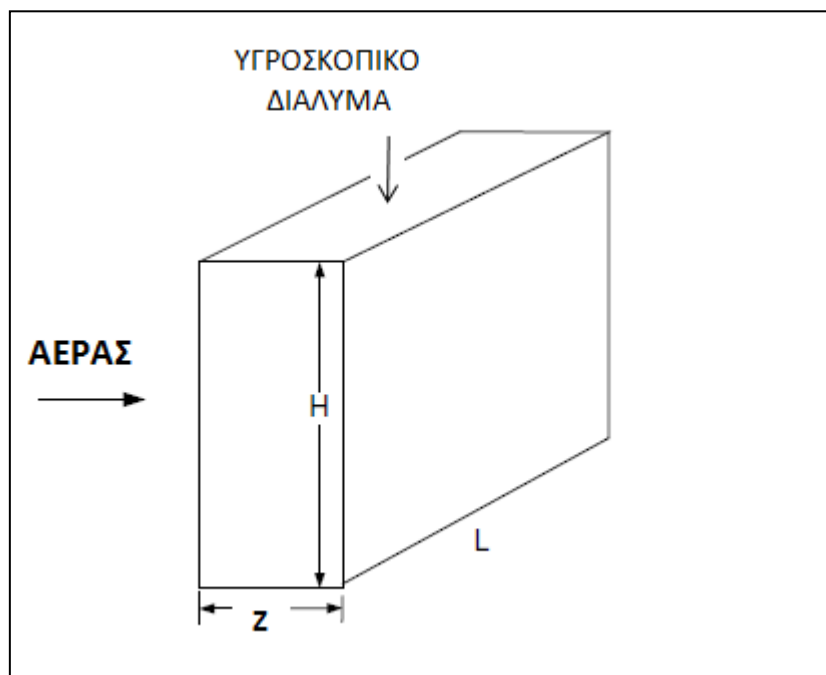
$$g_{inf} = \frac{q}{A_g} \quad [m s^{-1}] \quad (4.1.9)$$

Ο ρυθμός εξαερισμού  $q$  ( $m^3 s^{-1}$ ) μπορεί να προσδιοριστεί με τη χρήση κάποιου ανιχνευτικού αερίου, όπως το  $N_2O$  (Bartzanas et al., 2004).

## 4.2 Υγροσκοπική Απορρόφηση

Η μεταφορά θερμότητας και μάζας στους συσκευασμένους αφυγραντήρες επηρεάζεται από πολλές παράμετρος, όπως η σχετική κατεύθυνση ροής του αέρα και του αφυγραντικού, ο τύπος και το υλικό συσκευασίας καθώς και οι παράμετροι του εισερχόμενου αέρα και του αφυγραντικού. Η διαδικασία αφύγρανσης είναι τόσο πολύπλοκη που η καθαρά θεωρητική μελέτη συχνά αποτυγχάνει να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα (Liu et al., 2006b). Έτσι, πολλές πειραματικές μελέτες έχουν διεξαχθεί.

Σε αφυγραντήρες κάθετων ροών, τα ρεύματα του αέρα και του υγρού υγροσκοπικού διαλύματος συναντώνται και στη συνέχεια ένα μέρος της υγρασίας του αέρα μεταφέρεται στην υγρή φάση (Σχήμα 4.1). Συνεπώς, αφήνουν τον αφυγραντήρα με ξηρότερο τον αέρα και αραιωμένο το υγροσκοπικό διάλυμα. Στην υγροσκοπική απορρόφηση των υδρατμών του αέρα του θερμοκηπίου, ο αέρας διέρχεται μέσα από το υγρό τοίχωμα του διαλύματος του  $\text{CaCl}_2$ , και χάνει ένα μέρος της υγρασίας τους. Η λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών που απελευθερώνεται αυξάνει την θερμοκρασία του διαλύματος του  $\text{CaCl}_2$  και του αέρα.



Σχήμα 4.1. Σχηματική διάταξη αφυγραντήρα υγροσκοπικής απορρόφησης κάθετων ροών.

Η παραδοχή που χρησιμοποιείται στην παρακάτω ανάλυση είναι ότι η παροχή

του διαλύματος δεν επηρεάζεται από την απορροφούμενη ποσότητα υδρατμών.

Η απόδοση μεταφοράς μάζας του αφυγραντήρα αποτιμάται με όρους ρυθμού απομάκρυνσης υδρατμών και με την αποτελεσματικότητα του υγρασίας ή ενθαλπίας του αφυγραντήρα (Liu et al., 2006). Ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών,  $dm$ , υπολογίζεται από την σχέση (4.2.1). Η αποτελεσματικότητα υγρασίας του αφυγραντήρα,  $\eta_m$ , ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής αλλαγής στην ειδική υγρασία του αέρα περνώντας μέσα από τον αφυγραντήρα προς τη μέγιστη δυνατή διαφορά στην ειδική υγρασία του αέρα κάτω από ιδανικές συνθήκες, όπως δείχνει η σχέση (4.2.2).

$$dm = m_a(X_{a,in} - X_{a,out}) \quad [g s^{-1}] \quad (4.2.1)$$

$$\eta_m = \frac{(X_{a,in} - X_{a,out})}{(X_{a,in} - X_{int})} \quad (4.2.2)$$

Για έναν μονωμένο απορροφητή υγρασίας, η μέγιστη δυνατή διαφορά στην ειδική υγρασία του αέρα επιτυγχάνεται όταν ο αέρας, που εγκαταλείπει τον αφυγραντήρα, βρίσκεται στο ισοδύναμο ειδικής υγρασίας με το διάλυμα του αφυγραντικού. Το ισοδύναμο ειδικής υγρασίας του διαλύματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία του ( $T_{sol}$ ) και την συγκέντρωση του ( $\xi$ ). Όσο υψηλότερη είναι η συγκέντρωση του και όσο χαμηλότερη η θερμοκρασία του, τόσο περισσότερη υγρασία απορροφά.

Οι παράμετροι του αέρα και του διαλύματος εξόδου μπορούν να προκύψουν από γνωστές παραμέτρους του αέρα και του διαλύματος εισόδου, αφού προσδιοριστούν η αποτελεσματικότητα ενθαλπίας και υγρασίας. Λόγω της πολυπλοκότητας των συνδιασμένων διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας και μάζας, η αποτελεσματικότητα μπορεί να αποδοθεί με βάση επαρκή πειραματικά δεδομένα.

Αντίστοιχα με την αποτελεσματικότητα υγρασίας, ορίζεται και η αποτελεσματικότητα ενθαλπίας από τη σχέση:

$$\eta_h = \frac{(h_{a,in} - h_{a,out})}{(h_{a,in} - h_{int})} \quad (4.2.3)$$

Με βάση το παραπάνω ορισμό της αποτελεσματικότητας και για γνωστές παραμέτρους του εισερχόμενου αέρα και του εισερχόμενου διαλύματος, μπορούν να υπολογιστούν η ενθαλπία και η ειδική υγρασία του αέρα που εξέρχεται από τον αφυγραντήρα, ως ακολούθως:

$$h_{a,out} = (1 - \eta_h) * h_{a,in} + \eta_h h_{int} \quad [\text{kJ kg}^{-1}] \quad (4.2.4)$$

$$X_{a,out} = (1 - \eta_m) * X_{a,in} + \eta_m X_{int} \quad [\text{g kg}^{-1}] \quad (4.2.5)$$

Η ενθαλπία του αέρα προκύπτει από την εξίσωση, η οποία είναι μια συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα και της ειδικής υγρασίας. Η θερμοκρασία εξόδου του αέρα υπολογίζεται από την εξίσωση, αν είναι γνωστές η ενθαλπία και η ειδική υγρασία εξόδου του αέρα από τον αφυγραντήρα.

$$h_{a,out} = c_{p,a} * T_{a,out} + X_{a,out} * (\lambda + c_{p,v} T_{a,out}) \quad [\text{kJ kg}^{-1}] \quad (4.2.6)$$

$$T_{a,out} = \frac{h_{a,out} - X_{a,out} * \lambda}{c_{p,a} + X_{a,out} * c_{p,v}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.2.7)$$

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας ( $h_m$ ) συνδέεται με το συντελεστή μεταφοράς θερμότητας ( $h_c$ ) με τη σχέση (Mohan et al., 2008):

$$h_m = \frac{h_c}{C_{p,a} * Le} \quad [\text{g m}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (4.2.8)$$

$$Le = \left(\frac{\alpha}{D_a}\right)^{2/3} \quad (4.2.9)$$

Όπου  $C_{p,a}$  η ειδική θερμότητα του αέρα ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) και  $Le$  ο αριθμός Lewis, ο οποίος συνηθίζεται να θεωρείται ίσος με τη μονάδα. Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας ( $h_m$ ) προσδιορίζεται από την ταχύτητα του αέρα και τις καταστάσεις ροής.

Ο ρυθμός απορρόφησης υδρατμών ( $dm$ ) από υγροσκοπικό διάλυμα μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον συντελεστή μεταφοράς μάζας ( $h_m$ ) και τη διαφορά της ειδικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου ( $X_{a,in}$ ) από την ειδική υγρασία κοντά στην επιφάνεια αλληλεπίδρασης ( $X_{int}$ ) με τη σχέση:

$$dm = h_m * A_p * (X_{int} - X_{a,in}) \quad [\text{g s}^{-1}] \quad (4.2.10)$$

Όπου  $A_p$  η διαβρεχόμενη από το διάλυμα επιφάνεια του τοιχώματος, που ισούται με το γινόμενο ειδικής επιφάνειας του τοιχώματος του αφυγραντήρα επί τον όγκο του ( $A_{sp} * A_d * Z$ ).

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας συνήθως αναπαριστάται χρησιμοποιώντας τις παρακάτω τρεις αδιάστατες ποσότητες: τον αριθμό Sherwood, τον αριθμό Reynolds και τον αριθμό Schmidt.

$$h_m = \frac{Sh * \rho_a * D_a}{d_e} \quad [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (4.2.11)$$

Όπου  $d_e$  είναι η ισοδύναμη διάμετρος της δομής του αφυγραντήρα. Ο αριθμός Sherwood υπολογίζεται συνάρτησε των αριθμών Reynolds και Schmidt, καθώς και του λόγου της παροχής μάζας του υγροσκοπικού διαλύματος προς παροχή μάζας του αέρα, από την παρακάτω σχέση:

$$Sh = n_1 * Re^{n2} * Sc^{n3} * \left(\frac{m_{sol}}{m_a}\right)^{n4} \quad (4.2.12)$$

Ο αριθμός Schmidt προκύπτει από το λόγο του κινηματικού ιξώδους προς το συντελεστή διάχυσης του αέρα:

$$Sc = \frac{\nu_a}{D_a} \quad (4.2.13)$$

Ενώ, οι σταθερές  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  και  $n_4$  εκτιμώνται από πειραματικά δεδομένα (Zhang et al., 2010). Σε όλες τις συσχετίσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως εκθέτης του αριθμού χρησιμοποιείται το 0,333 ενώ, οι εκθέτες για τον αριθμό Schmidt κυμαίνονται μεταξύ του 0,2 και του 1,74. Επιπρόσθετοι παράγοντες που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του αριθμού Sherwood είναι η πίεση υδρατμών και η συγκέντρωση του υγροσκοπικού διαλύματος. Έτσι, είναι δυνατός ο προσδιορισμός του συντελεστή μεταφοράς μάζας ( $h_m$ ) από την σχέση 4.2.11.

Στην συνέχεια γνωρίζοντας την υγρασία του αέρα και του υγροσκοπικού διαλύματος στην είσοδο του αφυγραντήρα υπολογίζεται ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από τον αφυγραντήρα, από τη σχέση 4.2.10. Με γνωστό τον ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από τον αφυγραντήρα από τη σχέση (4.2.1) μπορεί να υπολογιστεί η ειδική υγρασία εξόδου του αέρα από τον αφυγραντήρα και στη συνέχεια η αποτελεσματικότητα υγρασίας του αφυγραντήρα, από τη σχέση 4.2.2.

Οι Liu et al. (2008), για αφυγραντήρα υγροσκοπικής απορρόφησης κάθετων ροών, προσδιόρισαν την σχέση ανάμεσα στην αποτελεσματικότητα υγρασίας ( $\eta_m$ ) και στην αποτελεσματικότητα ενθαλπίας ( $\eta_h$ ) με την παρακάτω σχέση:

$$\eta_m = \eta_h + \kappa * \left( 1 - \eta_h - e^{-\frac{h_m * A_p}{m_a}} \right) \quad (4.2.14)$$

Το παράγοντας  $\kappa$  δίνεται από την εξίσωση:

$$\kappa = \frac{X_{a,in} - X^*}{X_{a,in} - X_{int}} \quad (4.2.15)$$

Όπου  $X^*$  είναι η μέση τιμή της ειδικής υγρασίας στην είσοδο του αφυγραντήρα ( $X_{a,in}$ ) και της ειδικής υγρασίας στην επιφάνεια αλληλεπίδρασης ( $X_{int}$ ).

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 4.2.14, 4.2.15, 4.2.4 και 4.2.7 μπορεί να υπολογιστεί η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο του αφυγραντήρα.

Κατά τη διαδικασία της αφύγρυνσης συμβαίνει τόσο μεταφορά μάζας όσο και μεταφορά θερμότητας. Έτσι, ο ρυθμός ροής και η ενθαλπία του διαλύματος στην

έξοδο του αφυγραντήρα αυξάνονται ως φαίνεται στην σχέση (4.2.16) και (4.2.17), αντίστοιχα:

$$m_{sol,out} = m_{sol,in} + m_a * (X_{a,in} - X_{a,out}) \quad [kg \ s^{-1}] \quad (4.2.16)$$

$$h_{sol,out} = \frac{m_{sol,in}}{m_{sol,out}} h_{sol,in} + \frac{m_a}{m_{sol,out}} (h_{a,in} - h_{a,out}) \quad [kJ \ kg^{-1}] \quad (4.2.17)$$

Η συγκέντρωση του διαλύματος εξόδου προκύπτει από την εξίσωση , βάση της ισορροπίας μάζας. Ύστερα, η θερμοκρασία εξόδου του διαλύματος από τον αφυγραντήρα μπορεί να υπολογιστεί από την ενθαλπία και τη συγκέντρωση εξόδου.

$$\xi_{out} = \frac{m_{sol,in}}{m_{sol,out}} \xi_{in} \quad (4.2.18)$$



### 4.3 Αντλία Θερμότητας

Καθώς, ο αέρας του θερμοκηπίου περνά από τον εξατμιστή της αντλίας, η ενέργεια του μειώνεται με ρυθμό  $Q_{\psi}$ , λόγω της μείωσης της λανθάνουσας θερμότητας των υδρατμών που συμπυκνώνονται πάνω στον εξατμιστή και λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα. Ο ρυθμός μείωσης της λανθάνουσας ενέργειας ( $Q_{ev}$ ), σε kW, ισούται με:

$$Q_{ev} = \frac{m_{hp} * \lambda}{3600} \quad [kW] \quad (4.3.1)$$

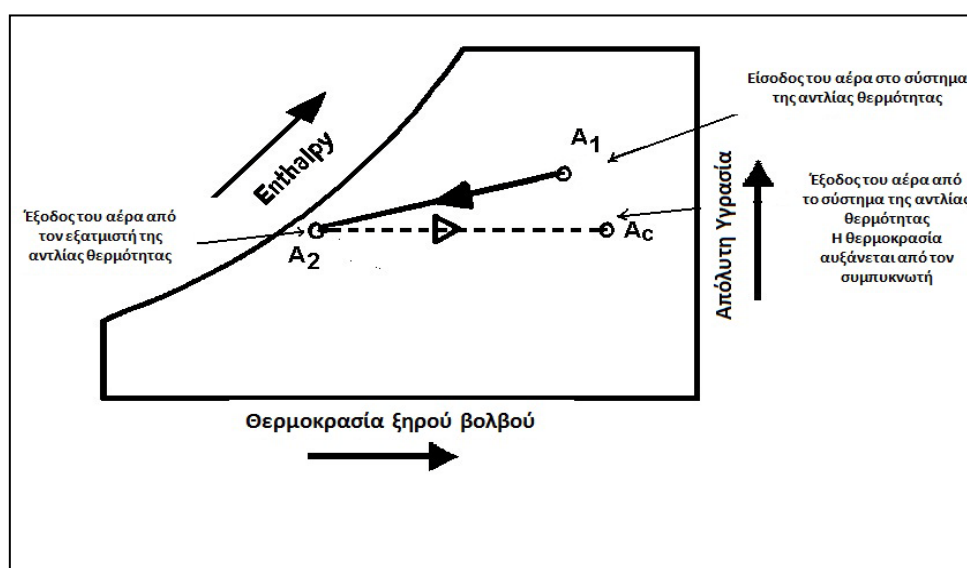
Όπου  $\lambda$ , η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού ( $kJ \text{ kg}^{-1}$ ), η τιμή της οποίας καθορίζεται από την θερμοκρασία σύμφωνα με τη σχέση:

$$\lambda = 2501 - 2,361 * T \quad [kJ \text{ kg}^{-1}] \quad (4.3.2)$$

Όπου  $m_{hp}$ , είναι ο ρυθμός συμπύκνωσης υδρατμών από τον εξατμιστή της αντλίας σε  $kg \text{ h}^{-1}$ .

Στο συμπυκνωτή ο ψυχρός και αφυγραμένος αέρας θερμαίνεται και αυξάνεται η ενέργεια του με ρυθμό:

$$Q_{\theta} = Q_{\psi} + \Delta E \quad [kW] \quad (4.3.3)$$



Σχήμα 4.2. Οι μεταβολές στην ενθαλπία του αέρα του θερμοκηπίου κατά την αφύγρανση του από την αντλία θερμότητας.

Έτσι, ο ωφέλιμος συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας ( $COP_{use}$ ) ορίζεται ως:

$$COP_{use} = \frac{Q_{ev} + \Delta E}{\Delta E} \quad (4.3.4)$$

Σε αυτό το σημείο θα ήταν σκόπιμο να διακρίνουμε τον ωφέλιμο συντελεστή της αντλίας θερμότητας από το συνήθως χρησιμοποιούμενο συντελεστή συμπεριφοράς μιας αντλίας θερμότητας. Συνήθως, ως συντελεστής θερμικής συμπεριφοράς μιας αντλίας θερμότητας ορίζεται το πηλίκο:

$$COP_{\theta} = \frac{Q_{\theta}}{Q_{\theta} - Q_{\psi}} \quad (4.3.5)$$

Ο συντελεστής θερμικής συμπεριφοράς ( $COP_{\theta}$ ) είναι αυτός που καθορίζει τον σχεδιασμό των κλιματιστικών συσκευών και των αντλιών θερμότητας. Οι κατασκευάστριες εταιρίες, προκειμένου να αυξήσουν την απόδοση της αντλίας θερμότητας, αυξάνουν την επιφάνεια των εναλλακτών. Αυτή η στρατηγική επιτρέπει στις αντλίες θερμότητας να λειτουργούν με υψηλότερη θερμοκρασία εξατμίσου και χαμηλότερη θερμοκρασία συμπύκνωσης, με αποτέλεσμα την μείωση της σχέσης συμπίεσης και κατ'επέκταση τον μεγαλύτερο COP και την οικονομία ενέργειας (Qi, 2009).

Κατά αναλογία με το συντελεστή θερμικής συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας ορίζεται και ο συντελεστής ψυκτικής συμπεριφοράς:

$$COP_{\psi} = \frac{Q_{\psi}}{Q_{\theta} - Q_{\psi}} \quad (4.3.6)$$

Η θερμική ενέργεια που απορροφάται στον εξατμιστή ( $Q_{\psi}$ ) της αντλίας μπορεί να υπολογιστεί από τη διαφορά ενθαλπίας του αέρα πριν και μετά τη διέλευση του από τον εξατμιστή  $\Delta h_{evap}^a$ , και τη παροχή μάζας του αέρα ( $m_a$ ), ως εξής:

$$Q_{\psi} = m_a * (h_{ev,in}^a - h_{ev,out}^a) \quad [kW] \quad (4.3.7)$$

Διαφορετικά, η θερμική ενέργεια που απορροφάται από τον εξατμιστή ( $Q_{\psi}$ ) της αντλίας θερμότητας μπορεί να υπολογιστεί από τη παροχή μάζας του ψυκτικού ρευστού ( $m_R$ ) και από την ειδική ψυκτική παραγωγή στον εξατμιστή ( $q_{\psi}$ ):

$$Q_{\psi} = m_R * q_{\psi} \quad [kW] \quad (4.3.8)$$

Κατά αντιστοιχία, η θερμική ενέργεια που αποδίδεται από τον συμπυκνωτή ( $Q_{\theta}$ ) της αντλίας θερμότητας ορίζεται ως:

$$Q_{\theta} = m_R * q_{\theta} \quad (4.3.9)$$

Η πραγματική μηχανική ισχύς ( $\Delta E$ ) που απορροφά ο συμπιεστής της αντλίας θερμότητας δύνεται από τη σχέση:

$$\Delta E = \frac{w * m_R}{\eta_{tot}} \quad (4.3.10)$$

Όπου  $w$ , το ειδικό απορροφούμενο μηχανικό έργο από τον συμπιεστή,  $m_R$ , η παροχή μάζας του ψυκτικού ρευστού και  $\eta_{tot}$ , ο ολικός βαθμός απόδοσης.

Ο ολικός βαθμός απόδοσης ( $\eta_{tot}$ ) υπολογίζεται από τον ενδεικνυμένο βαθμό απόδοσης ( $\eta_i$ ) και από το μηχανικό βαθμό απόδοσης ( $\eta_m$ ), ο οποίος κυμαίνεται από 0,85 έως 0,95 και συνήθως λαμβάνεται ίσος με 0,9. Ο ενδεικνυμένος βαθμός απόδοσης ( $\eta_i$ ) υπολογίζεται με βάση το λόγο της πίεσης του ψυκτικού ρευστού κατά τη συμπύκνωση ( $p_c$ ) προς τη πίεση του ψυκτικού ρευστού κατά την εξάτμιση ( $p_e$ ), από τη σχέση:

$$\eta_i = 1 - 0,05 \frac{p_c}{p_e} \quad (4.3.11)$$

Η κατανάλωση ενέργειας από την αντλία θερμότητας ανά kg αφαιρούμενων υδρατμών χαρακτηρίζεται και ως ειδική κατανάλωση ενέργειας (SEC) και ορίζεται ως το πηλίκο της καταναλισκόμενης ισχύος από τον συμπιεστή της αντλίας προς το ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από την αντλία θερμότητας (Chou et al., 2004):

$$SEC = \frac{\Delta E}{m_{hp}} \quad [\text{kWh kg}^{-1}] \quad (4.3.12)$$

Ο ρυθμός συμπύκνωσης υδρατμών από την αντλία θερμότητας ( $m_{hp}$ ) μπορεί να υπολογιστεί με οι δύο τρόπους:

1. Χρησιμοποιώντας τις ψυχομετρικές μετρήσεις του αέρα του θερμοκηπίου στην είσοδο και την έξοδο του εξατμιστή της αντλίας θερμότητας:

$$m_{hp} = V_a * (x_{ev,in} - x_{ev,out}) * 3,6 \quad [\text{kg h}^{-1}] \quad (4.3.13)$$

2. Χρησιμοποιώντας την ενεργειακή ισορροπία της αντλίας θερμότητας, η μείωση της λανθάνουσας ενέργειας του αέρα του θερμοκηπίου, μέσω της αντλίας θερμότητας, ισούται με τη μεταβολή της αισθητής ενέργειας μείον την ενέργεια του συμπιεστή της αντλίας:

$$m_{hp} = \frac{\rho_a c_{p,a} V_a (T_{out}^{hp} - T_{in}^{hp}) + 10^{-3} c_{p,v} V_a (x_{out}^{hp} T_{out}^{hp} - x_{in}^{hp} T_{in}^{hp}) - \Delta E}{\lambda} * 3600 \quad [\text{kg h}^{-1}] \quad (4.3.14)$$

#### 4.4 Υβριδικό Σύστημα Αφύγρανσης

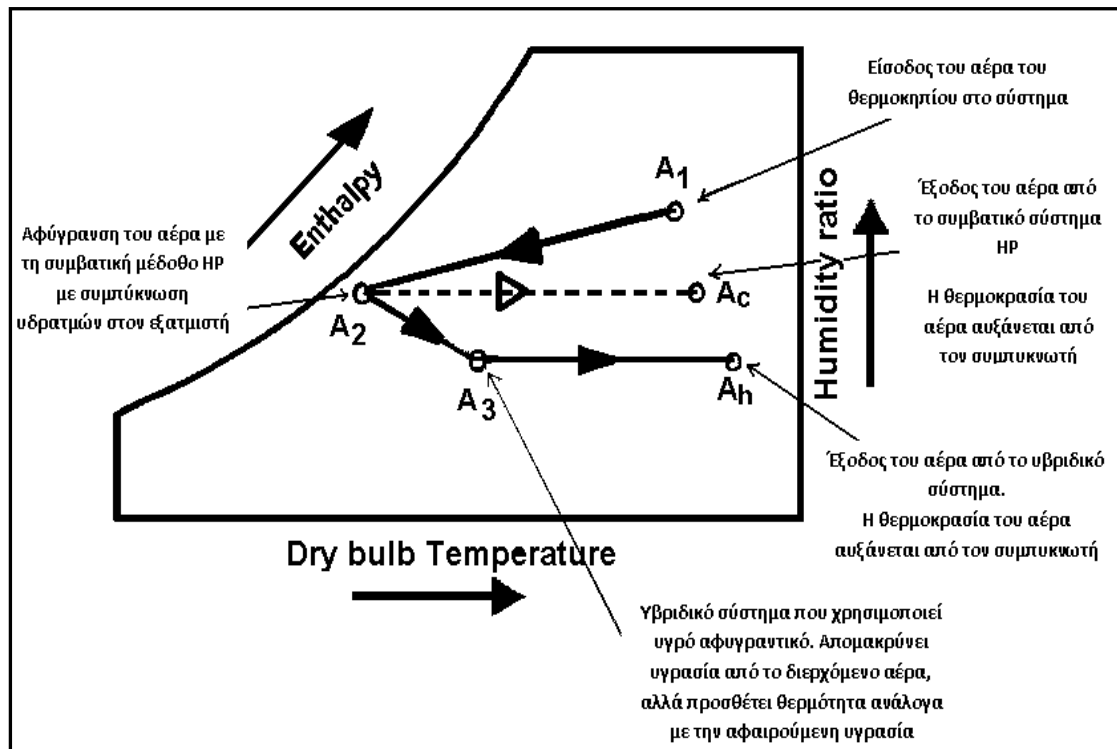
Το πρόβλημα της υψηλής υγρασίας στο θερμοκήπιο είναι έντονο κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου και ιδίως τη νύχτα, όπου το πιθανότερο είναι να απαιτείται θέρμανση του θερμοκηπίου για τη διατήρηση ενός ευνοϊκού περιβάλλοντος ανάπτυξης των φυτών. Επομένως, στο θερμοκήπιο το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα είναι η αφύγρανση του αέρα χωρίς ταυτόχρονη ψύξη. Σε αυτή την περίπτωση, τα υβριδικά συστήματα αφύγρανσης του αέρα με ταυτόχρονη ψύξη δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογή στο θερμοκήπιο. Για την αφύγρανση του θερμοκηπίου απαιτείται η ανάπτυξη μιας διαφορετικής διαμόρφωσης υβριδικού συστήματος. Για το σκοπό αυτό, στη παρούσα διατριβή, σχεδιάστηκε ένα νέο υβριδικό σύστημα αφύγρανσης κατάλληλο για χρήση στο θερμοκήπιο.

Στο σύστημα αυτό, ο αέρας περνά πρώτα από τον εξατμιστή μιας αντλίας θερμότητας όπου ψύχεται και αφήνει ένα μέρος της υγρασίας του, ακολούθως, ο αέρας περνά και από υγροσκοπικό διάλυμα για περαιτέρω αφύγρανση, και τελικά εξέρχεται από τον συμπυκνωτή της αντλίας (σχήμα 3.1).

Προσδοκάται ότι, το νέο υβριδικό σύστημα που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της υγροσκοπικής αφύγρανσης και των συστημάτων συμπίεσης ατμού, μπορεί να έχει υψηλή αποτελεσματικότητα στην απομάκρυνση της υγρασίας, να μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και να είναι κατάλληλο για χώρους με υψηλή παραγωγή υγρασίας όπως το θερμοκήπιο.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται οι μεταβολές στην ενθαλπία του αέρα του θερμοκηπίου κατά την αφύγρανση του από την αντλία θερμότητας και υβριδικό σύστημα στο ψυχομετρικό διάγραμμα. Όταν χρησιμοποιείται η αντλία θερμότητας για την αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου, ο αέρας περνά πρώτα από τον εξατμιστή της αντλίας με συνέπεια να ψύχεται και να χάνει ένα μέρος των υδρατμών του (A1-A2). Στην συνέχεια περνά μέσα από τον συμπυκνωτή της αντλίας από τον οποίο θερμαίνεται χωρίς να μεταβληθεί η περιεκτικότητα του σε υδρατμούς (A2-Ac). Τελικά, εξέρχεται από το σύστημα σε υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή που εισήλθε και με μειωμένη περιεκτικότητα σε υδρατμούς. Στο υβριδικό σύστημα ο αέρας του θερμοκηπίου περνά πρώτα από τον εξατμιστή της αντλίας (A1-A2) με συνέπεια να ψύχεται και να χάνει ένα μέρος των υδρατμών του,

ακολουθως περνά από το υγρό τοίχωμα του διαλύματος του  $\text{CaCl}_2$  (A2-A3), χάνει ένα επιπλέον μέρος της υγρασίας τους και αυξάνει αναλόγως η θερμοκρασία του. Ύστερα, διέρχεται μέσα από τον συμπυκνωτή, όπου θερμαίνεται, για να εξέλθει τελικά από το σύστημα (A3-Ah). Στο σχήμα 4.3 φαίνεται ότι η διαδικασία αφύγρανσης με το υβριδικό σύστημα είναι πιο αποτελεσματική συγκριτικά με την αφύγρανση μόνο από την αντλία θερμότητας.



Σχήμα 4.3. Οι μεταβολές στην ενθαλπία του αέρα του θερμοκηπίου κατά την αφύγρανση του από την αντλία θερμότητας και το υβριδικό σύστημα στο ψυχομετρικό διάγραμμα.

Κατά τη λειτουργία του υβριδικού συστήματος ο αέρας του θερμοκηπίου περνά αρχικά από τον εξατμιστή της αντλίας όπου συμπυκνώνεται ένα μέρος της υγρασίας του με ρυθμό  $m_{hp}$ , στη συνέχεια περνά από το σύστημα του υγροσκοπικού διαλύματος όπου απορροφάται άλλο ένα μέρος από την υγρασία του με ρυθμό  $m_s$  και τελικά εξέρχεται από τον συμπυκνωτή της αντλίας. Έτσι, ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το υβριδικό σύστημα ( $m_{hd}$ ) υπολογίζεται από το άθροισμα του ρυθμού απομάκρυνσης από τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας ( $m_{hp}$ ) και του ρυθμού απομάκρυνσης από το τοίχωμα με το υγροσκοπικό διάλυμα του  $\text{CaCl}_2$  ( $m_s$ ) :

$$m_{hd} = m_{hp} + m_s \quad [\text{kg h}^{-1}] \quad (4.4.1)$$

Ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας ( $m_{hd}$ ) μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$m_{hp} = \rho * V_a * (X_a - X_{ev,out}) * 3,6 \quad [\text{kg h}^{-1}] \quad (4.4.2)$$

Ενώ ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το τοίχωμα με το υγροσκοπικό διάλυμα του μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$m_s = h_m * A_p * (X_{ev,out} - X_{int}) * 3,6 \quad [\text{kg h}^{-1}] \quad (4.4.3)$$

Η ειδική υγρασία στην επιφάνεια αλληλεπίδρασης ( $X_{int}$ ) του αέρα με το υγροσκοπικό διάλυμα υπολογίζεται από την πίεση υδρατμών στο κορεσμό του διαλύματος για την αντίστοιχη συγκέντρωση ( $\xi$ ).

Με όρους απορρόφησης λανθάνουσας θερμότητας από τον αέρα του θερμοκηπίου, κατά αντιστοιχία με το ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών, ισχύει ο ρυθμός απορρόφησης λανθάνουσας θερμότητας από το υβριδικό σύστημα ( $Q_{hd}$ ) ισούται με το άθροισμα των ρυθμών απορρόφησης λανθάνουσας θερμότητας στα δύο υποσυστήματα, στον εξατμιστή της αντλίας ( $Q_{hp}$ ) και στο τοίχωμα του υγροσκοπικού διαλύματος ( $Q_s$ ).

$$Q_{hd} = Q_{hp} + Q_s \quad [\text{kW}] \quad (4.4.4)$$

Ο ρυθμός απορρόφησης λανθάνουσας θερμότητας ( $Q_{hd}$ ) και ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών ( $m_{hd}$ ) από το υβριδικό σύστημα συνδέονται με τη σχέση:

$$Q_{hd} = \frac{m_{hd} * \lambda}{3600} \quad [\text{kW}] \quad (4.4.5)$$

Ο ωφέλιμος βαθμός απόδοσης  $COP_{hd}$  του υβριδικού συστήματος υπολογίζεται από το ρυθμό απορρόφησης λανθάνουσας θερμότητας του συστήματος ( $Q_{hd}$ ) και την καταναλισκόμενη ισχύ  $\Delta E_{hd}$  για την λειτουργία του συστήματος, ως εξής:

$$COP_{hd} = \frac{Q_{hd} + \Delta E_{hd}}{\Delta E_{hd}} \quad (4.4.6)$$



## **5. Αποτελέσματα – Συζήτηση**

## **5.1 Προσδιορισμός εξατμισοδιαπνοής και απαιτήσεων αφύγρανσης στο θερμοκήπιο μέσω ενός μοντέλου ισορροπίας υδρατμών**

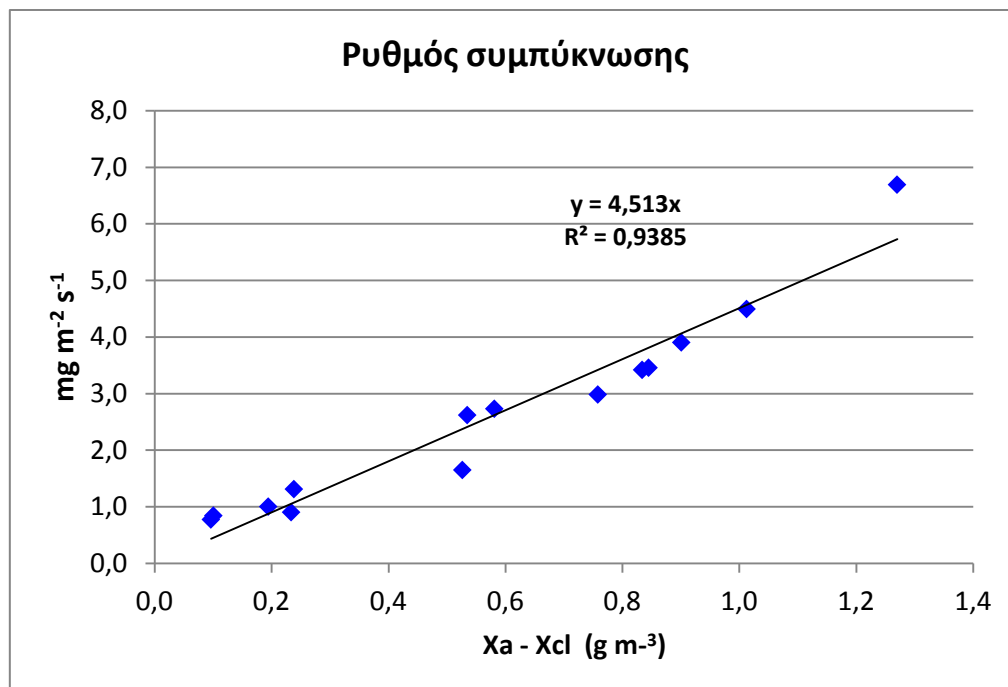
### 5.1.1 Συμπύκνωση υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος

Στο διάγραμμα 5.1.1 παρουσιάζεται η σχέση που συνδέει τον ρυθμό συμπύκνωσης υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος ανά μονάδα εδάφους, συναρτήσει της διαφοράς της απόλυτης υγρασίας στο κορεσμό στη θερμοκρασία του καλύμματος από την υφιστάμενη απόλυτη υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου.

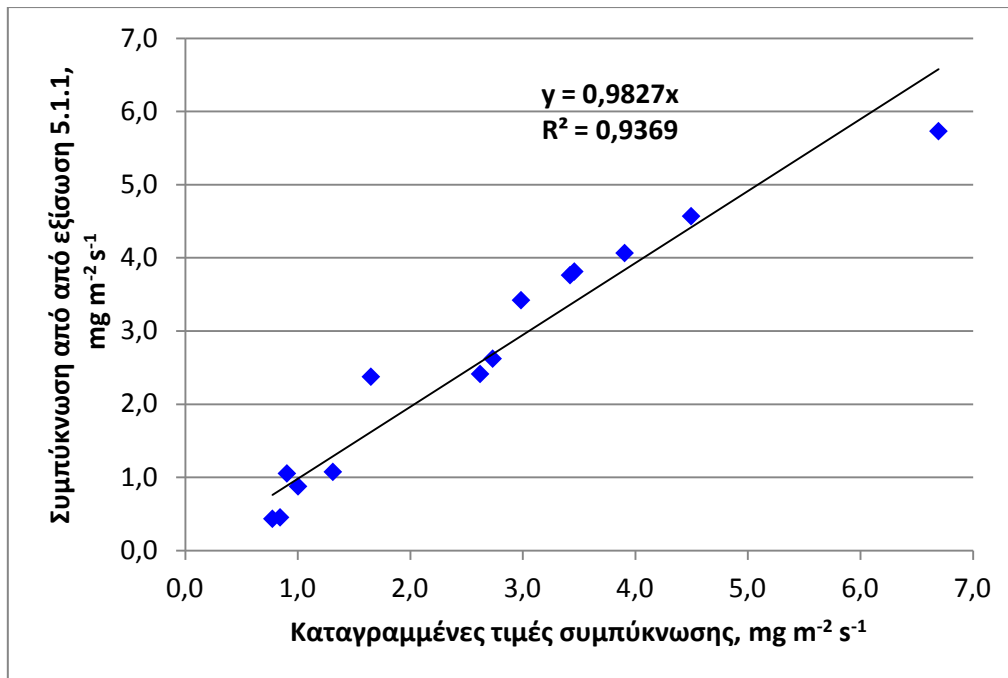
Έτσι, η σχέση 4.1.4 διαμορφώνεται ως εξής:

$$E_{\text{con}} = 4,513 * (x_a - x_{cl}) \quad [\text{mg m}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (5.1.1)$$

Από τη σχέση ανάμεσα στις καταγραμμένες με το απορροφητικό χαρτί και τις προβλεπόμενες τιμές (διάγραμμα 5.1.2) φαίνεται ότι η σχέση 5.1.1 προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια τον ρυθμό συμπύκνωσης στην εσωτερική πλευρά του καλύμματος του θερμοκηπίου.

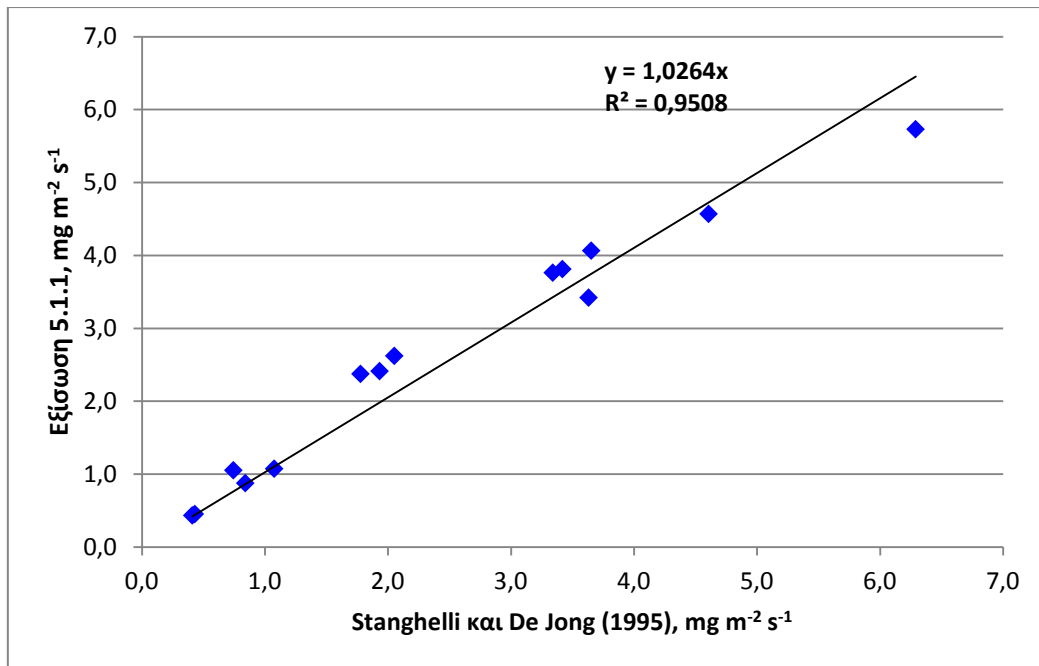


**Διάγραμμα 5.1.1.** Η επίδραση της διαφοράς της απόλυτης υγρασίας του αέρα με την απόλυτη υγρασία στη θερμοκρασία του καλύμματος στον κορεσμό στο ρυθμό συμπύκνωσης υδρατμών.



**Διάγραμμα 5.1.2.** Σχέση μεταξύ καταγραμμένων τιμών συμπύκνωσης και προβλεπόμενων τιμών συμπύκνωσης από την εξίσωση 5.1.1.

Η πρόβλεψη, που δίνεται για το ρυθμό συμπύκνωσης από την εξίσωση 5.1.1, συγκρίθηκε και με την εξίσωση από την εργασία των Stanghellini και De Jong (1995), η σχέση μεταξύ των προβλέψεων φαίνεται στο διάγραμμα 5.1.3. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα 5.1.3 υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο προβλέψεων.

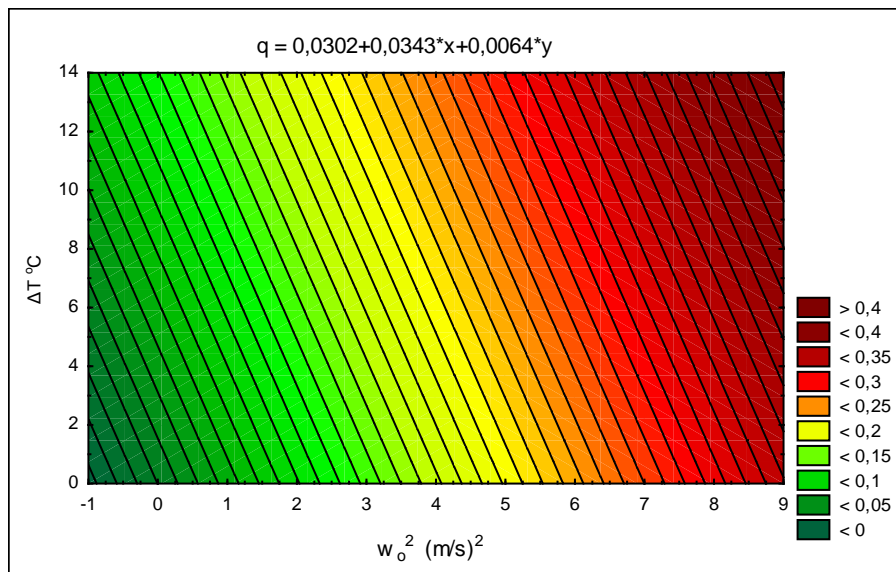


**Διάγραμμα 5.1.3.** Σύγκριση ρυθμού συμπύκνωσης από εξίσωση και από το μοντέλο των Stanghelli και De Jong (1995).

### 5.1.2 Ρυθμός διαφυγών αέρα

Στο διάγραμμα 5.1.4 φαίνεται η μεταβολή του ρυθμού εξαερισμού του θερμοκηπίου ( $q$ ) συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου έξω από το θερμοκήπιο ( $w_o$ ) και της διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού-εξωτερικού αέρα. Ο ρυθμός διαφυγών του αέρα του θερμοκηπίου ( $q$ ) προς το εξωτερικό περιβάλλον βρέθηκε να συνδέεται με την ταχύτητα του ανέμου έξω από το θερμοκήπιο ( $w_o$ ) και με τη διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού-εξωτερικού αέρα με τη σχέση:

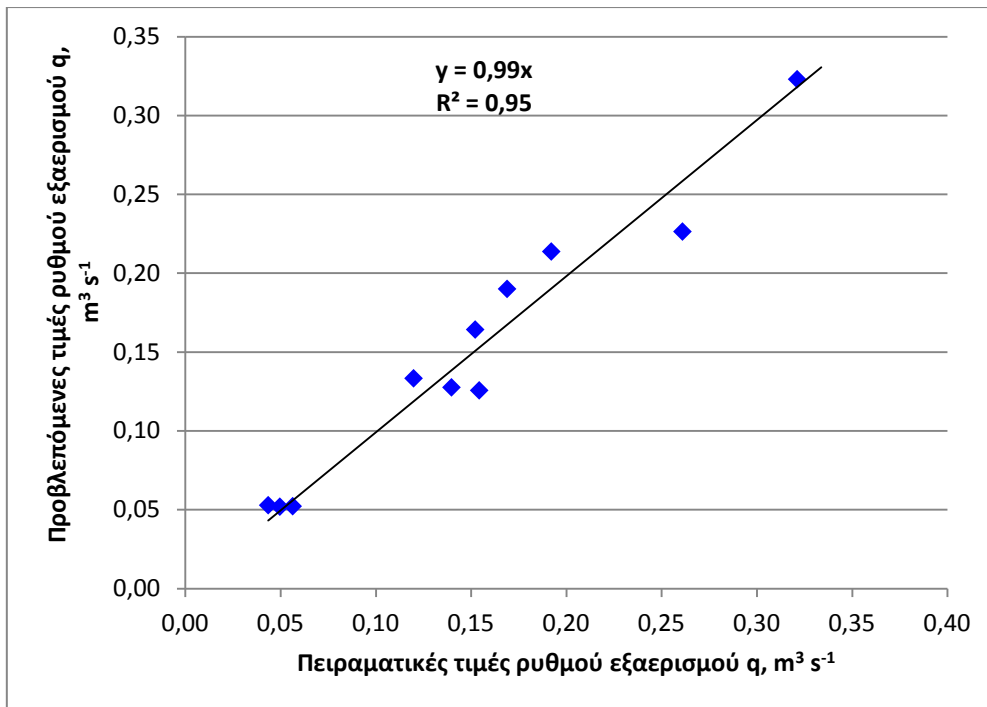
$$q = 0,0343 * w_o^2 + 0,0064 * (T_a - T_o) + 0,0302, \quad [\text{m}^3\text{s}^{-1}] \quad (5.1.2)$$



Διάγραμμα. 5.1.4. Η μεταβολή του ρυθμού εξαερισμού του θερμοκηπίου συναρτήσει του τετραγώνου της ταχύτητας του ανέμου έξω από το θερμοκήπιο και της διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού-εξωτερικού αέρα.

Στο διάγραμμα 5.1.5 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ των πειραματικών τιμών του ρυθμού διαφυγών του θερμοκηπίου και των προβλεπόμενων τιμών από την εξίσωση 5.1.2. Το μέσο σφάλμα μεταξύ των πειραματικών – προβλεπόμενων τιμών ήταν 2%.

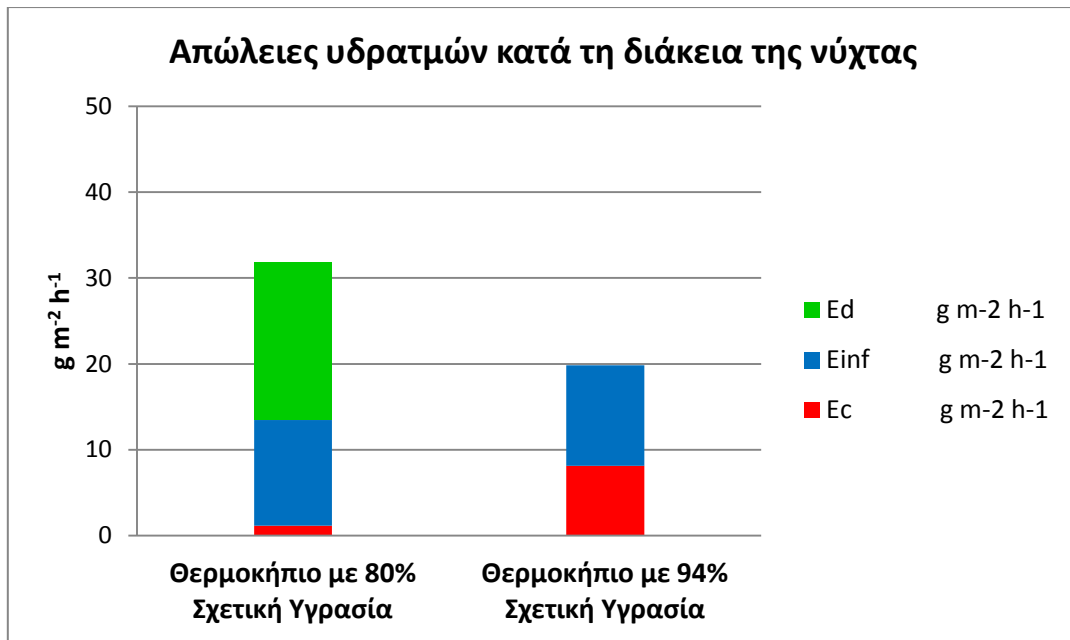
Προηγούμενες εργασίες προσδιόρισαν το ρυθμό ανανέωσης του αέρα του θερμοκηπίου χωρίς να λάβουν υπόψη τους την διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού-εξωτερικού αέρα, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μικρότερη συμφωνία πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών. Στην παρούσα εργασία η εισαγωγή της διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού-εξωτερικού αέρα βελτιώνει τη συμφωνία πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών.



Διάγραμμα 5.1.5. Σύγκριση πειραματικών τιμών ρυθμού εξαερισμού με προβλεπόμενες τιμές από την εξίσωση 5.1.2.

### 5.1.3 Εξατμισοδιαπνοή θερμοκηπίου

Στο διάγραμμα 5.1.6 παρουσιάζεται η μέση κατανομή των απωλειών υδρατμών κατά τη νυκτερινή περίοδο (Δεκέμβριος 2007) και χωρίς να δουλεύει το σύστημα θέρμανσης σε θερμοκήπιο με έλεγχο και χωρίς έλεγχο της υγρασίας του αέρα.

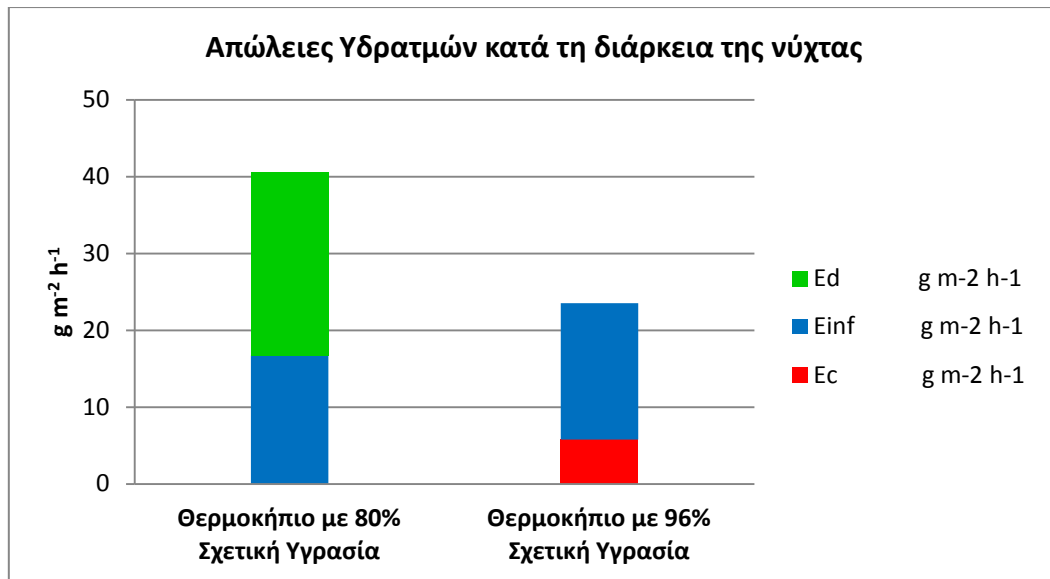


Διάγραμμα 5.1.6. Μέση κατανομή απωλειών υδρατμών κατά τη διάρκεια της νύχτας, σε θερμοκήπιο με έλεγχο και χωρίς έλεγχο της υγρασίας (Δεκέμβριος, 2007).

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.1.6 ο έλεγχος της σχετικής υγρασίας, με ανώτατο όριο το 80%, αύξησε σημαντικά την εξατμισοδιαπνοή στο θερμοκήπιο (κατά 60%) συγκριτικά με την ανεξέλεγκτη υγρασία, η αύξηση αυτή είναι αναμενόμενη μιας και αυξήθηκε το έλλειμμα πίεσης υδρατμών στον αέρα του θερμοκηπίου. Ο έλεγχος της σχετικής υγρασίας, με ανώτατο όριο το 80%, περιορίζει δραστικά τη συμπύκνωση των υδρατμών στο κάλυμμα του θερμοκηπίου ενώ, οι απώλειες υδρατμών από διαφυγές του αέρα είναι σχεδόν ίδιες στα δύο θερμοκήπια. Για τις χειμωνιάτικες νύχτες του Δεκεμβρίου του 2007, ο μέσος ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου για να διατηρείται η σχετική υγρασία στο 80% κατά τη διάρκεια της νύχτας, βρέθηκε να είναι  $18,3 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .

Στο διάγραμμα 5.1.7 παρουσιάζεται η μέση κατανομή των απωλειών υδρατμών για ανοιξιάτικες νυκτερινές περιόδους (Μάιος 2008) και χωρίς να δουλεύει το σύστημα θέρμανσης σε θερμοκήπιο με έλεγχο και χωρίς έλεγχο της υγρασίας του αέρα.





Διάγραμμα 5.1.7. Μέση κατανομή απωλειών υδρατμών κατά τη διάρκεια της νύχτας, σε θερμοκήπιο με έλεγχο και χωρίς έλεγχο της υγρασίας (Μάιος, 2008).

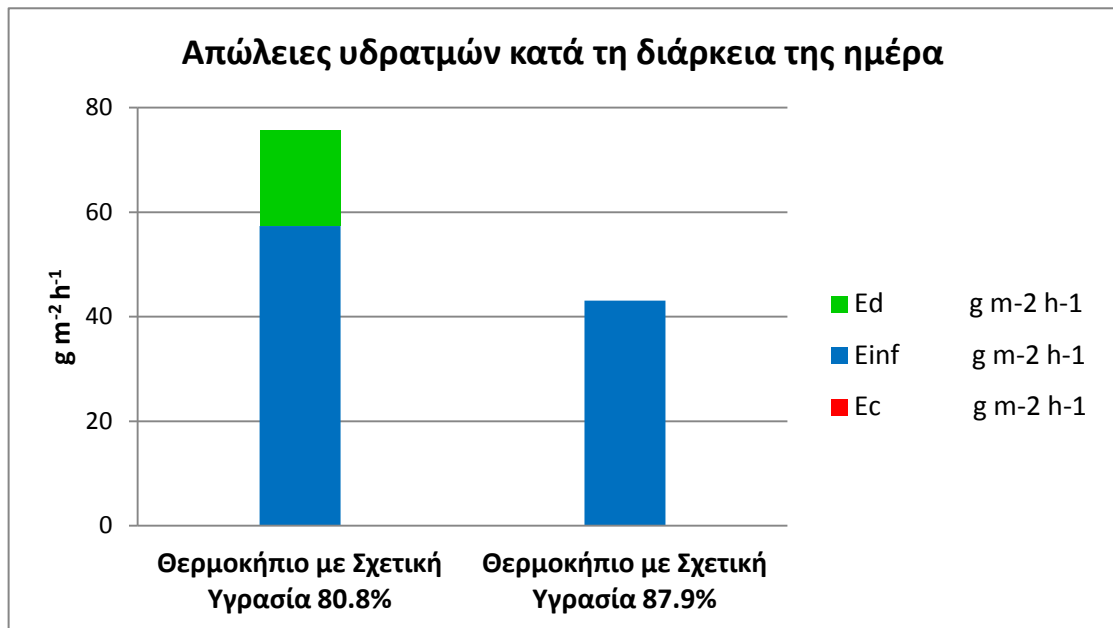
Στο διάγραμμα 5.1.7 παρατηρούνται υψηλότερες τιμές ρυθμού εξατμισοδιαπνοής συγκριτικά με την περίοδο του Δεκεμβρίου 2007 (διάγραμμα 5.1.6) διότι παρόλο που τα επίπεδα της σχετικής υγρασίας είναι παρόμοια στα αντίστοιχα θερμοκήπια, η υψηλότερη θερμοκρασία τη περίοδο του Μαΐου (19,4 °C) δημιουργεί υψηλότερο έλλειμμα κορεσμού υδρατμών (444 Pa) συγκριτικά με αυτό του Δεκεμβρίου (247 Pa) για το θερμοκήπιο στο οποίο εφαρμόστηκε η αφύγρανση. Οι διαφυγές υδρατμών στο εξωτερικό περιβάλλον είναι αυξημένες κατά την ανοιξιάτικη περίοδο λόγω της υψηλότερης διαφοράς απόλυτης υγρασίας εσωτερικού - εξωτερικού αέρα. Έτσι, για την περίοδο του Μαΐου, οι ανάγκες αφύγρανσης για τη διατήρηση της σχετικής υγρασίας στο 80%, κυμάνθηκαν από 20,8 έως 29,5 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, με μέση τιμή τα 23,9 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>.

Στο διάγραμμα 5.1.8 παρουσιάζεται η μέση κατανομή των απωλειών υδρατμών κατά τη διάρκεια της ημέρας (χωρίς να δουλεύει το σύστημα θέρμανσης) σε θερμοκήπιο με έλεγχο και χωρίς έλεγχο της υγρασίας του αέρα. Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι διαφυγές υδρατμών από τον αέρα στο εξωτερικό περιβάλλον ήταν μεγαλύτερες συγκριτικά με αυτές της νύχτας, κυρίως λόγω της υψηλότερης διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού εξωτερικού αέρα, μιας και η μέση ταχύτητα του ανέμου έξω από το θερμοκήπιο δεν διέφερε σημαντικά.



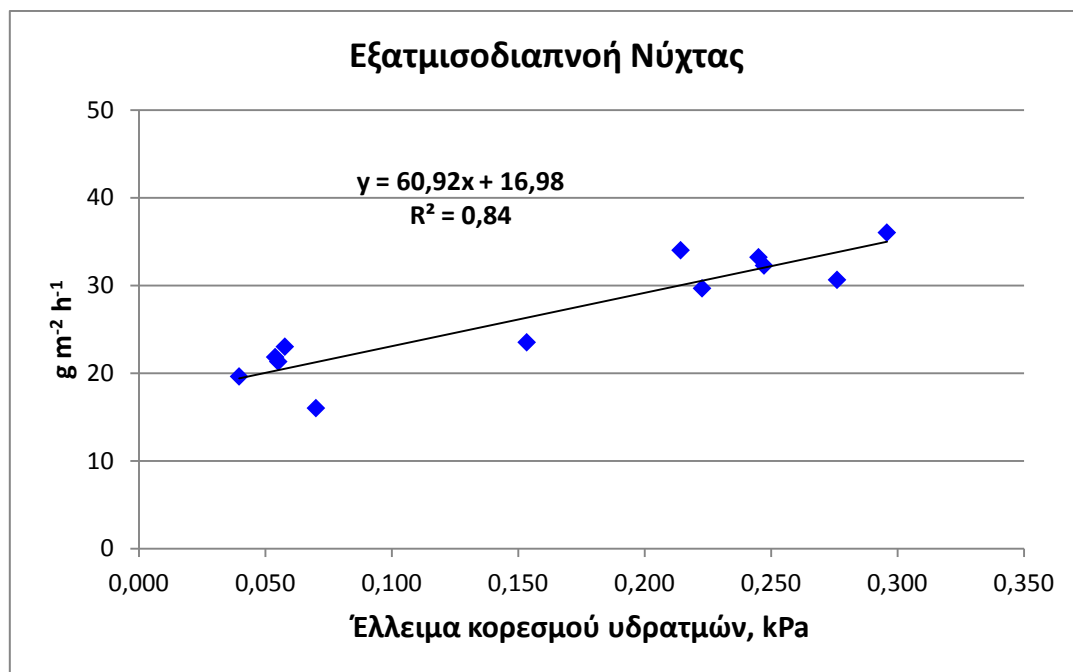
Εικόνα 5.1. Αριστερά το διαμέρισμα του θερμοκηπίου με αφύγρανση και δεξιά το διαμέρισμα του θερμοκηπίου χωρίς αφύγρανση.

Η εξατμισοδιαπνοή κατά τη διάρκεια της ημέρας βρέθηκε αυξημένη (Διάγραμμα 5.1.8) συγκριτικά με τη νύχτα (Διάγραμμα 5.1.6), παρόλο που οι τιμές της σχετικής υγρασίας ήταν σχεδόν στα ίδια επίπεδα. Όμως, η υψηλότερη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ημέρας δημιουργεί μεγαλύτερο έλλειμμα κορεσμού υδρατμών, το οποίο αυξάνει το δυναμικό εξάτμισης. Επιπλέον, το ισοζύγιο ενέργειας στο κάλυμμα κατά τη διάρκεια της ημέρας ήταν θετικό, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του καλύμματος κατά τη διάρκεια της ημέρας να ήταν υψηλότερη από το σημείο δρόσου του αέρα του θερμοκηπίου και να μην παρατηρηθούν συμπυκνώσεις υδρατμών πάνω του. Λαμβάνοντας υπόψη τις υψηλότερες διαφυγές αέρα από το θερμοκήπιο, ο μέσος ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου για να διατηρείται η σχετική υγρασία στο 80% κατά τη διάρκεια της ημέρας, βρέθηκε να είναι παρόμοιος με αυτόν της νύκτας ( $18,3 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Οι υψηλότερες διαφυγές υδρατμών από το θερμοκήπιο με τον έλεγχο της σχετικής υγρασίας στο 80% οφείλονται στην υψηλότερη θερμοκρασία κατά  $2,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  που εμφάνισε το θερμοκήπιο συγκριτικά με το θερμοκήπιο με 87,9% σχετική υγρασία.



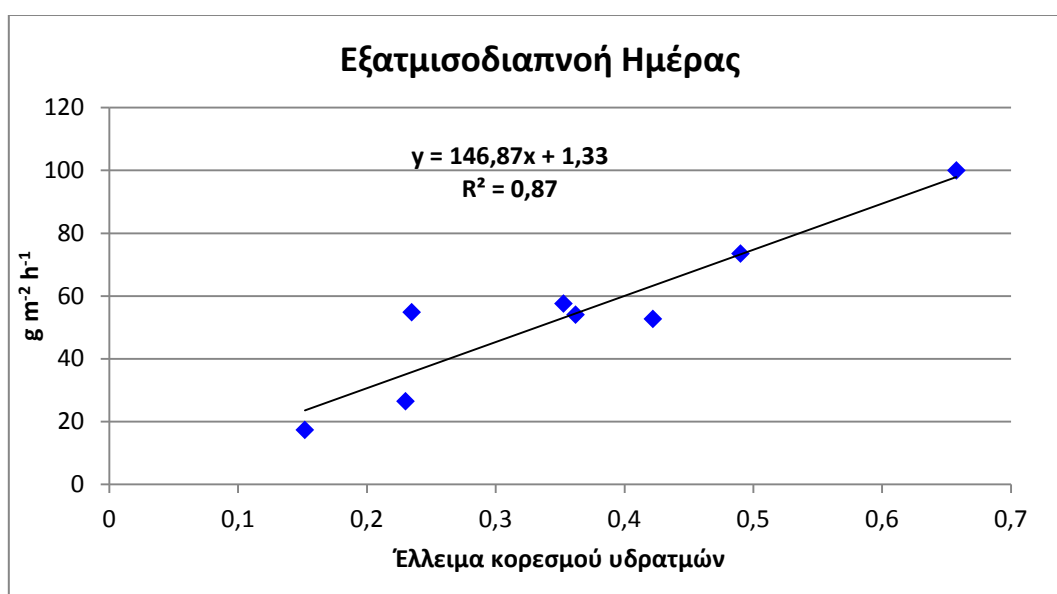
Διάγραμμα 5.1.8. Υπολογισθείσα μέση κατανομή απωλειών υδρατμών κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε θερμοκήπιο με έλεγχο και χωρίς έλεγχο της υγρασίας.

Στα διαγράμματα 5.1.9 και 5.1.10 παρουσιάζεται η επίδραση του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών του αέρα του θερμοκηπίου στο ρυθμό εξατμισοδιαπνοής νύχτας και ημέρας, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.1.9. Η μεταβολή του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια της νύχτας συναρτήσεσι του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών του αέρα.

Αν και η συσχέτιση ανάμεσα στο έλλειμμα κορεσμού υδρατμών του αέρα του θερμοκηπίου και στο ρυθμό εξατμισοδιαπνοής κατά τη διάρκεια της νύχτας είναι σχετικά υψηλή, το σφάλμα εκτίμησης μέσω της εξίσωσης του διαγράμματος 5.1.9 μπορεί να είναι μεγάλο. Ο Bakker (1986) αναφέρει ότι σε χαμηλούς ρυθμούς διαπνοής το σφάλμα εκτίμησης μπορεί να φθάσει το 30% ή και περισσότερο. Το τυπικό σφάλμα για την εξίσωση υπολογισμού του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής του διαγράμματος 5.1.9, βρέθηκε να είναι  $2,73 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .



Διάγραμμα 5.1.10. Η μεταβολή του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκειας της ημέρας συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών του αέρα.

Κατά τη διάρκεια της ημέρας παρατηρείται μεγαλύτερη κλίση στη εξίσωση της εξατμισοδιαπνοής και αυτό δικαιολογείται από το ότι κατά την διάρκεια της ημέρας η εξατμισοδιαπνοή είναι μεγαλύτερη λόγω της επίδρασης της ηλιακής ακτινοβολίας.

### 5.1.5 Συμπεράσματα

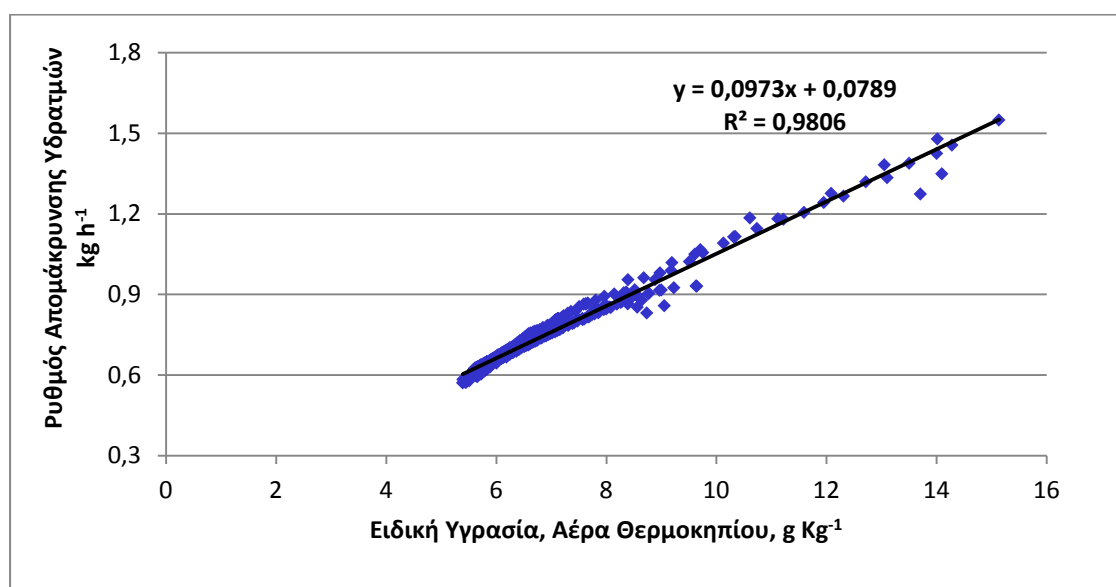
Στη παρούσα εργασία προσδιορίστηκε η εξατμισοδιαπνοή θερμοκηπιακής καλλιέργειας από ένα απλό μοντέλο μεταφοράς υδρατμών. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο είναι εφαρμόσιμο για όλες τις καλλιέργειες σε όλα τα στάδια ανάπτυξης, χωρίς να απαιτείται μέτρηση της θερμοκρασίας των φύλλων και της αντίστασης τους, ούτε του δείκτη φυλλικής επιφάνειας.

## **5.2 Αφύγρανση του θερμοκηπίου με σύστημα υγροσκοπικής απορρόφησης**

## 5.2.1 Ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το υγροσκοπικό τοίχωμα

### Επίδραση της ειδικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου

Στο διάγραμμα 5.2.1 παρουσιάζεται η επίδραση της ειδικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στο ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από το υγροσκοπικό σύστημα αφύγρανσης, όταν αυτό δούλευε με παροχή αέρα  $0,3703 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  και υπέρκορο διάλυμα, δηλαδή, με συγκέντρωση διαλύματος 54%.



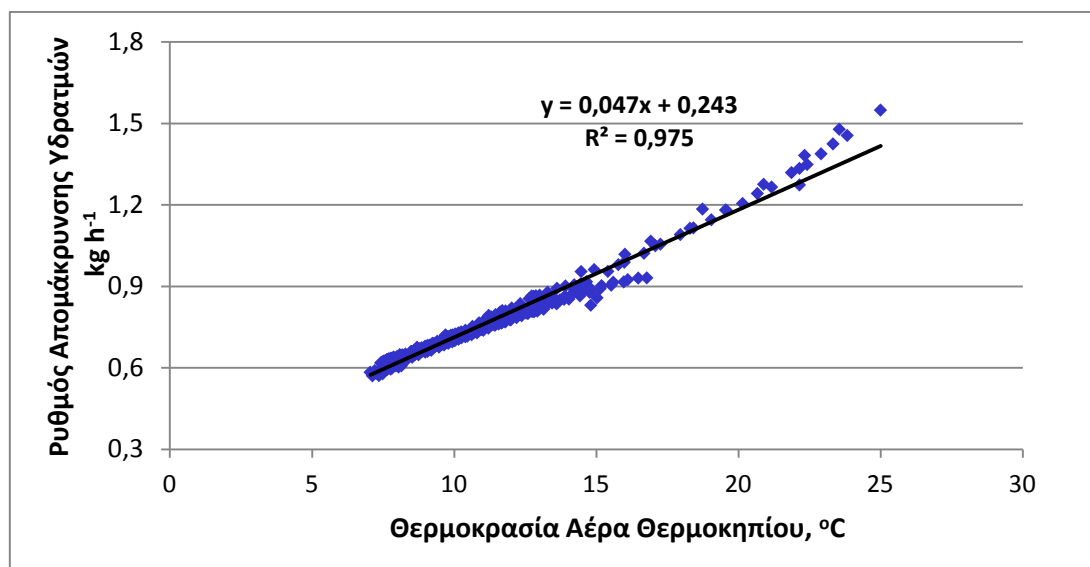
Διάγραμμα 5.2.1. Η επίδραση της ειδικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στον ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από δοκιμαζόμενο σύστημα αφύγρανσης.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.2.1, ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το σύστημα αφύγρανσης αυξάνεται με την ειδική υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου. Με την αύξηση της ειδικής υγρασίας του αέρα, η διαφορά πίεσης υδρατμών ανάμεσα στον αέρα και το υγροσκοπικό διάλυμα αυξάνεται επομένως, αυξάνεται και η διαφορά της ειδικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου ( $X_a$ ) από την ειδική υγρασία κοντά στην επιφάνεια αλληλεπίδρασης ( $X_{int}$ ) με υγροσκοπικό διάλυμα, και έτσι αυξάνεται ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών.

### Επίδραση της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου

Στο διάγραμμα 5.2.2 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στο ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από το υγροσκοπικό

σύστημα αφύγρανσης, όταν αυτό δούλευε με παροχή αέρα  $0,3703 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  και συγκέντρωση διαλύματος 54%.

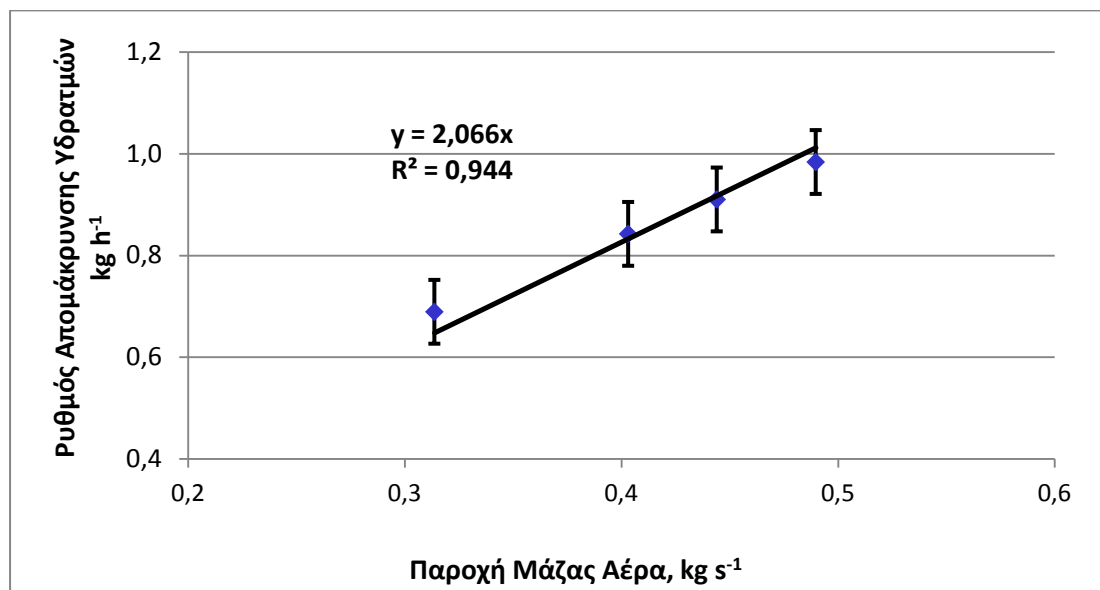


Διάγραμμα 5.2.2. Η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου, στον ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από δοκιμαζόμενο σύστημα αφύγρανσης.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.2.2, ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το σύστημα αφύγρανσης αυξάνεται σημαντικά με την θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου. Σε προηγούμενες έρευνες αναφέρεται ότι ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από συστήματα υγροσκοπικής απορρόφησης σαν αυτό της παρούσας εργασίας είτε μειώνεται (Moon et al., 2009) είτε αυξάνεται ελαφρώς (Babakhani et al., 2010) είτε παραμένει αμετάβλητος (Liu et al., 2006) με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα. Στις εργασίες αυτές μελετήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα διατηρώντας σταθερές τις τιμές της ειδικής υγρασίας του αέρα και της θερμοκρασίας του υγροσκοπικού διαλύματος. Στην παρούσα εργασία η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα μελετήθηκε με σταθερή σχετική υγρασία αέρα, άρα με αυξανόμενη ειδική υγρασία, και θερμοκρασία υγροσκοπικού διαλύματος ίση την θερμοκρασία του αέρα. Επομένως, η αύξηση στον ρυθμό απορρόφησης υδρατμών με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα οφείλεται εν μέρει στην αυξανόμενη ειδική υγρασία του αέρα και εν μέρει στην αύξηση της διαφοράς πίεσης υδρατμών μεταξύ του αέρα και του υγροσκοπικού διαλύματος.

### Επίδραση της παροχής του αέρα του θερμοκηπίου μέσα από το σύστημα

Στο διάγραμμα 5.2.3 παρουσιάζεται, η επίδραση του ρυθμού ροής του αέρα του θερμοκηπίου μέσα από το τοίχωμα του υγροσκοπικού διαλύματος, στο ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από το υγροσκοπικό σύστημα αφύγρανσης, όταν αυτό δούλευε σε θερμοκρασία αέρα 15 °C, σχετική υγρασία 80% και με σταθερή συγκέντρωση CaCl<sub>2</sub> στο διάλυμα 54%.



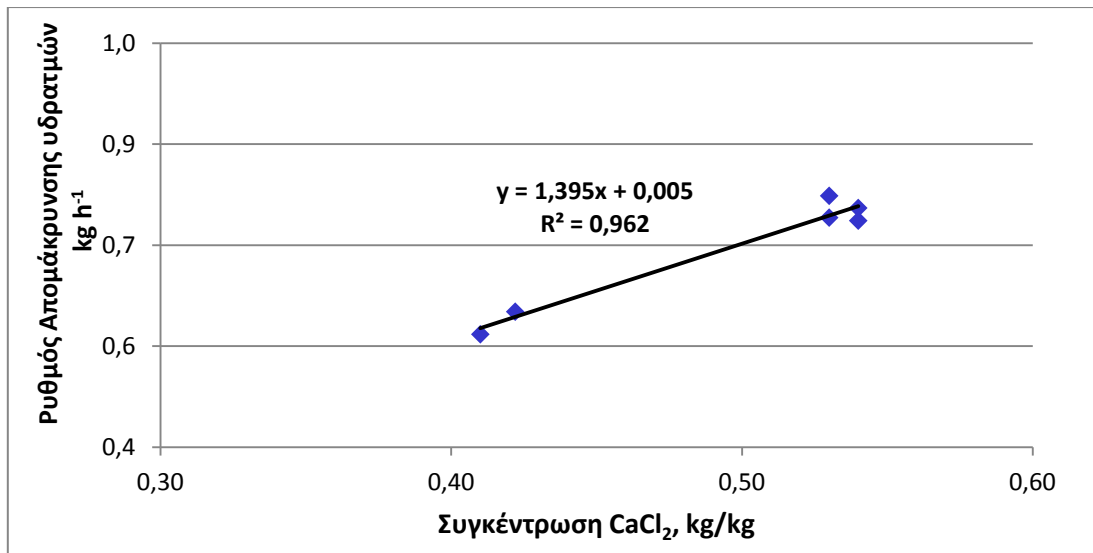
Διάγραμμα 5.2.3. Η επίδραση της ροής του αέρα του θερμοκηπίου μέσα από τον αφυγραντήρα στον ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από δοκιμαζόμενο σύστημα αφύγρανσης (κάθε σημείο έχει προέλθει από 6 μετρήσεις για κάθε παροχή μάζας αέρα).

Ο ρυθμός απομάκρυνσης αυξάνεται γραμμικά με τη αύξηση της ροής του αέρα (μέχρι τη μέγιστη ταχύτητα που χρησιμοποιήθηκε). Ο υψηλότερος ρυθμός ροής του αέρα αυξάνει το συντελεστή μεταφοράς μάζας μεταξύ υγροσκοπικού διαλύματος και αέρα.

### Επίδραση της συγκέντρωσης του υγροσκοπικού διαλύματος

Στο διάγραμμα 5.2.4 παρουσιάζεται, η επίδραση της συγκέντρωσης του CaCl<sub>2</sub> στο υγροσκοπικό διάλυμα, στο ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από το υγροσκοπικό σύστημα αφύγρανσης, όταν αυτό δούλευε σε θερμοκρασία αέρα 10,1-11,4 °C, ειδική υγρασία 8,6-9,3 g kg<sup>-1</sup> και με παροχή αέρα 0,3703 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.





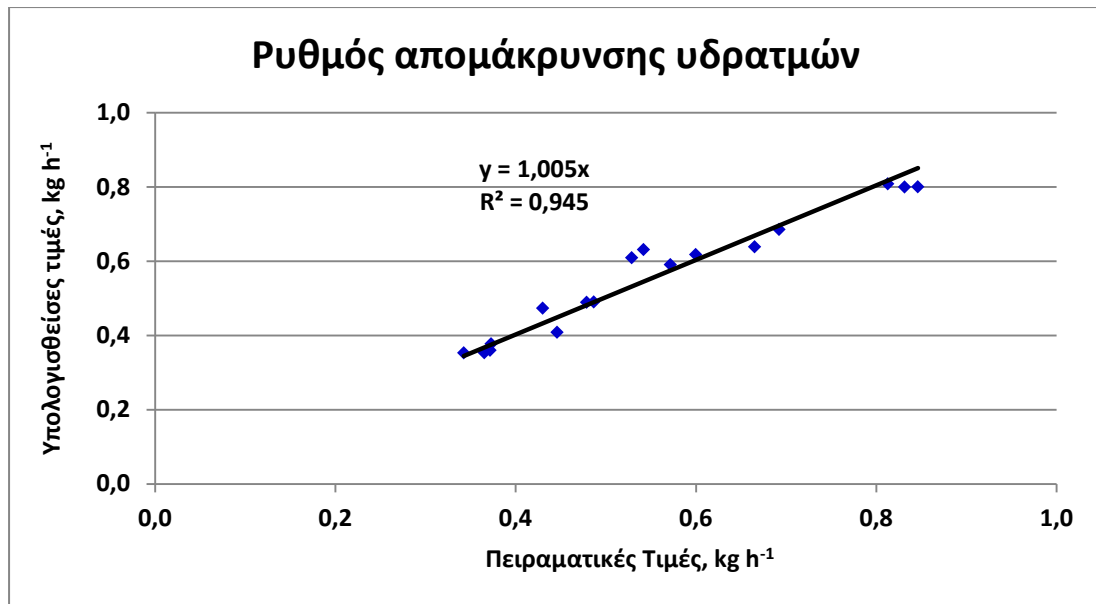
Διάγραμμα 5.2.4. Η επίδραση της συγκέντρωσης του διαλύματος, στον ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από δοκιμαζόμενο σύστημα αφύγρανσης.

Η πίεση υδρατμών του υγροσκοπικού διαλύματος μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης, και αυξάνεται το δυναμικό μεταφοράς μάζας ανάμεσα στο υγροσκοπικό διάλυμα και την υγρασία του αέρα. Έτσι, ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του υγροσκοπικού διαλύματος.

Η μοναδική εργασία, που έχει χρησιμοποιήσει υγροσκοπικό διάλυμα CaCl<sub>2</sub> σε αφυγραντήρα κάθετων ροών, είναι των Moon et al. (2009), οι οποίοι πέτυχαν υψηλότερο ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών, δουλεύοντας όμως με υψηλότερη ειδική υγρασία και παροχή υγροσκοπικού διαλύματος.

### 5.2.2 Επαλήθευση θεωρητικού μοντέλου

Στο διάγραμμα 5.2.5 παρουσιάζονται οι ποσότητες των υδρατμών που συλλέγονταν στο δοχείο του διαλύματος του CaCl<sub>2</sub> συγκριτικά με τις υπολογισθείσες ποσότητες από την εξίσωση (4.2.1) συναρτήσει των μετρήσεων ειδικής υγρασίας πριν και μετά το τοίχωμα του CaCl<sub>2</sub>, της παροχής του αέρα και του χρόνου λειτουργίας. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5.2.5 υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των δύο μεθόδων προσδιορισμού της συνολικής ποσότητας των υδρατμών που απομακρύνονται από τον αέρα του θερμοκηπίου.

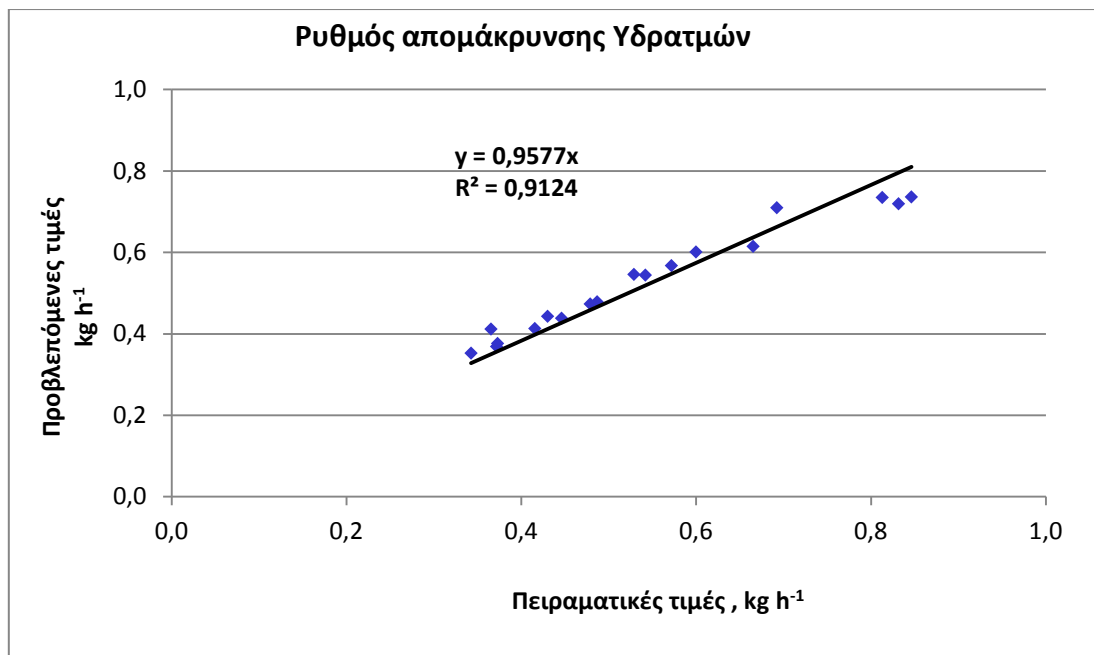


Διάγραμμα 5.2.5. Σχέση μεταξύ των πειραματικών τιμών και των υπολογισθέντων μέσω της διαφοράς ειδικής υγρασίας.

Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων για τον προσδιορισμό του αριθμού Sherwood προέκυψε η παρακάτω σχέση:

$$Sh = 0,002186 * Re_a^{0,973} Sc_a^{0,333} * \left(\frac{m_{sol}}{m_a}\right)^{0,105} \quad (5.2.1)$$

Έτσι, ο συντελεστής μεταφοράς μάζας ( $h_m$ ) αυξήθηκε από 3 στα 4,5 g/m<sup>2</sup>s με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα από 1,1 m s<sup>-1</sup> στα 1,7 m s<sup>-1</sup>.



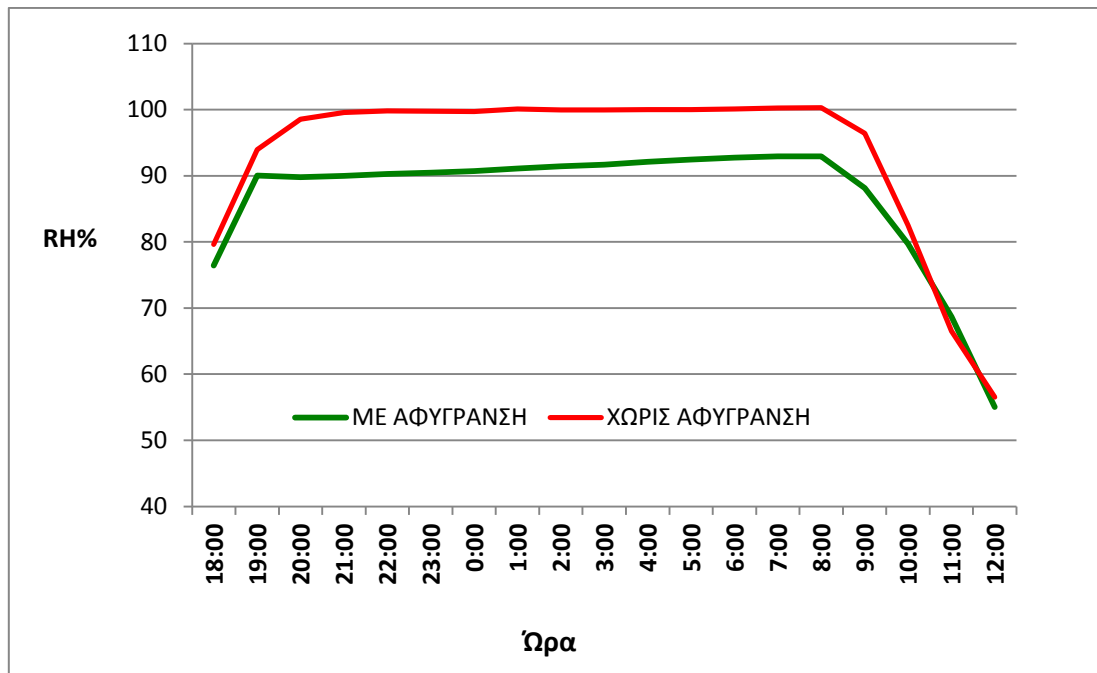
Διάγραμμα 5.2.6. Σχέση μεταξύ πειραματικών τιμών του ρυθμού απομάκρυνσης υδρατμών με τις υπολογισθείσες από το συντελεστή μεταφοράς μάζας.

Στο διάγραμμα 5.2.6 παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες τιμές του ρυθμού απομάκρυνσης των υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου που προσδιορίστηκαν μέσω του συντελεστή μεταφοράς μάζας ( $h_m$ ) από την εξίσωση (4.2.10) συγκριτικά με τις μετρούμενες ποσότητες στο δοχείο του διαλύματος του  $\text{CaCl}_2$  δια του χρόνου λειτουργίας. Όπως φαίνεται από διάγραμμα 5.2.6 υπάρχει πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων και των πειραματικών τιμών του ρυθμού απομάκρυνσης υδρατμών. Η ασυμφωνία δε ξεπερνάει το 13%. Σε αντίστοιχες προηγούμενες εργασίες, όπου ως υγροσκοπικό διάλυμα χρησιμοποιήθηκε το  $\text{LiBr}$ , η ασυμφωνία κυμαινόταν από 12% (Babakhani et al., 2010) έως 20% (Liu et al., 2006).

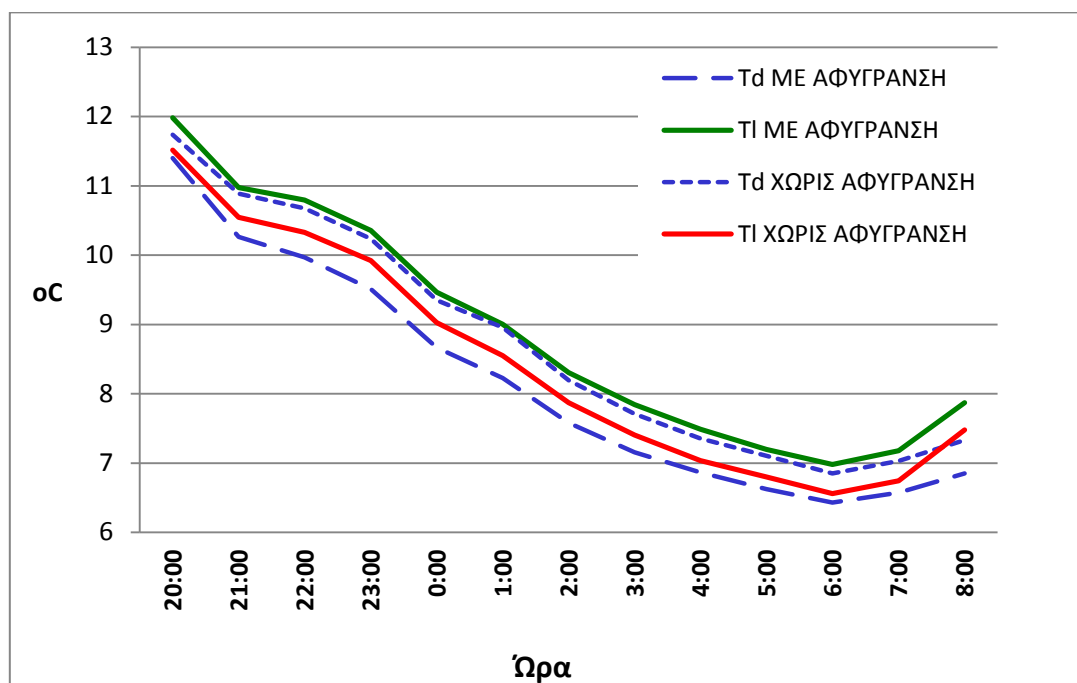
### 5.2.3 Επίδραση της αφύγρανσης με το σύστημα της υγροσκοπικής απορρόφησης στο κλίμα του θερμοκηπίου

Στο διάγραμμα 5.2.7 παρουσιάζεται η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας μέσα στο 24ωρο, τόσο στο θερμοκήπιο στο οποίο εφαρμόστηκε αφύγρανση με το

δοκιμαζόμενο σύστημα, κατά την διάρκεια της νύχτας, όσο και στο θερμοκήπιο στο οποίο η υγρασία ήταν ανεξέλεγκτη.



Διάγραμμα 5.2.7. Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας μέσα στο 24ωρο στο θερμοκήπιο χωρίς αφύγρανση και σε αυτό που έγινε αφύγρανση με το δοκιμαζόμενο σύστημα.



Διάγραμμα 5.2.8. Η θερμοκρασία του σημείου δρόσου ( $T_d$ ) και η θερμοκρασία των φύλλων των φυτών ( $T_l$ ) στα παραπάνω θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας.

Στο διάγραμμα 5.2.8 παρουσιάζεται η εξέλιξη της θερμοκρασίας του σημείου δρόσου ( $T_d$ ) στα δύο θερμοκήπια, καθώς και η θερμοκρασία των φύλλων της καλλιέργειας ( $T_l$ ), κατά την διάρκεια λειτουργίας της αφύγρανσης με το δοκιμαζόμενο σύστημα. Από το διάγραμμα 5.2.7 φαίνεται καθαρά η σημαντική μείωση στη σχετική υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου, που προκάλεσε η λειτουργία του δοκιμαζόμενου συστήματος αφύγρανσης. Ο περιορισμός της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο είχε ως αποτέλεσμα η θερμοκρασία των φύλλων των φυτών να διατηρείται υψηλότερα από το σημείο δρόσου (Διάγραμμα 5.2.8), γεγονός που αποκλείει την συμπύκνωση υδρατμών πάνω στα φυτά. Αντίθετα, στο θερμοκήπιο, όπου η υγρασία ήταν ανεξέλεγκτη, η θερμοκρασία των φύλλων ήταν μικρότερη από το σημείο δρόσου του αέρα (Διάγραμμα 5.2.8), γεγονός που κάνει τη συμπύκνωση υδρατμών πάνω στην καλλιέργεια δυνατή.

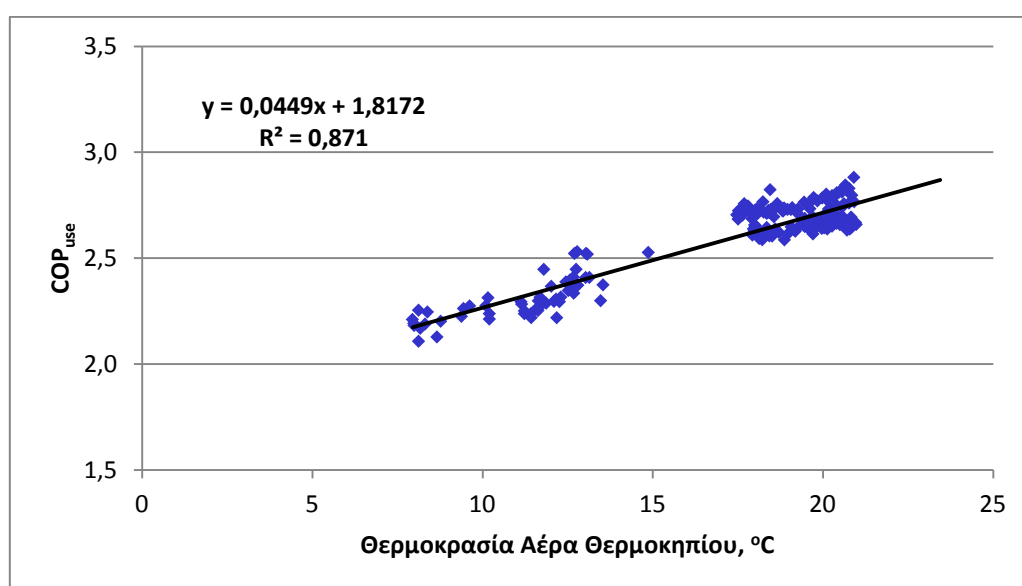
#### **5.2.4 Συμπεράσματα**

Το σύστημα υγροσκοπικής απομάκρυνσης των υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου σε θερμοκρασία 15 °C και σχετική υγρασία 80% παρουσίασε ένα ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών της τάξεως 984 g h<sup>-1</sup> (ή 4100 g m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>). Οι υπολογισμοί πρόβλεψης του ρυθμού απομάκρυνσης υδρατμών παρουσίασαν καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα. Η εφαρμογή της αφύγρανσης του αέρα του θερμοκηπίου με το δοκιμαζόμενο σύστημα μείωσε τη σχετική υγρασία στο χώρο του θερμοκηπίου σε βαθμό τέτοιο που να καθιστά τη συμπύκνωση υδρατμών πάνω στα φυτά αδύνατη.

**5.3 Αφύγρανση του αέρα του  
θερμοκηπίου με χρήση αντλίας  
θερμότητας αέρα- αέρα**

### 5.3.1 Ωφέλιμος Συντελεστής συμπεριφοράς

Στο διάγραμμα 5.3.1 παρουσιάζεται η σχέση του ωφέλιμου συντελεστή απόδοσης ( $COP_{use}$ ) της αντλίας θερμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου. Η αντλία θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία σε θερμοκρασία αέρα  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  και σχετικής υγρασίας 80% είχε ωφέλιμο συντελεστή απόδοσης ( $COP_{use}$ ) 2,5. Της ίδιας τάξεως μεγέθους (2,7) ήταν και ο συντελεστής συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας που χρησιμοποίησαν οι Boulard et al. (1989).



Διάγραμμα 5.3.1. Η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στο ωφέλιμο συντελεστή απόδοσης της αντλίας θερμότητας σε σχετική υγρασία 80%.

Από τα δεδομένα του κεφαλαίου 5.1 προέκυψε ότι οι μεγαλύτερες απαιτήσεις αφύγρανσης εντοπίζονται την ανοιξιάτικη περίοδο λόγω της αυξημένης εξατμισοδιαπνοής και της σχετικά περιορισμένης συμπύκνωσης υδρατμών στο κάλυμμα του θερμοκηπίου. Οι υψηλότερες απαιτήσεις αφύγρανσης ήταν γύρω στα  $30\text{ g m}^{-2}\text{h}^{-1}$ , με μέση θερμοκρασία αέρα θερμοκηπίου  $20,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Για αυτές τις απαιτήσεις, από τη σχέση 4.3.1, προκύπτει ο επιθυμητός ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών ίσος με  $20,83\text{ W m}^{-2}$ . Στους  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.3.1, ο ωφέλιμος συντελεστής της αντλίας θερμότητας είναι 2,7, άρα για να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από την αντλία θερμότητας, η αντλία πρέπει να απορροφά ισχύ ίση με  $12,3\text{ W m}^{-2}$ . Ο αντίστοιχος υπολογισμός για τη

χειμερινή περίοδο, όπου οι απαιτήσεις αφύγρανσης ήταν στα  $20 \text{ g m}^{-2}\text{h}^{-1}$  και η μέση θερμοκρασία αέρα θερμοκηπίου  $10,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , συνεπάγεται ότι η αντλία θερμότητας πρέπει να απορροφά ισχύ ίση με  $10,7 \text{ W m}^{-2}$ .

### 5.3.2 Συντελεστής ψυκτικής και θερμικής συμπεριφοράς

Στον πίνακα 5.3.1 παρουσιάζονται παράμετροι λειτουργίας του συστήματος της αντλίας θερμότητας, ο πίνακας αποτελείται από δύο μέρη. Στο αριστερό μέρος του πίνακα παρουσιάζονται παράμετροι που υπολογίστηκαν από τις μετρήσεις του αέρα του θερμοκηπίου καθώς περνούσε μέσα από την αντλία. Έτσι, από την διαφορά ενθαλπίας του αέρα πριν και μετά το εξατμιστή ( $\Delta h_{\text{evap}}^a$ ) και από τη παροχή μάζας ( $m_a$ ) υπολογίστηκε η ψυκτική ισχύς του εξατμιστή ( $Q_\psi$ ). Με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκε και η θερμική ισχύς του συμπυκνωτή ( $Q_\theta$ ).

Στο δεξιό μέρος του πίνακα 5.3.1 παρουσιάζονται παράμετροι λειτουργίας της αντλίας θερμότητας που υπολογίστηκαν από τις θερμοκρασίες του κύκλου της με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος CoolPack.

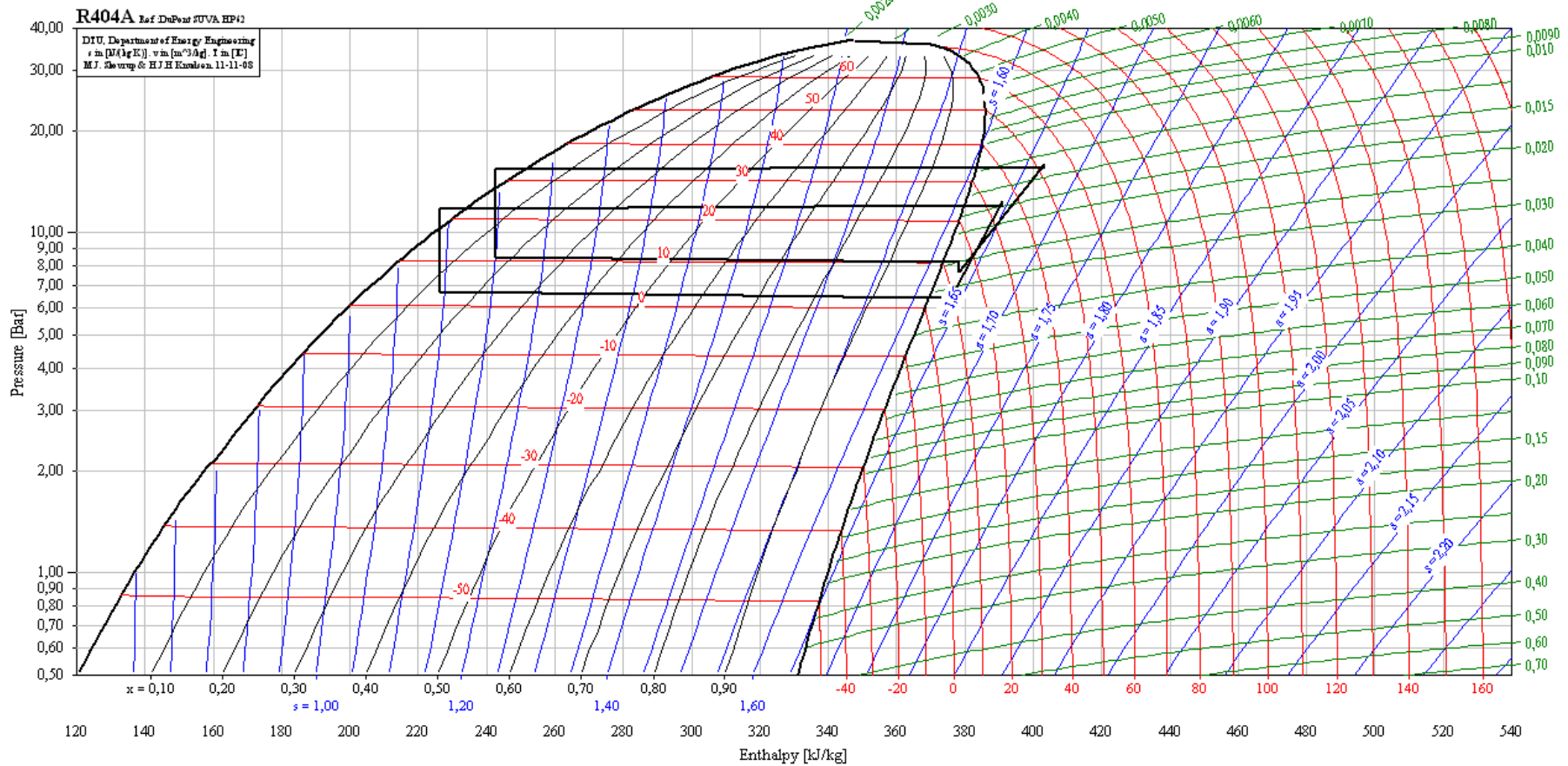
Στο διάγραμμα 5.3.2 παρουσιάζονται οι κύκλοι λειτουργίας της αντλίας θερμότητας για 2 διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας λειτουργίας, στους  $11,5 \text{ }^\circ\text{C}$  και  $18,8 \text{ }^\circ\text{C}$ , οι οποίοι κατασκευάστηκαν με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος CoolPack.

Στον πίνακα 5.3.2 παρουσιάζονται οι εκτιμώμενοι συντελεστές ψυκτικής ( $\text{COP}_\psi$ ) και θερμικής ( $\text{COP}_\theta$ ) συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας που προέκυψαν με τρεις διαφορετικές μεθόδους υπολογισμού. Στην πρώτη μέθοδο υπολογισμού χρησιμοποιήθηκαν μόνο μετρήσεις της ενθαλπίας του αέρα καθώς περνούσε μέσα από την αντλία θερμότητας, στην δεύτερη μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν και οι καταγραφές της απορροφούμενης ισχύος από την αντλία θερμότητα, ενώ στη τρίτη μέθοδο χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις της ενθαλπίας του αέρα, μετρήσεις θερμοκρασιών του κύκλου καθώς και οι υπολογισμοί από το υπολογιστικό πρόγραμμα CoolPack.



Πίνακας 5.3.1. Στο αριστερό μέρος του πίνακα παράμετροι της λειτουργίας του συστήματος της αντλίας θερμότητας που υπολογίστηκαν από τις μετρήσεις του αέρα, ενώ στο δεξιό μέρος του παράμετροι που υπολογίστηκαν από τις θερμοκρασίες του κύκλου της αντλίας θερμότητας με τη χρήση του προγράμματος CoolPack.

Υπολογισμός από μετρήσεις αέρα								Υπολογισμός από πρόγραμμα CoolPack					
	Παροχή Όγκου αέρα	Ειδικός όγκος αέρα	Παροχή Μάζας αέρα	Απώλεια ενθαλπίας αέρα στον εξατμιστή	Αύξηση ενθαλπίας αέρα στον συμπυκνωτή	Ψυκτική Ισχύς	Θερμική Ισχύς	Ειδική ψυκτική ενέργεια	Ειδική θερμική ενέργεια	Ειδικό μηχανικό έργο	Παροχή μάζας ψυκτικού ρευστού	Ολικός βαθμός απόδοσης	Μηχανική Ισχύς
	$V_a$ ( $m^3 s^{-1}$ )	$v_a$ ( $m^3 kg^{-1}$ )	$m_a$ ( $kg s^{-1}$ )	$\Delta h_{evap}^a$ ( $kJ kg^{-1}$ )	$\Delta h_{cond}^a$ ( $kJ kg^{-1}$ )	$Q_\psi$ (kW)	$Q_\theta$ (kW)	$q_\psi$ ( $kJ kg^{-1}$ )	$q_\theta$ ( $kJ kg^{-1}$ )	$w$ ( $kJ kg^{-1}$ )	$m_R$ ( $kg s^{-1}$ )	$\eta_{tot}$ -	$\Delta E$ (kW)
50 Hz $T_a=18,8^\circ C$	0,577	0,849	0,679	7,22	9,27	4,9	6,3	135,7	173,0	25,0	0,036	0,76	1,19
50 Hz $T_a=11,5^\circ C$	0,577	0,818	0,702	7,83	9,40	5,5	6,6	147,7	169,7	22,0	0,038	0,81	1,03



Διάγραμμα 5.3.2. Στο ενθαλπικό διάγραμμα παρουσιάζεται ο κύκλος λειτουργίας της αντλίας θερμότητας για δύο διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας λειτουργίας.

Πίνακας 5.3.2. Παρουσιάζονται οι συντελεστές ψυκτικής και θερμικής συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας με τρεις διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού.

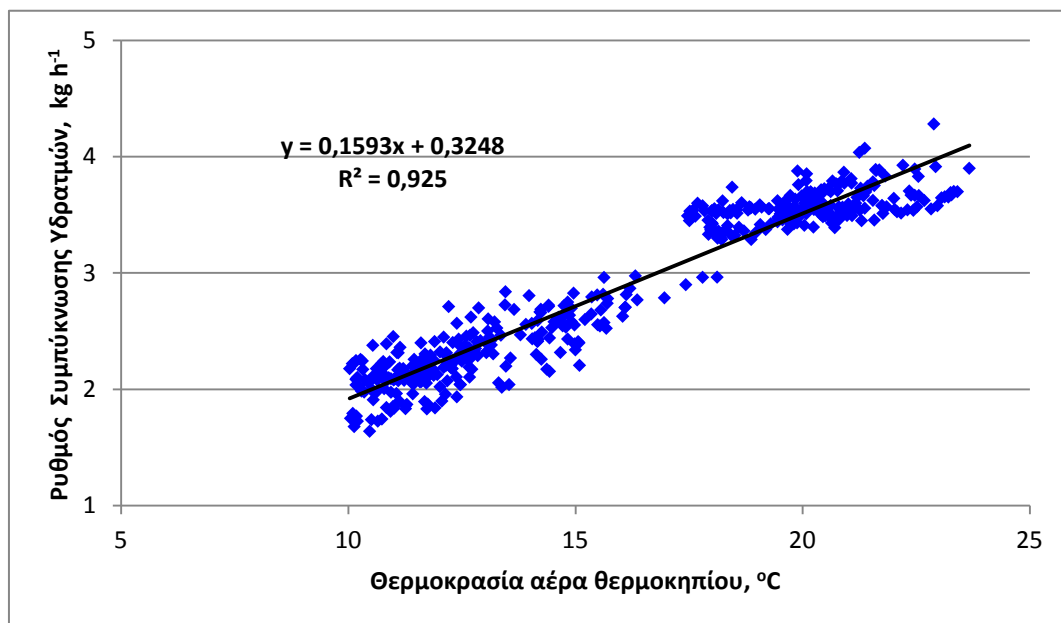
	Υπολογισμός μόνο από μετρήσεις αέρα		Υπολογισμός από μετρήσεις αέρα και κατανάλωσης ενέργειας		Υπολογισμός από το πρόγραμμα CoolPack	
	COP <sub>ψ</sub>	COP <sub>θ</sub>	COP <sub>ψ</sub>	COP <sub>θ</sub>	COP <sub>ψ</sub>	COP <sub>θ</sub>
50 Hz T <sub>a</sub> =18,8 °C	3,6	4,6	3,5	4,5	4,2	5,2
50 Hz T <sub>a</sub> =11,5 °C	4,9	5,9	4,8	5,8	5,4	6,4

Η εκτίμηση των συντελεστών ψυκτικής (COP<sub>ψ</sub>) και θερμικής συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας (COP<sub>θ</sub>) με τις τρεις διαφορετικές μεθόδους, παρουσιάζουν καλή συμφωνία μεταξύ τους, η μεγαλύτερη απόκλιση που παρουσιάζεται είναι της τάξεως του 20%. Οι μικρές αυτές αποκλίσεις μπορούν να δικαιολογηθούν από τα σφάλματα μέτρησης των οργάνων και από μικρές απώλειες θερμότητας του συμπυκνωτή μέσω ακτινοβολίας, οι οποίες δεν μπορούσαν να καταγραφούν στο διερχόμενο ρεύμα αέρα μέσα από την αντλία θερμότητας. Οι συντελεστές συμπεριφοράς βαίνουν μειούμενοι με τη μείωση θερμοκρασίας λειτουργίας, διότι ο κύκλος γίνεται πιο ισοεντροπικός.

### 5.3.3 Ικανότητα απομάκρυνσης υδρατμών από την αντλία θερμότητας

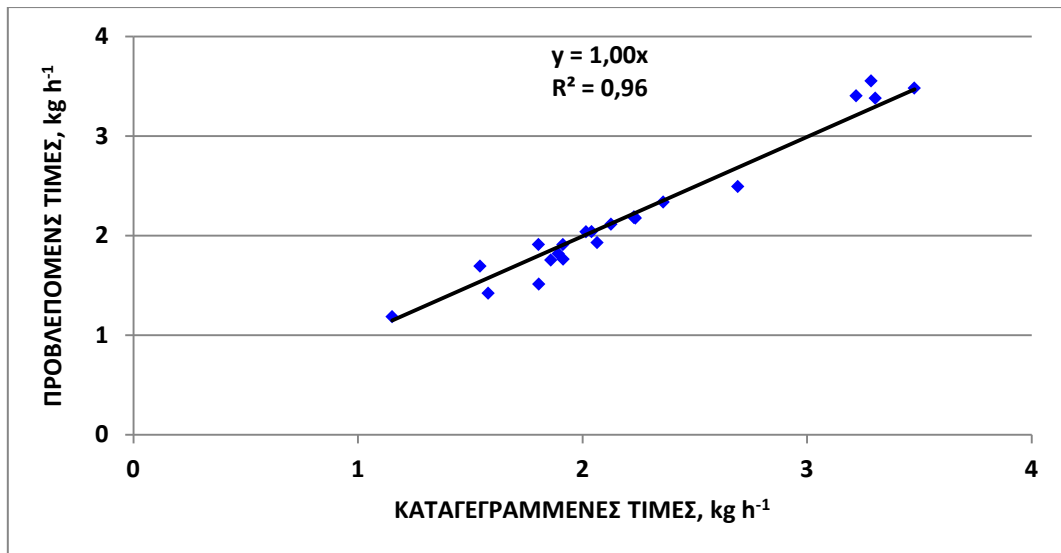
Στο διάγραμμα 5.3.3 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στο ρυθμό συμπύκνωσης υδρατμών από την αντλία θερμότητας σε επίπεδα υγρασίας 80-83%, όπως υπολογίστηκε από τη σχέση 4.3.14. Ενώ στο διάγραμμα 5.3.4 και 5.3.5 παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στις καταγραφόμενες τιμές συλλεγόμενου νερού από την αντλία θερμότητας και τιμές των σχέσεων 4.3.14 και 4.3.13 αντίστοιχα. Και οι δύο μέθοδοι προσδιορισμού του ρυθμού συμπύκνωσης ελέχθησαν για 22 νυχτερινές περιόδους λειτουργίας της αντλίας θερμότητας και αναλύθηκαν με την ανάλυση της παλινδρόμησης. Η μέθοδος προσδιορισμού του ρυθμού συμπύκνωσης υδρατμών από την αντλία θερμότητας μέσω της σχέσης 4.3.14, εμφανίζει ελαφρώς υψηλότερη ακρίβεια (τυπικό σφάλμα εκτίμησης 0,124 kg h<sup>-1</sup>) συγκριτικά με τον προσδιορισμό του ρυθμού συμπύκνωσης

μέσω της σχέσης 4.3.13 (Διάγραμμα 5.3.5), που βασίζεται στη διαφορά περιεκτικότητας υδρατμών πριν και μετά τον εξατμιστή της αντλίας ακρίβεια (τυπικό σφάλμα εκτίμησης  $0,141 \text{ kg h}^{-1}$ ).

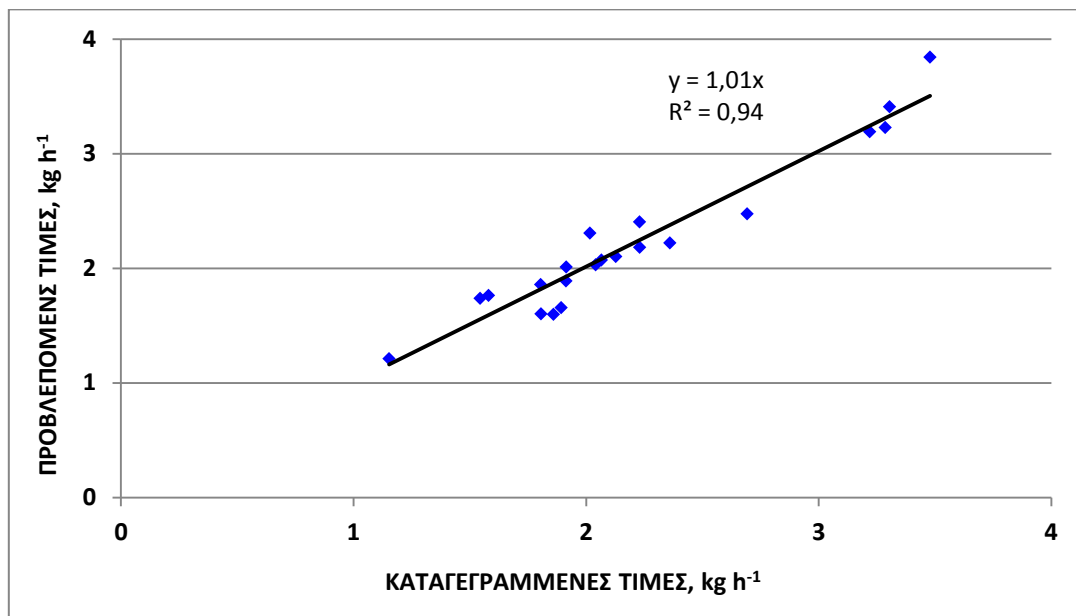


Διάγραμμα 5.3.3. Ο ρυθμός συμπύκνωσης υδρατμών από την αντλία θερμότητας συναρτήσεται της θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου.

Το σύστημα της αντλίας θερμότητας μπορεί να απομακρύνει 2715g υδρατμών ανά ώρα από αέρα θερμοκρασίας  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  και σχετικής υγρασίας 80%. Ο Chasseriaux (1987) με στόχο τη μείωση της σχετικής υγρασίας σε ένα θερμοκήπιο  $3000\text{m}^2$  χρησιμοποίησε μια αντλία θερμότητας με ονομαστική ισχύ  $2,8 \text{ kW}$ , η οποία στους  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  και σε σχετική υγρασία 87,5-90,5% συμπύκνωνε  $5 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ . Οι Boulard et al. (1989) χρησιμοποίησαν μια αντλία θερμότητας, με 25% μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ συμπιεστή ( $2 \text{ kW}$ ) συγκριτικά με τη χρησιμοποιηθείσα στην παρούσα εργασία, η οποία στους  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  συμπύκνωνε  $5 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$  αλλά, σε υψηλότερα επίπεδα σχετικής υγρασίας 88-93%.



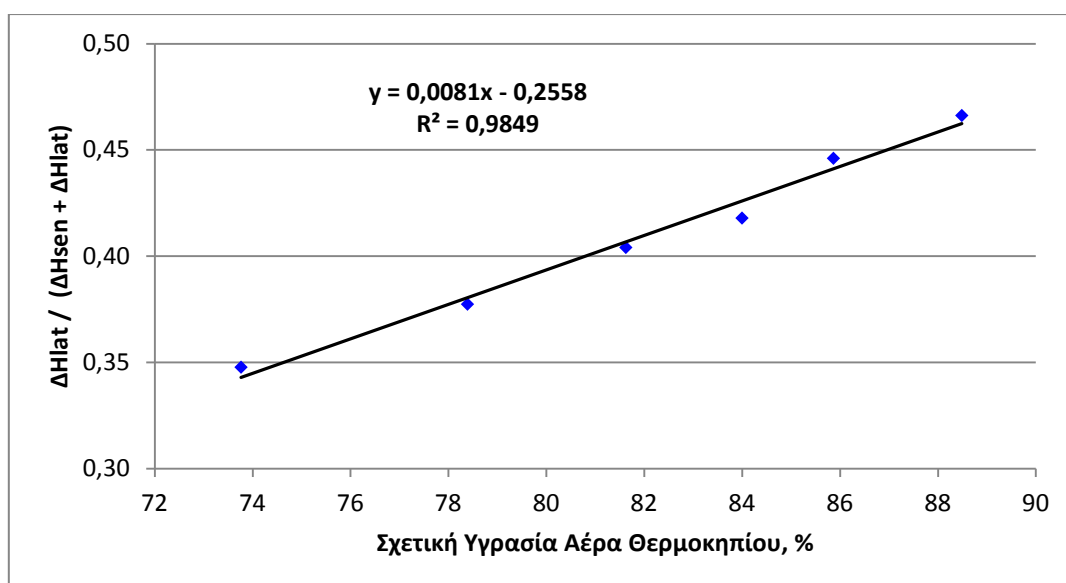
Διάγραμμα 5.3.4 Η σχέση ανάμεσα στις καταγεγραμμένες τιμές συμπυκνωμένων υδρατμών το πρωί μετά από νυκτερινή λειτουργία της αντλίας θερμότητας και στις προβλεπόμενες τιμές από την σχέση 4.3.14.



Διάγραμμα 5.3.5. Η σχέση ανάμεσα στις καταγεγραμμένες τιμές συμπυκνωμένων υδρατμών το πρωί μετά από νυκτερινή λειτουργία της αντλίας θερμότητας και στις προβλεπόμενες τιμές από την σχέση 4.3.13.

Στο διάγραμμα 5.3.6 παρουσιάζεται η επίδραση της σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στο λόγο της μεταβολής της λανθάνουσας ενέργειας προς τη μεταβολή της συνολικής ενέργειας του αέρα του θερμοκηπίου που περνά μέσα από την αντλία θερμότητας. Ο λόγος της μεταβολής της λανθάνουσας θερμότητας προς την συνολική μεταβολή της ενθαλπίας του αέρα για λειτουργία της αντλίας

θερμότητας σε σχετική υγρασία 80% είναι 0,39, ενώ για σχετική υγρασία 90% φθάνει το 0,47. Στο σύστημα αφύγρανσης με τους ψυχόμενους πτερυγιοφόρους αγωγούς, που μελέτησαν οι Campen και Bot, (2002), ο λόγος της απομακρυνόμενης λανθάνουσας θερμότητας προς την ολική μείωση της ενθαλπίας ήταν μικρότερη από το 0,33, για σχετική υγρασία 80%. Η αύξηση του λόγου της μεταβολής της λανθάνουσας ενέργειας προς τη συνολική μεταβολή της ενέργειας του αέρα υποδεικνύει αύξηση του ρυθμού συμπύκνωσης υδρατμών από την αντλία θερμότητας με την αύξηση της σχετικής υγρασίας του αέρα.



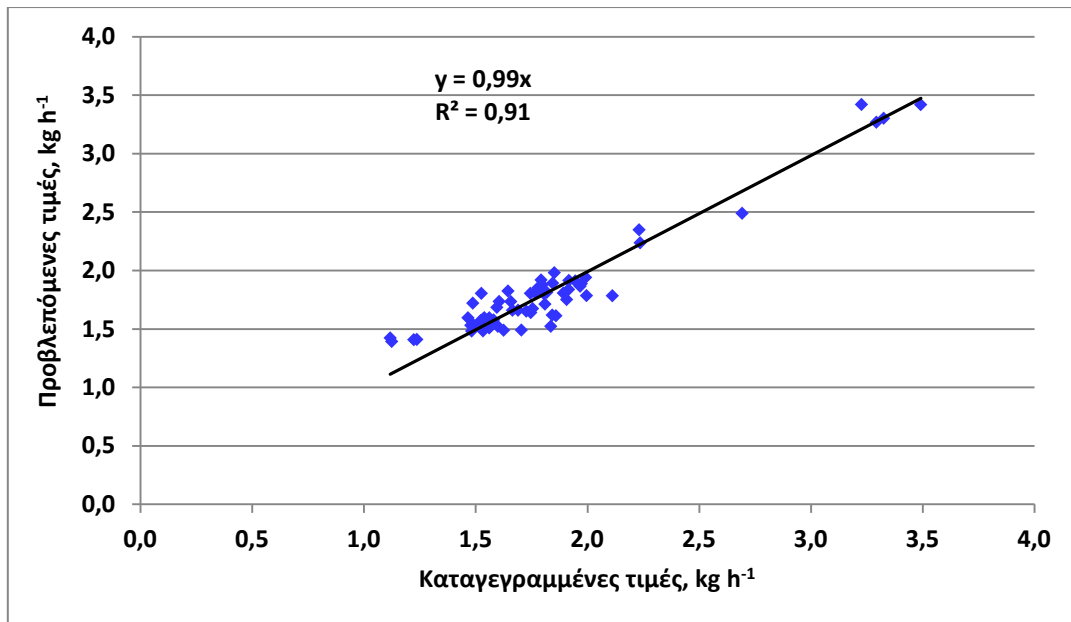
Διάγραμμα 5.3.6. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στον λόγο της μεταβολής της λανθάνουσας ενέργειας προς τη μεταβολή της ενθαλπίας του αέρα μεταξύ εισόδου και εξόδου της αντλίας θερμότητας.

Όταν χρησιμοποιείται μία αντλία θερμότητας για την διατήρηση της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο τότε η αντλία θερμότητας σταματά και ξαναλειτουργεί ανάλογα με το ισοζύγιο υδρατμών του θερμοκηπίου, με συνέπεια να μειώνεται η αποτελεσματικότητα της αφύγρανσης και να αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας. Σ' αυτή την περίπτωση η ποσότητα των υδρατμών που συμπυκνώνεται στον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας ( $m_{hp}$ ) μέσα σε μία χρονική περίοδο ( $t$ ) επηρεάζεται από το καθαρό χρόνο λειτουργίας  $\Delta t$  σε hrs, από το αριθμό των εκκινήσεων και παύσεων της αντλίας  $S_t$  και από τη θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου  $T_a$  σε °C.

$$m_{hp} = \frac{0.07526 * T_a * \Delta t}{t} - \frac{0.1176 * St}{t} + 1.819 \quad [\text{kg h}^{-1}] \quad (5.3.1)$$

Η σχέση 5.3.1 προέκυψε από την ανάλυση δεδομένων από 61 νυχτερινές περιόδους λειτουργίας της αντλίας θερμότητας. Η ανάλυση έδειξε ότι η ποσότητα των υδρατμών που απομακρύνεται από την αντλία στη μονάδα του χρόνου παρουσιάζει σημαντική θετική συσχέτιση ( $r=0,87$ ) με τη θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου, επίσης σημαντική θετική συσχέτιση ( $r=0,56$ ) παρουσιάζει με σχετική διάρκεια λειτουργίας, ενώ παρουσιάζει σημαντική αρνητική συσχέτιση ( $r=-0,83$ ) με τον αριθμό των εκκινήσεων και παύσεων του συμπιεστή της αντλίας. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων έδειξε ότι η ροή του αέρα μέσα από τους εναλλάκτες της αντλίας θερμότητας δεν έχει σημαντική επίδραση (αριθμός συσχέτισης=  $-0,03$ ) στο ρυθμό συμπύκνωσης υδρατμών. Αυτό συμβαίνει διότι όταν μειώνεται η ροή του αέρα αυξάνεται η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο από την αντλία θερμότητας (σχέση 4.3.14).

Στο διάγραμμα 5.3.7 παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στην ποσότητα των συμπυκνωμένων υδρατμών που ζυγίζονταν κάθε πρωί μετά από νυχτερινή λειτουργία της αντλίας θερμότητας και των προβλεπόμενων τιμών από την σχέση 5.3.1. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5.3.7, η σχέση 5.3.1 προβλέπει με υψηλή ακρίβεια την ποσότητα των υδρατμών που απομακρύνονται από την αντλία θερμότητας.



Διάγραμμα 5.3.7. Η σχέση ανάμεσα στις καταγεγραμμένες τιμές συμπυκνωμένων υδρατμών το πρωί μετά από νυκτερινή λειτουργία της αντλίας θερμότητας και στις προβλεπόμενες τιμές από την εξίσωση 5.10.

### 5.3.4 Κατανάλωση ενέργειας από την αντλία θερμότητας

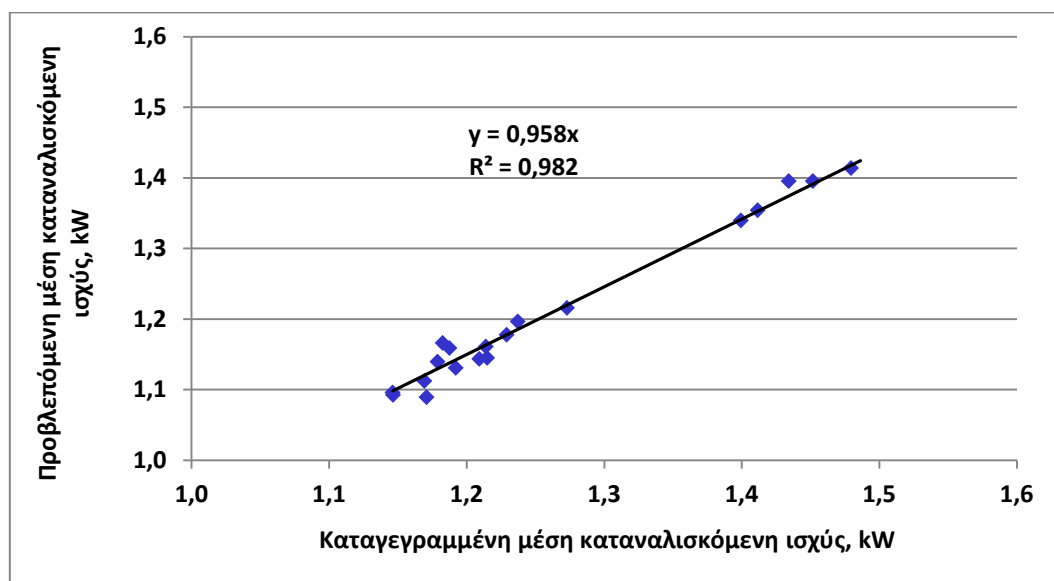
Η αφυγραντική αντλία θερμότητας, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, είχε ονομαστική ισχύ συμπιεστή ( $P_o$ ) ίσο με 1,6 kW, όμως από τις καταγραφές της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας φάνηκε ότι, η απορροφούμενη ισχύς από το συμπιεστή ήταν μικρότερη από την ονομαστική και η τιμή της εξαρτιόταν από τη θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια λειτουργίας της. Έτσι, από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψε η σχέση 5.3.2 που συνδέει την απορροφούμενη ισχύς από την αντλία θερμότητας  $\Delta E$  με την ονομαστική ισχύς της αντλίας και τη θερμοκρασία του αέρα λειτουργίας:

$$\Delta E = P_o + 0,0275 * T_a - 0,795 \quad [\text{kW}] \quad (5.3.2)$$

Στο διάγραμμα 5.3.8 φαίνεται η συμφωνία μεταξύ των καταγεγραμμένων τιμών της ισχύος που απορροφάται από την αντλία θερμότητας και των προβλεπόμενων τιμών από την σχέση 5.3.2, συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος και της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου. Ανάλογη παρατήρηση είχε κάνει και



ο Chasseriaux (1987), που ενώ χρησιμοποίησε μια αντλία θερμότητας με ονομαστική ισχύ 2,8 kW, η καταγεγραμμένη απορροφούμενη ισχύ από την αντλία θερμότητας κυμάνθηκε μεταξύ του 2,41 kW και του 2,56 kW. Μείωση της απορροφούμενης ισχύος από τον συμπιεστή της αντλίας με τη μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας παρατηρείται και στον πίνακα 5.3.1, που έχει προκύψει από το υπολογιστικό πρόγραμμα CoolPack.

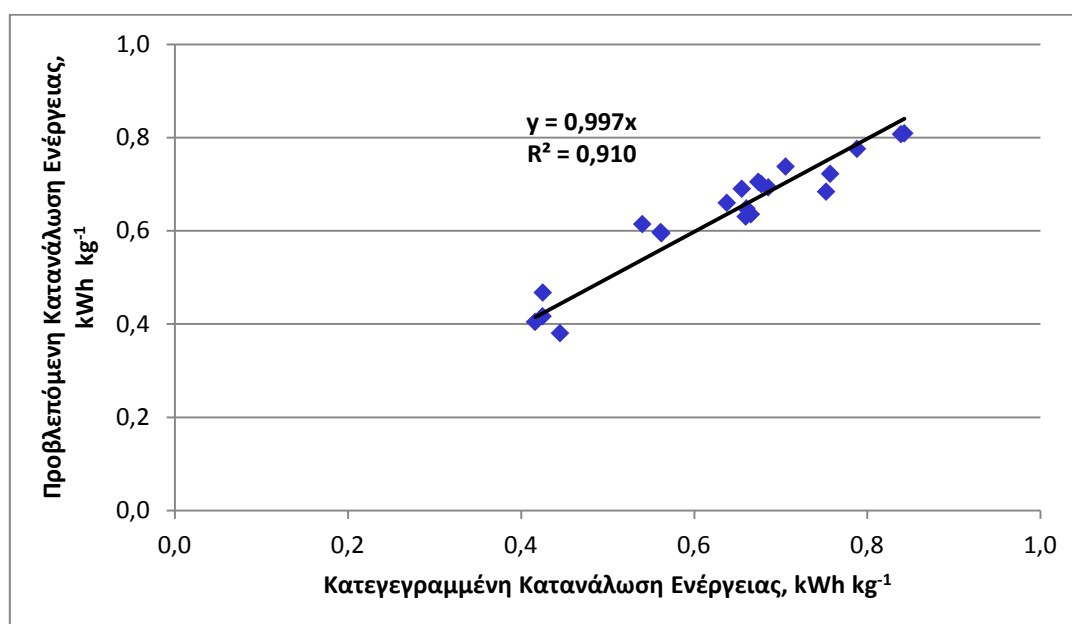


Διάγραμμα 5.3.8. Η σχέση ανάμεσα στην καταγεγραμμένη απορροφούμενη ισχύ από την αντλία θερμότητας και την προβλεπόμενη ισχύ από την εξίσωση 5.3.2.

Εκτός από την αποτελεσματικότητα μιας μεθόδου αφύγρανσης σημαντικής σημασίας είναι η οικονομικότητα μιας μεθόδου, η οποία συνήθως υπολογίζεται με βάση την κατανάλωση ενέργειας. Στην περίπτωση, που ως μέθοδος αφύγρανσης του αέρα του θερμοκηπίου χρησιμοποιείται μια αφυγραντική αντλία θερμότητας, η κατανάλωση ενέργειας για την απομάκρυνση ενός κιλού υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας, από τη σχετική διάρκεια λειτουργίας και από τον αριθμό των εκκινήσεων και παύσεων του συμπιεστή της αντλίας. Έτσι, για την αντλία που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, η κατανάλωση ενέργειας ανά kg αφαιρούμενων υδρατμών (ειδική κατανάλωση ενέργειας) μπορεί να δοθεί από την σχέση:

$$SEC = -0,410 * \frac{\Delta t}{t} + 0,0275 * \frac{St}{t} - 0,0074 * T_a + 0,928, \quad [\text{kWh kg}^{-1}] \quad (5.3.3)$$

Η σχέση 5.3.3 δείχνει ότι η κατανάλωση ενέργειας ανά λίτρο αφαιρούμενου νερού μειώνεται όσο αυξάνει η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου και ο καθαρός χρόνος λειτουργίας για δεδομένη χρονική περίοδο. Αντίθετα, η αύξηση του αριθμού των εκκινήσεων και των παύσεων του συμπιεστή της αντλίας αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας ανά λίτρο αφαιρούμενου νερού. Το τυπικό σφάλμα εκτίμησης για την σχέση 5.3.3 είναι 0,037. Στο διάγραμμα 5.3.9 φαίνεται η συμφωνία ανάμεσα στις καταγεγραμμένες τιμές κατανάλωσης από την αντλία θερμότητας και στις προβλεπόμενες τιμές κατανάλωσης από την σχέση 5.3.3.



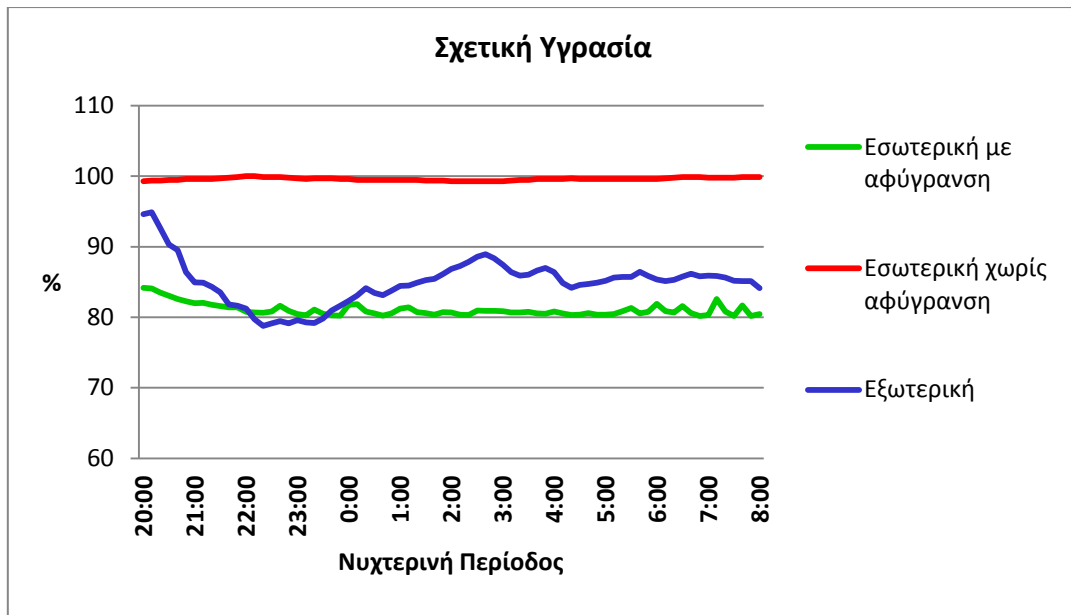
Διάγραμμα 5.3.9. Η σχέση ανάμεσα στις καταγεγραμμένες τιμές κατανάλωσης από την αντλία θερμότητας και στις προβλεπόμενες από την σχέση 5.3.3.

Έτσι, η κατανάλωση ενέργειας για την απομάκρυνση ενός kg υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου κυμαινόταν από 0,4 έως 0,8 kWh kg<sup>-1</sup>. Οι Gao et al. (2011) αναφέρουν ότι η μέση κατανάλωση ενέργειας από μία αφυγραντική αντλία θερμότητας ήταν 0,63 kWh kg<sup>-1</sup>, η τιμή αυτή βρίσκεται μέσα στο εύρος του διαγράμματος 5.3.9. Η ενέργεια αυτή δεν προστίθεται σε αυτή που καταναλώνεται για τη θέρμανση του θερμοκηπίου, αλλά η ενέργεια που καταναλώνεται για θέρμανση θα μειωθεί σε ποσό ίσο προς αυτό της κατανάλωσης της αντλίας θερμότητας.

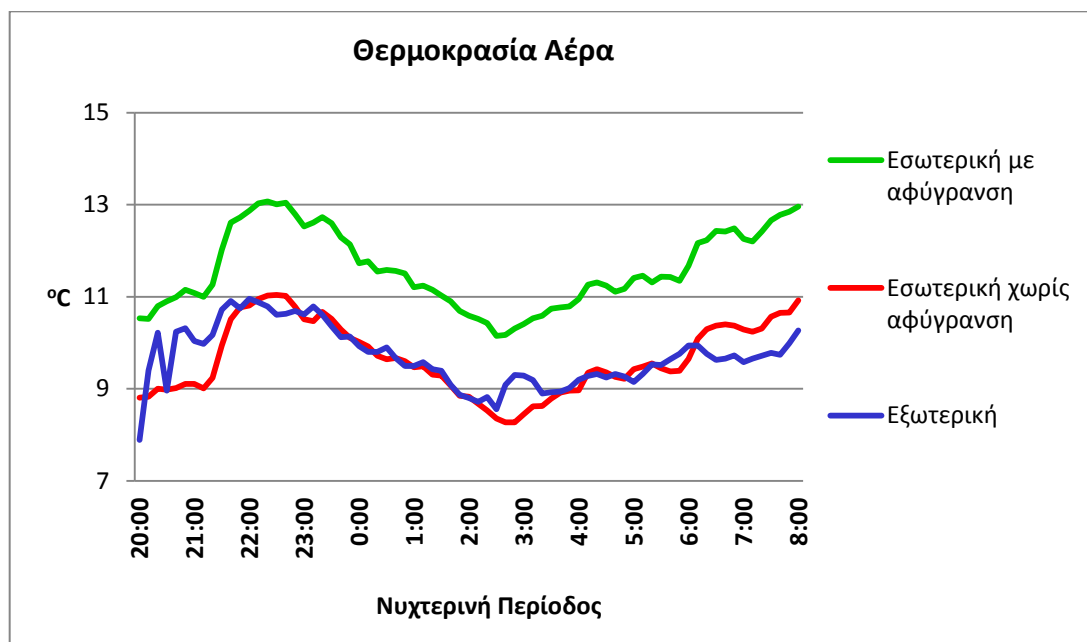
### 5.3.5 Επίδραση της αφύγρανσης με την αντλία θερμότητας στο κλίμα του θερμοκηπίου

Στο διάγραμμα 5.3.10 και 5.3.11 παρουσιάζονται ενδεικτικά η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας και της θερμοκρασίας, αντίστοιχα, στο θερμοκήπιο όπου εφαρμόστηκε αφύγρανση του αέρα με τη χρήση αντλίας θερμότητας συγκριτικά με τις τιμές στο θερμοκήπιο μάρτυρα και το εξωτερικό περιβάλλον. Τα δεδομένα αφορούν τη νυχτερινή περίοδο (20:00 – 08:00) της 23<sup>ης</sup> προς 24<sup>ης</sup> Νοεμβρίου 2007. Επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τα δεδομένα αυτής της περιόδου διότι απαιτήθηκε η αντλία θερμότητας να λειτουργεί σχεδόν στο 90% του συνολικού χρόνου για την συγκράτηση της υγρασίας στο 80%. Στο θερμοκήπιο, όπου η υγρασία δεν ελεγχόταν, η σχετική υγρασία έφθανε το 100%, με μέση τιμή κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου 99,3%. Η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο στο οποίο λειτουργούσε η αντλία θερμότητας ήταν 81%.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όταν χρησιμοποιείται μια αφυγραντική αντλία θερμότητας για τον έλεγχο της υγρασίας, ο εξατμιστής της αντλίας απορροφά τη λανθάνουσα θερμότητα των συμπυκνούμενων υδρατμών και στη συνέχεια αυτή η θερμότητα μαζί με την καταναλισκόμενη ενέργεια από τον συμπιεστή της αντλίας απελευθερώνεται στον αέρα του θερμοκηπίου, μέσω του συμπυκνωτή της αντλίας. Συνέπεια αυτού είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου συγκριτικά με ένα θερμοκήπιο, όπου δεν ελέγχεται η υγρασία (Διάγραμμα 5.3.11). Έτσι, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5.3.11, η θερμοκρασία του αέρα στο θερμοκήπιο που λειτουργούσε η αντλία θερμότητας συγκριτικά με τον μάρτυρα ήταν υψηλότερη από 1,6 έως 2,2 °C, με μέση τιμή 1,95 °C.

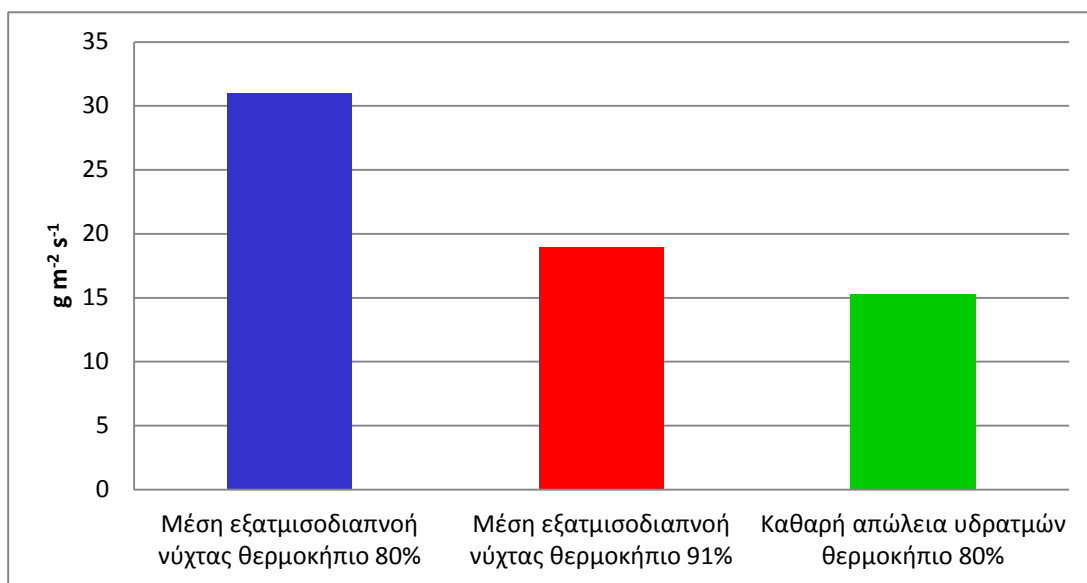


Διάγραμμα 5.3.10. Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο με την αντλία θερμότητας, στο θερμοκήπιο με ανεξέλεγκτη υγρασία και στο εξωτερικό περιβάλλον.



Διάγραμμα 5.3.11. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο με την αντλία θερμότητας, στο θερμοκήπιο με ανεξέλεγκτη υγρασία και στο εξωτερικό περιβάλλον.

Στο διάγραμμα 5.3.12 παρουσιάζεται η μέση εξατμισοδιαπνοή νύχτας, για το ολόκληρο το μήνα Δεκέμβριο του 2007, για το θερμοκήπιο στο οποίο υπήρχε έλεγχος της σχετικής υγρασίας και για το θερμοκήπιο χωρίς έλεγχο της υγρασίας.



Διάγραμμα 5.3.12. Η απώλειες υδρατμών κατά τη διάρκεια της νύχτας για το μήνα Δεκέμβριο 2007, για το θερμοκήπιο με την αντλία θερμότητας και για το θερμοκήπιο χωρίς έλεγχο της υγρασίας.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο έλεγχος της υγρασίας στο θερμοκήπιο αυξάνει το ρυθμό εξατμισοδιαπνοής. Ο μέσος ρυθμός εξατμισοδιαπνοής κατά τη διάρκεια της νύχτας ήταν 64% υψηλότερος συγκριτικά με του θερμοκηπίου με την ανεξέλεγκτη υγρασία (Διάγραμμα 5.3.12). Όμως, όταν χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της υγρασίας αφυγραντική αντλία θερμότητας, η ποσότητα των υδρατμών, που απομακρύνει από τον αέρα του θερμοκηπίου, συλλέγεται και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Έτσι, η καθαρή κατανάλωση νερού στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκεια της νύχτας στο θερμοκήπιο, που χρησιμοποιεί αντλία θερμότητας, μειώνεται συγκριτικά με το θερμοκήπιο χωρίς έλεγχο της υγρασίας, και φθάνει στο 80% της κατανάλωσης του.

### 5.3.6 Συμπεράσματα

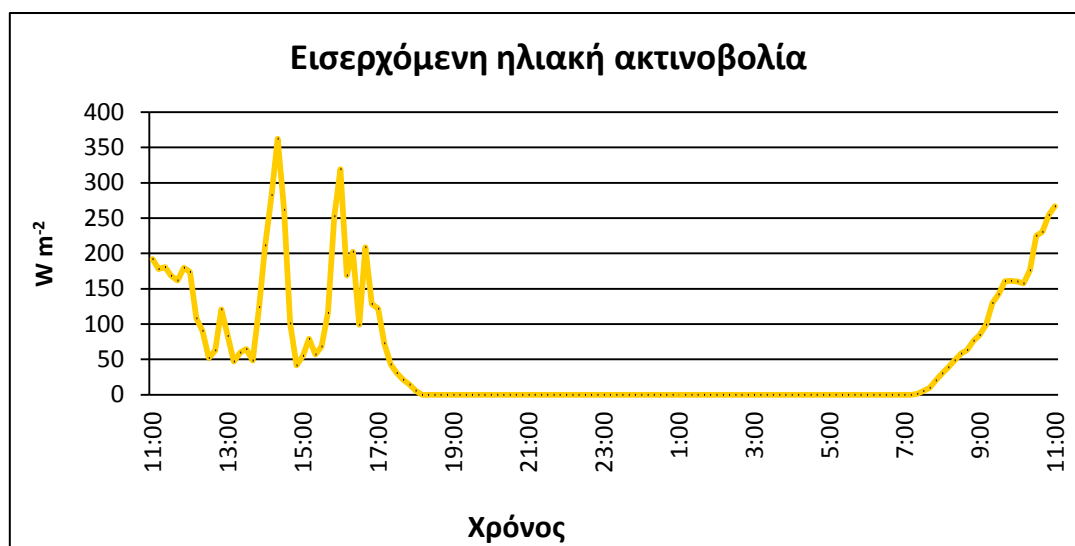
Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η λειτουργία μιας αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα για την αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου. Ο ωφέλιμος συντελεστής απόδοσης της αντλίας θερμότητας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου. Η απαιτούμενη ισχύς της αντλίας θερμότητας για συγκράτηση της σχετικής υγρασίας στο 80% υπολογίστηκε στα 12,3 W m<sup>-2</sup> εδάφους. Προσδιορίστηκε ο ρυθμός συμπύκνωσης υδρατμών από την αντλία θερμότητας ανάλογα με τις συνθήκες, τη διάρκεια και τη συχνότητα λειτουργίας. Έτσι, για

συνεχή λειτουργία σε αέρα θερμοκηπίου 15 °C και σχετικής υγρασίας 80%, η αντλία θερμότητας μπορούσε να συμπυκνώνει 2,8 kg h<sup>-1</sup>. Προσδιορίστηκε επίσης η κατανάλωση ενέργειας ανά κιλό συλλεγόμενων υδρατμών, η οποία στους 15 °C και σχετική υγρασία 80% βρέθηκε να είναι 0,435 kWh kg<sup>-1</sup>. Ο έλεγχος της σχετικής υγρασίας με τη χρήση αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα αυξάνει την θερμοκρασία ενός μη θερμαινόμενου θερμοκηπίου μέχρι και κατά 2 °C.

## **5.4 Αφύγρανση θερμοκηπίου με υβριδικό σύστημα αφύγρανσης**

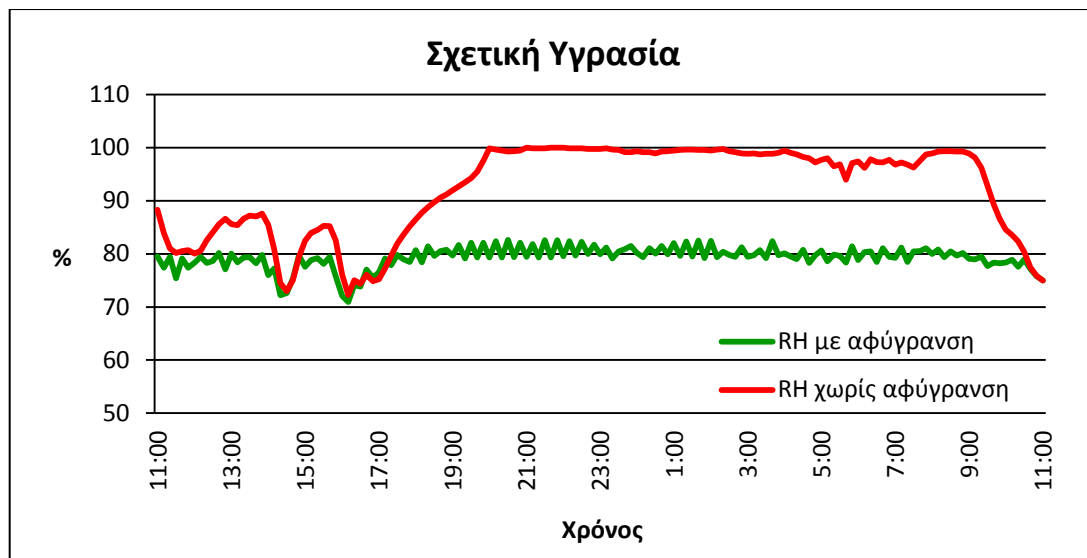
### 5.4.1 Επίδραση της λειτουργίας του υβριδικού συστήματος στο κλίμα του θερμοκηπίου

Στις 18 Φεβρουαρίου 2007, η μέση ένταση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο, κατά τη διάρκεια της ημέρας, ήταν χαμηλή ( $108 \text{ W m}^{-2}$ ) με αποτέλεσμα η θερμοκρασία στο θερμοκήπιο να επιτρέπει τα παράθυρα να παραμείνουν κλειστά όλη την ημέρα (Διάγραμμα 5.4.1). Έτσι, το υβριδικό σύστημα χρησιμοποιήθηκε για την αφύγρανση του αέρα στο ένα από τα δύο θερμοκήπια του πειράματος από τις 11:00 το πρωί της 18<sup>ης</sup> έως τις 11:00 της 19<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου. Στο διάγραμμα 5.4.2 παρουσιάζεται η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας του αέρα στο θερμοκήπιο, όπου εφαρμόστηκε αφύγρανση του αέρα με υβριδικό σύστημα, η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο με την ανεξέλεγκτη υγρασία.



Διάγραμμα 5.4.1. Η εξέλιξη της εισερχόμενης στο θερμοκήπιο ηλιακής ακτινοβολίας από τις 11:00 π.μ. της 18<sup>ης</sup> έως τις 11:00 π.μ. της 19<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου.

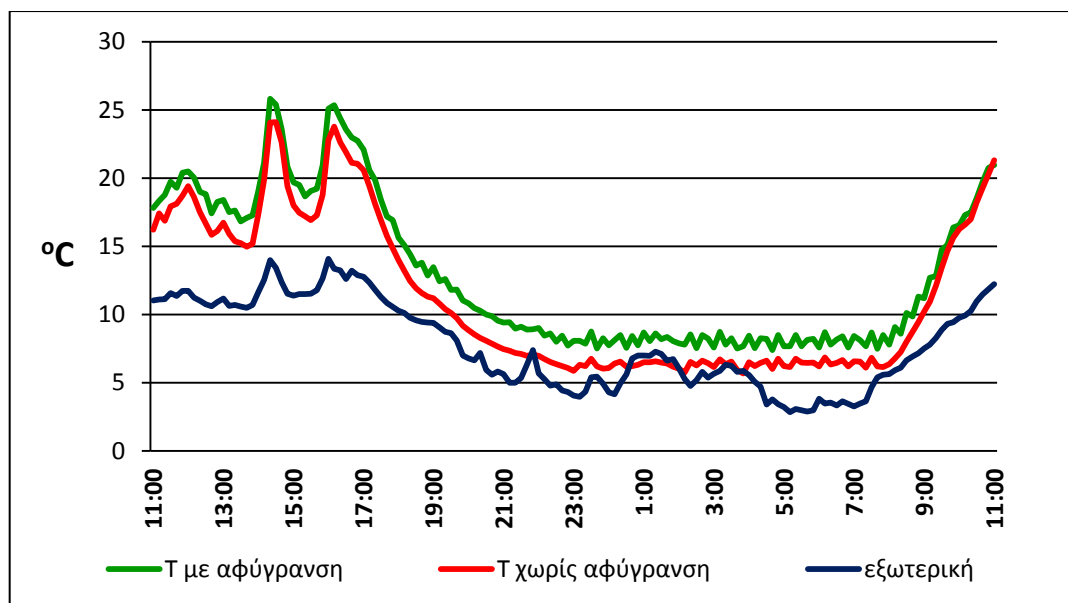




Διάγραμμα 5.4.2. Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο με λειτουργία του υβριδικού συστήματος αφύγρανσης και στο θερμοκήπιο με την ανεξέλεγκτη υγρασία.

Στο θερμοκήπιο όπου λειτουργούσε το υβριδικό σύστημα αφύγρανσης η σχετική υγρασία του αέρα δεν ξεπέρασε το όριο του 80% μέσα σε όλο το 24ωρο. Αντίθετα, στο θερμοκήπιο με την ανεξέλεγκτη υγρασία, η σχετική υγρασία του αέρα έφθανε το 100% κατά τη διάρκεια της νύχτας και υπερέβαινε το όριο του 80% κατά τη διάρκεια της ημέρας σε χαμηλές εντάσεις εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Η μέση τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα στο θερμοκήπιο με αφύγρανση από το υβριδικό σύστημα ήταν 79,3%, ενώ στο θερμοκήπιο με την ανεξέλεγκτη υγρασία 92%.

Η ενέργεια, που καταναλώνει το υβριδικό σύστημα αφύγρανσης, και η μετατροπή της λανθάνουσας θερμότητας των απομακρυνόμενων υδρατμών, από το σύστημα αφύγρανσης, σε αισθητή θερμότητα στο χώρο του θερμοκηπίου είχε ως αποτέλεσμα τη υψηλότερη θερμοκρασία στο θερμοκήπιο συγκριτικά με το θερμοκήπιο με την ανεξέλεγκτη υγρασία (Διάγραμμα 5.4.3).

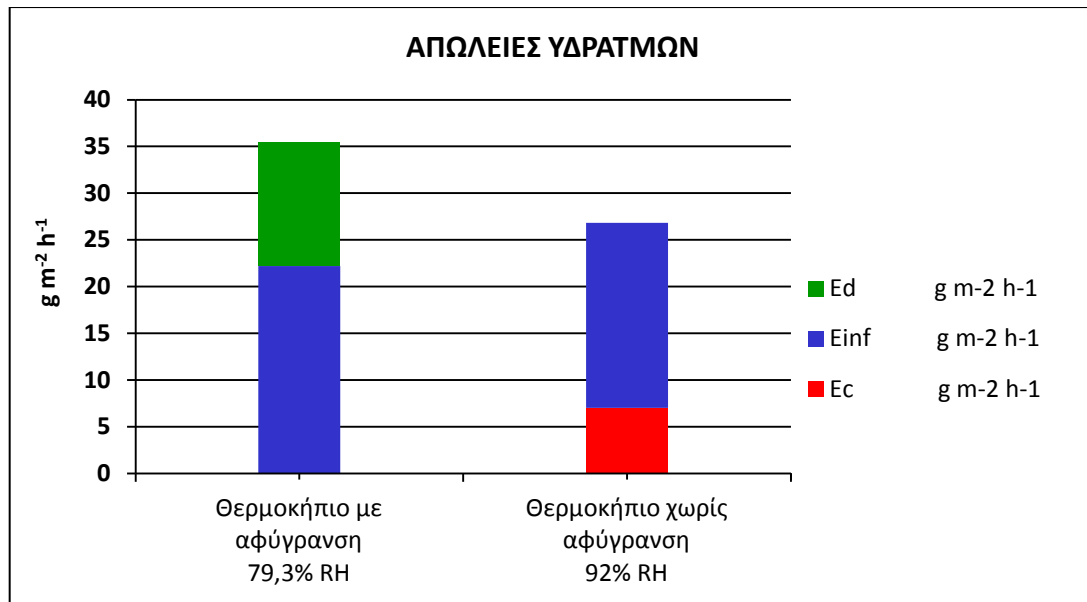


Διάγραμμα 5.4.3. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο με λειτουργία του υβριδικού συστήματος αφύγρανσης, στο θερμοκήπιο με την ανεξέλεγκτη υγρασία, καθώς και η εξέλιξη της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα.

Η μέση διαφορά θερμοκρασίας των δύο θερμοκηπίων ήταν 1,6 °C. Οι μεγαλύτερες διαφορές στην θερμοκρασία παρατηρήθηκαν κατά την διάρκεια της νύχτας όπου η συχνότητα λειτουργίας του υβριδικού συστήματος αφύγρανσης ήταν μεγαλύτερη, δηλαδή υψηλότερος ρυθμός έκλυσης αισθητής θερμότητας στο χώρο του θερμοκηπίου. Στο διάγραμμα 5.4.3 φαίνεται καθαρά και η επίδραση της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας στη θερμοκρασία του θερμοκηπίου (Διάγραμμα 5.4.1).

#### 5.4.2 Επίδραση της αφύγρανσης με το υβριδικό σύστημα στις απώλειες υδρατμών του θερμοκηπίου

Στο διάγραμμα 5.4.4 παρουσιάζεται η κατανομή των απωλειών υδρατμών, στο θερμοκήπιο με αφύγρανση του αέρα από το υβριδικό σύστημα και στο θερμοκήπιο με την ανεξέλεγκτη υγρασία, για το διάστημα από τις 11:00 το πρωί της 18<sup>ης</sup> έως τις 11:00 το πρωί της 19<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου.



Διάγραμμα 5.4.4. Η κατανομή των απωλειών του θερμοκηπίου με αφύγρανση και χωρίς αφύγρανση από τις 11:00 πμ της 18<sup>ης</sup> έως τις 11:00 πμ της 19<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου.

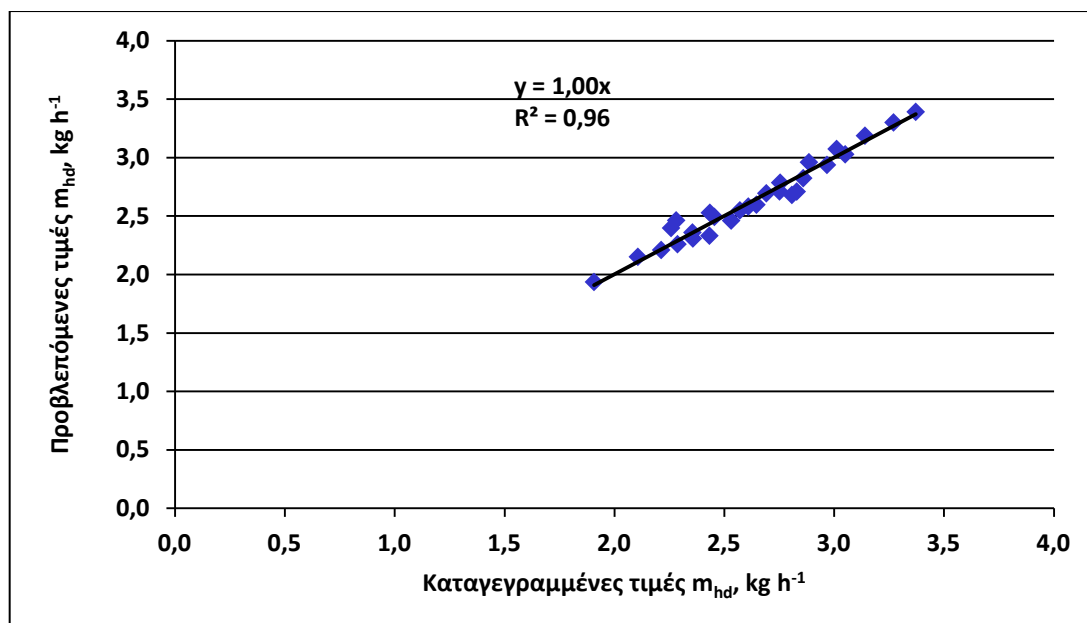
Η αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου με το υβριδικό σύστημα αύξησε το έλλειμμα πίεσης υδρατμών του (0,338 kPa) συγκριτικά με το έλλειμμα πίεσης υδρατμών του αέρα του θερμοκηπίου με την ανεξέλεγκτη υγρασία (0,162 kPa). Το γεγονός αυτό, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5.4.4, οδήγησε σε αυξημένο ρυθμό εξατμισοδιαπνοής στο θερμοκήπιο ( $35,5 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ), στο οποίο λειτουργούσε το υβριδικό σύστημα για την αφύγρανση του χώρου, συγκριτικά με το ρυθμό εξατμισοδιαπνοής του θερμοκηπίου με την ανεξέλεγκτη υγρασία ( $26,8 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ). Οι διαφυγές των υδρατμών, από το θερμοκήπιο με την αφύγρανση, στο εξωτερικό περιβάλλον ήταν ελαφρώς αυξημένες (κατά 12%) σε σχέση με αυτές του θερμοκηπίου με την ανεξέλεγκτη υγρασία. Η αύξηση αυτή των διαφυγών στο θερμοκήπιο με την αφύγρανση οφείλεται στην υψηλότερη θερμοκρασία του αέρα που επικρατούσε στο εσωτερικό του, εξαιτίας της απελευθέρωσης αισθητής θερμότητας από την λειτουργία της αφύγρανσης με το υβριδικό σύστημα. Η υψηλότερη θερμοκρασία στο εσωτερικό αέρα του θερμοκηπίου αφενός αυξάνει το ρυθμό διαφυγών του θερμοκηπίου, λόγω αύξησης της διαφοράς πίεσης του αέρα μέσα και έξω από το θερμοκήπιο, και αφετέρου για δεδομένη σχετική υγρασία αυξάνεται η απόλυτη υγρασία του αέρα του, επομένως αυξάνεται και η διαφορά απόλυτης υγρασίας μέσα και έξω από το θερμοκήπιο.

### 5.4.3 Ικανότητα απομάκρυνσης υδρατμών από το υβριδικό σύστημα

Όταν χρησιμοποιείται ένα σύστημα αφύγρανσης για την διατήρηση της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο τότε το σύστημα σταματά και αρχίζει τη λειτουργία του ανάλογα με το επίπεδο της ποσότητας των υδρατμών του θερμοκηπίου, με συνέπεια να μειώνεται η αποτελεσματικότητα της αφύγρανσης και να αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας. Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων βρέθηκε ότι, ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου από το υβριδικό σύστημα μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση:

$$m_{hd} = 0,278 * X_a + 2,268 * \xi - 0,063 * St, \quad [kg \text{ h}^{-1}] \quad (5.4.1)$$

Ο ρυθμός απομάκρυνσης υδρατμών από το υβριδικό σύστημα αυξάνεται με την αύξηση της ειδικής υγρασίας του αέρα και της συγκέντρωσης του υγροσκοπικού διαλύματος του  $\text{CaCl}_2$ , ενώ αντίθετα μειώνεται όσο αυξάνει ο αριθμός των κύκλων λειτουργίας του συστήματος ανά ώρα (St). Η αύξηση της συγκέντρωσης του υγροσκοπικού διαλύματος μειώνει την πίεση υδρατμών του, αυξάνοντας έτσι την διαφορά πίεσης υδρατμών ανάμεσα στο αέρα και το διάλυμα (σχέση 4.4.2). Η διαφορά πίεσης υδρατμών αποτελεί την κινητήρια δύναμη για την απορρόφηση υδρατμών από το υγροσκοπικό διάλυμα. Η αύξηση του αριθμού των κύκλων λειτουργίας του συστήματος ανά ώρα μειώνει την ικανότητα του για την απομάκρυνση των υδρατμών, διότι ο εξατμιστής της αντλίας θερμότητας δεν αποκτά άμεσα την χαμηλότερη θερμοκρασία του. Στο διάγραμμα 5.4.5 παρουσιάζεται η συμφωνία πειραματικών και προβλεπόμενων τιμών από τη σχέση 5.4.1. Το τυπικό σφάλμα εκτίμησης για τη σχέση 5.4.1 είναι  $0,077 \text{ kg h}^{-1}$ , ενώ η μέση απόκλιση ανάμεσα στις πραγματικές και τις προβλεπόμενες τιμές του ρυθμού απομάκρυνσης υδρατμών από υβριδικό σύστημα ήταν 2,2%, με μέγιστη το 5,95%.

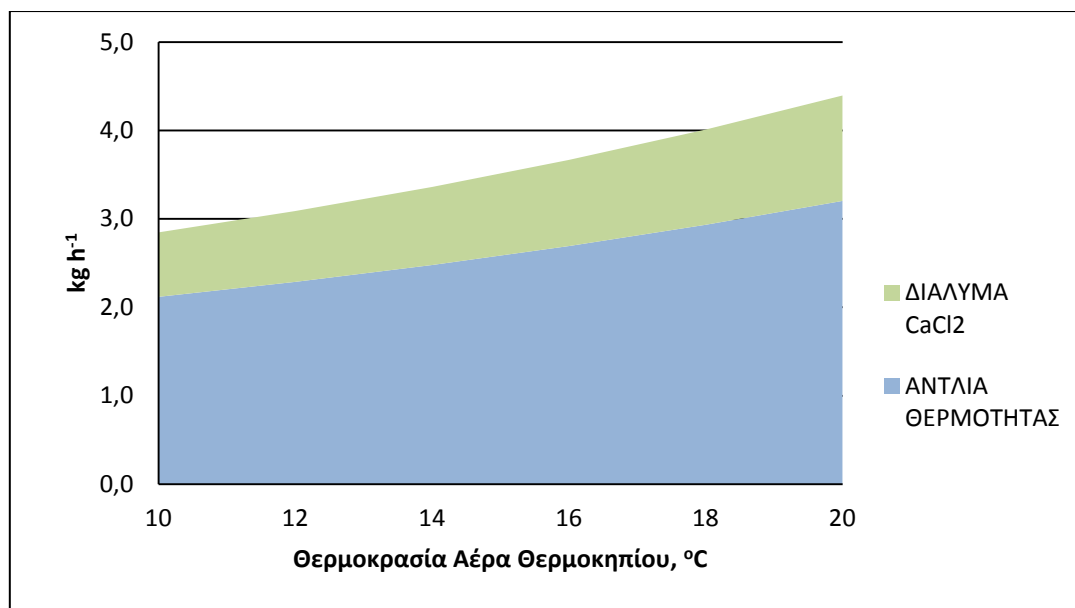


Διάγραμμα 5.4.5. Η σχέση ανάμεσα στις πειραματικές τιμές του ρυθμού απομάκρυνσης υδρατμών από το υβριδικό σύστημα και στις προβλεπόμενες τιμές από τη σχέση 5.4.1.

Όπως αναφέρθηκε η μη συνεχή λειτουργία του υβριδικού συστήματος αφύγρανσης επηρεάζει κυρίως την ικανότητα του εξατμιστή της αντλίας για απομάκρυνση υδρατμών, από την άλλη η ικανότητα του εξατμιστή της αντλίας δεν επηρεάζεται από τη συγκέντρωση του υγροσκοπικού διαλύματος του  $CaCl_2$ . Επομένως, η ικανότητα απομάκρυνσης υδρατμών από τον εξατμιστή της αντλίας εξαρτάται από την ειδική υγρασία του αέρα και των αριθμό των κύκλων λειτουργίας ανά ώρα, έτσι προέκυψε η σχέση:

$$m_{hp} = 0,192 * X_a - 0,183 * St + 1,124, \quad [kg\ h^{-1}] \quad (5.4.2)$$

Από τις σχέσεις 5.4.1 και 5.4.2, προσδιορίστηκε η κατανομή της ικανότητας του υβριδικού συστήματος αφύγρανσης ανάμεσα στον εξατμιστή της αντλίας και το υγροσκοπικό διάλυμα του  $CaCl_2$ , όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.4.6. Η κατανομή, όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5.4.6, έχει υπολογιστεί για έναν κύκλο λειτουργίας ανά ώρα, για συγκέντρωση υγροσκοπικού διαλύματος  $CaCl_2$  54% και για σχετική υγρασία αέρα θερμοκηπίου 80%.



Διάγραμμα 5.4.6. Η ικανότητα απομάκρυνσης υδρατμών υβριδικού συστήματος και η κατανομή των απομακρυνόμενων υδρατμών ανάμεσα στον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας και υγροσκοπικό διάλυμα, συναρτήσει της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου, για σχετική υγρασία 80%, για συγκέντρωση CaCl<sub>2</sub> 54% και για ένα κύκλο λειτουργίας ανά ώρα.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.4.6, η κατανομή της ικανότητας απομάκρυνσης υδρατμών από το υβριδικό σύστημα ανάμεσα στον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας και το υγροσκοπικό διάλυμα δεν μεταβάλλεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου όταν η σχετική υγρασία παραμένει σταθερή. Έτσι, για σχετική υγρασία 80%, το 73% της συνολικής ποσότητας των υδρατμών που απομακρύνει το υβριδικό σύστημα απομακρύνεται από τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας και το 27% από το υγροσκοπικό διάλυμα.

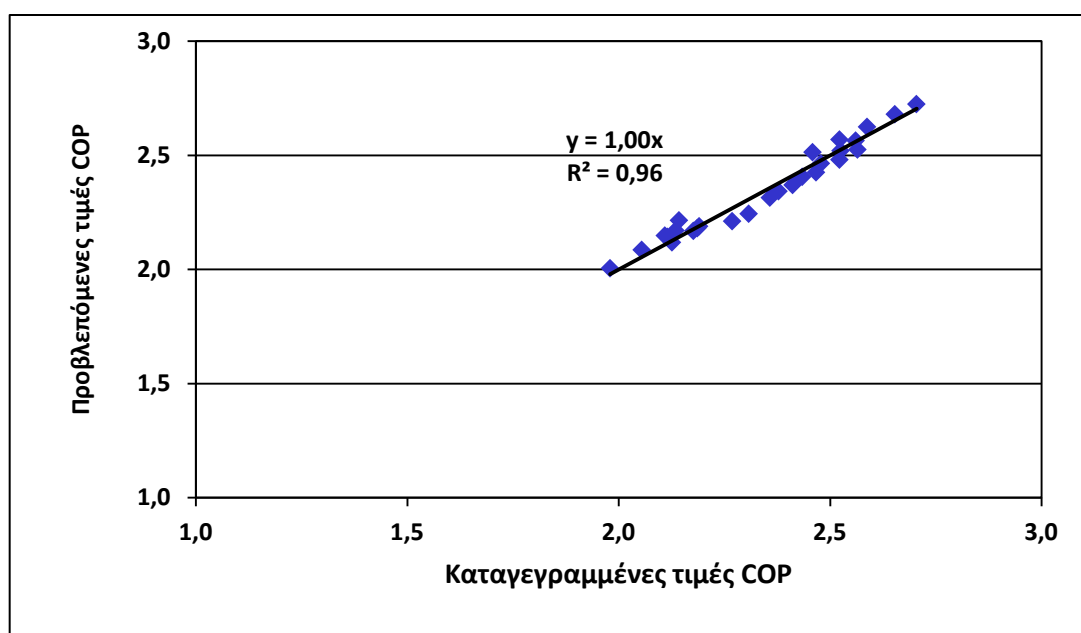
#### 5.4.4 Ωφέλιμος συντελεστής συμπεριφοράς υβριδικού συστήματος

Από τη σχέση 4.4.6 υπολογίστηκε ο ωφέλιμος συντελεστής συμπεριφοράς του υβριδικού συστήματος για 24 περιόδους λειτουργίας και καταγράφηκαν ο αριθμός των κύκλων λειτουργίας, η μέση συγκέντρωση του CaCl<sub>2</sub> στο διάλυμα, η ειδική υγρασία του αέρα, ο καθαρός χρόνος λειτουργίας και η συνολική ποσότητα των αφαιρούμενων υδρατμών σε κάθε περίοδο. Από την ανάλυση της πολλαπλής παλινδρόμησης προέκυψε η παρακάτω σχέση, που συνδέει τον αφυγραντικό συντελεστή συμπεριφοράς του υβριδικού συστήματος με την ειδική υγρασία του

αέρα του θερμοκηπίου, την συγκέντρωση του υγρασκοπικού διαλύματος και τον αριθμό των κύκλων λειτουργίας του συστήματος ανά ώρα:

$$\text{COP} = 0,0578 * X_a + 1,109 * \xi - 0,044 * St + 1,741, \quad (5.4.3)$$

Το τυπικό σφάλμα εκτίμησης για τη σχέση 5.4.3 είναι 0,04, ενώ η μέση απόκλιση ανάμεσα στις πραγματικές και τις προβλεπόμενες τιμές του αφυγραντικού συντελεστή συμπεριφοράς του υβριδικού συστήματος ήταν 1,3%, με μέγιστη απόκλιση 3,4%. Στο διάγραμμα 5.4.7 παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στις πειραματικές τιμές του αφυγραντικού συντελεστή συμπεριφοράς του υβριδικού συστήματος και τις προβλεπόμενες τιμές από τη σχέση 5.4.3. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5.4.7, η σχέση 5.4.3 προβλέπει με υψηλή ακρίβεια το συντελεστή συμπεριφοράς του υβριδικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε για την αφύγρανση του θερμοκηπίου στη παρούσα εργασία.



Διάγραμμα 5.4.7. Η σχέση ανάμεσα στις πειραματικές τιμές του αφυγραντικού συντελεστή συμπεριφοράς του υβριδικού συστήματος αφύγρανσης και στις προβλεπόμενες από την σχέση 5.4.3.

Σύμφωνα με το κεφάλαιο 5.3 της παρούσας διατριβής ο ωφέλιμος συντελεστής συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας στους 15 °C και 80% σχετική υγρασία ήταν 2,5, σε αυτές τις συνθήκες η ειδική υγρασία του αέρα είναι 8,5 g kg<sup>-1</sup>.

Σύμφωνα με τη σχέση 5.4.3, ο ωφέλιμος συντελεστής συμπεριφοράς του υβριδικού συστήματος για ειδική υγρασία αέρα  $8,5 \text{ g kg}^{-1}$ , συγκέντρωση υγροσκοπικού διαλύματος  $\text{CaCl}_2$  54% και για ένα κύκλο λειτουργίας ανά ώρα, είναι 2,79. Επομένως, ο ωφέλιμος συντελεστής συμπεριφοράς του υβριδικού συστήματος αφύγρανσης είναι 11,6% υψηλότερος από αυτόν της αντλίας θερμότητας.

Με γνωστό τον αφυγραντικό συντελεστή συμπεριφοράς του υβριδικού συστήματος και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 4.4.5 και 4.4.6, μπορεί να υπολογιστεί η κατανάλωση ενέργειας για κάθε kg αφαιρούμενων υδρατμών από τον αέρα του θερμοκηπίου. Έτσι, στους  $15^\circ\text{C}$  και υγρασία 80% για κάθε kg αφαιρούμενων υδρατμών απαιτούνται 0,388 kWh, ενώ στους  $20^\circ\text{C}$  και 80% απαιτούνται 0,347 kWh. Οι αντίστοιχες καταναλώσεις για αφύγρανση μόνο με την αντλία θερμότητας ήταν 0,435 kWh και 0,398 kWh. Επομένως, το υβριδικό σύστημα αφύγρανσης παρουσιάζει μειωμένη κατανάλωση ενέργειας (κατά 13%) συγκριτικά με το σύστημα της αντλίας θερμότητας.

#### **5.4.5 Συμπεράσματα**

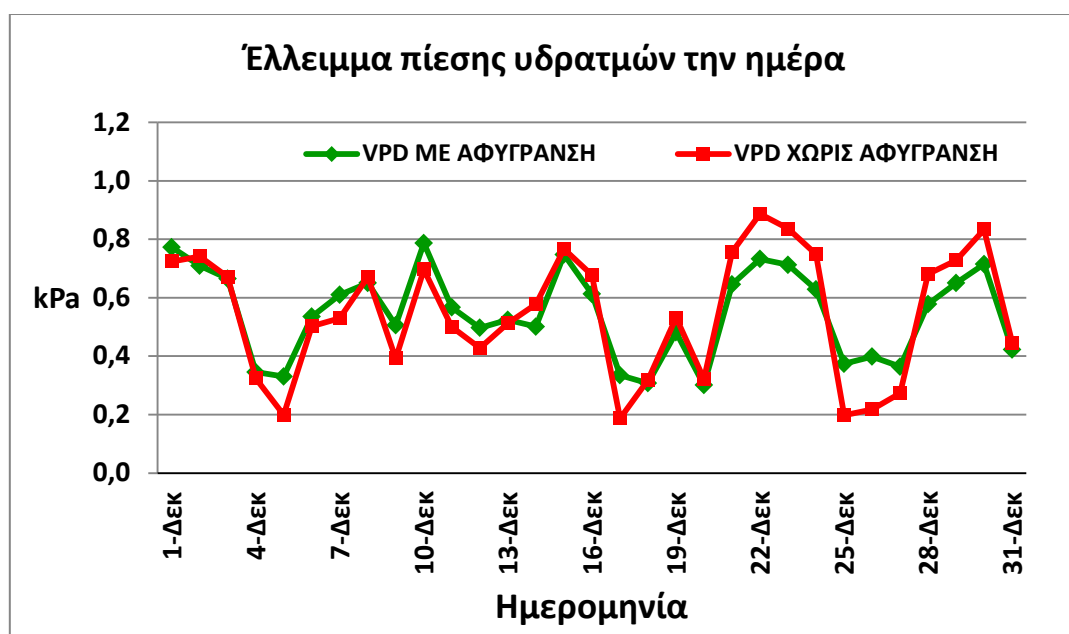
Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε υβριδικό σύστημα αφύγρανσης του θερμοκηπίου του οποίου η ικανότητα απομάκρυνσης υδρατμών, στους  $15^\circ\text{C}$  και 80% σχετική υγρασία, ήταν 30% υψηλότερη από αυτή του συστήματος με λειτουργία μόνο αντλίας θερμότητας. Η αφύγρανση του θερμοκηπίου με το προτεινόμενο υβριδικό σύστημα παρουσίασε μικρότερη κατανάλωση ενέργειας κατά 13% συγκριτικά με την αφύγρανση του θερμοκηπίου μόνο με τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας. Έτσι, ο ωφέλιμος συντελεστής του υβριδικού συστήματος συμπεριφοράς ήταν μόνο κατά 12% υψηλότερος από αυτόν του συστήματος της αντλίας θερμότητας.



**5.5 Επίδραση υγρασίας στην  
ανάπτυξη, την παραγωγή και στην  
ευαισθησία προσβολής από  
βοτρυτή**

### 5.5.1 Επιδράσεις της υγρασίας στην ανάπτυξη

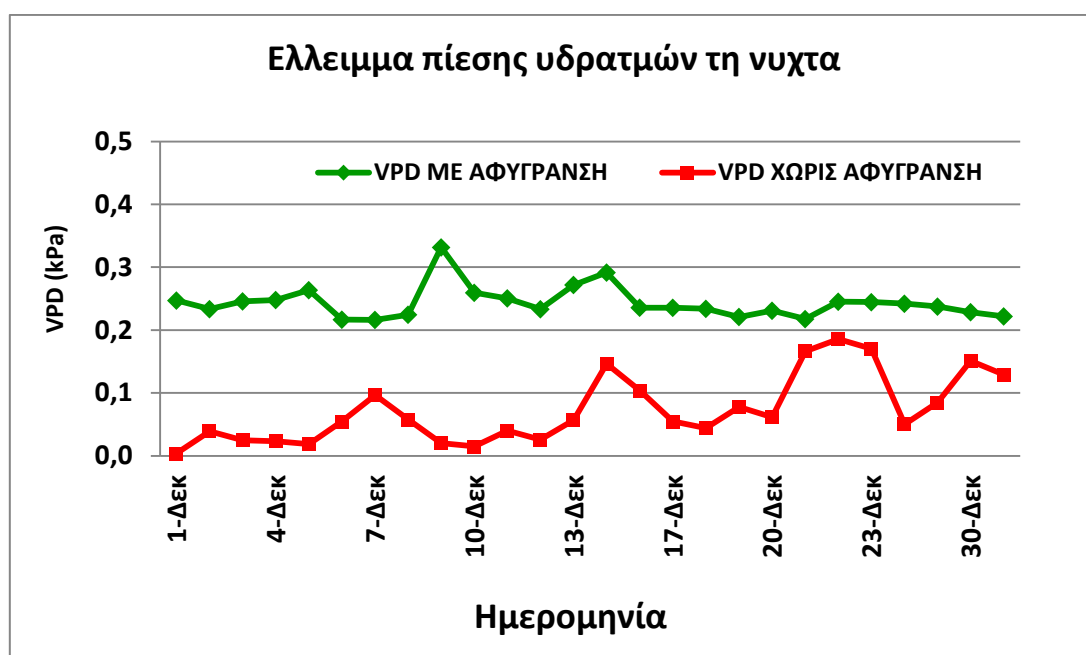
Στο διάγραμμα 5.5.1 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια τιμή του ελλείμματος πίεσης υδρατμών του αέρα στα δύο διαμερίσματα του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Κατά τη διάρκεια της ημέρας άνοιγαν τα παράθυρα για αποφευχθεί η υπερβολική άνοδος της θερμοκρασίας και έτσι οι υδρατμοί που παράγονταν από την εξατμισοδιαπνοή απομακρύνονταν με τον εξαερισμό. Κατά συνέπεια το επίπεδο της υγρασίας να μη διαφέρει σημαντικά στα δύο διαμερίσματα του θερμοκηπίου (Διάγραμμα 5.5.1)



Διάγραμμα 5.5.1. Η εξέλιξη του ελλείμματος πίεσης υδρατμών κατά τη διάρκεια της ημέρας τον Δεκέμβριο του 2007 στο θερμοκήπιο με αφύγρανση και στο θερμοκήπιο χωρίς αφύγρανση.

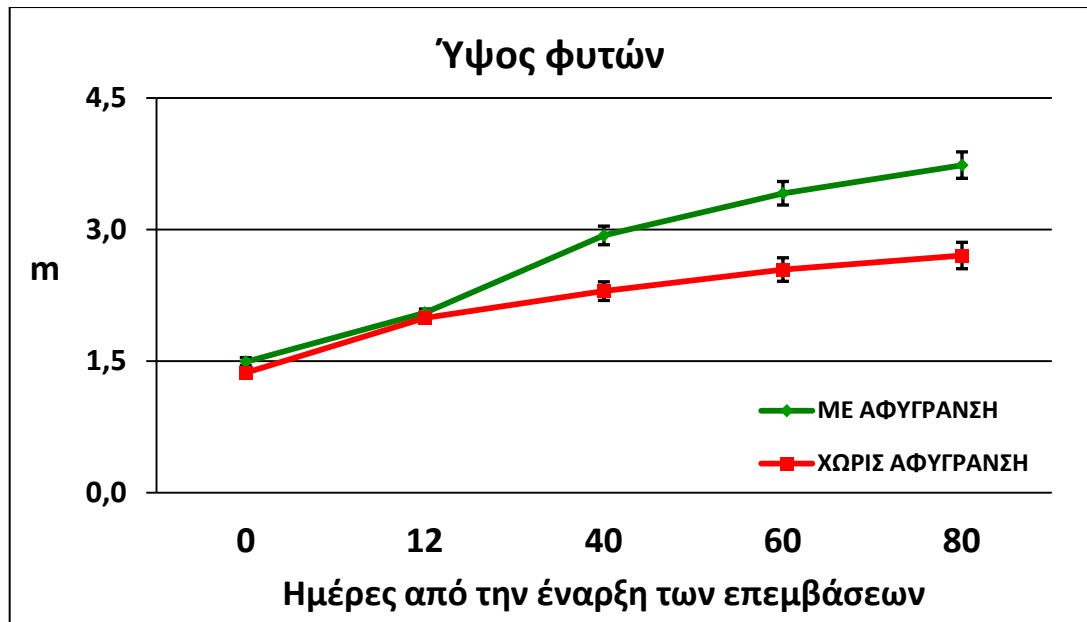
Κατά την διάρκεια της νύχτας, λόγω της πτώσης της εξωτερικής θερμοκρασίας, τα παράθυρα του θερμοκηπίου παρέμεναν κλειστά. Έτσι, η υγρασία στο αέρα του θερμοκηπίου αύξανε. Στον θερμοκήπιο μάρτυρα, που η υγρασία δεν ελεγχόταν, το έλλειμμα πίεσης υδρατμών μειωνόταν πολύ και κυμάνθηκε από 0,01 έως 0,19 kPa, με μέση τιμή τα 0,08 kPa. Επομένως, για όλες της νύχτες του Δεκεμβρίου του 2007, το έλλειμμα πίεσης υδρατμών στο θερμοκήπιο μάρτυρας βρισκόταν κάτω από το ελάχιστο επιθυμητό όριο του 0,2 kPa. Αντίθετα, στο θερμοκήπιο, που πραγματοποιούταν αφύγρανση του αέρα, το μέσο έλλειμμα

πίεσης υδρατμών, κατά τη διάρκεια της νύχτας τον Δεκέμβριο του 2007, κυμάνθηκε από 0,22 έως 0,43 kPa, με μέση τιμή τα 0,25 kPa (Διάγραμμα 5.5.2).



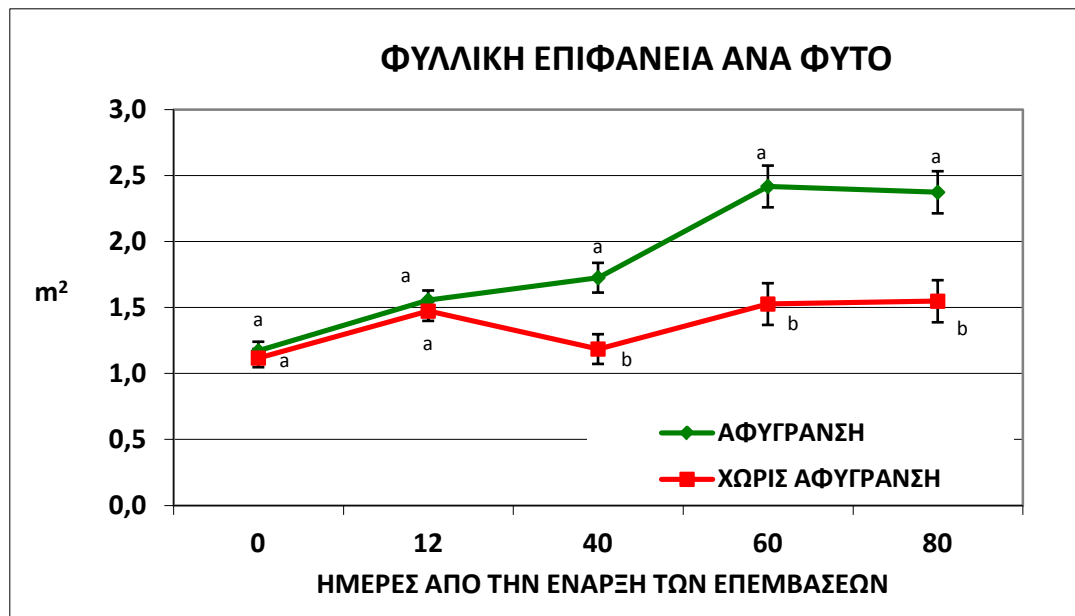
Διάγραμμα 5.5.2. Η εξέλιξη του ελλείματος πίεσης υδρατμών κατά τη διάρκεια της νύχτας τον Δεκέμβριο του 2007 στο θερμοκήπιο με αφύγρανση και στο θερμοκήπιο χωρίς αφύγρανση.

Στο διάγραμμα 5.5.3 φαίνεται η επίδραση της σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της νύχτας στο ύψος των φυτών αγγουριάς. Τα φυτά που αναπτύχθηκαν στο θερμοκήπιο με την ελεγχόμενη υγρασία παρουσίασαν μεγαλύτερο ύψος συγκριτικά με τα φυτά που αναπτύχθηκαν στο θερμοκήπιο με την ανεξέλεγκτη υγρασία. Η διαφορά στο ύψος των φυτών έγινε σημαντική 40 ημέρες μετά την έναρξη των επεμβάσεων.



Διάγραμμα 5.5.3. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στο ύψος φυτών αγγουριάς.

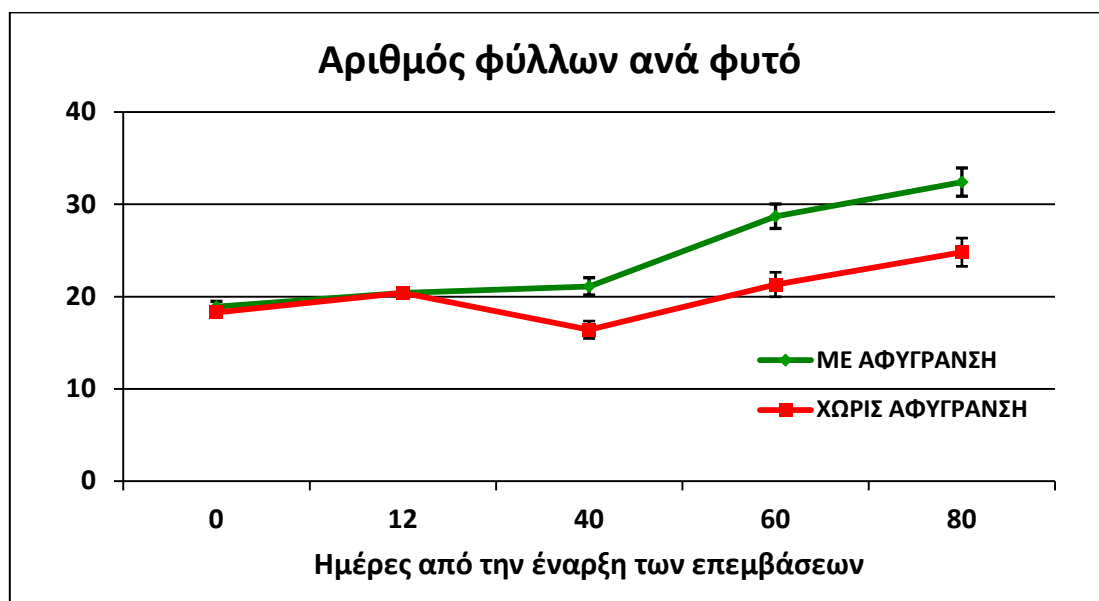
Στο διάγραμμα 5.5.4 παρουσιάζεται η επίδραση της υγρασίας στην ανάπτυξη της φυλλικής επιφάνειας των φυτών αγγουριάς. Τα φυτά αγγουριάς, που αναπτύχθηκαν στο θερμοκήπιο με την υψηλή υγρασία ( $v_{pd} = 0,08 \text{ kPa}$ ), κατά τη διάρκεια της νύχτας, παρουσίασαν μειωμένη ανάπτυξη φυλλικής επιφάνειας.



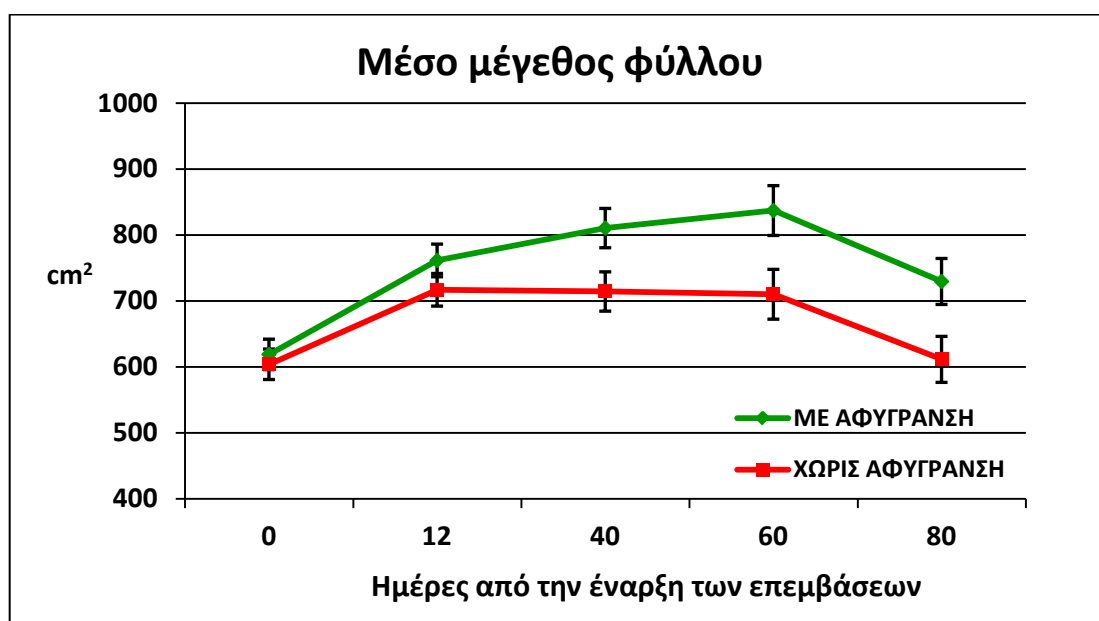
Διάγραμμα 5.5.4. Επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στην ανάπτυξη της φυλλικής επιφάνειας φυτών αγγουριάς.

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα 5.5.5 και 5.5.6, η μικρότερη φυλλική επιφάνεια

ανά φυτό οφειλόταν τόσο στο μικρότερο μέγεθος φύλλου (del Amor και Marcellis, 2006, Holder και Cockshull, 1990), όσο και στο μειωμένο αριθμό φύλλων ανά φυτών (Munholland et al., 2001). Οι διαφορές σε όλες τις παραμέτρους ανάπτυξης των φυτών, που αναπτύχθηκαν σε διαφορετικά περιβάλλοντα σχετικής υγρασίας, κατά την διάρκεια της νύχτας, έγιναν σημαντικές 40 ημέρες από την έναρξη των επεμβάσεων και διατηρήθηκαν έως το τέλος της καλλιέργειας.



Διάγραμμα 5.5.5. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στον αριθμό των φύλλων ανά φυτό αγγουριάς.



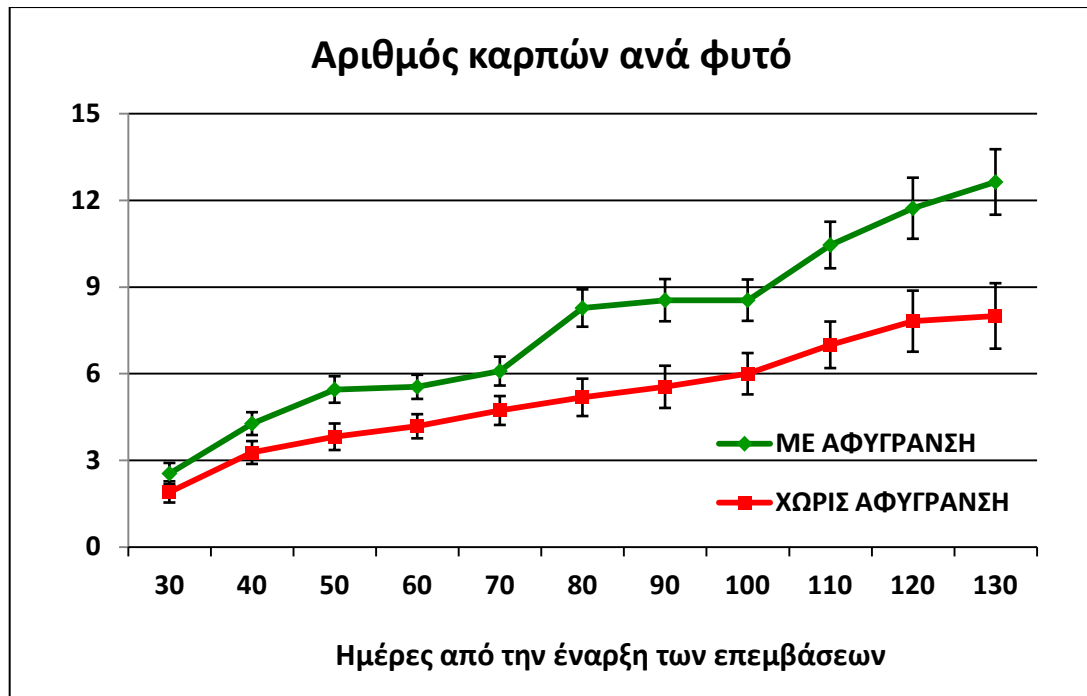
Διάγραμμα 5.5.6. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στο μέσο μέγεθος των φύλλων της αγγουριάς.

### 5.5.2 Επιδράσεις της υγρασίας στην παραγωγή

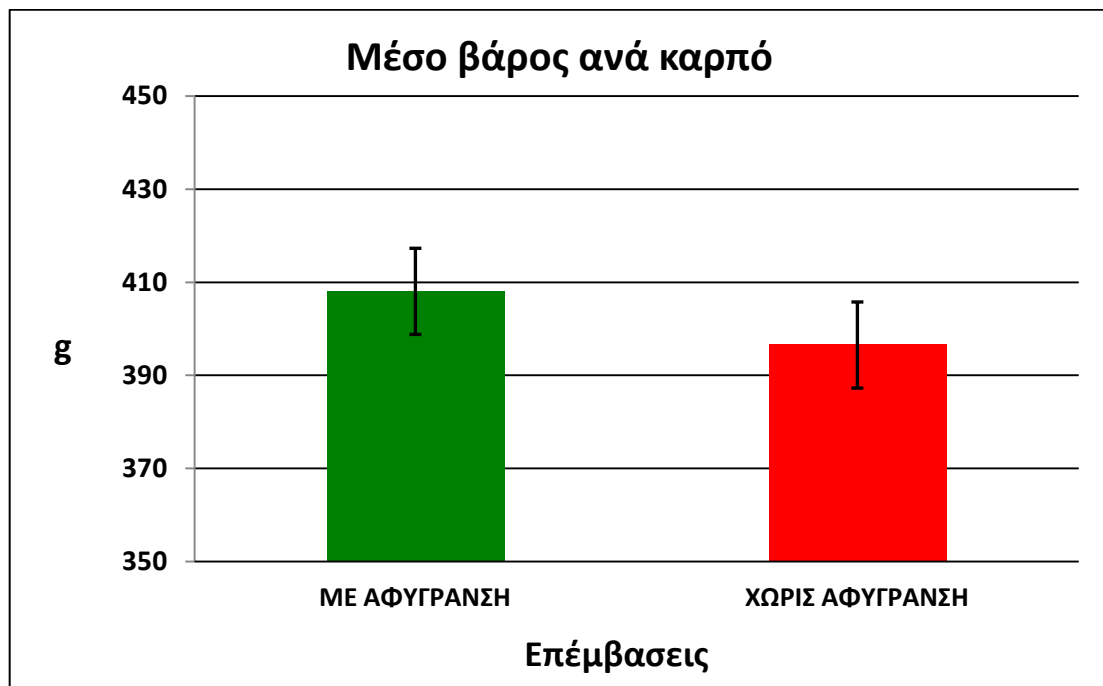
Στο διάγραμμα 5.5.7 παρουσιάζεται η επίδραση της υγρασίας στην παραγωγή των φυτών αγγουριάς. Τα φυτά αγγουριάς που αναπτύχθηκαν στο θερμοκήπιο με έλεγχο της υγρασίας, κατά τη διάρκεια της νύχτας (0,25 kPa), παρουσίασαν αυξημένη παραγωγή κατά 60% συγκριτικά με τα φυτά που αναπτύχθηκαν σε συνθήκες υψηλής υγρασίας (vrd= 0,08 kPa) κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η αύξηση στην παραγωγή ήταν ανάλογη με την αύξηση της φυλλικής επιφάνειας (Διάγραμμα 5.5.4). Στο θερμοκήπιο, στο οποίο ελεγχόταν η υγρασία, το μέσο έλλειμμα κορεσμού υδρατμών ήταν υψηλότερο από τα 0,2 kPa, τα οποία θεωρούνται ως ελάχιστο αποδεκτό όριο, για την ανάπτυξη και την παραγωγή των θερμοκηπιακών καλλιεργειών (Bakker, 1984). Η μικρότερη παραγωγή οφειλόταν στο μικρότερο αριθμό καρπών ανά φυτό (Διάγραμμα 5.5.8), ενώ το μέσο βάρος καρπών δεν επηρεάστηκε από τα διαφορετικά επίπεδα υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της νύχτας (Διάγραμμα 5.5.9).



Διάγραμμα 5.5.7. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στην παραγωγή φυτών αγγουριάς.



Διάγραμμα 5.5.8. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στον αριθμό των παραγόμενων καρπών ανά φυτό αγγουριάς.



Διάγραμμα 5.5.9. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στο μέσο βάρος καρπού αγγουριάς.

### 5.5.3 Επιδράσεις της υγρασίας στην ευαισθησία προσβολής από βοτρύτη

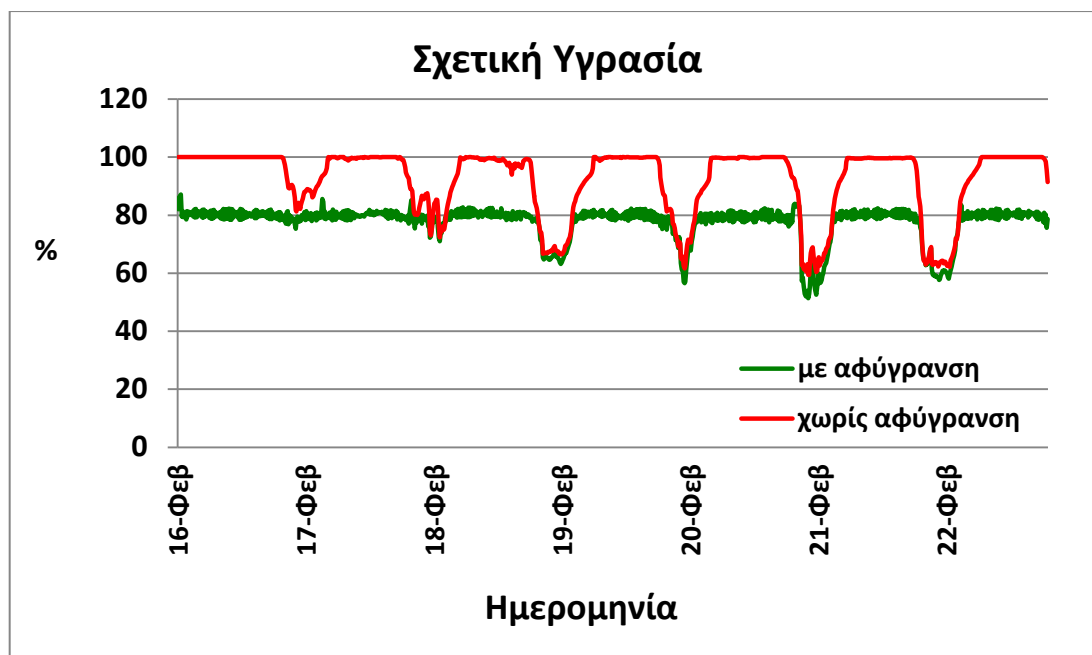
Στον πίνακα 5.5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τεχνητών μολύνσεων της 23<sup>ης</sup> Ιανουαρίου 2007. Όπως φαίνεται, αρκετοί από τους καρπούς, στους οποίους έγινε τεχνητή μόλυνση, αποβλήθηκαν από τα φυτά, πιθανότατα λόγω χαμηλής ηλιοφάνειας και χαμηλών θερμοκρασιών κατά τη περίοδο αυτή. Επομένως, από τη συγκεκριμένη τεχνητή μόλυνση δεν ήταν δυνατόν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

Πίνακας 5.5.1. Τα αποτελέσματα των τεχνητών μολύνσεων της 16<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 2007.

	Τεχνητή μόλυνση 23/01/07		
	Καρποί που μολύνθηκαν	Καρποί που προσβλήθηκαν	Καρποί που αποβλήθηκαν
Θερμοκήπιο με ανώτατο όριο σχετικής υγρασίας 80%	11	0	2
Θερμοκήπιο με ανεξέλεγκτη σχετική υγρασία	11	6	5

Στο διάγραμμα 5.5.10 παρουσιάζεται η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο, στο οποίο δεν αφηνόταν να ξεράσει το όριο του 80% και στο θερμοκήπιο χωρίς έλεγχο της υγρασίας, για 7 ημέρες μετά την τεχνητή μόλυνση της 16<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 2007.





Διάγραμμα 5.5.10. Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στα δύο θερμοκήπια για 7 ημέρες μετά την τεχνητή μόλυνση στις 16/02/07.

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5.5.10 στο θερμοκήπιο χωρίς τον έλεγχο της υγρασίας, κατά τη διάρκεια της νύχτας, η σχετική υγρασία έφθανε το 100%, ενώ στο θερμοκήπιο με την αφύγρανση δεν ξεπερνούσε το 80%.

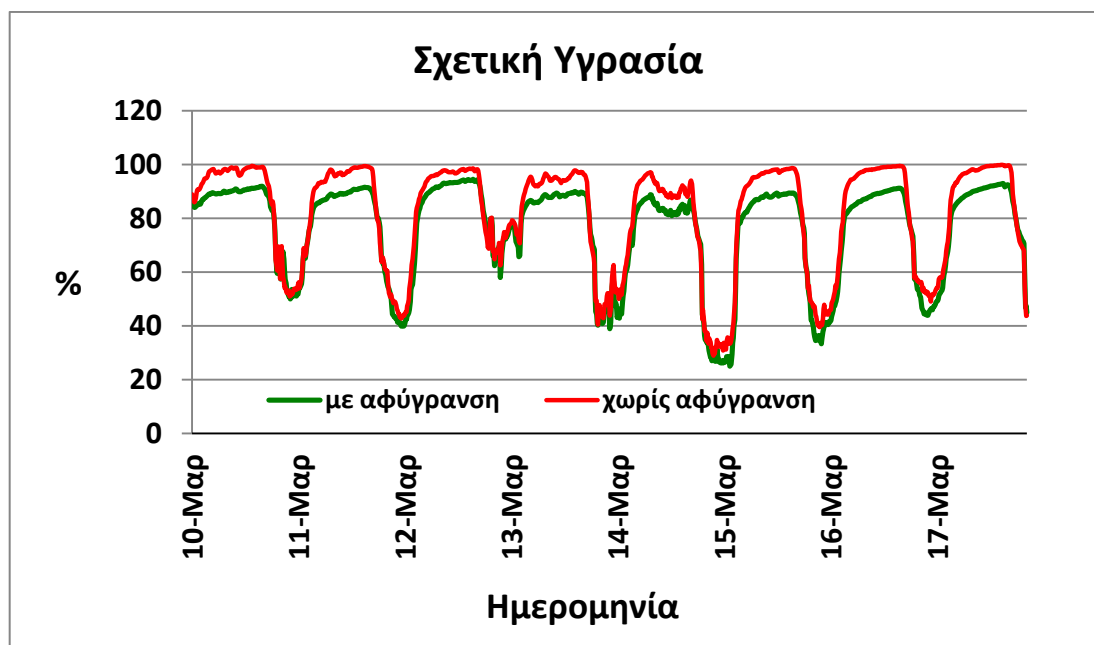
Τα αποτελέσματα της τεχνητής μόλυνσης της 16<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 2007 παρουσιάζονται στο πίνακα 5.5.2. Όπως φαίνεται καθαρά στον πίνακα, στο θερμοκήπιο, που η σχετική υγρασία δεν ξεπερνούσε το 80%, οι καρποί δεν προσβλήθηκαν από το μυκήλιο του μύκητα, αντίθετα στο θερμοκήπιο που η σχετική υγρασία έφθανε το 100% κατά τη διάρκεια της νύχτας προχώρησε η προσβολή σε όλους τους καρπούς.

Πίνακας 5.5.2. Τα αποτελέσματα των τεχνητών μολύνσεων της 16<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 2007.

	Τεχνητή μόλυνση 16/02/07		
	Καρποί που μολύνθηκαν	Καρποί που προσβλήθηκαν	Καρποί που αποβλήθηκαν
Θερμοκήπιο με ανώτατο όριο σχετικής υγρασίας 80%	11	0a	0
Θερμοκήπιο με ανεξέλεγκτη σχετική υγρασία	11	11b	0

Στο διάγραμμα 5.5.11 παρουσιάζεται η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο στο οποίο δεν αφηνόταν να ξεράσει το όριο του 90% και στο

Θερμοκήπιο χωρίς έλεγχο της υγρασίας, για 7 ημέρες μετά την τεχνητή μόλυνση στις 10 Μαρτίου 2007.



Διάγραμμα 5.5.11. Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στα δύο θερμοκήπια για 8 ημέρες μετά την τεχνητή μόλυνση στις 10/03/07.

Στον πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τεχνητών μολύνσεων της 10<sup>ης</sup> Μαρτίου 2007, τα οποία δείχνουν ότι οι καρποί προσβλήθηκαν τόσο στο θερμοκήπιο με την ανεξέλεγκτη υγρασία όσο και στο θερμοκήπιο που η σχετική υγρασία δεν ξεπερνούσε το 90%. Επομένως, το όριο 90%, της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο, δεν είναι ικανό, ώστε να αποτρέψει το κίνδυνο προσβολής από βοτρυτή.

Πίνακας 5.5.3. Τα αποτελέσματα των τεχνητών μολύνσεων της 10<sup>ης</sup> Μαρτίου 2007.

	Τεχνητή μόλυνση 10/03/07		
	Καρποί που μολύνθηκαν	Καρποί που προσβλήθηκαν	Καρποί που αποβλήθηκαν
Θερμοκήπιο με ανώτατο όριο σχετικής υγρασίας 80%	11	11a	0
Θερμοκήπιο με ανεξέλεγκτη σχετική υγρασία	11	10a	1

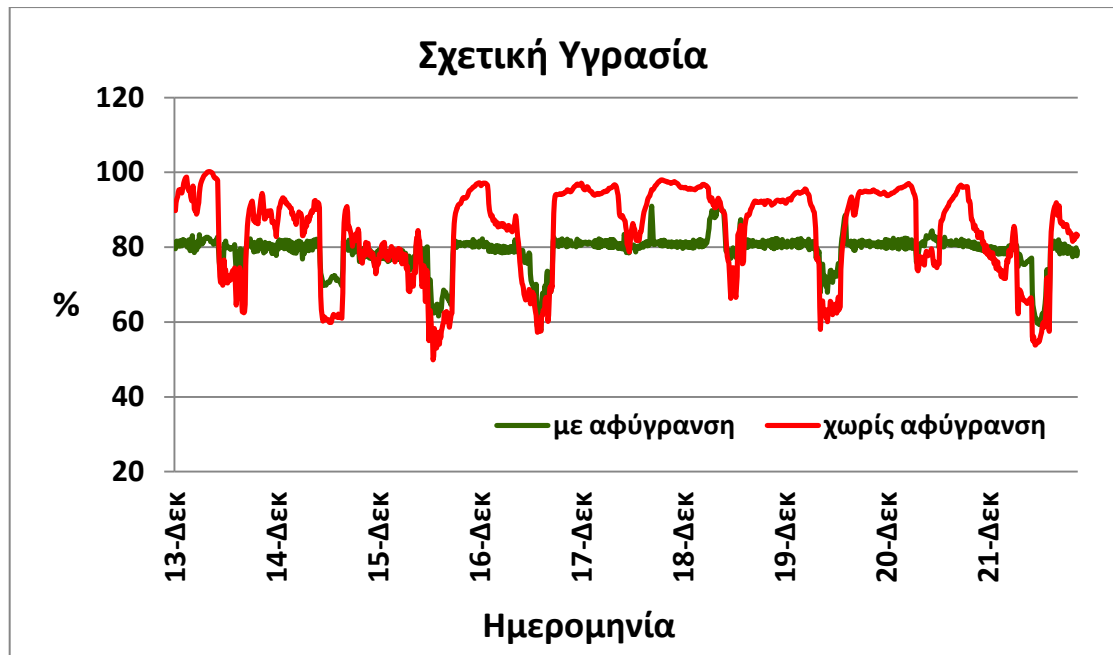


Εικόνα 5.2: Καρποί αγγουριάς που προσβλήθηκαν από τις τεχνητές μολύνσεις.



Εικόνα 5.3: Καρποί αγγουριάς που δεν προσβλήθηκαν από τις τεχνητές μολύνσεις και συνέχισαν κανονικά την ανάπτυξη τους.

Στο διάγραμμα 5.5.12 παρουσιάζεται η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο, στο οποίο δεν αφηνόταν να ξεράσει το όριο του 80% και στο θερμοκήπιο χωρίς έλεγχο της υγρασίας, για 7 ημέρες, μετά το άνοιγμα των σακουλών και την τεχνητή μόλυνση της 06<sup>ης</sup> Δεκεμβρίου 2007. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.5.12, η σχετική υγρασία στο θερμοκήπιο μάρτυρα, κατά τη διάρκεια της νύχτας, κυμαινόταν από 90 έως 100%, ενώ στο δεύτερο θερμοκήπιο η σχετική υγρασία ελεγχόταν και δεν ξεπερνούσε το 80%.



Διάγραμμα 5.5.12. Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στα δύο θερμοκήπια για 8 ημέρες μετά το άνοιγμα των σακουλών των καρπών της τεχνητής μόλυνσης στις 06/12/07.

Στο διάγραμμα 5.5.13 παρουσιάζεται η εξέλιξη της εξάπλωσης της προσβολής του βοτρυτή στους προσβεβλημένους καρπούς αγγουριάς στο θερμοκήπιο χωρίς αφύγρανση και ανεξέλεγκτη υγρασία, καθώς και, στο θερμοκήπιο με αφύγρανση, στο οποίο η σχετική υγρασία δεν ξεπερνούσε το 80%. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο ρυθμός εξάπλωσης της προσβολής του βοτρυτή στους ήδη προσβεβλημένους καρπούς αγγουριάς δεν επηρεάστηκε από τα διαφορετικά επίπεδα σχετικής υγρασίας των δύο θερμοκηπίων κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Διάγραμμα 5.5.13. Η εξέλιξη της εξάπλωσης της προσβολής πάνω στους προσβεβλημένους καρπούς στα δύο θερμοκήπια.

#### 5.5.4 Συμπεράσματα

Η αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου και η διατήρηση της σχετικής υγρασίας στο 80%, είχε ως αποτέλεσμα την πιο ζωηρή ανάπτυξη των φυτών, με αύξηση του ύψους τους και της φυλλικής τους επιφάνειας. Η αύξηση της διαθέσιμης φωτοσυνθετικής επιφάνειας συνετέλεσε στην αύξηση της απόδοσης των φυτών αγγουριάς κατά 60%, στο θερμοκήπιο με αφύγρανση του αέρα συγκριτικά με το θερμοκήπιο με την ανεξέλεγκτη σχετική υγρασία.

Με τη διατήρηση της σχετικής υγρασίας του θερμοκηπίου, σε επίπεδα χαμηλότερα του 80%, ήταν δυνατόν για αποφευχθεί η προσβολή από το βοτρυτή, όχι όμως να ανακοπεί η εξέλιξη υπάρχουσας προσβολής. Η προσβολή από τον μύκητα απαιτεί την ύπαρξη διαθέσιμη υγρασίας στην επιφάνεια των ιστών, όταν όμως ο μύκητας έχει εγκατασταθεί, τη υγρασία που χρειάζεται την παίρνει από το ίδιο τον προσβεβλημένο ιστό.

## **6. Συνολικός Σχολιασμός – Συμπεράσματα**

## 6.1 Έλεγχος της υγρασίας

Η αφύγρανση του θερμοκηπίου αποτελεί ένα ουσιαστικό τμήμα του ελέγχου του κλίματος του θερμοκηπίου. Η υψηλή σχετική υγρασία είναι μια αιτία ανάπτυξης των ασθενειών των φυτών, οι οποίες τελικά μειώνουν την ποσότητα και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Ο κίνδυνος της εμφάνισης και της ανάπτυξης των ασθενειών των φυτών στο θερμοκήπιο αυξάνεται όταν η επιφάνεια των φυτών είναι υγρή. Όσο υψηλότερη είναι η σχετική υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου, τόσο αυξάνει η πιθανότητα να συμβεί επιφανειακή συμπύκνωση υδρατμών πάνω στα φυτά, μειώνοντας έτσι την ποιότητα και την παραγωγή των προϊόντων. Θεωρητικά, η επιφανειακή συμπύκνωση υδρατμών δεν μπορεί να συμβεί όταν η σχετική υγρασία είναι μικρότερη από το 100% και η θερμοκρασία των φυτών είναι ίδια με αυτή του αέρα του θερμοκηπίου. Όμως, έχει βρεθεί ότι η θερμοκρασία της κορυφής της κόμης είναι χαμηλότερη εξαιτίας των απωλειών ενέργειας μέσω μεγάλου μήκους ακτινοβολίας (Marcelis et al., 2008). Σε αυτό το τμήμα της κόμης είναι πιθανόν να εμφανιστεί επιφανειακή συμπύκνωση υδρατμών, όταν η σχετική υγρασία είναι υψηλή. Έχει επίσης βρεθεί ότι τα όργανα της κόμης με μεγαλύτερη μάζα (π.χ. καρποί, βλαστοί), εξαιτίας της μεγαλύτερης τους θερμοχωρητικότητας (μεγαλύτερη μάζα ανά επιφάνεια) τείνουν να έχουν χαμηλότερη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια περιόδων κατά τις οποίες η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου αυξάνεται, π.χ. κατά την ανατολή του ηλίου.

Εκτός από τις διαφορές θερμοκρασίας που παρατηρούνται ανάμεσα στον αέρα του θερμοκηπίου και την καλλιέργεια, η θερμοκρασία του αέρα διαφοροποιείται στο χώρο του θερμοκηπίου. Η ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο είναι αποτέλεσμα πολλών παραγόντων όπως ο εξαερισμός, η θέρμανση, η διαπνοή της καλλιέργειας, η ηλιακή ακτινοβολία κ.α. (Campen, 2009). Αντίθετα, η απόλυτη υγρασία του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο είναι ομοιόμορφη. Κατά συνέπεια, η σχετική υγρασία εξαρτάται κυρίως από τη παραλλακτικότητα της θερμοκρασίας. Οι θέσεις μέσα στο θερμοκήπιο όπου η θερμοκρασία είναι χαμηλή εμφανίζουν υψηλή σχετική υγρασία, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα της επιφανειακής συμπύκνωσης υδρατμών πάνω στα φυτά όπως

έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 5.1. Για το λόγο αυτό η κατανομή της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο πρέπει να είναι ομοιογενής ιδιαίτερα όταν η σχετική υγρασία είναι υψηλή. Στο κεφάλαιο 5.5 φάνηκε καθαρά ότι η βελτίωση του περιβάλλοντος ανάπτυξης των φυτών από πλευράς σχετικής υγρασίας, αλλά και θερμοκρασίας (κατά 2 °C), οδήγησε σε αύξηση της παραγωγής κατά 60% και σε μειωμένη παθολογία των φυτών.

## 6.2 Μέθοδοι αφύγρανσης

Ο εξαερισμός είναι μια μέθοδος αφύγρανσης του θερμοκηπίου μη επαρκώς ελεγχόμενη. Η λειτουργία του εξαερισμού επηρεάζεται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των παραθύρων και του περιβάλλοντος χώρου, τη διαφορά θερμοκρασίας εσωτερικού εξωτερικού αέρα, τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου, επομένως μπορεί να διαφέρει η λειτουργία του στα διάφορα θερμοκήπια. Το γεγονός ότι αυτή η μέθοδος ελέγχεται δύσκολα έχει ως αποτέλεσμα η πραγματοποιούμενη αφύγρανση να υπερβαίνει την απαιτούμενη, με άμεση συνέπεια την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Επιπλέον, ο εξαερισμός αυξάνει την ετερογένεια του κλίματος του θερμοκηπίου η οποία μπορεί να είναι η αιτία των προβλημάτων υγρασίας στο θερμοκήπιο.

Η συμπύκνωση υδρατμών στον εξατμιστή μιας αντλίας θερμότητας φαίνεται ως μια λογική μέθοδος για την αφύγρανση του θερμοκηπίου, μιας και η λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών μετατρέπεται σε αισθητή θερμότητα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση του θερμοκηπίου. Από την άποψη αυτή, το σύστημα της αντλίας θερμότητας, που περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.3, μελετήθηκε. Από αυτή τη μελέτη βγήκε το συμπέρασμα ότι, η αισθητή θερμότητα που απορροφάται από τον εξατμιστή της αντλίας είναι υψηλότερη από την λανθάνουσα θερμότητα. Στο συμπέρασμα αυτό έχουν καταλήξει και άλλοι ερευνητές (Campen και Bot, 2002, Chou και συνεργάτες, 2004). Κατά συνέπεια, η θερμότητα, που απαιτείται να απορροφηθεί από τον εξατμιστή της αντλίας, ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία του κάτω από το σημείο δρόσου είναι σχετικά υψηλή. Επομένως, χρειάζεται μεγαλύτερη ικανότητα για ψύξη παρά για τη



διαδικασία μόνο της συμπύκνωσης, έτσι αυξάνεται η κατανάλωση ενέργειας από την αντλία θερμότητας για απορρόφηση αυτής της ενέργειας. Εφόσον, η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται κατά τις περιόδους όπου απαιτείται θέρμανση η απορροφούμενη ενέργεια (αισθητή και λανθάνουσα) από τον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας αποδίδεται μέσω του συμπυκνωτή της αντλίας στο αέρα του θερμοκηπίου μειώνοντας την κατανάλωση του συστήματος θέρμανσης (εφόσον υπάρχει). Στα θερμοκήπια, τα οποία δεν διαθέτουν συστήματα θέρμανσης, αυτή η αποδιδόμενη ενέργεια οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό τους βελτιώνοντας έτσι το περιβάλλον των καλλιεργούμενων φυτών. Επομένως, όταν εφαρμόζεται αφύγρανση ενός θερμαινόμενου θερμοκηπίου με ένα σύστημα αντλίας θερμότητας δεν καταναλώνεται πρόσθετη ενέργεια για τη λειτουργία του συστήματος αφού η ενέργεια που καταναλώνει η αντλία θερμότητας αφαιρείται από την κατανάλωση του συστήματος θέρμανσης. Άρα, για την απόφαση εισαγωγής μιας αφυγραντικής αντλίας θερμότητας στους μηχανισμούς ελέγχου του κλίματος του θερμοκηπίου το μόνο κριτήριο είναι το κόστος αγοράς της. Το κόστος αγοράς μιας αντλίας θερμότητας αέρα-αέρα καθορίζεται από το μέγεθος της, οι Campen και συνεργάτες (2003) αναφέρουν ότι, το κόστος μιας αντλίας θερμότητας υπολογίζεται σε 0,50 €/W. Από το ισοζύγιο υδρατμών του θερμοκηπίου (κεφάλαιο 5.1) προέκυψε ότι η απαιτούμενη ισχύ της αντλίας θερμότητας σε περιόδους με αυξημένες απαιτήσεις αφύγρανσης (άνοιξη) ήταν περίπου  $12,3 \text{ W m}^{-2}$  (ή  $12,3 \text{ kW / στρέμμα}$ ) άρα το κόστος εγκατάστασης μιας αντλίας θερμότητας για την αφύγρανση του θερμοκηπίου υπολογίζεται σε 6150.00€/στρέμμα.

Η αφύγρανση με τη χρήση ενός υγροσκοπικού υλικού παρουσιάζει και αυτή το πλεονέκτημα ότι η λανθάνουσα θερμότητα των απορροφούμενων υδρατμών μετατρέπεται άμεσα σε αισθητή θερμότητα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την θέρμανση του θερμοκηπίου. Η αναγέννηση του υλικού, η οποία απαιτείται για την επαναχρησιμοποίησή του, μπορεί να γίνει με αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας ή κάποιας απορριπτόμενης ενέργειας. Οι Balaras et al. (2007) αναγνωρίζουν ότι, το κόστος των ηλιακών συλλεκτών μπορεί να είναι απαγορευτικό για την εξάπλωση αυτών των συστημάτων. Οι Campen et al. (2003) υποστηρίζουν

ότι η απαιτούμενη ενέργεια για την αναγέννηση των υγροσκοπικών υλικών μπορεί να πραγματοποιηθεί με συμβατικά μέσα και ένα ποσοστό αυτής της ενέργειας (μέχρι 90%) μπορεί να ανακτηθεί μέσω ενός σύνθετου συστήματος ανάκτησης συμπεριλαμβανομένου της συμπύκνωσης των υδρατμών που παράγονται κατά την αναγέννηση του υλικού. Παρόλα αυτά, τέτοια συστήματα δεν έχουν αναπτυχθεί στην πράξη. Στην πλαίσια της παρούσας διατριβής επιχειρήθηκε η αναγέννηση του υγροσκοπικού διαλύματος όμως, η ατελής μόνωση των διατάξεων αναγέννησης δεν επέτρεψε την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για το κόστος αναγέννησης του υγροσκοπικού υλικού.

Σε ορισμένες αναφορές αποτρέπεται η χρήση των υγροσκοπικών υλικών για την αφύγρανση του θερμοκηπίου εξαιτίας της διαβρωτικής ικανότητας ορισμένων υλικών ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{LiCl}$ ) όμως, αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί, με αντικατάσταση των μεταλλικών υλικών των μηχανισμών και των διατάξεων λειτουργίας με πλαστικά υλικά, τα οποία δεν παρουσιάζουν πρόβλημα διάβρωσης.

Η ένταση της έρευνας σχετικά με τη χρήση των υγροσκοπικών υλικών, που εμφανίζεται τα τελευταία χρόνια, προμηνύει βελτίωση της τεχνολογικής τους αρτιότητας και της ευκολίας της λειτουργίας τους, καθώς και, την ανάπτυξη της εμπορική τους εκμετάλλευση.

Η λειτουργία των υβριδικών συστημάτων αυξάνει την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης υδρατμών από τον αέρα, όμως η τεχνολογική τους ανάπτυξη καθορίζεται από την πορεία ανάπτυξης των υγροσκοπικών συστημάτων μιας και τα συστήματα συμπίεσης ατμού έχουν ήδη τυποποιηθεί και παρουσιάζουν παγκόσμια εμπορική εξάπλωση.

Αν μπορεί να εξασφαλιστεί χαμηλού κόστους αναγέννηση του υγροσκοπικού διαλύματος τότε το κόστος λειτουργίας του αφυγραντικού συστήματος προκύπτει από τη λειτουργία ενός ανεμιστήρα για τη κυκλοφορία του αέρα και μιας αντλίας για την κυκλοφορία του υγροσκοπικού διαλύματος. Έτσι, το κόστος λειτουργίας του υγροσκοπικού συστήματος είναι μικρότερο συγκριτικά με το κόστος λειτουργίας του συστήματος της αντλίας θερμότητας. Αν λάβουμε όμως υπόψη ότι η ενέργεια, που καταναλώνει ο συμπιεστής της αντλίας θερμότητας, αφαιρείται από τη κατανάλωση του συστήματος θέρμανσης, τότε το κόστος λειτουργίας της αφυγραντικής αντλίας

θερμότητας είναι συγκρίσιμο με αυτό του υγρασκοπικού συστήματος αφύγρανσης. Στην παρούσα διατριβή η αντλία θερμότητας, που χρησιμοποιήθηκε, λειτουργούσε με κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, από ενεργειακής άποψης θα ήταν προτιμότερο ο συμπιεστής της αφυγραντικής αντλίας να λειτουργούσε με μηχανή εσωτερικής καύσεως. Για την παραγωγή μιας kWh ηλεκτρικού ρεύματος από μια γεννήτρια παραγωγής απαιτούνται περίπου 0,35 λίτρα πετρελαίου. Αν χρησιμοποιηθεί πετρέλαιο θέρμανσης με τιμή περίπου 0,9€/l, μια kWh κοστίζει 0,32€. Όμως, η ευνοϊκή τιμή αγροτικού ηλεκτρικού ρεύματος στη χώρα μας (0,062€/kWh) καθιστά την λειτουργία της αφυγραντικής αντλίας οικονομικότερη με τη κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος.

Συμπερασματικά, λαμβάνοντας υπόψη την παρούσα κατάσταση της τεχνολογικής προόδου, στη παρούσα χρονική στιγμή, η αφύγρανση του αέρα του θερμοκηπίου με τη χρήση αντλίας θερμότητας μπορεί να θεωρηθεί ως η πιο ενδεδειγμένη λύση για την αφύγρανση τόσο των μη θερμαινόμενων θερμοκηπίων όσο και για την αφύγρανση των θερμαινόμενων θερμοκηπίων. Η αύξηση του εισοδήματος, λόγω της βελτίωσης της απόδοσης των καλλιεργούμενων φυτών, με τον έλεγχο της υγρασίας, διευκολύνει την απόσβεση εγκατάστασης μιας αφυγραντικής αντλίας θερμότητας.

### **6.3 Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση**

Η μόνωση των θερμοκηπίων έχει αυξηθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών. Αυτή η τάση είναι αποτέλεσμα της αύξησης του κόστους της ενέργειας. Η βελτίωση της μόνωσης αυξάνει τα επίπεδα της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο, αφού μειώνεται η συμπύκνωση υδρατμών στο κάλυμμα και περιορίζονται στο ελάχιστο οι διαφυγές του αέρα στο εξωτερικό περιβάλλον. Για το λόγο αυτό ο έλεγχος της υγρασίας είναι ουσιαστικός και απαραίτητος στα σύγχρονα θερμοκήπια. Η μόνωση των θερμοκηπίων αναμένεται να βελτιωθεί περαιτέρω με την εισαγωγή υλικών κάλυψης που θα συνδυάζουν υψηλότερη περατότητα στο φως με υψηλότερη θερμομόνωση (Swinkels et al., 2001).

Τα συστήματα μείωσης της σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκαν στη παρούσα διατριβή πλεονεκτούν στο ότι χρησιμοποιούν την λανθάνουσα θερμότητα των υδρατμών για τη θέρμανση του θερμοκηπίου. Το πρόβλημα της υψηλής υγρασίας εμφανίζεται κυρίως σε περιόδους κατά τις οποίες απαιτείται και θέρμανση, όμως μπορεί να υπάρχει η ανάγκη για μείωση της σχετικής υγρασίας και σε περιόδους κατά τις οποίες δεν απαιτείται θέρμανση. Σε αυτές τις περιόδους η λειτουργία των συστημάτων μείωσης της υγρασίας στο θερμοκήπιο θα αύξανε το κόστος παραγωγής των προϊόντων. Για παράδειγμα στα σύγχρονα θερμοκήπια, τα οποία έχουν εγκαταστήσει συστήματα εμπλουτισμού με CO<sub>2</sub>, τα παράθυρα πρέπει να παραμένουν κλειστά όσο περισσότερο γίνεται. Στην περίπτωση αυτή, η διαπνοή της καλλιέργειας είναι αυξημένη και οι παραγόμενοι υδρατμοί δεν απομακρύνονται επαρκώς με συμπύκνωση στο κάλυμμα ή με τις διαφυγές του αέρα, έτσι η σχετική υγρασία στο χώρο του θερμοκηπίου αυξάνεται συνεχώς. Επομένως, απαιτείται η θερμότητα που παράγεται από την λειτουργία των αφυγραντικών συστημάτων να μπορεί να αποθηκευτεί για να χρησιμοποιηθεί όταν παραστεί ανάγκη. Ήδη, στα σύγχρονα θερμοκήπια χωρών της Β. Ευρώπης πραγματοποιείται εποχιακή αποθήκευση θερμότητας σε μεγάλες υδάτινες δεξαμενές (Bot, 2001). Τα συστήματα αντλιών θερμότητας συνδέονται εύκολα με τα συστήματα θέρμανσης καθώς και με τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας των θερμοκηπίων. Στη χώρα μας η αποθήκευση θερμότητας για χρήση στο θερμοκήπιο είναι ελάχιστη. Η διερεύνηση της κατάλληλης μεθόδου αποθήκευσης θερμότητας για τις ελληνικές συνθήκες είναι απαραίτητη. Η αποθήκευση θερμότητας θα δώσει τη δυνατότητα στα ελληνικά θερμοκήπια να λειτουργούν ως κλειστά ή ημίκλειστα. Το κλειστό θερμοκήπιο έχει το πλεονέκτημα της παρεχόμενης προστασίας από εχθρούς και ασθένειες των φυτών (γιατί δεν επιτρέπει την είσοδο εντόμων και παθογόνων). Παρέχει τη δυνατότητα ανακύκλωσης του συνόλου, σχεδόν, του χρησιμοποιούμενου νερού στο χώρο του. Παρέχει τη δυνατότητα εμπλουτισμού του χώρου του θερμοκηπίου με διοξείδιο του άνθρακα καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και όλες τις εποχές, αυξάνοντας έτσι σημαντικά την παραγωγικότητα του.

Όσον αφορά τις αφυγραντικές αντλίες θερμότητας θα πρέπει να διερευνηθεί αν το μέγεθος του εξατμιστή τους επηρεάζει το λόγο της απορροφούμενης

λανθάνουσας θερμότητας προς την συνολική απορροφούμενη ενθαλπία. Η αύξηση αυτού του λόγου θα βελτιώσει το ωφέλιμο συντελεστή απόδοσης της αντλίας.

Η αβεβαιότητα ως προς τις τιμές των συμβατικών καυσίμων και η απαίτηση για αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επιτάσσει την συνέχιση της έρευνας στον τομέα της χρήσης αφυγραντικών υλικών για τον έλεγχο της υγρασίας στο χώρο του θερμοκηπίου. Ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση ενός ηλιακού συλλέκτη απαιτούνται για την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος αφύγρανσης του θερμοκηπίου με χρήση υγροσκοπικών υλικών, που θα περιλαμβάνει και διαδικασίες ανάκτησης θερμότητας για να εξασφαλίζεται το ελάχιστο κόστος λειτουργίας.

## Βιβλιογραφία

- Abdul-Wahab, S.A., Zurigat, Y.H. and Abu-Arabi, M.K. 2004. Predictions of moisture removal rate and dehumidification effectiveness for structured liquid desiccant air dehumidifier. *Energy* 29 (1) 19-34.
- Acock, B., Charles-Edwards, D.A. and Hand, D.W. 1976. An analysis of some effects of humidity on photosynthesis by a tomato canopy under winter light conditions and a range of carbon dioxide concentrations. *Journal of Experimental Botany*, 27: 933-941.
- Acock, B., 1980. Analysing and predicting the responses of the glasshouse crop to environmental manipulation. In: *Opportunities for increasing yield*. Pitman, London.
- Aikman, D.P. and Houter, G. 1990. Influence of radiation and humidity on transpiration: Implications for calcium levels in tomato leaves. *Journal of Horticultural Science* 65 (3): 245-253.
- Albright, L.D. and Behler, M.L. 1984. An air-liquid heat exchanger for greenhouse humidity control. *Transactions of the ASAE*, 27(5), 1524-1530.
- del Amor, F.M. and Marcelis, L.F.M. 2006. Differential effect of transpiration and Ca supply on growth and Ca concentration of tomato plants. *Scientia Horticulturae*, 111: 17-23.
- Babakhani, D, Soleymani, M. and Moheb, A. 2010. Heat and mass transfer between air and liquid desiccant in cross-flow contact systems. *Chemical and Engineering Technology*, 33(2): 281-291.
- Bakker, J.C. 1990. The effects of day and night humidity on yield and fruit quality of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science* 65 (3): 323-331.
- Bakker, J.C., Welles, G.W.H. and van Uffelen, J.A.M. 1987. The effects of day and night humidity on yield and quality of glasshouse cucumber. *Journal of Horticultural Science* 62 (3): 363-370.
- Bakker, J.C., 1986. Measurement of canopy transpiration or evapotranspiration in greenhouses by means of a simple vapour balance model. *Agric. For. Meteorol.*, 37: 133-141.
- Bakker, J.C. 1984. Effects on changes in ventilation on cucumber. *Acta Hort.* 148: 519-524.
- Bakker, J.C. 1984. Physiological disorders in cucumber under high humidity conditions and low ventilation rates in greenhouses. *Acta Hort.* 156: 257-264.
- Balaras, C.A., Grossman, G., Henning, H.M., Infante Ferreira, C.A., Podesser, E., Wang, L. and Wiemken, E., 2007. Solar air conditioning in Europe – an overview. *Renew Sustain Energy Rev*, 11:299–314.

- Baptista, F., Bailey, B. and Meneses, J. 2008. Comparison of humidity conditions in unheated tomato greenhouses with different natural ventilation management and implications for climate and *Botrytis cinerea* control. *Acta Hort.* 801: 1013 - 1019.
- Bartzanas, T., Kittas, C. and Boulard, T., 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering*, 88(4):479–90.
- Bot, G.P.A., 2001. Developments in indoor sustainable plant production with emphasis on energy saving. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30: 151-165.
- Boulard, T., Chave, M., Fatnassi, H., Poncet, C. and Roy, J. 2008. *Botrytis cinerea* spore balance of a greenhouse rose crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148 (3): 504-511.
- Boulard, T., Baille, A., Lagier, J., Mermier, M. and Vanderschmitt E. 1989. Water vapour transfer in a plastic house equipped with a dehumidification heat pump. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 44: 191-204.
- Campen, J.B., Kempkes, F.L.K. and Bot, G.P.A. 2009. Mechanically controlled moisture removal from greenhouses. *Biosystems Engineering* 102: 424-432.
- Campen, J.B., Bot, G.P.A. and de Zwart H. F. 2003. Dehumidification of greenhouses at Northern latitudes. *Biosystems Engineering* 86 (4): 487-493.
- Campen, J.B. and Bot, G.P.A. 2002. Dehumidification in greenhouses by condensation on finned pipes. *Biosystems Engineering* 82 (2): 177-185.
- Campen, J.B. and Bot, G.P.A. 2001. Design of a low-energy dehumidifying system for greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(1): 65-73.
- Chasseriaux, G. 1987. Heat pumps for reducing humidity in plastics greenhouses. *Plasticulture*, 73: 29-40.
- Choi, J. H., Chung, G. C. and Suh, S. R., 1997. Effect of night humidity on the vegetative growth and the mineral composition of tomato and strawberry plants. *Scientia Horticulturae*, 70: 293-299.
- Chou, S.K., Chua, K.J., Ho, J.C. and Ooi, C.L. 2004. On the study of an energy-efficient greenhouse for heating, cooling and dehumidification applications. *Applied Energy* 77 (4): 355-373.
- Conde, M.R. 2004. Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design. *International Journal of Thermal Sciences*, 43: 367-382.

- De Zwart H F (1996). Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. PhD Thesis, Agricultural University of Wageningen.
- De Kraker, J., Van den Ende, J.E., Rossing, W.A.H., Bastiaansen, C. and Van de Werft, W. 1999. Computer-aided design of improved warning systems - a case study for Botrytis control in flower bulbs. OEPP/EPPO Bulletin, 30: 105-113.
- De Kraker, J., Kessel, G.J.T., Van der Werf, W., Van den Ende, J.E., Köhl, J. and W.A.H. 2000. Rossing Searching for sustainable strategies in Botrytis management: how models can help. XII International Botrytis Symposium, Reims, France.
- Elad, Y, Yunis, H. and Volpin, H. 1993. Effect of nutrition on susceptibility of cucumber, eggplant and pepper crops to Botrytis cinerea. Canadian Journal of Botany, 71 (4): 602-608.
- Elad, Y., Yunis, H. and Mahrer, Y. 1989. Effect of climatic conditions in polyethylene-covered structures on grey mould disease of winter cucumber. Appl. agric. Res. 3: 243-247.
- Eden, M.A., Hill, R.A., Beresford, R. and Stewart, A. 1996. The influence of inoculum concentration, relative humidity, and temperature on infection of greenhouse tomatoes by Botrytis cinerea. Plant Pathology 45: 795-806.
- Factor, H.M. and Grossman, G.A. 1980. Packed bed dehumidifier/regenerator for solar air conditioning with liquid desiccants. Solar Energy 24 (6): 541-550.
- Fricke, A., Krug, H., 1997. Influence of humidification and dehumidification on greenhouse climate as well as water relations and productivity of cucumber II. Influences on plants. Garterbauwissenschaft, 62 (6): 241-248.
- Fumo, N. and Goswami, D.Y., 2002. Study of an aqueous lithium chloride desiccant system: air dehumidification and desiccant regeneration, Solar Energy 72 (4): 351-361.
- Gao, Z., Guo, H., Brad, R., Waterer, D. and VanDuyvendyke, R. 2011. Energy efficiency comparison of four greenhouse dehumidification methods in gold region. ASABE Annual International Meeting.
- Gislerod, H.R., Selmer-Olsen, A.R. and Mortensen, L.M. 1987. The effect of air humidity on nutrient uptake of some greenhouse plants. Plant and Soil, 102: 193-196.
- Grange, R.I. and Hand, D.W. 1987. A review of the effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. Journal of Horticultural Science, 62: 125-134.
- Gruda, N., 2005. Impact of environmental factors on product quality of greenhouse vegetables for fresh consumption. Critical Reviews in Plant Sciences, 24: 227-247.



- De Halleux, D. and Gauthier, L. 1998. Energy consumption due to dehumidification of greenhouses under Northern latitudes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 69: 35-42.
- Hand, D.W., Langton, F.A., Hannah, M.A. and Cockshull, K.E. 1996. Effects of humidity on the growth and the flowering of cut-flower chrysanthemums. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 71 (2): 227-234.
- Hand, D.W. 1988. Effects of atmospheric humidity on greenhouse crops. *Acta Horticulturae*, 229: 143-158.
- ten Have, A., van Berloo, R., Lindhout, P. and van Kan, J.A.L. 2007. Partial stem and leaf resistance against the fungal pathogen *Botrytis cinerea* in wild relatives of tomato. *European Journal of Plant Pathology*, 117: 153-166.
- Henseler, K. 1981. Fungizide beeinträchtigen den Ertrag. Möglichkeiten der *Botrytis*-Bekämpfung bei Schnittcyclamen. *Gartenbau Gartenwirtschaft* 81: 382.
- Holder, R. and Cockshull, K.E. 1990. Effects of humidity on the growth and yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, 65 (1): 31-39.
- Horst, R.K. and Nelson, P.E. 1997. *Compendium of chrysanthemum diseases* American Phytopathological Society (APS Press), St. Paul, USA.
- Jain, S. and Bansal P.K. 2007. Performance analysis of liquid desiccant dehumidification systems. *International Journal of Refrigeration*, 30: 861-872.
- Jarvis, W.R., 1989. Managing diseases in greenhouse crops. *Plant Dis.* 73: 190-194.
- Jolliet, O. 1994. Hortitrans, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57: 23-37.
- Jolliet, O. and Bailey, B.J. 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58: 43-62.
- Kamoen, O. Thirty years research on *Botrytis cinerea*. 2000. XII International *Botrytis* Symposium, Reims, France.
- Kerssies, A. 1994. Effects of temperature, vapor pressure deficit and radiation on infectivity of conidia of *Botrytis cinerea* and on susceptibility of gerbera petals. *European Journal of Plant Pathology*, 100: 123-136.
- Kohl, J., Gerlagh, M. and Grit, G., 2000. Biocontrol of *Botrytis cinerea* by *Ulocladium atrum* in different production systems of cyclamen. *Plant disease*, 84 (5): 569-573.
- Körner, O. and Holst, N. 2004. Model based humidity control of *Botrytis cinerea* in greenhouse cultivation. *Acta Hort.* 691: 141 -148.

- Körner, O. and Challa, H. 2003. Process-based humidity control regime for greenhouse crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 39:173-192.
- Langston, D. 2001. Diseases of greenhouse tomatoes. Available online at <http://pubs.caes.uga.edu/caespubs/pubs/pdf/L42.pdf>
- Lazzarin, R.M., Gasparella, A. and Longo, G.A. 1999. Chemical dehumidification by liquid desiccants: theory and experiment, *International Journal of Refrigeration* 22: 334-347.
- Lipton, W.J. 1970. Growth of tomato plants and fruit production in high humidity and at high temperatures. *Journal of the American Society of Horticultural Science*, 95: 674-680.
- Liu, X.H., Jiang Y. and Qu, K.Y. 2008. Analytical solution of combined heat and mass transfer performance in a cross-flow packed bed liquid desiccant air dehumidifier. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51: 4563-4572.
- Liu, X.H., Jiang Y. and Qu, K.Y. 2007. Heat and mass transfer of cross flow liquid desiccant air dehumidifier/regenerator. *Energy Conversion and Management*, 48: 546-554.
- Liu, X.H., Zhang, Y., Qu, K.Y. and Jiang Y. 2006. Experimental Study on mass transfer performances of cross flow dehumidifier using liquid desiccant. *Energy Conversion and Management*, 47: 2682-2692.
- Mohan, B.S., Maiya, M.P. and Tiwari, S. 2008. Performance of liquid desiccant columns for a hybrid air-conditioner. *Applied Thermal Engineering*, 28: 1342-1355.
- Moon, C.G., Bansal, P.K. and Jain, S. 2009. New mass transfer performance data of a cross-flow liquid desiccant dehumidification system. *International Journal of Refrigeration*, 32: 524-533.
- Morgan, W. 1984. The effect of night temperature and glasshouse ventilation on the incidence of *Botrytis cinerea* in a late-planted tomato crop. *Crop Protection*, 3 (2): 243-251.
- Mulholland, B.J., Fussell, M., Edmondson, R.N., Burns, J.G., McKee, J.M.T. and Basham, J. 2000. Effect of humidity and nutrient feed K/Ca ratio on physiological responses and the accumulation of dry matter, Ca and K in tomato. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 75 (6): 713-722.
- Mulholland, B.J., Fussell, M., Edmondson, R.N., Basham, J. and McKee, J.M.T. 2001. Effect of vpd, K nutrition and root zone temperature on leaf area development, accumulation of Ca and K and yield in tomato. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 76 (5): 641-647.

- Nederhoff, E. 1997. High humidity and plant diseases. New Zealand Commercial Grower 52(4).
- O'Neill, T., Shtienberg, D. and Elad, Y. 1997. Effect of some host and microclimate factors on infection of tomato stems by *Botrytis cinerea*. Plant Disease, 81 (1): 36-40.
- Patnaik, S., Lenz, T.G. and Lof, G.O.G. 1990. Performance studies for an experimental solar open-cycle liquid desiccant air dehumidification system, Solar Energy 44 (3): 123-135.
- Picken, A. 1984. A review of pollinisation and fruit set in the tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill). Journal of Horticultural Science, 59: 1-13.
- Romero-Aranda, R. and Longuenesse, J.J., 1995. Modeling the effect of air vapour pressure deficit on leaf photosynthesis of greenhouse tomatoes: the importance of leaf conductance of CO<sub>2</sub>. Journal of Horticultural Science, 70: 423-432.
- Rousse, D.R., Martin, D.Y., Thériault, R., Léveillée, F. and Boily, R. 2000. Heat recovery in greenhouses: a practical solution. Applied Thermal Engineering, 20: 687-706.
- Salinas, J., Glandorf, D.C.M., Picavet, E.D. and Verhoeff, K., 1989. Effect of temperature, relative humidity and age of conidia on the incidence of spotting on gerbera flowers caused by *Botrytis cinerea*. Neth. J. Plant Path. 95: 51-64.
- Seginer, I., 2002. The Penman – Monteith evapotranspiration equation as an element in greenhouse ventilation design. Biosystems Engineering, 82 (4): 423-439.
- Seginer, I., Kantz, D., Levav, N. and Peiper, U.M., 1990. Night-time transpiration in greenhouses. Scientia Hortic., 41: 265-276.
- Seginer, I. and Kantz, D. 1989. Night-time use of dehumidifiers in greenhouses: an analysis. Journal of Agricultural Engineering Research, 44: 141-158.
- Seginer, I., 1984. On the night transpiration of greenhouse roses under glass or plastic cover. Agric. Meteorol., 30: 257-268.
- Stanghellini, C. and De Jong, T. 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse. Agricultural and Forest Meteorology, 76: 129-148.
- Stanghellini, C. and Van Meurs, Th. M. 1992. Environmental control of greenhouse crop transpiration. Journal of Agricultural Engineering Research, 51,297-311.
- Swalls, A. A. and O'Leary, J. W. 1975. The effect of relative humidity on growth, water consumption and calcium uptake in tomato plants. J. Ariz. Acad. Sci. 10: 87-89.

- Swinkels, G., Sonneveld, P. and Bot, G. 2001. Improvement of Greenhouse Insulation with Restricted Transmission Loss through Zigzag Covering Material. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 79(1): 91-97.
- Tanner, W. and Beevers, H. 2001. Transpiration, a prerequisite for long-distance transport of minerals in plants? *Plant Biology*, 98 (16): 9443-9447.
- Tantau, H.G., Lange, D., 2003. Greenhouse climate control: an approach for integrated pest management. *Comput. Electron. Agric.* 00, 1–12.
- Trigui, M., 1999. Effects of humidity on tomato (*Lycopersicon Esculentum* cv. Truss) water uptake, yield, and dehumidification cost. *Canadian Biosystems Engineering*, 41 (3): 135-140.
- Van de Sanden P. and Uittien, J. 1995. Root environment water potential and tomato fruit growth. *Acta Horticulturariae* 401: 531-536.
- Wang, Y.F., Chung, T.W. and Jian, W.M. 2011. Airborne fungi inactivation using an absorption dehumidification system. *Indoor and Built Environment*: 1-7.
- Xu, H.L., Iraqi, D. and Gosselin, A. 2006. Effect of ambient humidity on physiological activities and fruit yield and quality of greenhouse tomato. *Acta Hort.* 761: 85-92.
- Yao, Y., 2010. Using power ultrasound for the regeneration of dehumidizers in desiccant air-conditioning systems: A review of prospective studies and unexplored issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 1860-1873.
- Yunis, H., Elad, Y. and Mahrer, Y. 1990. Effects of air temperature, relative humidity and canopy wetness on gray mold of cucumbers in unheated greenhouse. *Phytoparasitica*, 18 (3): 203-215.
- Zhang, Li, Hihara, E., Matsuoka, F. and Dang, C. 2010. Experimental analysis of mass transfer in adiabatic structured packing dehumidifier/regenerator with liquid desiccant. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53: 2856–2863.
- Zhang, Y., Mahrer, Y. and Margolin, M. 1997. Predicting the microclimate inside a greenhouse: an application of a one-dimensional numerical model in an unheated greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 86:291-297.

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 5.1.1. Η επίδραση της διαφοράς της απόλυτης υγρασίας του αέρα με την απόλυτη υγρασία στη θερμοκρασία του καλύμματος στον κορεσμό στο ρυθμό συμπύκνωσης υδρατμών.

Διάγραμμα 5.1.2. Σχέση μεταξύ καταγραμμένων τιμών συμπύκνωσης και προβλεπόμενων τιμών συμπύκνωσης από την εξίσωση 5.1.1.

Διάγραμμα 5.1.3. Σύγκριση ρυθμού συμπύκνωσης από εξίσωση και από το μοντέλο των Stanghellini και De Jong (1995).

Διάγραμμα 5.1.4. Η μεταβολή του ρυθμού εξαερισμού του θερμοκηπίου συναρτήσει του τετραγώνου της ταχύτητας του ανέμου έξω από το θερμοκήπιο και της διαφοράς θερμοκρασίας εσωτερικού-εξωτερικού αέρα.

Διάγραμμα 5.1.5. Σύγκριση πειραματικών τιμών ρυθμού εξαερισμού με προβλεπόμενες τιμές από την εξίσωση 5.1.2.

Διάγραμμα 5.1.6. Μέση κατανομή απωλειών υδρατμών κατά τη διάρκεια της νύχτας, σε θερμοκήπιο με έλεγχο και χωρίς έλεγχο της υγρασίας (Δεκέμβριος, 2007).

Διάγραμμα 5.1.7. Μέση κατανομή απωλειών υδρατμών κατά τη διάρκεια της νύχτας, σε θερμοκήπιο με έλεγχο και χωρίς έλεγχο της υγρασίας (Μάιος, 2008).

Διάγραμμα 5.1.8. Υπολογισθείσα μέση κατανομή απωλειών υδρατμών κατά τη διάρκεια της ημέρας, σε θερμοκήπιο με έλεγχο και χωρίς έλεγχο της υγρασίας.

Διάγραμμα 5.1.9. Η μεταβολή του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκειας της νύχτας συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών του αέρα.

Διάγραμμα 5.1.10. Η μεταβολή του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής στο θερμοκήπιο κατά τη διάρκειας της ημέρας συναρτήσει του ελλείμματος κορεσμού υδρατμών του αέρα.

Διάγραμμα 5.2.1. Η επίδραση της ειδικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στον ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από δοκιμαζόμενο σύστημα αφύγρανσης.

Διάγραμμα 5.2.2. Η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου, στον ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από δοκιμαζόμενο σύστημα αφύγρανσης.

Διάγραμμα 5.2.3. Η επίδραση της ροής του αέρα του θερμοκηπίου μέσα από τον αφυγραντήρα στον ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από δοκιμαζόμενο σύστημα αφύγρανσης (κάθε σημείο έχει προέλθει από 6 μετρήσεις για κάθε παροχή μάζας αέρα).

Διάγραμμα 5.2.4. Η επίδραση της συγκέντρωση του διαλύματος, στον ρυθμό απομάκρυνσης υδρατμών από δοκιμαζόμενο σύστημα αφύγρανσης.

Διάγραμμα 5.2.5. Σχέση μεταξύ των πειραματικών τιμών και των υπολογισθέντων μέσω της διαφοράς ειδικής υγρασίας.

Διάγραμμα 5.2.6. Σχέση μεταξύ πειραματικών τιμών του ρυθμού απομάκρυνσης υδρατμών με τις υπολογισθείσες από το συντελεστή μεταφοράς μάζας.

Διάγραμμα 5.2.7. Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας μέσα στο 24ωρο στο θερμοκήπιο χωρίς αφύγρανση και σε αυτό που έγινε αφύγρανση με το δοκιμαζόμενο σύστημα.

Διάγραμμα 5.2.8. Η θερμοκρασία του σημείου δρόσου ( $T_d$ ) και η θερμοκρασία των φύλλων των φυτών ( $T_f$ ) στα παραπάνω θερμοκήπια κατά την διάρκεια της νύχτας.

Διάγραμμα 5.3.1. Η επίδραση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στο ωφέλιμο συντελεστή απόδοσης της αντλίας θερμότητας σε σχετική υγρασία 80%.

Διάγραμμα 5.3.2. Στο ενθαλπικό διάγραμμα παρουσιάζεται ο κύκλος λειτουργίας της αντλίας θερμότητας για τρία διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας λειτουργίας.

Διάγραμμα 5.3.3. Ο ρυθμός συμπύκνωσης υδρατμών από την αντλία θερμότητας συναρτησει της θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου.

Διάγραμμα 5.3.4 Η σχέση ανάμεσα στις καταγεγραμμένες τιμές συμπυκνωμένων υδρατμών το πρωί μετά από νυκτερινή λειτουργία της αντλίας θερμότητας και στις προβλεπόμενες τιμές από την σχέση 4.3.14.

Διάγραμμα 5.3.5. Η σχέση ανάμεσα στις καταγεγραμμένες τιμές συμπυκνωμένων υδρατμών το πρωί μετά από νυκτερινή λειτουργία της αντλίας θερμότητας και στις προβλεπόμενες τιμές από την σχέση 4.3.13.

Διάγραμμα 5.3.6. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας του αέρα του θερμοκηπίου στον λόγο της μεταβολής της λανθάνουσας ενέργειας προς τη μεταβολή της ενθαλπίας του αέρα μεταξύ εισόδου και εξόδου της αντλίας θερμότητας.

Διάγραμμα 5.3.7. Η σχέση ανάμεσα στις καταγεγραμμένες τιμές συμπυκνωμένων υδρατμών το πρωί μετά από νυκτερινή λειτουργία της αντλίας θερμότητας και στις προβλεπόμενες τιμές από την εξίσωση 5.10.

Διάγραμμα 5.3.8. Η σχέση ανάμεσα στην καταγεγραμμένη απορρούμενη ισχύ από την αντλία θερμότητας και την προβλεπόμενη ισχύ από την εξίσωση 5.3.2.

Διάγραμμα 5.3.9. Η σχέση ανάμεσα στις καταγεγραμμένες τιμές κατανάλωσης από την αντλία θερμότητας και στις προβλεπόμενες από την σχέση 5.3.3.

Διάγραμμα 5.3.10. Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο με την αντλία θερμότητας, στο θερμοκήπιο με ανεξέλεγκτη υγρασία και στο εξωτερικό περιβάλλον.

Διάγραμμα 5.3.11. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο με την αντλία θερμότητας, στο θερμοκήπιο με ανεξέλεγκτη υγρασία και στο εξωτερικό περιβάλλον.

Διάγραμμα 5.3.12. Η απώλειες υδρατμών κατά τη διάρκεια της νύχτας για το μήνα Δεκέμβριο 2007, για το θερμοκήπιο με την αντλία θερμότητας και για το θερμοκήπιο χωρίς έλεγχο της υγρασίας.

Διάγραμμα 5.4.1. Η εξέλιξη της εισερχόμενης στο θερμοκήπιο ηλιακής ακτινοβολίας από τις 11:00 πμ της 18<sup>ης</sup> έως τις 11:00 πμ της 19<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου.

Διάγραμμα 5.4.2. Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στο θερμοκήπιο με λειτουργία του υβριδικού συστήματος αφύγρανσης και στο θερμοκήπιο με την ανεξέλεγκτη υγρασία.

Διάγραμμα 5.4.3. Η εξέλιξη της θερμοκρασίας στο θερμοκήπιο με λειτουργία του υβριδικού συστήματος αφύγρανσης, στο θερμοκήπιο με την ανεξέλεγκτη υγρασία, καθώς και η εξέλιξη της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα.

Διάγραμμα 5.4.4. Η κατανομή των απωλειών του θερμοκηπίου με αφύγρανση και χωρίς αφύγρανση από τις 11:00 πμ της 18<sup>ης</sup> έως τις 11:00 πμ της 19<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου.

Διάγραμμα 5.4.5. Η σχέση ανάμεσα στις πειραματικές τιμές του ρυθμού απομάκρυνσης υδρατμών από το υβριδικό σύστημα και στις προβλεπόμενες τιμές από τη σχέση 5.4.1.

Διάγραμμα 5.4.6. Η ικανότητα απομάκρυνσης υδρατμών υβριδικού συστήματος και η κατανομή των απομακρυνόμενων υδρατμών ανάμεσα στον εξατμιστή της αντλίας θερμότητας και υγροσκοπικό διάλυμα, συναρτήσει της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου, για σχετική υγρασία 80%, για συγκέντρωση CaCl<sub>2</sub> 54% και για ένα κύκλο λειτουργίας ανά ώρα.

Διάγραμμα 5.4.7. Η σχέση ανάμεσα στις πειραματικές τιμές του αφυγραντικού συντελεστή συμπεριφοράς του υβριδικού συστήματος αφύγρανσης και στις προβλεπόμενες από την σχέση 5.4.3.

Διάγραμμα 5.5.1. Η εξέλιξη του ελλείμματος πίεσης υδρατμών κατά τη διάρκεια της ημέρας τον Δεκέμβριο του 2007 στο θερμοκήπιο με αφύγρανση και στο θερμοκήπιο χωρίς αφύγρανση.

Διάγραμμα 5.5.2. Η εξέλιξη του ελλείμματος πίεσης υδρατμών κατά τη διάρκεια της νύχτας τον Δεκέμβριο του 2007 στο θερμοκήπιο με αφύγρανση και στο θερμοκήπιο χωρίς αφύγρανση.

Διάγραμμα 5.5.3. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στο ύψος φυτών αγγουριάς.

Διάγραμμα 5.5.4. Επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στην ανάπτυξη της φυλλικής επιφάνειας φυτών αγγουριάς.

Διάγραμμα 5.5.5. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στον αριθμό των φύλλων ανά φυτό αγγουριάς.

Διάγραμμα 5.5.6. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στο μέσο μέγεθος των φύλλων της αγγουριάς.

Διάγραμμα 5.5.7. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στην παραγωγή φυτών αγγουριάς.

Διάγραμμα 5.5.8. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στον αριθμό των παραγόμενων καρπών ανά φυτό αγγουριάς.

Διάγραμμα 5.5.9. Η επίδραση της σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της νύχτας στο μέσο βάρος καρπού αγγουριάς.

Διάγραμμα 5.5.10. Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στα δύο θερμοκήπια για 7 ημέρες μετά την τεχνητή μόλυνση στις 16/02/07.

Διάγραμμα 5.5.11. Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στα δύο θερμοκήπια για 8 ημέρες μετά την τεχνητή μόλυνση στις 10/03/07.

Διάγραμμα 5.5.12. Η εξέλιξη της σχετικής υγρασίας στα δύο θερμοκήπια για 8 ημέρες μετά το άνοιγμα των σακουλών των καρπών της τεχνητής μόλυνσης στις 06/12/07.

Διάγραμμα 5.5.13. Η εξέλιξη της εξάπλωσης της προσβολής πάνω στους προσβεβλημένους καρπούς στα δύο θερμοκήπια.

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5.3.1. Στο αριστερό μέρος του πίνακα παράμετροι της λειτουργίας του συστήματος της αντλίας θερμότητας που υπολογίστηκαν από τις μετρήσεις του αέρα, ενώ στο δεξιό μέρος του παράμετροι που υπολογίστηκαν από τις θερμοκρασίες του κύκλου της αντλίας θερμότητας με τη χρήση του προγράμματος CoolPack.

Πίνακας 5.3.2. παρουσιάζονται οι συντελεστές ψυκτικής και θερμικής συμπεριφοράς της αντλίας θερμότητας με τρεις διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού.

Πίνακας 5.5.1. Τα αποτελέσματα των τεχνητών μολύνσεων της 16<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 2007.

Πίνακας 5.5.2. Τα αποτελέσματα των τεχνητών μολύνσεων της 16<sup>ης</sup> Φεβρουαρίου 2007

Πίνακας 5.5.3. Τα αποτελέσματα των τεχνητών μολύνσεων της 10<sup>ης</sup> Μαρτίου 2007.



## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Έκταση καλλιεργούμενων θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2005 (Πηγή: EuroStat)

Σχήμα 1.2. Έκταση καλλιεργούμενων θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα το 2006. (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

Σχήμα 1.3. Διαχωρισμός θερμοκηπιακών καλλιεργειών στην Ελλάδα, το 2006. (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

Σχήμα 1.4. Διαχωρισμός των θερμοκηπιακών κηπευτικών καλλιεργειών στην Ελλάδα, το 2006. (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

Σχήμα 1.5. Ποσοστιαία σχηματική παράσταση της έκτασης των ελληνικών θερμοκηπίων σε σχέση με το τύπο κατασκευής, το 2006. (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

Σχήμα 1.6. Ποσοστιαία σχηματική παράσταση της έκτασης των ελληνικών θερμοκηπίων σε σχέση με τη δυνατότητα θέρμανσης, το 2006. (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

Σχήμα 2.1. Η σχηματική αναπαράσταση του ανακτητή θερμότητας που χρησιμοποίησαν οι Rousse et al. (2000), σε εγκάρσια τομή.

Σχήμα 3.1 Σχηματική αναπαράσταση προτεινόμενου υβριδικού συστήματος αφύγρανσης θερμοκηπίου.

Σχήμα 4.1. Σχηματική διάταξη αφυγραντήρα υγροσκοπικής απορρόφησης κάθετων ροών.

Σχήμα 4.2. Οι μεταβολές στην ενθαλπία του αέρα του θερμοκηπίου κατά την αφύγρανση του από την αντλία θερμότητας.

Σχήμα 4.3. Οι μεταβολές στην ενθαλπία του αέρα του θερμοκηπίου κατά την αφύγρανση του από την αντλία θερμότητας και το υβριδικό σύστημα στο ψυχομετρικό διάγραμμα.

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 3.1. Εξωτερική άποψη του πειραματικού θερμοκηπίου.

Εικόνα 3.2. Μέτρηση μετεωρολογικών παραμέτρων α) σε αεριζόμενο κλωβό μέσα στο θερμοκήπιο και β) σε ιστό έξω από το θερμοκήπιο.

Εικόνα 3.3. Άποψη α) του αεροθέρμου θερμοκηπίου και β) του καταγραφικού συστήματος

Εικόνα 3.4. Άποψη της αντλίας θερμότητας που χρησιμοποιήθηκε για την αφύγρανση του θερμοκηπίου.

Εικόνα 3.5. Άποψη τοιχώματος από συμπιεσμένη κυτταρίνη που χρησιμοποιήθηκε για την αύξηση της επιφάνειας αλληλεπίδρασης υγρασκοπικού διαλύματος και αέρα.

Εικόνα 3.6. Άποψη των φυτών της καλλιέργειας αγγουριάς στο θερμοκήπιο του πειράματος

Εικόνα 3.7. Τεχνητές μολύνσεις στην απόληξη του άνθους σε νεαρούς καρπούς αγγουριάς.

Εικόνα 3.8. Τεχνητές μολύνσεις και κλείσιμο καρπών μέσα σε σακούλα ώστε να προχωρήσει η προσβολή.

Εικόνα 5.1. Αριστερά το διαμέρισμα του θερμοκηπίου με αφύγρανση και δεξιά το διαμέρισμα του θερμοκηπίου χωρίς αφύγρανση.

Εικόνα 5.2. Καρποί αγγουριάς που προσβλήθηκαν από τις τεχνητές μολύνσεις.

Εικόνα 5.3. Καρποί αγγουριάς που δεν προσβλήθηκαν από τις τεχνητές μολύνσεις και συνέχισαν κανονικά την ανάπτυξη τους.

## Κατάλογος Δημοσιεύσεων

1. **Lycoskoufis, I.** and Mavrogianopoulos, G., 2008: A Hybrid dehumidification system for greenhouses. *Acta Horticulturae*, 797, 55-60.
2. **Λυκοσκούφης Ι.**, Μαυρογιαννόπουλος Γ., 2007: Η χρήση της αντλίας θερμότητας στη μείωση της σχετικής υγρασίας στο χώρο του θερμοκήπιο. 5<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, Ε.Γ.Μ.Ε., Λάρισα.
3. **Λυκοσκούφης Ι.**, Μαυρογιαννόπουλος Γ., 2009: Η επίδραση της ρύθμισης της σχετικής υγρασίας στην ανάπτυξη και τη παραγωγή της αγγουριάς. 24<sup>ο</sup> Επιστημονικό Συνέδριο της Ελληνικής Εταιρείας της Επιστήμης των Οπωροκηπευτικών, Βέροια.
4. **Λυκοσκούφης Ι.**, Μαυρογιαννόπουλος Γ., 2011: Αφύγρανση του θερμοκηπίου με σύστημα υγροσκοπικής απορρόφησης. 7<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο Γεωργικής Μηχανικής, Ε.Γ.Μ.Ε., Αθήνα.