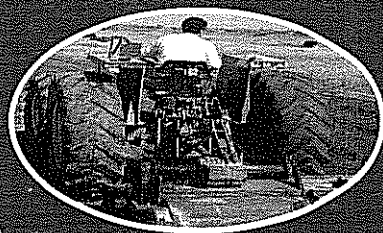
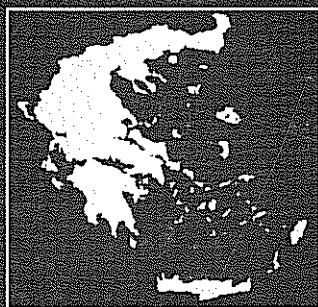
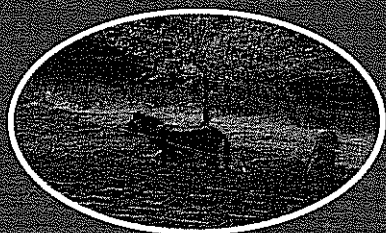


# 1<sup>ο</sup> Εθνικό Συνέδριο ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΤΟΜΟΣ  
ΕΙΣΗΓΗΣΕΩΝ

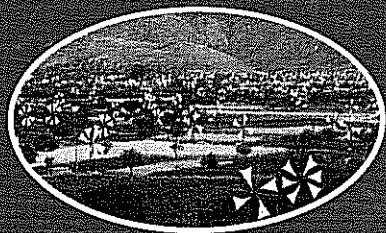


ΓΕΩΡΓΙΚΑ  
ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ



ΕΛΑΦΟΣ  
ΝΕΡΟ

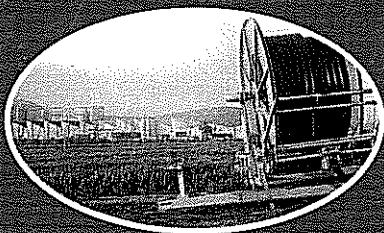
ΓΕΩΡΓΙΚΑ  
ΚΤΙΡΙΑ



ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ-  
ΑΠΟΒΛΗΤΑ-ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΑ

ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΕΤΑΙΡΕΙΑ  
ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ



**1<sup>ο</sup>** ΕΘΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ  
ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΤΟΜΟΣ ΕΙΣΗΓΗΣΕΩΝ

1998

ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΛΛΑΔΟΣ

**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΕΚΔΟΣΗΣ:** Βίκη Παπανικολάου

**ART DIRECTOR:** Ρούλα Τσιωρτζιώτη

**ΣΤΟΙΧΕΙΟΘΕΣΙΑ:** ΑΘΩΣ

**FILM:** bp Studios

**ΕΚΤΥΠΩΣΗ:** ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ ΑΕΒΕ

ΕΚΔΟΣΗ 1998

©ΑΘΩΣ

Στ. Παπανικολάου 10Α ● Κορωπί 194 00

Τηλ. 662.79.81 ● Fax: 662.37.58



ΑΘΩΣ

ΤΟΜΟΣ ΕΙΣΗΓΗΣΕΩΝ

# 1ου ΕΘΝΙΚΟΥ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

**1η ΜΕΡΑ - Παρασκευή 11 Δεκεμβρίου 1998**

**Αίθουσα Α**

- ◆ Γεωργικά Μηχανήματα και Παραγωγή Ισχύος
- ◆ Ενέργεια και Γεωργία

**Αίθουσα Β**

- ◆ Έδαφος & Νερό - Περιβάλλον
- ◆ Γεωργικά Κτίρια

**2η ΜΕΡΑ - Σάββατο 12 Δεκεμβρίου 1998**

**Αίθουσα Α**

- ◆ Επεξεργασία Προϊόντων - Απόβλητα - Απορρίματα
- ◆ Γεωργικά Μηχανήματα και Παραγωγή Ισχύος

**Αίθουσα Β**

- ◆ Έδαφος & Νερό - Περιβάλλον

## Οργανωτική Επιτροπή

Δρ. Γ. Παπαδάκης (Πρόεδρος)  
Δρ Ν. Δαναλάτος  
Δρ Ν. Δέρκας  
Ν. Κουτσοβίτης  
Δρ Α. Μιστριώνης  
Δρ Π. Παναγάκης

## Επιστημονική Επιτροπή

Σ. Κυρίτσος (Πρόεδρος)	Δρ Γ. Μαρτζόπουλος
Γ. Παπαδάκης (Αντιπρόεδρος)	Δρ Χ. Μαρτζοπούλου
Δρ Κ.-Β. Ακριτίδης	Δρ Γ. Μαυρογιαννόπουλος
Δρ Π. Αξαόπουλος	Δρ Ι. Μήτσιος
Δρ Σ. Βάλμης	Δρ Δ. Μπριασούλης
Δρ Β. Βασιλάτος	Δρ Χ. Μπαμπατζιρόπουλος
Δρ Φ. Γέρπτος	Α. Παπαγιαννοπούλου
Δρ Δ. Γεωργακάκης	Δρ Γ. Παρισόπουλος
Δρ Ν. Δαλέζιος	Δρ Γ. Πιτσιλής
Δρ Ν. Δαναλάτος	Δρ Α. Πουλοβασίλης
Δρ Ν. Δέρκας	Δρ Ν. Σιγρίμης
Δρ Π. Καρακατσούλης	Δρ Μ. Σκαρβέλας
Δρ Κ. Καρύτσας	Δρ Χ. Σούτερ
Δρ Κ. Κίττας	Δρ Γ. Τερζίδης
Δρ Ι. Κόκκορας	Δρ Χ. Τζιμόπουλος
Δρ Γ. Λαμπρινός	Δρ Κ. Τσατσαρέλης
Δρ Μ. Σακελλαρίου - Μακραντωνάκη,	

# ΤΟΜΟΣ ΕΙΣΗΓΗΣΕΩΝ - ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## 1η ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ

Σύστημα Δοκιμών Διατάξεων Προστασίας σε Περίπτωση Ανατροπής Ελκυστήρων . . . . .	11
<i>Πόδος Π., Αντωνούλας Γ., Σερσελούδης Χ., Παρισόπουλος Γ.</i>	
Μηχανοσυλλογή Βαμβακιού σε Στενές Αποστάσεις μεταξύ Γραμμών Σποράς . . . . .	21
<i>Μπαρτζιάλης Δ., Γαλανοπούλου-Σενδουκά Σ.</i>	
Βελτίωση του Βαθμού Απόδοσης Φυγόκεντρης Αντλίας με Προέκταση των Πτερυγίων . . . . .	27
<i>Ακριτίδης Κ., Καλοκάσης Π.</i>	
Επανασχεδιασμός με σκοπό τη Μείωση του Κόστους Παραγωγής Δισκοσβάρνας . . . . .	35
(Εργοστασίου Σάμπρη) <i>Τσιρίκογλου Θ., Γέμτος Θ.</i>	
Ο Σχεδιασμός και η Κατασκευή του Νέου Αρότρου TERRA 2000. . . . .	47
<i>Κούγκουλος Αθ., Μπαλουκτής Σ., Κατσής Χρ., Γέμτος Θ.</i>	
Σήμανση CE για τα Γεωργικά Μηχανήματα - Κατάρτιση Τεχνικού Φακέλου. . . . .	53
<i>Παπαγιαννοπούλου Α., Παρισόπουλος Γ.</i>	
Το Ηλεκτρονικό Εμπόριο στις Ελληνικές Επιχειρήσεις Γεωργικών Μηχανημάτων . . . . .	63
<i>Κωστοπούλου Κ., Σιδερίδης Α.</i>	
Απώλειες κατά τη Μηχανική Συγκομιδή των Ζαχαροτεύτλων στην Θεσσαλία. . . . .	71
Στοιχεία 1996 <i>Γέμτος Θ., Δέμης Βλ., Αλεξάνδρου Αθ., Καραμούτης Χρ.</i>	
Καλλιέργεια Επισπόρου Αραβοσίτου με το Σύστημα της Κατευθείαν Σποράς. . . . .	81
<i>Λιθουργίδης Α., Τσατσαρέλης Κ.</i>	
Καλλιέργεια Βαμβακιού σε Αναχώματα: Μια Εναλλακτική Μέθοδος. . . . .	89
<i>Σταθάκος Θ., Γέμτος Θ.</i>	
Προβλήματα Διαχείρισης και Κατασκευής Γεωργικών Μηχανημάτων . . . . .	101
<i>Νάτσος Θ.</i>	

## 2η ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΓΕΩΡΓΙΑ

- Τύποι, Εξοπλισμός, Ενεργειακή Αξιολόγηση και Δυνατότητες Εξοικονόμησης . . . . . 109  
Ενέργεια στα Θερμοκήπια της Μαγνησίας  
*Μπαρτζάνας Θ., Γιαγλάρας Π., Κίττας Κ.*
- Θέρμανση και Δροσισμός Θερμοκηπίων με Συστήματα Συνδιασμού . . . . . 121  
Γεώτρησης/Αντλίας Θερμότητας  
*Καρύτσας Κ.*
- Πειραματικά μελέτη και αξιολόγηση φωτοβολταϊκού συστήματος άντλησης . . . . . 129  
νερού με αντλία θετικής μετατόπισης  
*Καλλιβρούσης Α., Μανωλάκος Δ., Παπαδάκης Γ.*
- Τυποποίηση και Συναφείς Δραστηριότητες. . . . . 145  
*Γκιθώνας Γ.*

## 3η ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ

- Φορτία Ανέμου σε Θερμοκήπια . . . . . 153  
*Μπριασούλης Δ., Τσιρογιάννης Γ., Μυστριώτης Α.*
- Προσδιορισμός του Βαθμού Αερισμού σε Διπλό Τοξωτό Θερμοκήπιο . . . . . 165  
*Βασιλείου Ν., Νικήτα-Μαρτζόπουλου Χ., Μαρτζόπουλος Γ.*
- Πειραματικός Προσδιορισμός του Ολικού Συντελεστή Απωλειών . . . . . 185  
Θερμότητας σε ένα Πλαστικό Θερμοκήπιο  
*Κατσούλας Ν., Μπαρτζάνας Θ., Κίττας Κ.*
- Ρύθμιση του Περιβάλλοντος των Μεσογειακών Θερμοκηπίων: . . . . . 195  
Πρακτικές και Προοπτική  
*Μπαρτζάνας Θ., Baille Α., Κίττας Κ.*

## 4η ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ - ΑΠΟΒΛΗΤΑ - ΑΠΟΡΡΙΜΑΤΑ

Μέσα Μεταφοράς Φθαρτών Ελληνικών Αγροτικών Προϊόντων: . . . . . 209  
Προβλήματα και Προοπτικές  
Νάνος Γ.

Παράγοντες που Επιπρεάζουν την Αφυδάτωση κατά την Κατάψυξη . . . . . 219  
Μητρόπουλος Δ., Λαμπρινός Γ.

Εφαρμογή στο Έδαφος Απορριμάτων Παραγομένων κατά τον Εκκοκκισμό . . . . . 229  
του Βαμβακιού και την Χημική Αποκνώση του Βαμβακόσπορου  
Χουλιαράς Ν., Γέμος Θ., Δουλουδής Ι.

## 5η ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΕΛΑΦΟΣ & ΝΕΡΟ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Συστήματα Τηλεπισκόπησης στα Σύγχρονα Αρδευτικά Δίκτυα . . . . . 239  
Ευφραιμίδης Α.

Απλή Μέθοδος Μέτρησης της Παροχής σε Τραπεζοειδείς Ελευθέρους Καταβαθμούς . . 247  
Τερζίδης Γ., Αναστασιάδου-Παρθενίου Ε., Χατζηγιαννάκης Ε.

Συμβολή στον Ορθολογικό Σχεδιασμό της Στάγδην Αρδευσης με Βάση. . . . . 259  
την Κινητική της Διαβροχής από Γραμμική Επιφανειακή Πηγή  
Ελμαλόγλου Σ., Μαλάμος Μ.

Μελέτη Διατάξεων Αρδευσης με Σταγόνες στην Καλλιέργεια των Ζαχαροτεύτων . . . 271  
Σακελλαρίου Μ., Μασλάρης Ν., Καλφούντζος Δ., Γούλας Χ.

Διήθηση προς Κεκλιμένο Υδροφορέα από Υδατόρευμα . . . . . 281  
με βαθμιαία Μεταβαλλόμενη Στάθμη  
Τελόγλου Η., Ζήσης Θ., Τερζίδης Γ.

Διαστασιολόγηση Ταμπευτήρα του Καβουρόλακκα Χαλκιδικής . . . . . 291  
Παπαμιχαήλ Δ., Γεωργίου Π., Καραμούτσης Δ., Παρισόπουλος Γ.

Συγκριτική Αξιολόγηση Μοντέλων Πρόβλεψης της Υδραυλικής Αγωγιμότητας . . . . . 303  
Τζιμόπουλος Χ., Αραμπατζής Γ.



Διαχείριση Υδάτων της Υδρολογικής Λεκάνης του Ποταμού Αχελώου . . . . .	313
Κατάντη του Φράγματος Στρατού <i>Τσιμόπουλος Χ., Σπυρίδης Α.</i>	
Διαχείριση του Υδροφορέα της Λεκάνης του Αξιού με τη Βοήθεια . . . . .	325
Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών <i>Κουτάλου Β., Γιαννόπουλος Στ., Τσιμόπουλος Χ., Αρβανίτης Απ., Τσακίρη Μ.</i>	
Εδαφικές ρωγματώσεις και καθιζήσεις από την πτώση στάθμης . . . . .	335
των υπογείων νερών της λεκάνης της τέως λίμνης Κάρλας του Ν. Λαρίσης <i>Μιμίδης Μ.Θ., Αγγελίδης Σ.Μ., Χαλκίδης Ν.Η.</i>	
Αυτόματη Ρύθμιση του Μαθηματικού Μοντέλου της Πεδιάδας Πιερίας . . . . .	347
<i>Καβαλιεράτου Σ., Μπαρμπιτσιμόπουλος Χ., Τερζίδη Γ.</i>	
Εκτίμηση της Επίδρασης των Μεθόδων Κατεργασίας του Εδάφους, . . . . .	357
της Φυτοκάλυψης και της Κατεύθυνσης Σποράς του Βαμβακιού, στην Διάβρωση του Εδάφους <i>Τερζοῦδη Χ., Γέμτος Θ.</i>	
Διαχείριση Νερού και Αζωτούχου Λίπανσης σε Καλλιέργεια Αραβοσίτου . . . . .	367
με το Μοντέλο WANISIM <i>Αντωνόπουλος Β., Παυλάτου-Βε Α.</i>	
Χρήση Μεθόδων Μειωμένων Εισροών για την Κατεργασία του Εδάφους. . . . .	377
στην Καλλιέργεια του Καλαμποκιού <i>Καβαλάρης Χ., Γέμτος Θ., Γεωργίου Χ., Κουρκούτας Μ.</i>	
Η επίδραση της Χρήσης Γης στην Υποβάθμιση του εδάφους . . . . .	389
<i>Δαναλάτος Ν.Γ., Κοσμάς Κ., Γεροντίδης Στ., Μαραθιανού Μ.</i>	

## 3η ΕΝΟΤΗΤΑ

### ΓΕΩΡΓΙΚΑ ΚΤΙΡΙΑ

Προεδρείο: Κ. Κίττας, Χ. Μαρτζοπούλου

Συγγραφείς: Δ. Μπριασούλης, Γ. Τσιρογιάννης, Α. Μυστριώτης  
Ν. Βασιλείου, Χ. Νικήτα-Μαρτζόπουλου, Γ. Μαρτζόπουλος  
Ν. Κατσούλας, Θ. Μπαρτζάνας, Κ. Κίττας  
Θ. Μπαρτζάνας, Α. Baille, Κ. Κίττας



## ΦΟΡΤΙΑ ΑΝΕΜΟΥ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ

Δημήτρης Μπριασούλης<sup>1</sup>, Γιάννης Α. Τσιρογιάννης<sup>2</sup>, Αντώνης Μυστριώτης

<sup>1</sup>Εργ. Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθήνας  
<sup>2</sup>Υπότροφος Ι.Κ.Υ.

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

**Τ**α θερμοκήπια είναι ελαφριές κατασκευές που σκοπεύουν στο να επιτρέπουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διαφάνεια ως προς την ηλιακή ακτινοβολία και να δημιουργούν το κατάλληλο μικροκλίμα για τη βέλτιστη ανάπτυξη των φυτών ενώ παράλληλα να αντέχουν σε δράσεις λόγω συνδυασμού φορτίων (π.χ. άνεμος, χιόνι, βροχή και χαλάζι). Συχνά προκαίπουν ζημιές σε θερμοκήπια από καταγίδες και πολύ βαριές χιονοπτώσεις λόγω ανεπαρκούς σχεδιασμού ή λανθασμένου ορισμού των φορτίων, των συνδυασμών τους ή και των δύο. Για να έχουν οι θερμοκηπιακές κατασκευές ικανά περιθώρια ασφαλείας και να αποφεύγονται εκτεταμένες ζημιές, πρέπει να σχεδιάζονται σύμφωνα με τους σχετικούς κανονισμούς που προσφέρουν οδηγίες για τον υπολογισμό των φορτίων σχεδιασμού.

Εθνικοί κανονισμοί για γυάλινα και πλαστικής κάλυψης θερμοκήπια υπάρχουν σε αρκετές χώρες. Ήδη, προετοιμάζεται μέσω της αρμόδιας επιτροπής (CEN/TC-284), ένας κανονισμός για όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Κοινότητας (CEN), η βάση οποίου είναι οι Ευρωπαϊκές για δράσεις και σχεδιασμό κατασκευών (CEN, CEN). Γενικά εθνικοί κανονισμοί για δράσεις χρησιμοποιούνται σε αρκετές χώρες, και αυτό συμβαίνει όταν δεν υπάρχουν ειδικοί κανονισμοί για θερμοκήπια.

Οι δυνάμεις του ανέμου εμφανίζονται ως πίεση και αναρρόφηση στην επιφάνεια του καλύμματος του θερμοκηπίου. Η δυναμική ανεμοπίεση εξαρτάται από το ενεργό ύψος του θερμοκηπίου, μέγεθος όμως που δεν ορίζεται με τον ίδιο τρόπο από τους διάφορους κώδικες (CEN, ANSI/ASCE). Ο συντελεστής ανεμοπίεσης που ορίζει την πίεση και αναρρόφηση ως συνάρτηση της δυναμικής ανεμοπίεσης, εξαρτάται από το σχήμα και την θέση του τμήματος της κάλυψης για το οποίο γίνονται οι υπολογισμοί. Γενικά ο συντελεστής αυτός διαφέρει μεταξύ των διαφόρων κανονισμών.

Σε διάφορους κανονισμούς για κατασκευές περιλαμβάνονται τόσο τυπικές ταχύτητες ανέμου που δίνονται μέσω μετεωρολογικών δεδομένων της υπό μελέτη περιοχής όσο και η μορφολογία του μετώπου του ανέμου, που περιγράφει την επιρροή του ανάγλυφου στην μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος. Τα φορτία σχεδιασμού υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη την διατομή του κτιρίου σε σχέση με τον άνεμο, το σχήμα και το ύψος, το υψόμετρο και την τοπογραφία της περιοχής όπου είναι εγκατεστημένο καθώς και την αναμενόμενη διάρκεια ζωής της κατασκευής (περίοδος αναφοράς). Τόσο η εσωτερική όσο και η εξωτερική πίεση πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν γίνονται υπολογισμοί φορτίων ανέμου στην κατασκευή.

Η παρούσα εργασία βασίζεται σε μια υπό εξέλιξη έρευνα που αφορά την ουστηματική ανάλυση των στοιχείων που υπεισέρχονται στον υπολογισμό των φορτίων ανέμου στις κατασκευές στους διάφορους εθνικούς κανονισμούς, τον Ευρωπαϊκό για δράσεις και το προσχέδιο του Ευρωπαϊκού για σχεδιασμό θερμοκηπίων υπογραμμίζοντας τις διαφορές τους. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος Computational Fluid Dynamics (CFD) ως ένα πιο ενέλικτο και φτηνό μέσον για τον ορισμό της κατανομής της ανεμοπίεσης σε διάφορες τυπικές θερμοκηπια-

κές κατασκευές (επειδή τα πειράματά ανεμοσήραγγας είναι εξαιρετικά δαπανηρά και χρονοβόρα). Οι συνοριακές συνθήκες των αριθμητικών πειραμάτων επιλέχθηκαν έτσι ώστε να προσομοιώνεται το τυπικό ατμοσφαιρικό επιφανειακό στρώμα σε αγροτικές περιοχές όπου συνήθως είναι εγκατεστημένα τα θερμοκήπια. Μοντέλα για αυτές τις οριακές συνθήκες μπορούν ακόμη να βρεθούν σε κώδικες για φορτία και δράσεις σε κατασκευές. Με τη βοήθεια αυτών των αριθμητικών προσομοιώσεων είναι δυνατόν να αναλυθούν θεωρητικά και αριθμητικά και να συγκριθούν με αντίστοιχες περιπτώσεις δημοσιευμένων πειραμάτων πλήρους κλίμακας και ανεμοσήραγγας οι επιδράσεις των διαφορετικών παραδοχών των διαφόρων κωδίκων. Τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής αναμένεται να συνεισφέρουν σε ένα πιο ρεαλιστικό καθορισμό των ανεμοπιέσεων για το σχεδιασμό θερμοκηπίων και να βοηθήσουν την αντίστοιχη έρευνα για το προσχέδιο του Ευρωπαϊκού κανονισμού.

### Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το φορτίο ανέμου είναι μία από τις πιο σημαντικές δράσεις για τα θερμοκήπια. Η κατανομή της πίεσης λόγω του ανέμου εξαρτάται βασικά από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κτηρίου. Η επίδραση του σχήματος στην κατανομή αυτή περιγράφεται από τον αδιάστατο συντελεστή πίεσης  $c_p$ , ο οποίος ορίζεται ως:

$$Pe = \frac{1}{2} c_p \rho v_w^2 \quad (1)$$

όπου  $Pe$  είναι η εξωτερική πίεση στο κάλυμμα του θερμοκηπίου,  $v_w$  είναι η ταχύτητα του ανέμου υπολογισμένη σε ένα ύψος αναφοράς και  $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα.

Οι συντελεστές πίεσης για τους πιο κοινούς τύπους κτηρίων βασίζονται σε δημοσιευμένη έρευνα στην βιβλιογραφία και δίνονται από τους Εθνικούς Κανονισμούς για το σχεδιασμό κατασκευών και τους Ευρωκώδικες για δράσεις. Παρόλα αυτά οι τιμές των συντελεστών πίεσης που δίνονται στους κανονισμούς έχουν χαρακτηριστεί ως υπεραπλουστευτικές προσεγγίσεις της πραγματικότητας που θέτουν περιορισμούς στην αξιοπιστία του σχεδιασμού ως προς το φορτίο ανέμου (Stathopoulos & Saathoff). Για το λόγο αυτό η βελτιστοποίηση συγκεκριμένων σχεδίων θερμοκηπίων απαιτεί τον καθορισμό των συντελεστών πίεσης με βάση ένα μεγάλο αριθμό μετρήσεων σε υπάρχουσες πραγματικές κατασκευές και σε πειράματα ανεμοσήραγγας. Μέχρι τώρα μόνο μερικοί τύποι θερμοκηπίων έχουν μελετηθεί όσο αφορά τους συντελεστές πίεσης τους. Πιο συγκεκριμένα, οι συντελεστές πίεσης των θερμοκηπίων τύπου Venlo, που είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος στην Βόρεια Ευρώπη, έχουν μετρηθεί στο Silsoe Institute of Agricultural Engineering, Great Britain σε κατασκευές πραγματικής κλίμακας (Wells & Hoxey).

Αν υποθεθεί ότι τα θερμοκήπια μπορούν να θεωρηθούν κανονικές αμφικλινούς στέγης κατασκευές, οι συντελεστές που ισχύουν για τις άλλες χαμηλού ύψους κατασκευές όπως είναι οι αποθήκες και στάβλοι αλλά και οι τυπικές αστικές χαμηλές κατασκευές μπορούν να εφαρμοστούν στο σχεδιασμό τους. Πολλά τυπικά χαμηλού ύψους κτήρια έχουν μελετηθεί με πειράματα ανεμοσήραγγας. Τα πειράματα ανεμοσήραγγας έχουν το πλεονέκτημα των πλήρως ελεγχόμενων συνοριακών συνθηκών σε σχέση με τα πειράματα πραγματικής κλίμακας που γίνονται σε εξωτερικές συνθήκες όπου η ροή του ανέμου παραλλάσσεται από τα περικόρη του κτηρίου. Οι συνθήκες εισόδου των ανεμοσήραγγων τροποποιούνται κατάλληλα ώστε να προσομοιώνουν το ατμοσφαιρικό επιφανειακό στρώμα. Συγκριτικές μελέτες που έχουν δημοσιευτεί στην διεθνή βι-

βλιογραφία δείχνουν μια σχετικά καλή συμφωνία μεταξύ πειραμάτων ανεμοσήραγγας και πλήρους κλίμακας (Richards & Hoxey). Μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις παρουσιάζονται στις περιοχές όπου οι συντελεστές πίεσης παίρνουν μεγάλες αρνητικές τιμές. Ο λόγος για αυτή τη διαφοροποίηση δεν έχει γίνει πλήρως κατανοητός μέχρι στιγμής, αλλά έχει πιθανότητα σχέση με τη μεγάλη τυρβώδη δραστηριότητα που εμφανίζεται σε περιοχές ισχυρής αναρρόφησης.

Μια οικονομική και εύκολη εναλλακτική των πειραμάτων ανεμοσήραγγας (που όμως δεν τα υποκαθιστά) είναι η μέθοδος της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics (CFD)). Οι προσομοιώσεις CFD επιτρέπουν την εύκολη τροποποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κτηρίου και των συνοριακών συνθηκών περιγράφοντας κατάλληλα το ατμοσφαιρικό επιφανειακό στρώμα. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να μετρηθούν οι συντελεστές πίεσης για ένα μεγάλο αριθμό κατασκευών. Συγκρίσεις που βρέθηκαν στην βιβλιογραφία δείχνουν μια καλή συμφωνία μεταξύ των αριθμητικών αποτελεσμάτων και αυτών που προκύπτουν από τα πειράματα πλήρους κλίμακας. Παρόλα αυτά σε περιοχές μεγάλης τυρβώδους δραστηριότητας που αντιστοιχεί σε ροή αποκόλλησης, τα πειραματικά και τα αριθμητικά αποτελέσματα δεν συμφωνούν ποσοτικά. Στις περιοχές αυτές, ή η αριθμητική προσέγγιση συνεχώς υπερεκτιμά την δύναμη αναρρόφησης ή οι μετρητικές τεχνικές την υποεκτιμούν (ή και τα δύο) (Richards & Hoxey, Hoxey et al., Mistrionis et al., Mistrionis et al., ). Για το λόγο αυτό οι συντελεστές πίεσης που υπολογίζονται με CFD πρέπει να γίνονται αποδεκτές με προσοχή. Από την άλλη πλευρά, αποτελέσματα από πειράματα πλήρους κλίμακας ή μοντέλα ανεμοσήραγγας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μόνο ενδεικτικά αφού αφορούν μόνο πολύ ειδικούς συνδυασμούς κατασκευών και συνθηκών, ενώ μπορεί να έχουν επηρεαστεί και από τις τεχνικές μέτρησης. Έτσι η αριθμητική ανάλυση είναι σε πολλές περιπτώσεις η μόνη οικονομική μέθοδος για συστηματική μελέτη της επίδρασης των συγκεκριμένων γεωμετρικών παραμέτρων στους συντελεστές πίεσης.

## ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΕΣ

### Κανονισμοί για τον υπολογισμό των δράσεων ανέμου

Υπάρχουν μερικές διαφορές στον τρόπο με τον οποίο διαφορετικοί κανονισμοί προσεγγίζουν το αντικείμενο του υπολογισμού των δράσεων ανέμου στις κατασκευές γενικά και φυσικά και στις θερμοκηπιακές κατασκευές, όταν εφαρμόζονται με την κατάλληλη χρησιμοποίηση των σχετικών παραμέτρων. Στη συνέχεια περιγράφονται εν συντομία ο Ευρωκώδικας για δράσεις, ο αντίστοιχος Αμερικάνικος κώδικας για κτήρια και άλλες κατασκευές καθώς και το προσχέδιο του προτεινόμενου κανονισμού για τον σχεδιασμό θερμοκηπίων που λαμβάνονται υπόψη σε αυτή την εργασία:

#### ENV 1991-2-4 :1995

Αυτός ο κανονισμός αποτελεί μέρος των Κατασκευαστικών Ευρωκωδίκων που συνιστούν ένα σύνολο κανονισμών για κατασκευαστικό και γεωτεχνικό σχεδιασμό κτηρίων και έργων πολιτικού μηχανικού. Παρέχει κανόνες και μεθόδους για τον υπολογισμό των φορτίων ανέμου σε κατασκευές. Παρέχει δύο διαδικασίες για τον υπολογισμό των φορτίων ανέμου :

- την απλοποιημένη μέθοδο που εφαρμόζεται στα κτήρια εκείνα που οι κατασκευαστικές τους ιδιότητες δεν τα κάνουν επιδεκτικά σε δυναμική διέγερση (για χρήση σε κτήρια χαμηλότερα των 200 μέτρων ή σε εκείνα των οποίων ο δυναμικός συντελεστής είναι μικρότερος του 1,2)

- την λεπτομερειακή μέθοδο που εφαρμόζεται στα κτήρια εκείνα που οι κατασκευαστικές τους ιδιότητες τα κάνουν επιδεικτικά σε δυναμική διέγερση (όλες οι άλλες περιπτώσεις)

#### ANSI/ASCE 7-93

Ο κανονισμός αυτός περιλαμβάνει στοιχεία για διάφορους τύπους δράσεων συμπεριλαμβανομένης και αυτής του ανέμου. Το χαρακτηριστικό της τελευταίας έκδοσης είναι ότι περιέχει μία εκτενή αναθεώρηση του τμήματος που αφορά τα φορτία ανέμου ώστε να συμπεριλάβει όλες τις τελευταίες εξελίξεις στον τομέα αυτό.

#### prEN 13031-1

Αυτό το προσχέδιο (ήδη υπό τροποποίηση) αφορά ειδικά στα θερμοκήπια. Για τον υπολογισμό των δράσεων ανέμου, το προσχέδιο υποτίθεται ότι στηρίζεται στις μεθόδους που παρέχονται από το ENV 1991-2-4. Στην πραγματικότητα το prEN 13031-1 δεν είναι ένας κανονισμός για τον υπολογισμό των φορτίων ανέμου αλλά περιέχει πληροφορία που χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το ENV1991 (π.χ. συντελεστές πίεσης για συγκεκριμένα θερμοκήπια).

#### Κοινή βάση και κύριες διαφορές

Σε όλους τους παραπάνω κανονισμούς, που περιλαμβάνουν κανόνες για τον υπολογισμό των φορτίων ανέμου (EC1 και ANSI/ASCE), η απλή διαδικασία για τον υπολογισμό αφορά τον καθορισμό της ταχύτητας ανέμου, την επιλογή και καθορισμό των κατάλληλων συντελεστών που περιγράφουν τις επιδράσεις ριπών και τέλος την επιλογή των κατάλληλων συντελεστών πίεσης και δύναμης. Εξετάζοντας τις αναλυτικές μεθόδους που συνιστώνται για κτήρια που επιδέχονται δυναμική διέγερση, ένα σύνολο παραμέτρων ορίζει τις επιδράσεις ριπών του ανέμου στις κατασκευές. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήσαμε την απλή μέθοδο. Δεν περιλαμβάνεται στους σκοπούς αυτής της εργασίας η παρουσίαση εκτεταμένων αριθμητικών συγκρίσεων των κανονισμών όπως αυτοί εφαρμόζονται σε διάφορους τύπους θερμοκηπίων. Αντίθετα, η κοινή βάση και κάποιες κύριες διαφορές τονίζονται σε μια προσπάθεια να ξεκαθαρίσουν μερικά θέματα που αφορούν τις αρχές του υπολογισμού των "δράσεων ανέμου" που στηρίζονται στο υπό τροποποίηση προσχέδιο pr EN 13031-1 για τον σχεδιασμό θερμοκηπίων. Μερικά γενικά σχόλια σχετικά με τον υπολογισμό των πιέσεων ανέμου παρουσιάζονται συνοπτικά στην συνέχεια:

Πρώτα ο ANSI/ASCE διακρίνει τον υπολογισμό του φορτίου ανέμου που εφαρμόζεται στο κύριο σύστημα αντίστασης στον άνεμο από αυτόν που εφαρμόζεται για την κάλυψη και τα διάφορα στοιχεία της κατασκευής. Ο ENV-1991 παρέχει μία μέθοδο για όλες τις περιπτώσεις.

Ο ENV-1991 χρησιμοποιεί λογαριθμικό νόμο για την περιγραφή της μεταβολής της ταχύτητας με το ύψος ενώ ANSI/ASCE χρησιμοποιεί εκθετικό νόμο. Υπάρχουν ακόμη ορισμένες διαφορές μεταξύ των ομάδων των συντελεστών που χρησιμοποιεί ο κάθε κανονισμός (για παράδειγμα ο ANSI/ASCE χρησιμοποιεί τον συντελεστή σημαντικότητας ενώ δεν υπάρχει παρόμοιος συντελεστής ENV) και ακόμη στον τρόπο που εκφράζονται συντελεστές παρόμοιας σημασίας (π.χ. ο συντελεστής έκθεσης). Τέλος υπάρχουν διαφορές στον ορισμό του χαρακτηριστικού ύψους κάθε τύπου κατασκευής. Άλλες διαφορές αφορούν τους συντελεστές ασφάλειας και παραμέτρους όπως ο συντελεστής σημαντικότητας του ANSI/ASCE που μειώνει την αντίστοιχες πιέσεις ανέμου για τα αγροτικά κτήρια.

### Η ΜΕΘΟΔΟΣ CFD

Η μέθοδος της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics (CFD)) επιτρέπει τον λεπτομερή υπολογισμό του διανυσματικού πεδίου της μέσης ταχύτητας μιας ροής λύνοντας αριθμητικά τις αντίστοιχες εξισώσεις μεταφοράς. Οι εξισώσεις ισορροπίας που εκφράζουν αυτά τα φαινόμενα μεταφοράς έχουν την γενική μορφή (Awbi):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla \cdot \varphi \mathbf{v} = \nabla \cdot \left( \Gamma_{\varphi} \nabla \varphi \right) + S_{\varphi} \quad (2)$$

όπου είναι το διάνυσμα της ταχύτητας, είναι ο συντελεστής διάχυσης και είναι ο όρος πηγής. Το σύμβολο εκφράζει τη συγκέντρωση του μεταφερόμενου μεγέθους (μάζας, ορμής, ενέργειας, κ.λ.π.). Για παράδειγμα, στη περίπτωση της εξίσωσης διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας), το αντιστοιχεί στη πυκνότητα  $\rho$ . Αν το μεταφερόμενο μέγεθος είναι η ορμή, το αντιστοιχεί σε  $\rho \mathbf{v}$ . Σε αυτή τη περίπτωση η εξίσωση (2) αντιπροσωπεύει τις τρεις εξισώσεις διατήρησης της ορμής (εξισώσεις Navier-Stokes) που αντιστοιχούν στις τρεις συνιστώσες του διανύσματος.

Η επίλυση του συστήματος μερικών διαφορικών εξισώσεων (2) γίνεται στη γενική περίπτωση της τυρβώδους ροής μόνο με αριθμητικές μεθόδους γνωστές ως Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (Computational Fluid Dynamics (CFD)). Η επίλυση γίνεται πάνω σε ένα διάκριτο σύνολο σημείων (δικτύωμα) που περιγράφει το χώρο ή και το χρόνο σε περίπτωση δυναμικού συστήματος, με την Μέθοδο του Πεπερασμένου Όγκου (Finite Volume) ή διακριτό σύνολο στοιχείων με την μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements). Η ροή επιλύεται σε ένα πεπερασμένο χώρο. Η επίδραση εξωτερικών παραγόντων όπως ο άνεμος, η ηλιακή ακτινοβολία κ.λ.π., στη ροή προσομοιώνεται με αντίστοιχες συνοριακές συνθήκες.

Παρ' όλα αυτά, στη περίπτωση της τυρβώδους ροής, όπου εμφανίζονται δυναμικά φαινόμενα σε κλίμακα μικρότερη από τη κλίμακα του δικτύωματος επίλυσης, η παραπάνω μέθοδος δε δίνει σωστά αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν μοντέλα της τυρβώδους ροής ώστε να αντιμετωπίζεται η πολυπλοκότητα της τυρβώδους δυναμικής. Στα μοντέλα αυτά, τα μεγέθη που περιγράφουν τη ροή περιγράφονται ως άθροισμα δύο συνιστωσών, δηλαδή ενός αργά μεταβαλλόμενου και ενός γρήγορα μεταβαλλόμενου μέρους.

Τα τελευταία χρόνια, το πιο δημοφιλές μοντέλο τυρβώδους ροής είναι το k-ε μοντέλο. Στο μοντέλο αυτό η τυρβώδης δυναμική περιγράφεται από δύο επιπλέον εξισώσεις μεταφοράς που είναι συζευγμένες με τις εξισώσεις που περιγράφουν τη ροή (εξισώσεις Navier-Stokes). Οι δύο αυτές εξισώσεις εκφράζουν τη διατήρηση δύο φαινομενολογικών ποσοτήτων, της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k, και του ρυθμού απόσβεσής της ε. Το βασικό πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ότι δεν απαιτεί τον ορισμό επιπλέον εμπειρικών παραμέτρων που εξαρτώνται από τη θέση. Έτσι είναι δυνατόν να επιλυθούν περίπλοκες ροές που περιγράφονται από ελλειπτικές εξισώσεις, όπως ροές που διαχωρίζονται και ανακυκλώνονται.

Στα αριθμητικά πειράματα με τη μέθοδο CFD, το ατμοσφαιρικό επιφανειακό στρώμα προσομοιώνεται με παρόμοιο τρόπο όπως και στα πειράματα ανεμοσήραγγας, διαμορφώνοντας κατάλληλα την εισερχόμενη ροή αέρα. Πρόσφατοι υπολογισμοί με τη μέθοδο CFD (Richards & Hoxey, 1992; Hoxey et al, 1993; Mistrionis et al, 1997) έδειξαν συμφωνία σε ικανοποιητικό βαθμό μεταξύ αριθμητικών και πραγματικών πειραμάτων ανεμοσήραγγας ή φυσικής κλίμακας.

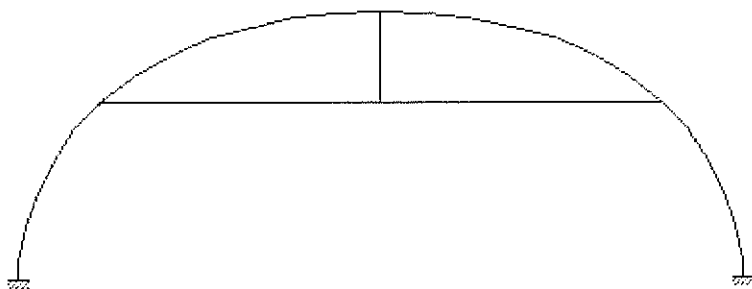


### ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

#### Επιλογή του τόπου, των τύπων θερμοκηπίων και της ταχύτητας ανέμου

Στα πλαίσια των συγκριτικών μελετών της εργασίας αυτής, υπολογίστηκαν οι ανεμοπιέσεις στα θερμοκήπια που υποθέτουμε ότι βρίσκονται στην Κρήτη. Αυτό συμβαίνει επειδή ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής έκτασης θερμοκηπίων στην χώρα μας βρίσκεται εκεί (44% το 1996) (Τσιρογιάννης).

Για τους σκοπούς της παρούσας ανάλυσης εστιάσαμε το ενδιαφέρον μας σε ένα τυπικό τοξωτό θερμοκήπιο με ύψος 3,3m και άνοιγμα 9m (ΣΧΗΜΑ 1).

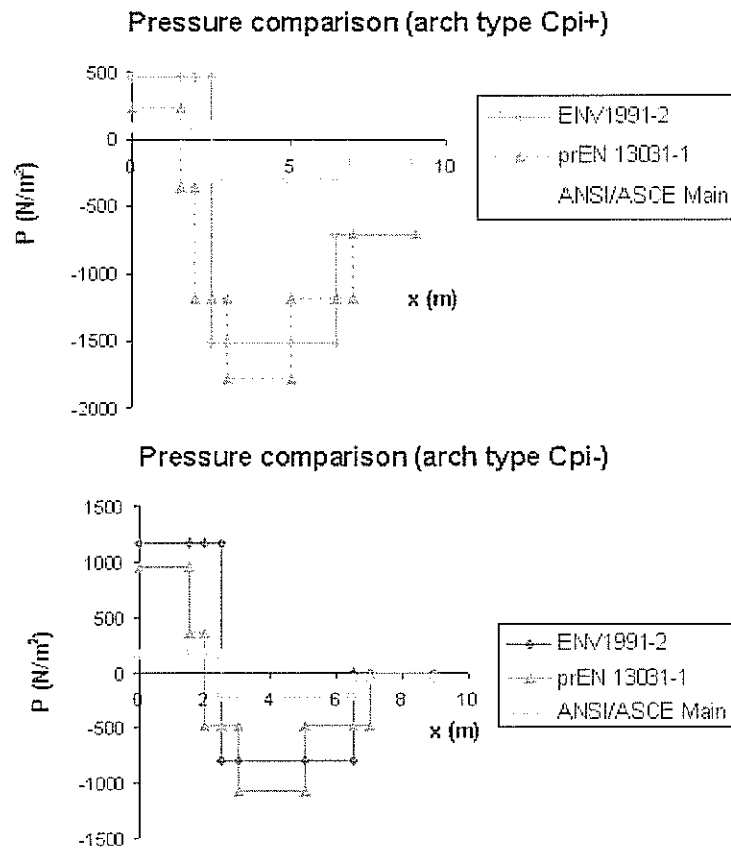


ΣΧΗΜΑ 1.

Όσο αφορά την εκτίμηση της ταχύτητας ανέμου, χρησιμοποιήθηκε η εργασία των Τζιανίκη Μ.Ι. & Τρέζου Κ.Γ., όπου παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της βασικής ταχύτητας αναφοράς του ανέμου στην Ελλάδα για τον υπολογισμό του φορτίου ανέμου στις κατασκευές. Σύμφωνα με την εργασία αυτή η Ελλάδα μπορεί να χωριστεί σε δύο ζώνες: η πρώτη με βασική τιμή της ταχύτητας αναφοράς του ανέμου ίση με 36m/s περιλαμβάνει τα νησιά και την ακτογραμμή για μια ζώνη πλάτους 10 km, ενώ η δεύτερη με 30 m/s περιλαμβάνει την υπόλοιπη χώρα. Οι ίδιες τιμές βρίσκονται και στο Παράρτημα Α του Ευρωκώδικα 1 για δράσεις ανέμου (CEN, 1995). Βάση της πληροφορίας αυτής επιλέχθηκε η ταχύτητα των 36 m/s. Ακόμη η περίοδος αναφοράς θεωρήθηκε ίση με 10 χρόνια (μια μέση ζωή σχεδιασμού για τα θερμοκήπια). Τέλος θεωρήθηκε ότι το θερμοκήπιο βρίσκεται εγκατεστημένο σε τυπική αγροτική γη μακριά από λόφους και γκρεμούς.

#### ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΠΙΕΣΗΣ, ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΠΙΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Στην παρούσα ανάλυση υπολογίστηκε με βάση τους κανονισμούς ENV 1991-2-4, ANSI/ASCE 7-93 και το προσχέδιο κανονισμού prEN 13031-1 καθώς και αριθμητικά (CFD) το φορτίο ανέμου για το θερμοκήπιο που αναφέρθηκε προηγουμένως, υποθέτοντας διεύθυνση ανέμου κάθετη στον άξονα του θερμοκηπίου. Τα αποτελέσματα που αφορούν την κατανομή της πίεσης ανέμου στο τοξωτό θερμοκήπιο παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.

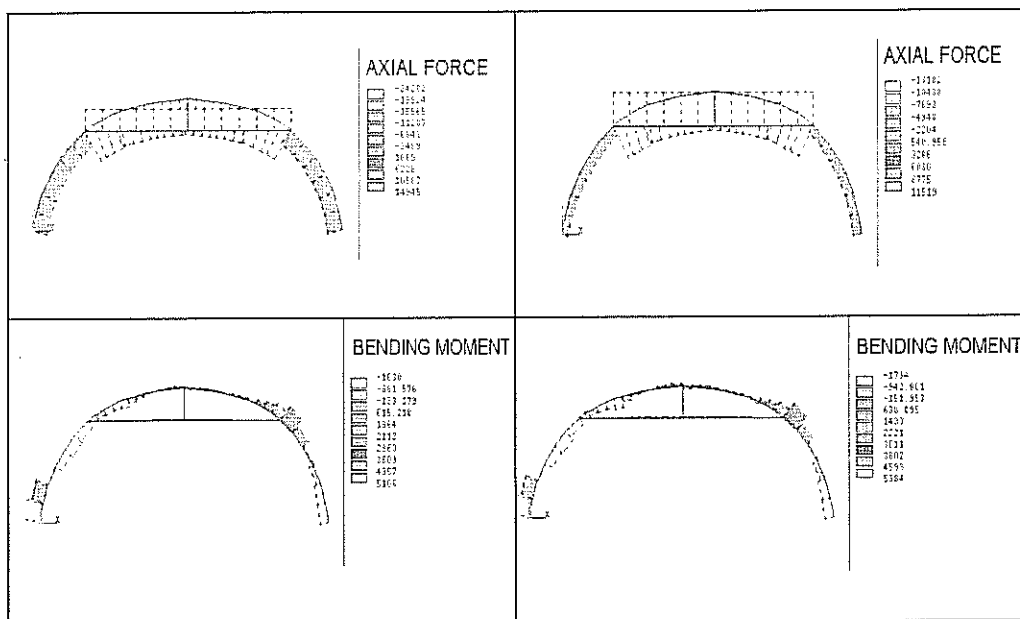


**ΣΧΗΜΑ 2.** Κατανομές πιέσεων ανέμου που υπολογίστηκαν σύμφωνα με διάφορους κανονισμούς (θεωρώντας θετικούς και αρνητικούς συντελεστές εσωτερικής πίεσης  $C_{pi}$  ίσους με  $+0.2$  και  $-0.4$  και  $GC_{pi}$  ίσο με  $0.153$  και  $-0.153$  για το Ευρωπαϊκό και Αμερικάνικο κανονισμό αντίστοιχα)

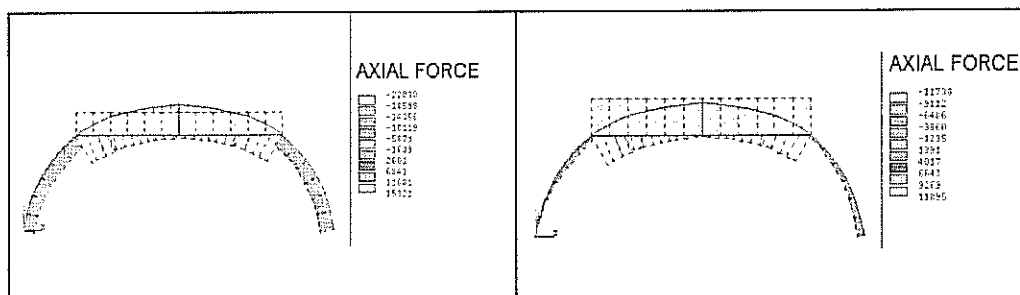
Το θερμοκήπιο αναλύθηκε χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ANSYS για τις αντίστοιχες κατανομές ανεμοπιέσεων του σχήματος 2. Στην παρούσα ανάλυση θεωρήθηκε μόνο γραμμική ελαστική συμπεριφορά για το μεταλλικό τόξο και χρησιμοποιήθηκαν τα σχετικά χαρακτηριστικά του υλικού και της κατασκευής που συνήθως χρησιμοποιούνται στην πράξη στην χώρα μας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.

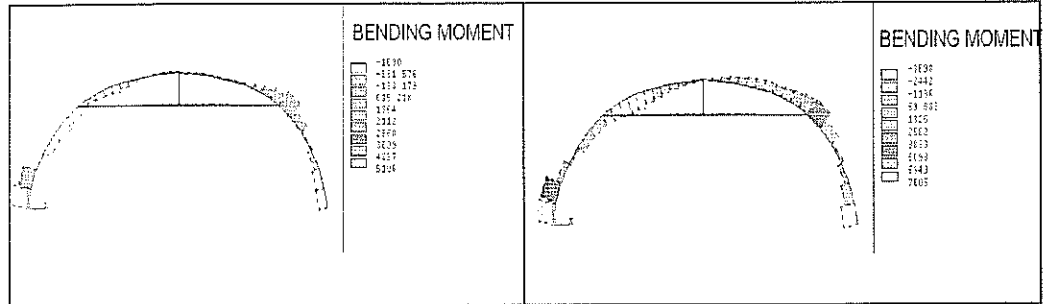
Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι η κατασκευή υπόκειται σε πολύ μικρότερες εσωτερικές δυνάμεις (ροπές και αξονικές δυνάμεις) κάτω από πιέσεις ανέμου που υπολογίστηκαν βάση του κώδικα ANSI, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τους EC1 και pr EN 13031-1. Η διαδικασία του EC1 οδηγεί σε χαρακτηριστικά υψηλότερες ροπές κάμψης από αυτές που δίνει το υπό τροποποίηση προσχέδιο prEN 13031. Το προσχέδιο prEN 13031-1 δίνει λίγο μεγαλύτερες αξονικές δυνάμεις (μεγάλες παραμορφώσεις και μη-γραμμικές επιδράσεις του υλικού είναι αντικείμενο της συνεχιζόμενης έρευνας π.χ. προβλήματα λυγισμού).

Όσο αφορά την καταπόνηση που αναπτύσσεται κάτω από τις υπολογισμένες πιέσεις χρησιμοποιώντας τους 3 κώδικες, παρατηρείται ότι η μέγιστη ορθή τάση σε διατομή κάθετη στον άξονα του τόξου ξεπερνά την αντίστοιχη τάση διαρροής του υλικού σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Ειδικότερα στην περίπτωση του EC1 και του prEN 13031-1, υπάρχουν μεγάλες περιοχές του τόξου όπου η μέγιστη ορθή τάση (υπολογισμένη βάση γραμμικής ελαστικής ανάλυσης) ξεπερνά την αντίστοιχη τάση διαρροής. Στην περίπτωση του ANSI, οι περιοχές αυτές του τόξου είναι πιο περιορισμένες. Θεωρήσαμε λοιπόν απαραίτητο να αναλυθεί στην συνέχεια η κατασκευή χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων για μη-γραμμική ανάλυση κατασκευών.

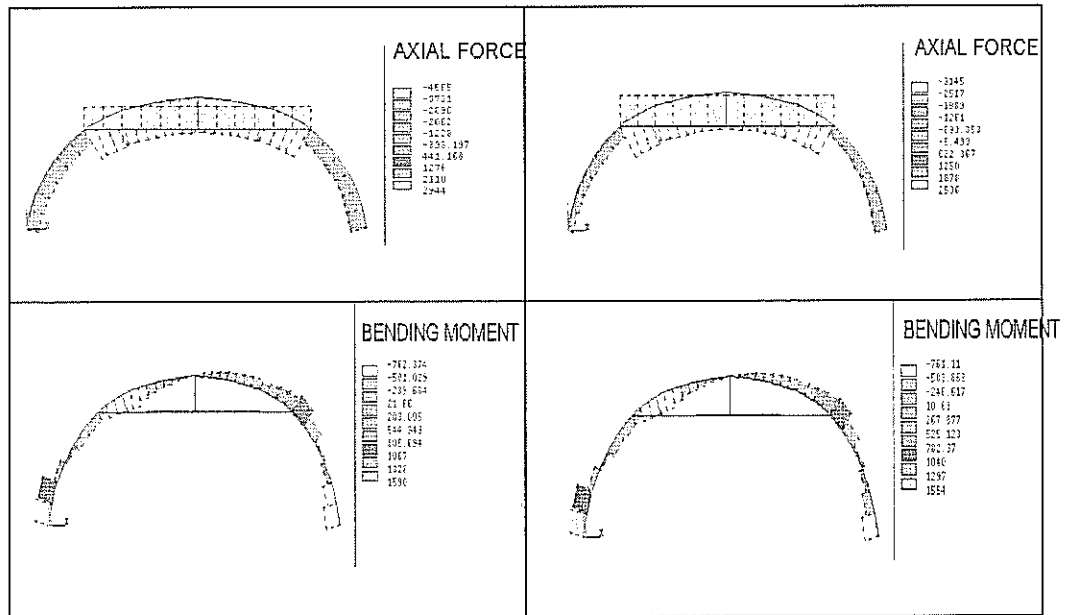


ΣΧΗΜΑ 3α. Αποτελέσματα δομοστατικής ανάλυσης για το θερμοκήπιο κάτω από φορτίο ανέμου υπολογισμένο με τον prEN 13031-1 (αριστερά: θετικές τιμές  $C_{pi}$ ; δεξιά: αρνητικές τιμές  $C_{pi}$ ).

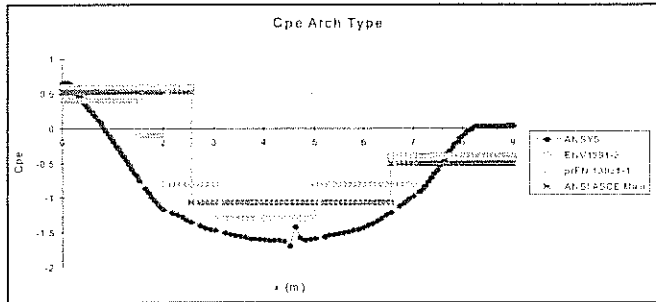




Σχήμα 3β. Αποτελέσματα δομοστατικής ανάλυσης για το θερμοκήπιο κάτω από φορτίο ανέμου υπολογισμένο με τον EC1 (αριστερά: θετικές τιμές Cp; δεξιά: αρνητικές τιμές Cs).

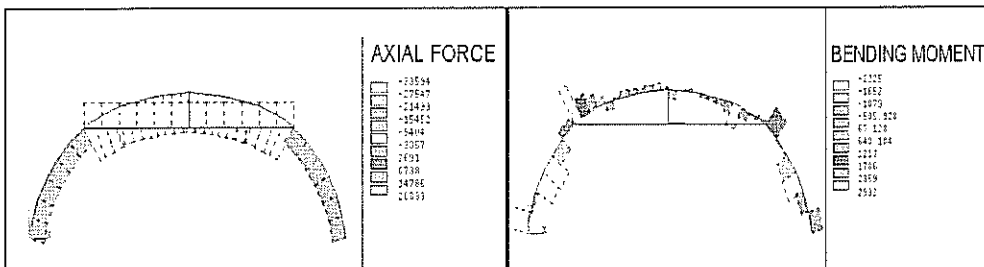


Σχήμα 3γ. Αποτελέσματα δομοστατικής ανάλυσης για το θερμοκήπιο κάτω από φορτίο ανέμου υπολογισμένο με τον ANSI/ASCE (αριστερά: θετικές τιμές Cp; δεξιά: αρνητικές τιμές Cs).



ΣΧΗΜΑ 4. Σύγκριση κατανομών εξωτερικής πίεσης υπολογισμένες βάσει διαφόρων κανονισμών και αυτής που υπολογίστηκε με την μέθοδο CFD

Συντελεστές εξωτερικής πίεσης μπορούν να υπολογιστούν επίσης χρησιμοποιώντας την μέθοδο CFD. Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης για το τοξωτό θερμοκήπιο που αναλύουμε υπολογίστηκαν με το λογισμικό ANSYS-FLOTRAN. Ως συνοριακή συνθήκη εισόδου χρησιμοποιήθηκε ένα λογαριθμικό προφίλ του ατμοσφαιρικού επιφανειακού στρώματος σε αγροτική γη. Οι συντελεστές εξωτερικής πίεσης που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στο σχήμα 4. Είναι φανερό ότι οι αντίστοιχες κατανομές ανεμοπίεσης είναι σχετικά όμοιες με αυτές που παρέχουν οι διάφοροι κανονισμοί αλλά υψηλότερες σε μέγεθος στο κεντρικό τμήμα του τόξου. Οι κατανομές των αξονικών δυνάμεων και των ροπών κάμψης (φάνονται στο Σχήμα 5 για την περίπτωση θετικού συντελεστή εσωτερικής πίεσης) δείχνουν μια δραματική αύξηση των αξονικών δυνάμεων εκ παραλλήλου με μικρότερες ροπές κάμψης αν συγκριθούν με αυτές που υπολογίστηκαν με τους ευρωπαϊκούς κώδικες.



ΣΧΗΜΑ 5. Αποτελέσματα δομοστατικής ανάλυσης για το τοξωτό θερμοκήπιο που υπόκειται σε φορτίο ανέμου υπολογισμένου βάσει του CFD (θετικές C<sub>ri</sub> τιμές).

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Φαίνεται ότι ο υπολογισμός των κατανομών της ανεμοπίεσης σε θερμοκηπιακές κατασκευές εξαρτάται πάρα πολύ όχι μόνο από τις υποθέσεις που γίνονται για την συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζεται αλλά και στους διάφορους κανονισμούς που χρησιμοποιούνται. Αυτή η τελευταία-

α εξάρτηση φαίνεται να είναι πολύ σημαντική και μπορεί να οδηγήσει ή σε υπέρ-σχεδιασμένες ή υπό-σχεδιασμένες κατασκευές. Οι αντίστοιχες αριθμητικές αναλύσεις επιβεβαιώνουν ότι η όλη διαδικασία δεν είναι αρκετά επιβεβαιωμένη ακόμη και χρειάζεται πιο έντονη και συστηματική έρευνα στον τομέα αυτό.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Comite Europeen de Normalisation (C.E.N.), 1996 prEN 13031-1-Final Draft "Greenhouses : Design and construction Part 1 : Commercial production greenhouses", Brussels.
2. Comite Europeen de Normalisation (C.E.N.), 1995. Eurocode 1 : Basis of design and actions on structures- Part 2-4 : Actions on structures "Wind actions", Brussels.
3. Comite Europeen de Normalisation (C.E.N.), 1995. Eurocode 1 : Basis of design and actions on structures- Part 2-5 : Actions on structures "Snow loads", Brussels.
4. ANSI/ASCE. 1996 "Minimum design loads for buildings and other structures", New York
5. Stathopoulos T. and Saathoff P., Wind pressure on roofs of various geometries, J. of Wind Eng. and Industrial Aerod., 38 (1991), 273.
6. Wells, D.A. & R.P. Hoxey, 1980. Measurements of wind loads on full scale glasshouses. J. of Wind Eng. and Industrial Aerod., 6 (1980), 139.
7. Richards P.J. and Hoxey R.P., Computational and wind tunnel modelling of mean wind loads on the Silsoe Structures Building. J. of Wind Eng. and Industrial Aerod., 41-44 (1992), 1641.
8. Hoxey R.P., Robertson A.P., Basara B., and Younis B.A., Geometric parameters that affect wind loads on low-rise buildings: full-scale and CFD experiments, J. of Wind Eng. and Industrial Aerod., 50 (1993), 243.
9. Mistriotis A., T. de Jong, M. Wagemans, and G.P.A. Bot (1997): "Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate in agricultural buildings". Netherlands J. of Agricultural Science 45 (1997), 81.
10. Mistriotis A., G.P.A. Bot, P. Picuno, G. Scarascia-Mugnozza, "Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics", J. of Agricultural and Forest Meteorology, 85 (1997), 217.
11. Awbi H.B. Ventilation in Buildings, E & FN Spon, London, G. Britain. Chapter 7, (1991).
12. Tsirogiannis Y.L., "Greenhouse types in Greece and their failure", Diploma Thesis A.U.A. (1996) (in Greek).
13. Tzanakis M.I., Trezos K.G. 1986. "Estimation of the reference wind speed over Greece for the design of structures", Technical Annals 1 No.6: 243-270 (in Greek).



## ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ ΑΕΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΔΙΠΛΟ ΤΟΞΩΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

N. N. Βασιλείου<sup>1</sup>, X. Νικήτα-Μαρτζοπούλου<sup>2</sup>, Γ. Γ. Μαρτζόπουλος<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Civil Engineer, Agric. Bank of Greece, Athens*

<sup>2</sup>*Professor, Aristotle University of Thessaloniki, Greece*

<sup>3</sup>*Professor, Aristotle University of Thessaloniki, Greece*

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο άνεμος είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν το περιβάλλον των θερμοκηπίων ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες. Είναι συνήθως η πιο σημαντική παράμετρος καθορισμού των φυσικών αλλαγών του αέρα σ'ένα θερμοκήπιο.

Σκοπός της έρευνας αυτής είναι η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης του ανέμου στο φυσικό αερισμό ενός διπλού τοξωτού θερμοκηπίου με απλή κάλυψη πλαστικού και πλευρικά ανοίγματα αερισμού. Το θερμοκήπιο κατασκευάσθηκε στο Αγρόκτημα του Τμήματος Γεωπονίας του Α. Π. Θ. Ο τύπος αυτός είναι αντιπροσωπευτικός τύπος κατασκευής στην Ελλάδα και γενικότερα στις Μεσογειακές χώρες.

Ο προσδιορισμός του βαθμού αερισμού (N) βασίσθηκε σε μετρήσεις που έγιναν με χρήση CO<sub>2</sub> σαν μέσο ανάχνευσης. Οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου (V10) και της διεύθυνσής του έγιναν με ηλεκτρονικά όργανα τοποθετημένα σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Τα πειραματικά αποτελέσματα οδήγησαν στον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ του βαθμού αερισμού και της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου. Η μαθηματική έκφραση αυτής της σχέσης είναι:

α.  $N = 17.7 V10$  για διεύθυνση ανέμου κανονική προς τα πλευρικά ανοίγματα του θερμοκηπίου, και

β.  $N = 8.48 V10$  για διεύθυνση ανέμου κατά μήκος των πλευρικών ανοιγμάτων.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις παραπάνω σχέσεις είναι ότι για δεδομένη ταχύτητα ανέμου, η επιφάνεια αερισμού που απαιτείται για την επίτευξη σταθερού βαθμού αερισμού με διεύθυνση ανέμου παράλληλη προς τα πλευρικά ανοίγματα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από αυτήν που απαιτείται όταν η διεύθυνση ανέμου είναι κανονική προς τα ανοίγματα.

### DETERMINATION OF NATURAL VENTILATION RATE IN A DOUBLE SPAN, ARCH TYPE, GREENHOUSE

N. N. Vassiliou, C. Nikita-Martzopoulou, G. G. Martzopoulos

### ABSTRACT

The wind is an important factor influencing the greenhouse environment.

This is normally the most significant parameter affecting the natural air changes in the greenhouse, even at low speeds. The scope of this study is the experimental investigation of the wind effect on the natural ventilation of a double arched greenhouse with single plastic covering and vent openings only on the sides. This greenhouse was erected in the University Farm of the



School of Agriculture. This type of greenhouse is representative in continental Greece as well as in most of the Mediterranean countries.

The determination of the rate of the air changes (N) was based on measurements carried out with the use of CO<sub>2</sub> as a trace media. The wind velocity (V10) measurements and the wind direction were taken by electronic sensors located on a height of 10 m above the ground level.

The results of the experiment led to the determination of the relationship between ventilation rate and wind velocity and direction. The mathematical expression of this relationship is:

$N=17.7 V10$  for wind direction normal to the sides opening of the greenhouse, and

$N=8.48 V10$  for wind direction along the side opening of the greenhouse

The conclusion derived of the above relationships is that for a certain wind speed, the ventilation area required to succeed a constant ventilation rate in a greenhouse with wind direction parallel to the side openings must be as much as twice of this required when the wind direction is normal to the opening.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ροή αέρα μέσω ενός ανοίγματος αερισμού σε ένα θερμοκήπιο προκαλείται από τη διαφορά πίεσης ΔΡ του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο και του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Η διαφορά πίεσης ΔΡ οφείλεται στον άνεμο και στη θερμοκρασιακή διαφορά του αέρα, μέσα και έξω από το θερμοκήπιο. Όταν η διαφορά πίεσης ΔΡ του αέρα έξω από το θερμοκήπιο με αυτόν μέσα είναι θετική, τότε έχουμε ροή προς το θερμοκήπιο. Αν αντίθετα η ΔΡ είναι αρνητική έχουμε ροή αέρα από το θερμοκήπιο προς τον περιβάλλοντα χώρο.

Οι μηχανισμοί αερισμού στηρίζονται σε:

α. Κίνηση αέρα οφειλόμενη στη διαφορά θερμοκρασίας.

β. Κίνηση αέρα οφειλόμενη στον άνεμο.

γ. Κίνηση αέρα οφειλόμενη σε συνδυασμένη δράση ανέμου και θερμοκρασιακής διαφοράς.

Οι πρώτες εργασίες για τον αερισμό των θερμοκηπίων εμφανίζονται τη δεκαετία του 1950.

Οι Morris και Neale (1954) χρησιμοποίησαν για αέριο ανάχνευσης το CO<sub>2</sub> για να υπολογίσουν τον αερισμό απλών αμφίρροικτων γυάλινων θερμοκηπίων, με ανοίγματα αερισμού στην οροφή και στις πλευρές. Ο Boi (1980) παρουσίασε ένα μοντέλο του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, για ένα γυάλινο θερμοκήπιο με ανοίγματα αερισμού μόνο στην οροφή. Ο Bouille (1975) μελέτησε τον αερισμό τοξωτών χαμηλών σκεπάστρων. Ο αερισμός γινόταν με τρύπες που ανοίχθηκαν στις πλευρές και στην οροφή.

Οι Kozai και Sase (1978) ήταν οι πρώτοι που παρουσίασαν ένα μοντέλο αερισμού. Κάνοντας σημαντικές απλοποιήσεις υπολογίζουν τις ανανεώσεις του αέρα N σε απλά και πολλαπλά αμφίρροικτα θερμοκήπια με ανοίγματα αερισμού στις πλευρές και στην οροφή. Η σχέση μεταξύ ταχύτητας ανέμου και ανανεώσεων αέρα βρέθηκε γραμμική.

Οι Kozai, Sase και Nara (1980) καθώς και οι Sase, Kozai, Nara και Negishi συνεχίζουν την έρευνα παρουσιάζοντας και τους συντελεστές πίεσης και αντίστασης στη ροή που μέχρι τότε είχαν ληφθεί από τη διεθνή βιβλιογραφία. Οι Sase, Takakura και Nara (1984) μελέτησαν τη ροή του ανέμου και την κατανομή της θερμοκρασίας σε δύο απλά αμφίρροικτα θερμοκήπια. Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η κατασκευαστική διαμόρφωση των ανοιγμάτων αερισμού, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου επηρεάζουν τη ροή του αέρα και την κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στο θερμοκήπιο.

Οι Sase και Nara (1985) παρουσιάζουν έναν αλγόριθμο για τη ρύθμιση του αερισμού σε αμφίροικο θερμοκήπιο με ανοίγματα αερισμού στην οροφή και στις πλευρές.

Οι Κίττας και συνεργάτες (1985 και 1987) προτείνουν έναν εμπειρικό τύπο που συνδέει τη θερμοκρασία μέσα και έξω από το θερμοκήπιο, την ηλιακή ακτινοβολία, την ταχύτητα του αέρα και την αδράνεια του συστήματος οφειλόμενη κυρίως στο έδαφος του θερμοκηπίου. Ο τύπος αυτός έχει προέλθει από πειραματικά αποτελέσματα σε ένα τοξωτό θερμοκήπιο χωρίς φυτό. Με τη βοήθεια αυτού του τύπου υπολογίζεται ο αριθμός ανανεώσεων του αέρα  $N$ , όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μηδενική, σε ένα θερμοκήπιο με δυναμικό αερισμό.

Ο Baytopum (1986) και οι Mekikdjan και Sevilla (1988) μελέτησαν τον αερισμό απλού αμφίροικου θερμοκηπίου ο πρώτος και τοξωτού θερμοκηπίου οι δεύτεροι χρησιμοποιώντας σαν αέριο ανάγνωσης το  $CO_2$ .

Ο Kabbaj (1988) μελέτησε τον αερισμό τροποποιημένου τοξωτού θερμοκηπίου χρησιμοποιώντας σαν αέριο ανάγνωσης το  $N_2O$ .

Με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, έγινε δυνατή η αριθμητική επίλυση μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων της ροής των ρευστών, συμπεριλαμβανομένης και της ροής του ανέμου. Εμφανίζεται έτσι η υπολογιστική δυναμική των ρευστών. Πολλοί ερευνητές όπως ο Hanson (1982), οι Bottcher και Willits (1987), οι Okushima, Sase και Nara (1988) και οι Παππά, Μουζάκης, Μπεργελές (1990) μελετούν τη ροή του ανέμου με την εφαρμογή της υπολογιστικής αεροδυναμικής.

Σκοπός της έρευνας αυτής είναι η πειραματική διερεύνηση της επίδρασης του ανέμου στο φυσικό αερισμό ενός διπλού τοξωτού θερμοκηπίου με πλευρικά ανοίγματα αερισμού. Σαν μέσο ανάγνωσης χρησιμοποιήθηκε το  $CO_2$ .

## 2. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

### 2. 1. Περιγραφή θερμοκηπίου

Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκε ένα διπλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο στο αγρόκτημα του Τμήματος Γεωπονίας του Α. Π. Θ. Το θερμοκήπιο αυτό είναι ένα τυπικό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο που συναντάται σε πολλές περιοχές της Ηπειρωτικής Ελλάδας.

Το υλικό κάλυψης ήταν μαλακό πλαστικό τριών στρώσεων (co-extruded) KRITIFIL TUV 390 THERMOFILLO.

Η κάτοψη, οι πλευρές και οι όψεις του θερμοκηπίου φαίνονται στο σχήμα 1. Τα χαρακτηριστικά του θερμοκηπίου είναι τα ακόλουθα:

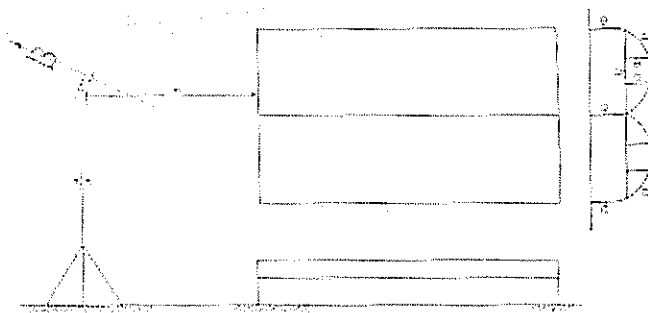
Μήκος	24 m
Πλάτος	$2 \times 7,05 = 14,10$ m
Ύψος υδρορροής	2,20 m
Ύψος κορφιάς	3,60 m
Εμβαδόν καλυμμένου εδάφους	338,4 m <sup>2</sup>
Όγκος θερμοκηπίου	1.054 m <sup>3</sup>

Η υδρορροή σχηματίζει γωνία 25° με το βορρά.

Τα ανοίγματα αερισμού ήταν στις πλευρές του θερμοκηπίου και είχαν κατά μήκος διάσταση  $L=20$  m. Τα ανοίγματα άνοιγαν με τη βοήθεια μανιβέλας. Το μέγιστο ύψος του ανοίγματος  $H$  ήταν 0,70 m. Όταν τα ανοίγματα είχαν ύψος 0,70 m το ποσοστό αερισμού ήταν:

$$\frac{\text{Εμβαδόν ανοιγμάτων αερισμού}}{\text{Εμβαδόν καλυμμένου εδάφους}} = \frac{2 \times 0,70 \times 20}{338,4} \times 100 = 8,27\%$$

Το κάλυμμα της οροφής στερεώθηκε με clips στην υδρορροή και στα γείσα. Επειδή ήταν ένα μονοκόμματο φύλο η στεγανότητά του ήταν πλήρης. Για τη στήριξη του καλύμματος των πλευρών στο έδαφος, ανοίχθηκε ένα μικρό χαντάκι διαστάσεων 0,20 x 0,20 m περίπου μέσα στο οποίο στηρίχθηκε το υλικό κάλυψης.



Σχήμα 1. Προσανατολισμός θερμοκηπίου.

## 2. 2. Αέριο ανάχνευσης για την εκτίμηση του αερισμού

Προκειμένου ένα αέριο να χρησιμοποιηθεί σαν αέριο ανάχνευσης για την εκτίμηση του βαθμού αερισμού, πρέπει να πληροί τις πιο κάτω προϋποθέσεις:

- α. Να μετράται εύκολα στις μικρές συγκεντρώσεις
- β. Να είναι αδρανές
- γ. Να μην είναι εύφλεκτο
- δ. Να μην είναι τοξικό
- ε. Το μοριακό βάρος του να είναι πλησίον του μέσου βάρους των συστατικών του αέρα.

Για τον υπολογισμό του αερισμού από τους ερευνητές χρησιμοποιήθηκαν διάφορα αέρια.

Οι Morris και Neale (1954) χρησιμοποίησαν CO<sub>2</sub>

Οι White και Lawrence (1960) χρησιμοποίησαν H<sub>2</sub>

Ο Bot (1983) χρησιμοποίησε CO<sub>2</sub>

Ο Baytorun (1986) χρησιμοποίησε CO<sub>2</sub>

Οι Mekikdjan και Sevilla (1988) χρησιμοποίησαν CO<sub>2</sub>

Ο Kabbaj (1988) χρησιμοποίησε N<sub>2</sub>O

Τα αέρια που συγκεντρώνουν τη μεγαλύτερη προτίμηση είναι το CO<sub>2</sub> και το N<sub>2</sub>O. Και τα δύο έχουν μοριακό βάρος 44. Το CO<sub>2</sub> έχει το μειονέκτημα να απορροφάται από τα φυτά. Το γεγονός αυτό πρέπει να ληφθεί υπόψη. Αντίθετα το N<sub>2</sub>O είναι αδρανές. Μειονέκτημα του N<sub>2</sub>O είναι το υψηλό κόστος.

Για τον υπολογισμό των ανανεώσεων του αέρα χρησιμοποιήθηκε CO<sub>2</sub>. Η επιλογή αυτή έγινε διότι το αντικείμενο της μελέτης ήταν η εκτίμηση της ροής του αέρα στην πρώτη φάση μίας καλλιέργειας, όπου το ύψος των φυτών είναι μικρό. Επομένως επειδή η μάζα των φυτών είναι μικρή, η ροή του αέρα επηρεάζεται πολύ λίγο από αυτά.

Οι μετρήσεις συνεπώς έγιναν στο θερμοκήπιο χωρίς φυτά, μια και αυτά όταν έχουν μικρό ύψος δεν επηρεάζουν τη ροή του αέρα.

### 2.3. Όργανα μετρήσεων

Η μέτρηση της διεύθυνσης και ταχύτητας του ανέμου έγινε με ένα ανεμόμετρο και έναν ανεμοδείκτη που τοποθετήθηκαν στην κορυφή ενός ιστού σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους. Ο ιστός τοποθετήθηκε σε απόσταση 13, 40 m από το θερμοκήπιο ώστε η ροή του ανέμου να μην επηρεάζεται από την παρουσία του θερμοκηπίου (σχ. 1).

Χρησιμοποιήθηκε ένα ανεμόμετρο με περιστρεφόμενα κύπελλα A100R της Vector instruments Ltd που έχει εύκολη ενδοεπικοινωνία (interfaced) με το data logger CR10 που χρησιμοποιήθηκε. Το ανεμόμετρο αυτό είναι μεγάλης ακριβείας.

Για τη μέτρηση της διεύθυνσης του ανέμου χρησιμοποιήθηκε ένας ανεμοδείκτης W200P της ίδιας εταιρείας, ο οποίος έχει εύκολη ενδοεπικοινωνία με το data logger CR10.

Με τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα του θερμοκηπίου και του περιβάλλοντος χώρου χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήρια θερμοκρασίας 107 Cambell Scientific Ltd.

Ένα από αυτά τοποθετήθηκε στον ιστό σε ύψος 2, 50 m και το άλλο στο εσωτερικό του θερμοκηπίου σε ύψος 1, 80 m. Και τα δύο τοποθετήθηκαν σε μετεωρολογικούς κλωβούς. Τα αισθητήρια αυτά είναι μεγάλης ακριβείας. Σύμφωνα με την εμπειρία της κατασκευάστριας εταιρείας το πιθανό σφάλμα των μετρήσεων είναι μικρότερο του \*0, 2 oC.

Η παροχή CO<sub>2</sub> στο θερμοκήπιο έγινε από μία φιάλη η οποία χωρούσε 50 kg CO<sub>2</sub>. Για να εξασφαλισθεί ομοιόμορφη παροχή CO<sub>2</sub> μέσα στο θερμοκήπιο, η έγχυση του CO<sub>2</sub> γινόταν μέσω ενός διάτρητου ελαστικού αγωγού διαμέτρου 1 cm. Ο αγωγός αυτός τοποθετήθηκε πάνω στους ελκυστήρες των ζευκτών.

Η δειγματοληψία για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> έγινε σε δύο σημεία του θερμοκηπίου και σε ύψος 1, 80 m από το έδαφος με τη βοήθεια δύο μικρών αντλιών που διοχέτευαν το αέριο στο μετρητή του CO<sub>2</sub>.

Για τη μέτρηση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> χρησιμοποιήθηκε ένας αναλυτής CO<sub>2</sub> Servomex 1370.

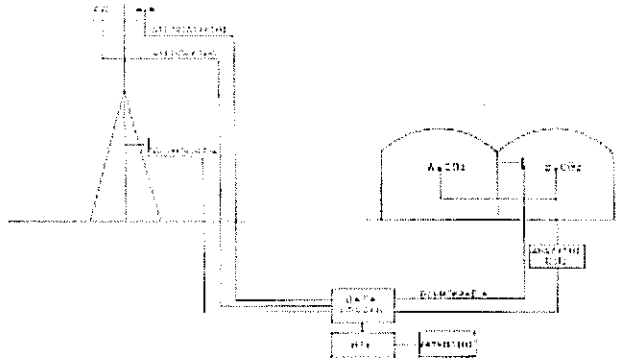
Για τη συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων από τους αισθητήρες και τον αναλυτή CO<sub>2</sub> χρησιμοποιήθηκε ένα Data Logger CR10 του οίκου Gambell Scientific. Η μονάδα έχει δυνατότητα δειγματοληψίας των τιμών όλων των αισθητήρων που είναι συνδεδεμένα στις εισόδους της σε τακτά και προγραμματιζόμενα χρονικά διαστήματα στη διάρκεια του 24ωρου. Οι τιμές αυτές μετά από επεξεργασία καταχωρούνται σε μνήμη εξόδου από όπου μεταφέρονταν σε ένα φορητό υπολογιστή Toshiba μέσω ενός συστήματος ενδοεπικοινωνίας RS 232 Interface.

Ο CR 10 έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- 12 αναλογικά κανάλια εισόδου με δυνατότητα και διαφορικής σύνδεσης
- Μνήμη RAM 64 K (περιλαμβάνεται πρόσθετη μνήμη) και ενσωματωμένο ρολόι πραγματικού χρόνου μεγάλης ακριβείας (\* 2 min το μήνα).
- Πληκτρολόγιο και οθόνη LCD RS

- 2 απαριθμητικές εισόδους
- 8 εξόδους ελέγχου (Control Ports).

Στο σχήμα 2 δίνεται το συνοπτικό διάγραμμα του πειραματικού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση του αερισμού στο τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο.



Σχήμα 2. Συνοπτικό διάγραμμα πειραματικού εξοπλισμού.

### 3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

#### 3.1. Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος

Για την καθ' ύψος μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου έγινε αποδεκτός ο εκθετικός νόμος:

$$V_z / V_{10} = (z / 10)^{\alpha} \quad (1)$$

Οπου:  $V_{10}$  = μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους (m s<sup>-1</sup>)

$V_z$  = μέση ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z (m s<sup>-1</sup>)

z = ύψος από την επιφάνεια του εδάφους (m)

$\alpha$  = αδιάστατος εκθέτης του οποίου η τιμή εξαρτάται από τη μορφή (τραχύτητα) του εδάφους

Για την εύρεση της τιμής του  $\alpha$  μετρήθηκαν ταυτόχρονα οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 2, 35 m και 10 m από την επιφάνεια του εδάφους για διεύθυνση του ανέμου παράλληλα και κάθετα στην υδρορροή. Χαρακτηριστικές μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου σε ύψος 10 m και 2, 35 m δίνονται:

α. για διεύθυνση ανέμου παράλληλη στην υδρορροή στον πίνακα 1.

β. για διεύθυνση ανέμου κάθετη στην υδρορροή στον πίνακα 2.

Για κάθε δοκιμή βρέθηκαν οι μέσες ταχύτητες  $V_{10}$  και  $V_{2,35}$  του ανέμου σε ύψος 10 m και 2, 35 m. Η τιμή του  $\alpha$  που αντιστοιχεί για διεύθυνση του ανέμου κάθετα στην υδρορροή είναι η μέση τιμή των  $\alpha$  που προκύπτουν από τις αντίστοιχες δοκιμές και την εφαρμογή της εξίσωσης (1).

Η ίδια μέθοδος ακολουθείται και για διεύθυνση του ανέμου παράλληλη στην υδρορροή.

Η τιμή του  $\alpha$  βρέθηκε:

α. Για διεύθυνση ανέμου κάθετη στην υδρορροή  $\alpha = 0, 24$ .

β. Για διεύθυνση ανέμου παράλληλη στην υδρορροή  $\alpha = 0, 27$ .

### 3. 2. Αρχές υπολογισμού του αερισμού θερμοκηπίων

Ο υπολογισμός των ανανεώσεων του αέρα σε ένα θερμοκήπιο γίνεται με τη βοήθεια CO<sub>2</sub> που χρησιμοποιήθηκε ως αέριο ανάχνευσης (tracer gas).

Η μέθοδος βασίζεται στην αρχή του ισοζυγίου μάζας του αερίου αυτού στο θερμοκήπιο. Σύμφωνα με αυτή, η συγκέντρωση C<sub>i</sub> του αερίου ανάχνευσης στο θερμοκήπιο, δίνεται από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης:

$$\text{Vol} (dC_i / dt) = -\Phi(t) C_i + Q(t) \quad (2)$$

Όπου: Vol = όγκος θερμοκηπίου (m<sup>3</sup>)

C<sub>i</sub> = συγκέντρωση ανάχνευσης στη χρονική στιγμή t (ppm ή ml m<sup>-3</sup>)

Φ(t) = ροή αέρα στη χρονική στιγμή t (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)

t = χρόνος (s)

Q(t) = ροή (παροχή) αερίου ανάχνευσης στο θερμοκήπιο (ml s<sup>-1</sup>)

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Μετρήσεις ταχύτητας ανέμου με διεύθυνση παράλληλη στην υδρορροή.

Ταχύτητα σε ύψος 2, 35 m (m s <sup>-1</sup> )	Ταχύτητα σε ύψος 10 m (m s <sup>-1</sup> )
1, 89	3, 50
1, 26	3, 00
3, 02	3, 42
1, 88	3, 08
1, 81	3, 50
0, 56	2, 00
1, 46	2, 25
1, 78	3, 17
1, 70	3, 00
2, 38	2, 33
1, 58	2, 58
2, 79	3, 00
2, 76	2, 75
2, 14	2, 25
1, 43	1, 75
1, 22	2, 00

Για τον υπολογισμό των ανανεώσεων του αέρα υπάρχουν δύο μέθοδοι:

α. Η μέθοδος της συνεχούς ροής (continuous flow method)

β. Η μέθοδος της μειούμενης συγκέντρωσης (decay rate method)

Η πρώτη μέθοδος είναι ακριβής, αλλά απαιτείται μεγάλη ποσότητα αερίου ανάχνευσης και η χρονική διάρκεια, μέχρι η μεταβολή της συγκέντρωσης του αερίου ανάχνευσης να γίνει μηδενική, είναι μεγάλη.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2.** Μετρήσεις ταχύτητας ανέμου με διεύθυνση κάθετη στην υδρορροή.

Ταχύτητα σε ύψος 2, 35 m (m s <sup>-1</sup> )	Ταχύτητα σε ύψος 10 m (m s <sup>-1</sup> )
2, 11	3, 08
3, 12	3, 58
1, 54	3, 83
2, 22	2, 75
2, 36	2, 50
1, 49	2, 83
1, 45	3, 50
1, 75	2, 33
1, 87	2, 92
2, 18	2, 67
3, 39	3, 33
2, 30	3, 83
2, 48	3, 17
1, 96	2, 50
1, 76	3, 17
2, 44	2, 83
1, 64	2, 50
1, 95	2, 50
1, 65	2, 17
1, 91	1, 75
1, 55	2, 08
1, 33	2, 33
1, 62	2, 42
0, 81	2, 33
2, 62	2, 92
1, 75	3, 08
2, 10	2, 42
1, 61	2, 67

Με τη μέθοδο της μειούμενης συγκέντρωσης ο αέρας του θερμοκηπίου εμπλουτίζεται με αέριο ανάχνευσης. Τη χρονική στιγμή  $t_0$  διακόπτεται η παροχή αερίου ανάχνευσης. Από τη χρονική στιγμή αυτή και μετά  $Q(t) = 0$ . Επομένως η σχέση (2) γίνεται:

$$\text{Vol} (dC_f/dt) = -\dots(t) C_f \quad (3)$$

$$dC_t / dt = (-\Phi(t) / Vol) C_t \quad (4)$$

$$\text{επειδή } N = 3600 \Phi / Vol \quad (5)$$

Η σχέση (4) γίνεται:

$$dC_t / dt = (-N / 3.600) C_t$$

Και επειδή  $N/3600 = R$  η σχέση αυτή λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$dC_t / dt = -R C_t \quad (6)$$

Όπου R: ρυθμός ανανεώσεων αέρα ανά s.

Εάν το R είναι σταθερό, τότε η επίλυση της (6) δίνει:

$$C_t = C_0 e^{-Rt} \quad (7)$$

όπου:  $C_t$  = η συγκέντρωση του αερίου ανάχνευσης τη χρονική στιγμή t (ppm)

$C_0$  = η συγκέντρωση του αερίου ανάχνευσης τη χρονική στιγμή  $t_0$  που διεκόπτεται η παροχή αερίου ανάχνευσης στο θερμοκήπιο (ppm)

$t_0=0$  = δηλαδή σαν αρχή του χρόνου λαμβάνεται η χρονική στιγμή  $t_0$ .

### 3.3. Υπολογισμός ανανεώσεων του αέρα N στο πειραματικό θερμοκήπιο

Για τον υπολογισμό του N επιλέγει η μέθοδος της μειούμενης συγκέντρωσης. Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι μείγμα αερίων, ένα εκ των οποίων είναι το CO<sub>2</sub>. Η μέση συγκέντρωση CO<sub>2</sub> στον αέρα είναι 330 ppm. Το γεγονός αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στις μετρήσεις.

Εάν  $C_{00}$  είναι η συγκέντρωση του CO<sub>2</sub> στον ατμοσφαιρικό αέρα, τότε η σχέση (7) λαμβάνει τη μορφή:

$$C_t - C_{00} = (C_0 - C_{00}) e^{-Rt} \quad (8)$$

$$\text{ή } -Rt = \ln [(C_t - C_{00}) / (C_0 - C_{00})]$$

$$\text{ή } R = \ln [(C_0 - C_{00}) / (C_t - C_{00})] / t$$

Για τον υπολογισμό του R και στη συνέχεια του N χρησιμοποιήθηκε η σχέση (8)

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

### 4.1. Μετρήσεις

Οι μετρήσεις έγιναν νωρίς το πρωί και αργά το απόγευμα, που η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι μικρή για να μην αυξάνεται αισθητά η διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta\theta$  όταν τα ανοίγ-



ματα αερισμού έκλειναν, προκειμένου να εμπλουτισθεί ο αέρας του θερμοκηπίου με CO<sub>2</sub>. Με τον τρόπο αυτό η επίδραση της θερμοκρασίας στον αερισμό ήταν μικρή. Η μέση ΔΘ ήταν 4 οC.

Έγιναν μετρήσεις για δύο διευθύνσεις ανέμου. Μία παράλληλη προς την υδρορροή του θερμοκηπίου και μία κάθετη προς αυτή.

Λαμβάνονταν μετρήσεις για διευθύνσεις ανέμου οι οποίες είχαν απόκλιση από τις πιο πάνω διευθύνσεις μέχρι \*15ο.

Ο βορράς αντιστοιχούσε στις 0ο και στις 360ο. Επειδή η υδρορροή σχημάτιζε γωνία 25ο με το βορρά (σχ. 1), η διεύθυνση του ανέμου παράλληλα προς την υδρορροή αντιστοιχούσε στις 335ο και η διεύθυνση κάθετα σε αυτή στις 245ο.

Για δεδομένη διεύθυνση ανέμου οι μετρήσεις της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> στο θερμοκήπιο γίνονταν όταν η ταχύτητα του ανέμου δεν είχε αυξομειώσεις. Αρχικά γινόταν μέτρηση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> στον περιβάλλοντα το θερμοκήπιο αέρα (C<sub>00</sub>). Στο τέλος κάθε δοκιμής για λόγους ελέγχου γινόταν πάλι μέτρηση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub>, (C<sub>0</sub>).

Στη συνέχεια έκλειναν τα ανοίγματα αερισμού και εμπλουτιζονταν ο αέρας του θερμοκηπίου με CO<sub>2</sub>. Μετά τον εμπλουτισμό του θερμοκηπίου με CO<sub>2</sub>, άνοιγαν τα ανοίγματα αερισμού και αρχίζαν οι καταγραφές των πιο κάτω μεγεθών με συχνότητα 5 δευτερολέπτων:

- α. Διεύθυνση ανέμου
  - β. Ταχύτητα ανέμου
  - γ. Θερμοκρασία αέρα θερμοκηπίου
  - δ. Θερμοκρασία αέρα εξωτερικού περιβάλλοντος
  - ε. Συγκέντρωση CO<sub>2</sub> μέσα στο θερμοκήπιο
- Συνολικά έγιναν 20 δοκιμές.

#### 4. 2. Υπολογισμοί - Αποτελέσματα

Για τον υπολογισμό των ανανεώσεων του αέρα χρησιμοποιήθηκε η σχέση (8)

$$C_t - C_{00} = (C_0 - C_{00})e^{-Rt}$$

Από το διάγραμμα διασποράς βρίσκεται η καμπύλη παλινδρόμησης της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> ως προς τον χρόνο t. Η καμπύλη αυτή είναι εκθετικής μορφής όπως φαίνεται και από την σχέση (8) και βρίσκεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Από αυτή βρίσκεται το R και στη συνέχεια το N. Οι εκθετικές εξισώσεις που αντιστοιχούσαν στις καμπύλες άριστης προσαρμογής (Best fit line) για κάθε δοκιμή δίνονται στον πίνακα 3.

Στον πίνακα 4 δίνεται το N και η μέση ταχύτητα του ανέμου που αντιστοιχούν στις δοκιμές με διεύθυνση αέρα κάθετα προς την υδρορροή και στο πίνακα 5 το N και η μέση ταχύτητα του ανέμου που αντιστοιχούν στις δοκιμές με διεύθυνση αέρα παράλληλα προς την υδρορροή.

Για τον υπολογισμό των καμπύλων αερισμού για διευθύνσεις παράλληλα και κάθετα προς την υδρορροή γίνεται ανάλυση παλινδρόμησης (Regression Analysis) μεταξύ της ανεξάρτητης μεταβλητής που είναι ταχύτητα του ανέμου και της εξαρτημένης μεταβλητής που είναι το N των δοκιμών.

Οι δύο μεταβλητές συνδέονται γραμμικά μεταξύ τους. Η ευθεία της θεωρητικής παλινδρόμησης είναι της μορφής:

$$N = a V_{10} + b \quad (9)$$

Ο υπολογισμός των συντελεστών  $a$  και  $b$  της εξίσωσης (9) έγινε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Εμπειρικές εξισώσεις καμυτών αψίδου προσαρμογής.

ΔΟΚΙΜΗ	ΕΚΘΕΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ
D1	$C=2224 e-0.003895 t$
D2	$C=2155 e-0.003600 t$
D3	$C=2101 e-0.005697 t$
D4	$C=1583 e-0.011355 t$
D5	$C=1674 e-0.009592 t$
D6	$C=1453 e-0.008023 t$
D7	$C=2255 e-0.009803 t$
D8	$C=2929 e-0.004606 t$
D9	$C=1449 e-0.008583 t$
D10	$C=1670 e-0.006179 t$
D11	$C=1196 e-0.004786 t$
D12	$C=1886 e-0.004518 t$
D13	$C=2081 e-0.008259 t$
D14	$C=1394 e-0.006357 t$
D15	$C=323 e-0.002428 t$
D16	$C=369 e-0.001888 t$
D17	$C=2097 e-0.003712 t$
D18	$C=1890 e-0.005023 t$
D19	$C=2840 e-0.008612 t$
D20	$C=2307 e-0.004725 t$

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. Ανανεώσεις αέρα  $N$  συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου  $V$ , για διεύθυνση κάθετη στην υδρορροή.

ΔΟΚΙΜΗ	$V$ (m s <sup>-1</sup> )	$N$
D1	0, 62	14, 0
D2	0, 68	12, 9
D3	1, 19	20, 5
D4	2, 28	40, 9
D5	1, 42	34, 5
D6	1, 12	28, 9
D7	1, 80	35, 3

Η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης για διεύθυνση ανέμου παράλληλη στην υδρορροή φαίνεται στο σχήμα 3 και δίνεται από τη σχέση:

$$v = 8,48V_{10} + 3,43 \quad (10)$$

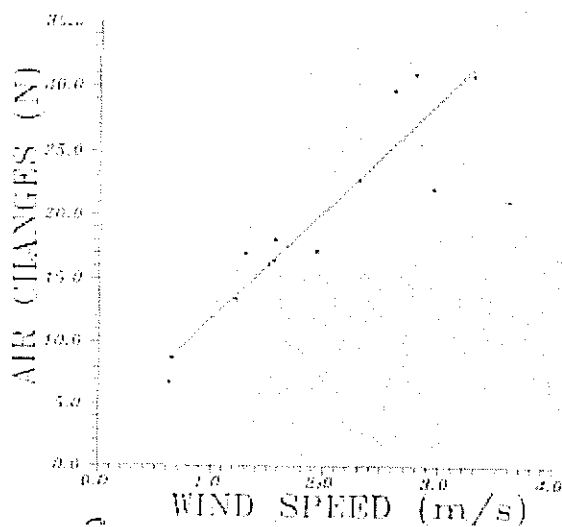
όπου:  $V_{10}$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m ( $m s^{-1}$ ).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5.** Ανανεώσεις αέρα  $N$  συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου  $V$ , για διεύθυνση παράλληλη στην υδρορροή.

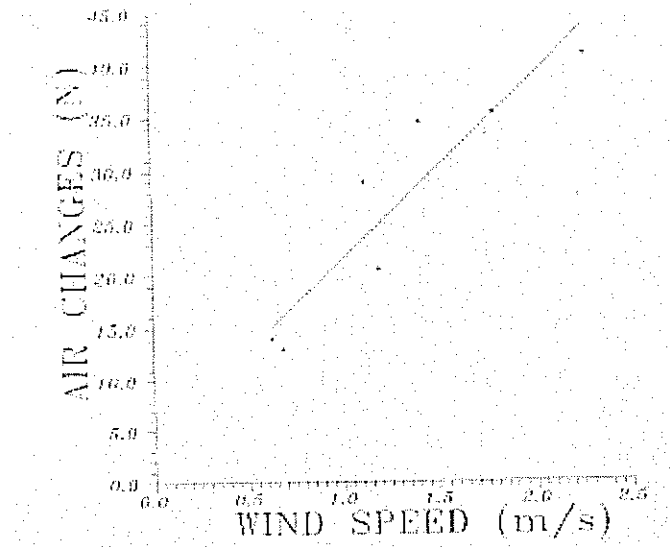
ΔΟΚΙΜΗ	$V (m s^{-1})$	$N$
D8	1,55	16,5
D9	3,30	30,9
D10	2,95	22,2
D11	1,93	17,2
D12	1,51	16,2
D13	2,62	29,7
D14	2,30	22,9
D15	0,65	8,7
D16	0,62	6,8
D17	1,22	13,4
D18	1,56	18,1
D19	2,80	31,0
D20	1,30	17,0

Η ευθεία γραμμικής παλινδρόμησης για διεύθυνση ανέμου κάθετη στην υδρορροή φαίνεται στο σχήμα (4) και δίνεται από τη σχέση:

$$N = 17,31 V_{10} + 4,20 \quad (11)$$



**Σχήμα 3.** Ανανεώσεις αέρα για διεύθυνση ανέμου παράλληλη στην υδρορροή.



Σχήμα 4. Ανανεώσεις αέρα για διεύθυνση ανέμου κάθετη στην υδρορορή.

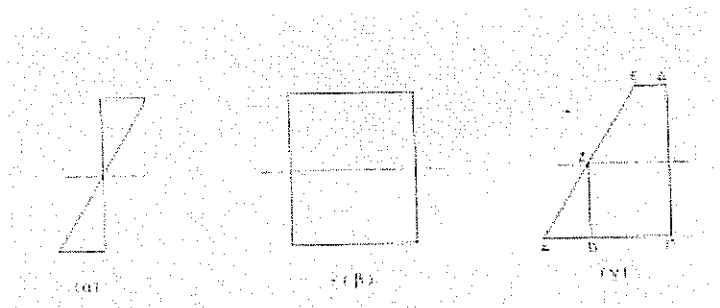
## 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 5.1. Αερισμός δημιουργούμενος από τη διαφορά θερμοκρασίας

Οι ανανεώσεις του αέρα του θερμοκηπίου που δίνονται στα σχήματα 3 και 4 προκύπτουν από την ταυτόχρονη δράση θερμοκρασιακής διαφοράς  $\Delta\Theta$  και την πνοή του ανέμου. Για τον υπολογισμό των ανανεώσεων του αέρα που οφείλονται μόνο στην πνοή του ανέμου πρέπει να αφαιρεθούν οι ανανεώσεις του αέρα που οφείλονται στη διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta\Theta$ .

Η μέση διαφορά θερμοκρασίας ήταν  $4^{\circ}\text{C}$ .

Η διαφορά πίεσης  $\Delta P$  που προέρχεται από τη  $\Delta\Theta$  δίνεται στο σχήμα 5α. Η διαφορά πίεσης  $\Delta P$  που προέρχεται από την πνοή του ανέμου δίνεται στο σχήμα 5β. Η άθροιση των διαφορών πιέσεων που προέρχεται από τα δύο πιο πάνω αίτια δίνεται στο σχήμα 5γ. Οι ανανεώσεις του αέρα που προκαλεί η διαφορά θερμοκρασίας, οφείλονται στη διαφορά των πιέσεων ABZ (σχ. 5γ).



Σχήμα 5. Διαφορές πιέσεων στο άνοιγμα αερισμού.

Οι ανανεώσεις του αέρα που προκαλεί η πνοή του ανέμου οφείλονται στις διαφορές των πιέσεων ΒΓΔΕΖ.

Η ροή εισόδου (εξόδου) του αέρα που οφείλεται στη διαφορά πίεσης ABZ δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{\Phi} = \frac{Z^{1/2}}{\delta} L V dz$$

από την επίλυση της οποίας προκύπτει ότι:

$$\Phi = (L/3) (g \beta \Delta\theta/F_0)^{1/2} H^{3/2} \quad (12)$$

όπου:  $L = 20$  m (μήκος ανοίγματος)

$H = 0,70$  m (ύψος ανοίγματος)

$g = 10$  m s<sup>-1</sup> (επιτάχυνση βαρύτητας)

$\beta = 3,6 \cdot 10^{-3}$  K<sup>-1</sup> (συντελεστής θερμοκλής διαστολής)

$F_0 = 2,04$  (συντελεστής αντίστασης στη ροή) (Boi, 1988)

Συνεπώς:

$$\ddot{\Theta} = (20/3) \sqrt{10 \times 3,6 \times 10^{-3} \times 4 / 2,4 \times 0,7^{3/2}} = 1,04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Η ροή αυτή του αέρα αντιστοιχεί σε:

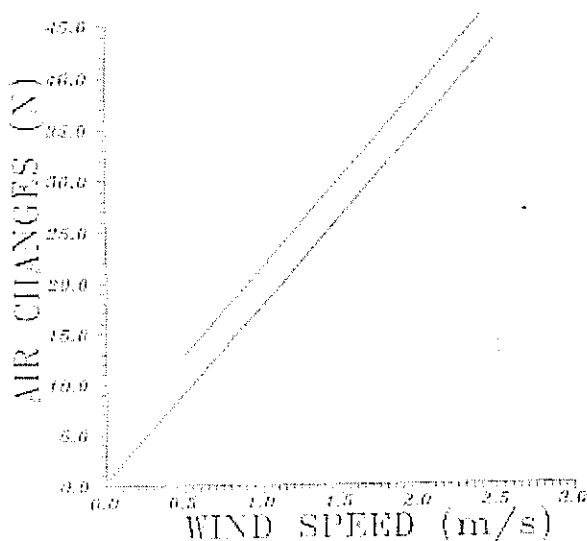
$$N = 1,04 \times 3.600 / 1.054 = 3,55 \text{ h}^{-1} \quad (13)$$

## 5. 2. Αερισμός που προκαλείται από άνεμο με διεύθυνση κάθετη στην υδρορροή

Το  $N$  που δίνει η σχέση (13) πρέπει να αφαιρεθεί από τις τιμές που λαμβάνονται από τη σχέση (11) και που οφείλονται σε συνδιασμό  $\Delta\theta$  και ανέμου, προκειμένου να βρεθεί το  $N$  που οφείλεται στην πνοή του ανέμου.

Η ευθεία του σχήματος 4 υφίσταται μία παράλληλη μετατόπιση και η νέα ευθεία που δίνει το  $N$  που οφείλεται μόνο στην πνοή του ανέμου δίνεται στο σχήμα 6. Η ευθεία αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$N = 17,31 \sqrt{10} + 0,65 (h-1)$$



Σχήμα 6. Ανανεώσεις αέρα από άνεμο με διεύθυνση κάθετη στην υδρορροή.

Στην πραγματικότητα η ευθεία πρέπει να διέρχεται από την αρχή των αξόνων (0, 0). Δηλαδή για ταχύτητα ανέμου  $V_{10}=0$ ,  $N=0$ .

Επομένως, το 0, 65 της σχέσης (13) προφανώς οφείλεται σε στατιστικό σφάλμα και ως εκ τούτου μπορεί να απαληφθεί, καθόσον η τιμή του είναι μικρή. Συνεπώς:

$$N = 17,31 V_{10} \quad (14)$$

Η ροή του αέρα, όταν πνέει άνεμος, δίνεται από τη σχέση (Βοι, 1988):

$$\Phi = \sqrt{K_c / F_o} A V_{10}$$

$$\text{αν } K = \sqrt{K_c / F_{10}} \quad (15)$$

$$\text{τότε } \Phi = K A V_{10} \quad (16)$$

όπου: K: Συντελεστής ανοίγματος

Kc: Συντελεστής σύνδεσης δυναμικής πίεσης και δραστηκής διαφοράς πίεσης

Από τις σχέσεις (5), (14), (16) προκύπτει:

$$K A V_{10} = N \text{Vol} / 3.600 = 17,31 V_{10} \text{Vol} / 3.600$$

$$K = 17,31 \text{Vol} / 3.600 A = 17,31 \times 1.054 / 3.600 \times 0,7 \times 20 = 0,362$$

Επομένως η σχέση 15 γίνεται:

$$\Phi = 0,362 A V_{10} (\text{m}^3 \text{s}^{-1}) \quad (17)$$

Από τις σχέσεις (15) και (17) προκύπτει ότι:

$$K_c = K^2 F_o = 0,3622 \times 2,04 = 0,267 \quad (18)$$

Από τις σχέσεις (12), (16) και (18) προκύπτει ότι η ροή του αέρα που οφείλεται στην πνοή του ανέμου είναι μεγαλύτερη αυτής που προκαλεί η διαφορά θερμοκρασίας όταν:

$$V_{10} > 0,205 \Delta\Theta^{1/2} \quad (19)$$

Από τη σχέση (19) προκύπτει:

$$\text{Για } \Delta\Theta = 4 \text{ } ^\circ\text{K} \quad V_{10} = 0,41 \text{ m s}^{-1}$$

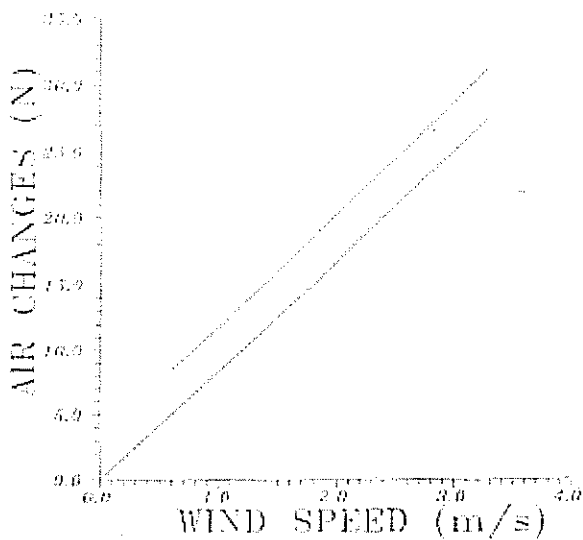
$$\text{Για } \Delta\Theta = 10 \text{ } ^\circ\text{K} \quad V_{10} = 0,65 \text{ m s}^{-1}$$

### 5.3. Αερισμός που προκαλεί ο άνεμος με διεύθυνση παράλληλη στην υδρορροή

Ομοίως ο αερισμός  $N=3,55 \text{ h}^{-1}$  πρέπει να αφαιρεθεί από τη σχέση 10 για να βρεθεί ο αερισμός του θερμοκηπίου που οφείλεται στην πνοή του ανέμου με διεύθυνση παράλληλη στην υδρορροή.

Η ευθεία του σχήματος 3 υφίσταται μια παράλληλη μετατόπιση (σχ. 7) και η νέα αυτή ευθεία δίνει τις ανανεώσεις του αέρα που οφείλονται μόνο στον άνεμο. Η νέα αυτή ευθεία δίνεται από τη σχέση:

$$N = 8,48 V10 \text{ (h}^{-1}\text{)} \quad (20)$$



Σχήμα 7. Ανανεώσεις αέρα από άνεμο με διεύθυνση παράλληλη στην υδρορροή.

Η ροή του αέρα όταν πνέει άνεμος δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = K A V10 = N \text{ Vol} / 3.600 = 8,48 V10 \text{ Vol} / 3.600$$

$$K = 8,48 \text{ Vol} / 3.600 A = 8,48 \times 1.054 / 3.600 \times 0,7 \times 20 = 0,177$$

και η σχέση λαμβάνει τη μορφή

$$\Phi = 0,177 A V10 \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)} \quad (21)$$

και σύμφωνα με τη σχέση (15):

$$Kc = K2 Fo = 0,1772 \times 2,05 = 0,363$$

Η ροή του αέρα οφειλόμενη σε πνοή ανέμου υπερτερεί της ροής που προκαλεί η διαφορά θερμοκρασίας όταν:

$$V_{10} > (2/3) \sqrt{Hg\beta / K_c \Delta\theta^{1/2}}$$

$$\text{Συνεπώς: } V_{10} > 0,42 \Delta\theta^{1/2} \quad (22)$$

Από τη σχέση 22 προκύπτει:

$$\begin{aligned} \text{Για } \Delta\theta = 4 \text{ } ^\circ\text{K} \quad V_{10} &= 0,84 \text{ m s}^{-1} \\ \text{Για } \Delta\theta = 10 \text{ } ^\circ\text{K} \quad V_{10} &= 1,33 \text{ m s}^{-1} \end{aligned}$$

## 6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συγκρίνοντας τις ανανεώσεις του αέρα από την πνοή του ανέμου, που δίνονται από τη σχέση (14) όταν αυτός έχει διεύθυνση κάθετη στην υδρορροή και από τη σχέση (20) όταν έχει διεύθυνση παράλληλη προς την υδρορροή παρατηρούμε τα εξής:

- α. Οι ανανεώσεις του αέρα για διεύθυνση ανέμου κάθετη στην υδρορροή, είναι σχεδόν διπλάσιες αυτών για διεύθυνση ανέμου παράλληλη στην υδρορροή.
- β. Η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας του ανέμου με διεύθυνση παράλληλη στην υδρορροή πέρα της οποίας η ροή του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο που οφείλεται στην πνοή του ανέμου, υπερτερεί αυτής που οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας υπολογίστηκε σε:

$$\begin{aligned} V_{10} &= 0,84 \text{ m s}^{-1} && \text{για } \Delta\theta = 4 \text{ } ^\circ\text{K} \\ \text{και } V_{10} &= 1,33 \text{ m s}^{-1} && \text{για } \Delta\theta = 10 \text{ } ^\circ\text{K} \end{aligned}$$

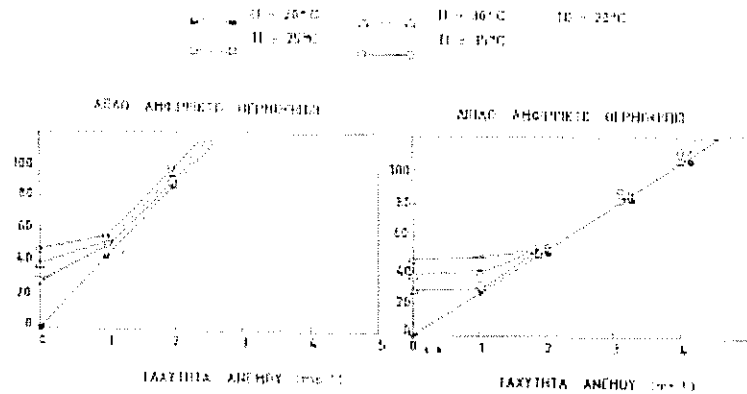
Και στις δύο περιπτώσεις η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρή. Η ροή συνεπώς του αέρα στον τύπο αυτόν του θερμοκηπίου, οφείλεται κυρίως στην πνοή του ανέμου.

Το συμπέρασμα αυτό είναι λογικό, μια και η κίνηση του αέρα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας, γίνεται μόνο μέσω των πλευρικών ανοιγμάτων, λόγω ανυπαρξίας ανοιγμάτων οροφής και ως εκ τούτου είναι μικρή.

- γ. Ο συντελεστής ανοίγματος  $K$  είναι ο διπλάσιος για διεύθυνση ανέμου κάθετη προς την υδρορροή σε σχέση με αυτόν για διεύθυνση παράλληλη με την υδρορροή.

Συγκρίνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα με αυτά της εργασίας των Kozai και Sase (1978) παρατηρούμε ότι οι καμπύλες που δίνουν τις ανανεώσεις του αέρα (σχ. 8) έχουν την ίδια μορφή, ενώ το  $N$  είναι διαφορετικό. Η ταχύτητα του ανέμου πέρα της οποίας η ροή οφειλόμενη σε αυτόν υπερτερεί της ροής που οφείλεται στη θερμοκρασιακή διαφορά είναι  $V = 1 \text{ m s}^{-1}$ .





Σχήμα 8. Ανανεώσεις αέρα Ν κατά Kozai, Sase (1978).

Το θερμοκήπιο που μελετήθηκε από τους Kozai και Sase είναι ένα απλό αμφίροικο θερμοκήπιο με πλάτος 9, 00 m και με ανοίγματα αερισμού στην οροφή και στις πλευρές. Για το λόγο αυτό:

- α. Οι ανανεώσεις του αέρα είναι περισσότερες
- β. Η επίδραση της θερμοκρασιακής διαφοράς είναι ισχυρότερη σε σχέση με το θερμοκήπιο της εργασίας αυτής που έχει πλάτος 14, 10 m.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της εργασίας των Kozai, Sase, Nara (1980) και ειδικότερα αυτά του αμφίροικου απλού θερμοκηπίου με ανοίγματα αερισμού μόνο στις πλευρές με τα πειραματικά αποτελέσματα του τοξωτού θερμοκηπίου παρατηρούμε ότι αυτά ποιοτικά συμπίπτουν. Οι ανανεώσεις του αέρα στο απλό αμφίροικο θερμοκήπιο είναι περισσότερες λόγω του μικρότερου πλάτους του που είναι 7, 20 m.

Τα συμπεράσματα των Sase, Takakura και Nara (1984) βρίσκονται σε συμφωνία με αυτά που βρέθηκαν στο πείραμα. Σύμφωνα με τους συγγραφείς ο αερισμός λόγω ανέμου εξαρτάται από τη διεύθυνση του ανέμου και από το αν η ροή του αέρα μεταξύ των ανοιγμάτων αερισμού μέσα στο θερμοκήπιο είναι ευθεία. Επίσης σ' ένα απλό αμφίροικο θερμοκήπιο με πλευρικά ανοίγματα αερισμού μόνο, ο άνεμος υπερτερεί της θερμοκρασιακής διαφοράς όταν έχει ταχύτητα κάτω των 2 m s<sup>-1</sup> και οφείλεται κυρίως στην ευθεία μορφή της ροής του αέρα μέσα στο θερμοκήπιο.

Αν ληφθεί υπόψη ότι το θερμοκήπιο που μελέτησαν οι ερευνητές αυτοί είχε το μισό πλάτος του διπλού τοξωτού θερμοκηπίου στο οποίο έγιναν τα πειράματα, με άμεση συνέπεια η σημασία της θερμοκρασιακής διαφοράς στον αερισμό να είναι μεγαλύτερη, τα πειραματικά συμπεράσματα από την έρευνα αυτή βρίσκονται σε συμφωνία με αυτά των Sase, Takakura και Nara.

Οι ανανεώσεις του αέρα στο θερμοκήπιο που μελετήθηκε οφείλονται κυρίως στην πνοή του ανέμου. Σε μέρη όπου υπάρχει συχνά νηνεμία πρέπει να τοποθετούνται ανοίγματα αερισμού και στις όψεις ή στην οροφή, ώστε να αυξάνεται ο αερισμός λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς.

Επειδή η ανανέωση του αέρα που οφείλεται στον άνεμο είναι διπλάσια για διεύθυνση ανέμου κάθετη στην υδρορροή σε σχέση με διεύθυνση ανέμου παράλληλη στην υδρορροή, είναι προτιμότερο η διεύθυνση της υδρορροής να είναι κάθετη στον επικρατούμενο άνεμο στην περιοχή εγκατάστασης ενός θερμοκηπίου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Baille, A. 1975. Etude de l'influence du positionnement des aerations sur les champs de temperature et de vitesse a l'interieur de semi-forçage. Annales Agronomiques, 26, p. 265-275.
2. Baytorun, A. N. 1986. Bestimmung des Luftwechsels bei gelufteten Gewächshäusern. Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover.
3. Bot, G. P. A. 1980. Validation of a dynamical model of greenhouse climate. Acta Horticulturae 106, p. 149-158.
4. Bot, G. P. A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Thesis Agricultural University Wageningen. The Netherlands.
5. Bottecher, R. W. , Willits, D. H. 1987. Numerical computation of two dimensional flow around and through a peaked-roof building. Transactions of the ASAE 30, p. 469-475.
6. Hanson, T. B. , Smith, F. , Summers, D. , Wilson, C. B. 1982. Computer simulation of wind flow around buildings. Computer Aided Design, 14 (1) p. 27-31.
7. Kabbaj, R. 1988. Modilisation de la ventilation statique d'une serre. Mémorie DEA. Option Energetique, Université de Perpignan, Juin.
8. Κίττας, Κ. 1985. Προσδιοριστικοί παράγοντες των θερμοκρασιακών ανυψώσεων "υπό κάλυψη". Εφαρμογή στον κλιματισμό των ελληνικών θερμοκηπίων. Τεχνικά Χρονικά Β', Τόμος 5, Τεύχος 4.
9. Kittas, C. , Chiapale, J. P. , Villele, O. De, Aries, F. 1987. Parametres significatifs du dterminisme de la temprature de l'air de la serre. Agricultural and Forest Meteorology, 40, p. 265-277.
10. Kozai, T. , Sase, S. 1978. A simulation of natural ventilation for a multispans greenhouse. Acta Horticulturae 87, p. 39-49.
11. Kozai, T. , Sase, S. , Nara, M. 1980. A Modelling approach to greenhouse ventilation control. Acta Horticulturae 106, p. 125-136.
12. Mekikdjan, C. , Sevilla, F. 1988. Optimal static ventilation in greenhouses. Acta Horticulturae 263, p. 335-341.
13. Morris, L. G. , Neale, F. E. 1954. The infra-red carvondioxide gasanalyzuer and its use in glasshouse research. NIAE (AFRC) rep. Wrestpark, Silsoe, England.
14. Morris, L. G. , Neale, F. E. , Postlethwaite, J. D. 1954. The transpiration of glasshouse crop and its relationship to the incoming solar radiation. J. of Agr. Engn. Research 2(2) p. 11-112.
15. Okushima, S. , Sase, S. , Nara, M. 1988. A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics. Acta Horticulturae 248.
16. Παππά, Α. , Μουζάκης, Φ. , Μπεργιλέζ, Γ. 1990. Αριθμητική προσομοίωση εξαερισμού θερμοκηπίων. Σεμινάριο Α. Τ. Ε. , Θερμοκηπιακές κατασκευές, Θεσσαλονίκη, Ιούλιος.
17. Sase, S. , Nara, M. 1985. A control algorithm for natural ventilation based on wind tunnel testing. Acta Horticulturae 174. Greenhouse climate and its control.
18. Sase, S. , Takakura, T. , Nara, M. 1984. Wind tunnel testing on airflow and temperature distribution of naturally ventilated greenhouses. Acta Horticultrae 148, p. 329-336.
19. Whittle, R. M. , Lawrence, W. J. C. 1960. The Climatology of Glashouses II, Ventilation. J. Agricultural Engineering Research 5(1): p. 36-41.



# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΟΛΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΕΝΑ ΠΛΑΣΤΙΚΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

Ν. Κατσούλας, Θ. Μπαρτζάνας, Κ. Κίττας

*Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής και Ζωικής Παραγωγής, Βόλος*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται πειραματικός προσδιορισμός του ολικού συντελεστή απωλειών θερμότητας (U) ενός θερμοκηπίου. Οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν σε πραγματικό θερμοκήπιο τύπου πολλαπλού τροποποιημένου τοξωτού με καλλιέργεια τριανταφυλλιάς στην περιοχή Καρδίτσας. Για τον υπολογισμό του παραπάνω συντελεστή πραγματοποιήθηκαν: (α) κλιματικές μετρήσεις που αφορούσαν το περιβάλλον του θερμοκηπίου, δηλαδή μέτρηση της θερμοκρασίας, της καθαρής ακτινοβολίας μέσα και έξω από το θερμοκήπιο, της θερμοκρασίας καλύμματος καθώς και της ταχύτητας του ανέμου έξω από το θερμοκήπιο και (β) μετρήσεις της ροής θερμότητας από τα συστήματα θέρμανσης (επιδάφια θέρμανση και θέρμανση με αερόθερμα), προς το περιβάλλον του θερμοκηπίου. Ο συντελεστής U εκφράστηκε αρχικά ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου (u), με τη σχέση:  $U = a + bu$ . Η σχέση αυτή τροποποιήθηκε προσθέτοντας ένα όρο σχετικό με την καθαρή ακτινοβολία στο θερμοκήπιο (Rn):  $U = a + bu + cRn/DT$ , όπου DT η διαφορά θερμοκρασίας του εσωτερικού με τον εξωτερικό αέρα. Η τελευταία αυτή σχέση έδωσε καλύτερα αποτελέσματα.

Λέξεις κλειδιά: *Ολικός συντελεστής απωλειών θερμότητας, ενεργειακό ισοζύγιο, πλαστικό θερμοκήπιο.*

## ABSTRACT

The aim of this study is to determine experimentally the overall coefficient of thermal losses (U), of a greenhouse. The experimental measurements were done in a multispan plastic greenhouse cultivated with rose located in the region of Karditsa. For the determination of the above coefficient, there was carried out: (a) climate measurements of greenhouse environment, such as temperature, net radiation inside and outside of the greenhouse, temperature of the cover and wind velocity outside the greenhouse, and (b) measurements of thermal supply by the heating systems (ground's heating with horizontal pipes at the ground and heating with ventilation). At first, the coefficient U was expressed as a function of the wind velocity (u) by the relation:  $U = a + bu$ . This relation was transformed by adding a factor relative to the net radiation (Rn):  $U = a + bu + cRn/DT$ , where DT is the difference of temperature between the inside and outside air. This relation gave better results.

Key-words: *Overall coefficient of thermal losses, energy balance, greenhouse with plastic cover.*

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή ανταγωνιστικών θερμοκηπιακών προϊόντων απαιτεί μείωση του κόστους παραγωγής με ταυτόχρονη πύηση υψηλών προδιαγραφών ποιότητας. Ένα μεγάλο μέρος του κόστους παραγωγής οφείλεται στη θέρμανση του θερμοκηπίου. Για τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας

γειας χωρίς την υποβάθμιση της παραγωγής είναι απαραίτητη η διεξοδική μελέτη της ενεργειακής συμπεριφοράς του θερμοκηπίου, έτσι ώστε να γίνει δυνατός ο ορθολογικός σχεδιασμός του προς την κατεύθυνση αυτή. Η ενεργειακή συμπεριφορά ενός θερμοκηπίου περιγράφεται από τον ολικό συντελεστή ενεργειακών απωλειών. Οι ενεργειακές απώλειες ενός θερμοκηπίου μπορούν να υπολογισθούν, με μεγάλη ακρίβεια από τις ενεργειακές ανταλλαγές στο θερμοκήπιο. Η μέθοδος αυτή όμως είναι δύσκολη διότι απαιτεί προηγουμένως να έχει προσδιοριστεί μεγάλος αριθμός συντελεστών που σχετίζονται με τις θερμοκές ιδιότητες των διαφόρων στοιχείων του θερμοκηπίου [7, 9, 12, 10]. Στις περιπτώσεις που μας ενδιαφέρει ο προσδιορισμός του μεγίστου ποσού θερμικών απωλειών ενός θερμοκηπίου, όπως όταν προόκειται για το σχεδιασμό των συστημάτων θέρμανσης, χρησιμοποιήστε η μέθοδος που απαιτεί τον προσδιορισμό μόνο του μέσου ολικού συντελεστή θερμικών απωλειών του θερμοκηπίου. Ο υπολογισμός του παραπάνω συντελεστή δίνει τη δυνατότητα αφενός μεν του ορθολογικού υπολογισμού των αναγκών σε κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, αφετέρου δε στη βελτίωση του σχεδιασμού και του εξοπλισμού των θερμοκηπιακών κατασκευών προς την κατεύθυνση της βελτιστοποίησης του ενεργειακού ισοζυγίου. Ο ολικός συντελεστής ενεργειακών απωλειών, σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει σε προηγούμενα έτη [5, 11, 13], επηρεάζεται από το μικροκλίμα της κάθε περιοχής, (θερμοκρασία, ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου) [2, 3, 4], από τον τύπο του θερμοκηπίου και από το είδος του συστήματος θέρμανσης του θερμοκηπίου. Προκειμένου λοιπόν να γίνει σωστός σχεδιασμός του απαιτούμενου συστήματος θέρμανσης για κάθε περιοχή και θερμοκήπιο είναι ανάγκη να υπολογισθεί αρχικά ο ολικός συντελεστής ενεργειακών απωλειών. Το αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι ο υπολογισμός, σε πραγματικές πειραματικές συνθήκες, του ολικού συντελεστή ενεργειακών απωλειών  $U$ , ενός πλιστιζού θερμοκηπίου, εξοπλισμένου με σύστημα επιδάφιας θέρμανσης και θέρμανσης με αερόθερμα.

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Οι συνολικές απώλειες θερμότητας  $Q_{tot}$  ( $W m^{-2}$ ) ενός θερμοκηπίου οφείλονται στις απώλειες από το κάλυμμα  $Q_{cov}$  (ακτινοβολία και συναγωγή) ( $W m^{-2}$ ), στις απώλειες λόγω διαφυγών αέρα  $Q_f$  ( $W m^{-2}$ ) και στις απώλειες που οφείλονται στις ανταλλαγές θερμότητας με το έδαφος  $Q_{gr}$  ( $W m^{-2}$ ) και μπορούν να αποδοθούν από την ακόλουθη σχέση [8, 10]:

$$Q_{tot} = Q_{cov} + Q_f + Q_{gr} \quad (1)$$

Οι παράγοντες που αναφέρονται στη σχέση (1) μπορούν να υπολογιστούν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$Q_{cov} = U_{cov} A_{cov} (T_{in} - T_{out}) \quad (2)$$

$$Q_f = U_f A_{cov} (T_{in} - T_{out}) \quad (3)$$

$$Q_{gr} = U_{gr} A_{gr} (T_{in} - T_{out}) \quad (4)$$

όπου:

$U_{cov}$  = ο συνολικός συντελεστής θερμικών απωλειών μέσω του καλύμματος,  $W m^{-2} ^\circ C^{-1}$ ,

$U_f$  = ο συντελεστής θερμικών απωλειών λόγω διαφυγών αέρα,  $W m^{-2} ^\circ C^{-1}$ ,

$U_{gr}$  = ο συντελεστής που αναφέρεται στις ανταλλαγές θερμότητας με το έδαφος,  $W m^{-2} ^\circ C^{-1}$ ,

$A_{cov}$ ,  $A_{gr}$  = η επιφάνεια του καλύμματος και του εδάφους αντίστοιχα σε  $m^2$ ,

$T_{in}$ ,  $T_{out}$  = εσωτερική και εξωτερική θερμοκρασία του αέρα, αντίστοιχα σε  $^{\circ}\text{C}$ .

Οι απώλειες θερμότητας προς το έδαφος μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, διότι η τιμή τους είναι πολύ μικρή συγκρινόμενη με τις άλλες [11]. Επομένως οι συνολικές απώλειες θερμότητας, χωρίς σημαντικό λάθος, μπορούν να δοθούν από την εξίσωση:

$$Q_{tot} = Q_{conv} + Q_f \quad (5)$$

Ο συντελεστής απωλειών  $U_{conv}$ , ο οποίος εκφράζει τις απώλειες από το κάλυμμα, μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των απωλειών με αζινοβολία  $U_R$  και των απωλειών με συναγωγή  $U_{conv}$  δηλαδή:

$$U_{conv} = U_R + U_{conv} \quad (6)$$

Έτσι οι συνολικές απώλειες θερμότητας  $Q_{tot}$ , σύμφωνα με τις σχέσεις (3), (5) και (6), μπορούν να εκφραστούν ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} Q_{tot} &= (U_R + U_{conv}) A_{conv} DT + U_f A_{conv} DT \sigma \\ Q_{tot} &= (U_R + U_{conv} + U_f) A_{conv} DT \sigma \\ Q_{tot} &= U A_{conv} DT \end{aligned} \quad (7)$$

Για την έκφραση του συντελεστή  $U$  έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις.

Ο συντελεστής  $U$  μπορεί να εκφραστεί με τη σχέση:

$$U = a u \quad (8)$$

όπου:  $a$  σταθερά που υπολογίζεται στατιστικά,  $W s m^{-3} ^{\circ}\text{C}^{-1}$  και  $u$  η ταχύτητα του ανέμου,  $m s^{-1}$ . Με τη χρήση της σχέσης (8) για την εκτίμηση του συντελεστή  $U$ , υπολογίζεται ένας μέσος ολικός συντελεστής απωλειών.

Μια άλλη έκφραση του συντελεστή είναι και η ακόλουθη:

$$U = a + b u \quad (9)$$

όπου  $a$  ( $W m^{-2} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) και  $b$  ( $W s m^{-3} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) είναι σταθερές που υπολογίζονται στατιστικά [6, 12]. Στην έκφραση του  $U$  με τη σχέση (8) λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες θερμότητας που σχετίζονται άμεσα με την ταχύτητα του ανέμου. Με την εισαγωγή ενός σταθερού όρου προκειπται η σχέση (9). Ο σταθερός όρος στην σχέση αυτή εκφράζει τις απώλειες θερμότητας που δεν σχετίζονται άμεσα με την ταχύτητα του ανέμου.

Στην προσπάθεια που έγινε να συμπεριληφθούν στην έκφραση του συντελεστή  $U$  και οι απώλειες θερμότητας με αζινοβολία, προτείνεται μία νέα σχέση:

$$U = a + b u + c R_n / DT \quad (10)$$

όπου  $c$  είναι αδιάστατη σταθερά που υπολογίζεται στατιστικά.

Προκειμένου να γίνει ο πειραματικός προσδιορισμός του  $U$ , θεωρούμε ότι η ενέργεια που πα-

ρέχεται από το σύστημα θέρμανσης κατά τη διάρκεια της νύχτας ισοδυναμεί με τις ενεργειακές απώλειες του θερμοκηπίου κατά το ίδιο χρονικό διάστημα, έτσι ώστε η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου να διατηρείται σταθερή. Από τη σχέση (7) προκύπτει ότι ο συντελεστής  $U$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [2, 6, 13]:

$$U = Q_{10t} / DT A_{cov} \quad (11)$$

Έτσι ο συντελεστής  $U$  υπολογίζεται πειραματικά από τη σχέση (11) χρησιμοποιώντας μετρήσεις των  $Q_{10t}$  και  $DT$  και στη συνέχεια υπολογίζονται στατιστικά οι σταθερές  $a$ ,  $b$ , και  $c$  ανάλογα με την έκφραση ((9), (10), (11)) του συντελεστή που χρησιμοποιούμε.

Η αποδιδόμενη από ένα ρευστό ενέργεια, που στην περίπτωση του συστήματος θέρμανσης του θερμοκηπίου μας είναι το νερό, δίνεται γενικά από τη σχέση:

$$Q = \rho C_p f (T_{in} - T_{ex}) \quad (12)$$

όπου:  $Q$  η αποδιδόμενη ενέργεια,  $W$ .

$\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού η οποία στην περίπτωση του νερού είναι  $1$  για θερμοκρασία κοντά στους  $25$  οC,  $kg\ m^{-3}$ ,

$C_p$  = η ειδική θερμότητα του νερού η οποία είναι  $4180$  για θερμοκρασία κοντά στους  $25$  οC,  $J\ Kg^{-1}\ oC^{-1}$ ,

$f$  = η παροχή σε νερό,  $m^3\ sec^{-1}$

$T_{in}$  = η θερμοκρασία του νερού κατά την είσοδό του στο σύστημα θέρμανσης, οC και

$T_{ex}$  = η θερμοκρασία του νερού κατά την έξοδό του από το σύστημα θέρμανσης, οC.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (12) μπορούμε να υπολογίσουμε το κέρδος ενέργειας σε θερμότητα που αποδίδεται από το νερό στο περιβάλλον του θερμοκηπίου μέσω της επιδράσεως θέρμανσης και των αερόθερμων. Χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες παροχές και θερμότητες εισόδου και εξόδου του νερού υπολογίζουμε την θερμότητα που αποδίδεται από την επιδράση θέρμανση  $Q_{\text{επιδ}}$  και τη θερμότητα που αποδίδεται από τα αερόθερμα  $Q_{\text{αεροθ}}$ . Η συνολική ενέργεια  $Q_{10t}$  ( $W$ ) που παρέχεται από το σύστημα θέρμανσης στο θερμοκήπιο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q_{10t} = Q_{\text{αεροθ}} + Q_{\text{επιδ}} \quad (13)$$

Επομένως για τον υπολογισμό του συντελεστή απωλειών ( $U$ ) είναι απαραίτητο να γίνουν οι παρακάτω μετρήσεις:

α) κλιματικές μετρήσεις που αφορούν το περιβάλλον του θερμοκηπίου, δηλαδή μέτρηση της θερμοκρασίας, της καθαρής ακτινοβολίας μέσα και έξω από το θερμοκήπιο, της θερμοκρασίας καλύμματος καθώς και της ταχύτητας του ανέμου έξω από το θερμοκήπιο και β) μετρήσεις της ροής θερμότητας από τα συστήματα θέρμανσης (επιδράση θέρμανση και θέρμανση με αερόθερμα) προς το περιβάλλον του θερμοκηπίου, με τη θερμιδομετρική μέθοδο.

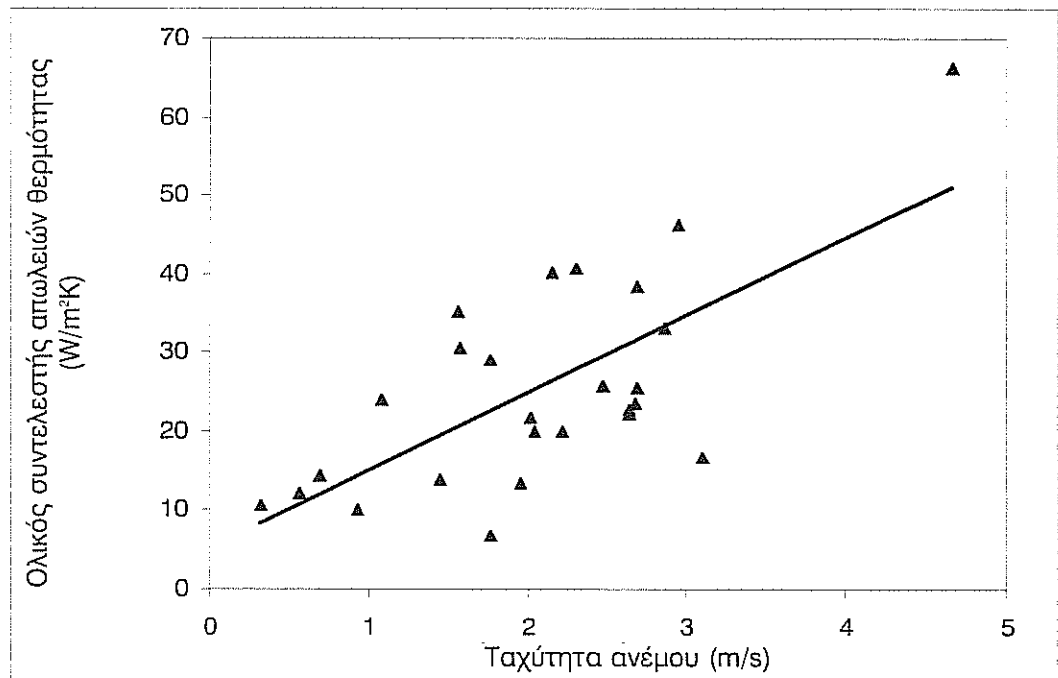
#### ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πολλαπλό τροποποιημένο τοξωτό θερμοκήπιο τον χειμώνα του 1997 στην περιοχή της Καρδίτσας. Το θερμοκήπιο κατασκευάστηκε το 1990 και κάλυ-

πε συνολικά 2, 88 στρέμματα. Αποτελείται από 6 βάσεις πλάτους 8 μέτρων η κάθε μία. Το μήκος του θερμοκηπίου είναι 60 μέτρα, το ύψος του ορθοστάτη 2, 5 μέτρα και το ύψος του κορυφιά 4 μέτρα, ο συνολικός του όγκος υπολογίστηκε στα 9. 350 m<sup>3</sup>, ενώ η συνολική επιφάνεια του καλύμματος υπολογίστηκε στα 3. 750 m<sup>2</sup>. Το θερμοκήπιο είναι καλυμμένο, στην οροφή με διπλό πλαστικό πάχους 180μ, με αέρα από το εσωτερικό του θερμοκηπίου μεταξύ των δυο φύλων και με Polycarbonate στα πλάγια. Το θερμοκήπιο διαθέτει σύστημα κεντρικής θέρμανσης ζεστού νερού το οποίο αποδίδει την θερμότητα ή με τα αερόθερμα ή/και με την επιδαπέδια θέρμανση. Για τη συλλογή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό σύστημα συλλογής δεδομένων τύπου CR10 της Campbell. Οι μετρήσεις έγιναν κατά τη διάρκεια της νύχτας μόνο έτσι ώστε να αποκλεισθεί το κέρδος της ενέργειας από τον ήλιο. Κάθε 10 δευτερόλεπτα γινόταν μία μέτρηση όλων των παραμέτρων και κάθε 30 λεπτά καταγραφόταν ο μέσος όρος. Στην συνέχεια υπολογιζόταν ο μέσος όρος όλων των παραμέτρων για κάθε νύχτα.

#### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο διάγραμμα 1 δίνεται η γραφική παράσταση των μετρημένων τιμών του συντελεστή U, όπως υπολογίζεται από τη σχέση (11), συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.



**Διάγραμμα 1.** Γραφική παράσταση του ολικού συντελεστή απωλειών θερμότητας του θερμοκηπίου συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.



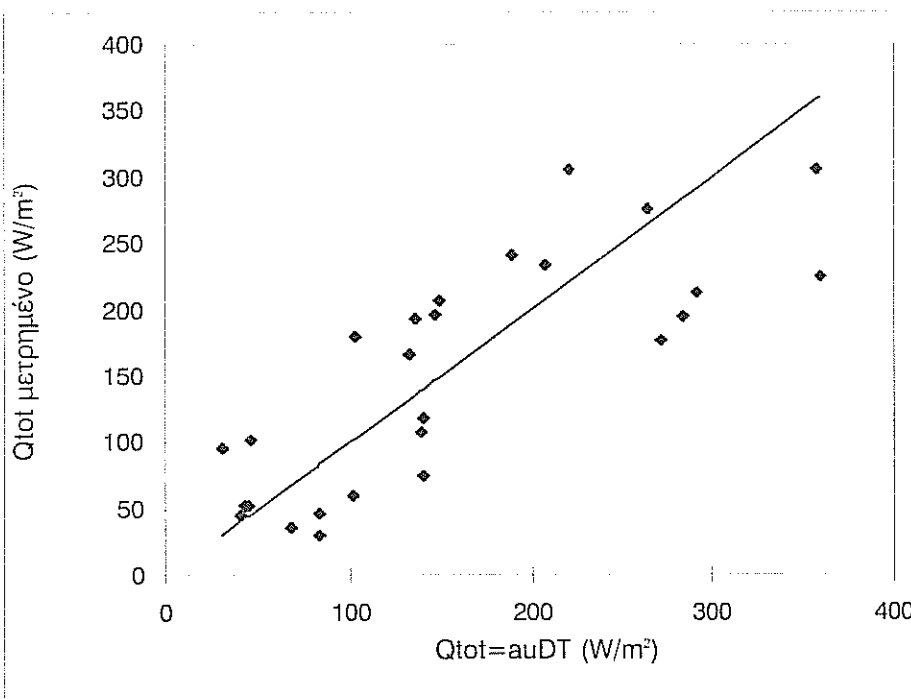
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1 ο ολικός συντελεστής απωλειών θερμότητας αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό εξάλλου αναφέρεται και στη διεθνή βιβλιογραφία [2, 3].

Ο συντελεστής  $U$  αρχικά εκφράστηκε συναρτήσει μόνο της ταχύτητας του ανέμου:

$$U = au \quad (14)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (10) και (14) και τις μετρήσεις των  $Q_{tot}$ ,  $DT$  και  $u$  έγινε επεξεργασία των μετρήσεων με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης. Για σύνολο 28 παρατηρήσεων τα αποτελέσματα έδωσαν  $a=12$  ( $W s m^{-3} K^{-1}$ ) με τυπικό σφάλμα 0,8 και  $R^2=0,62$ .

Στο διάγραμμα 2 δίνεται η γραφική παράσταση των μετρημένων τιμών του  $Q_{tot}$  και των υπολογισμένων τιμών από τη σχέση (14) με  $a=12 W s m^{-3} K^{-1}$ .



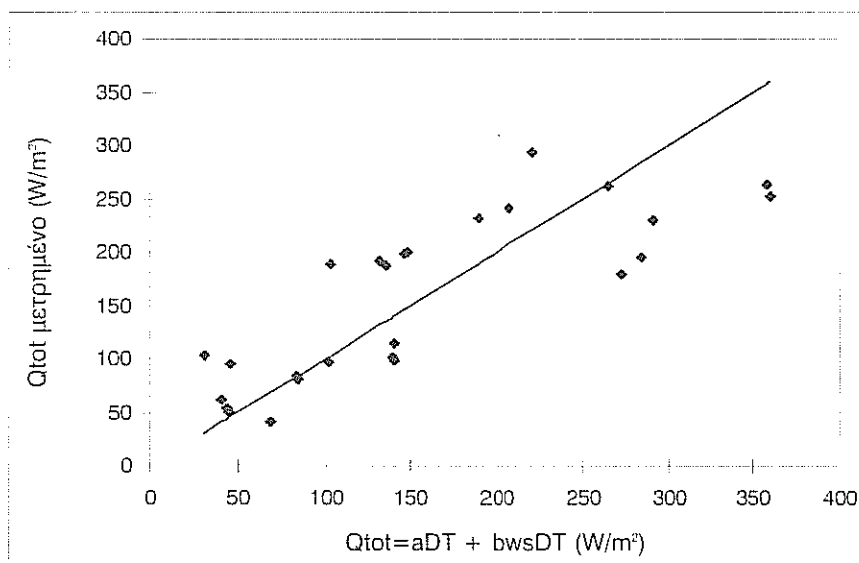
Διάγραμμα 2. Γραφική παράσταση των μετρήσεων των απωλειών του θερμοζηπίου συναρτήσει των εκτιμήσεων από το μοντέλο (14) με  $U=12u$ .

Όπως αναφέρεται και στην θεωρητική ανάλυση ο συντελεστής απωλειών μπορεί να δοθεί και από την ακόλουθη σχέση:

$$U = a + bu \quad (15)$$

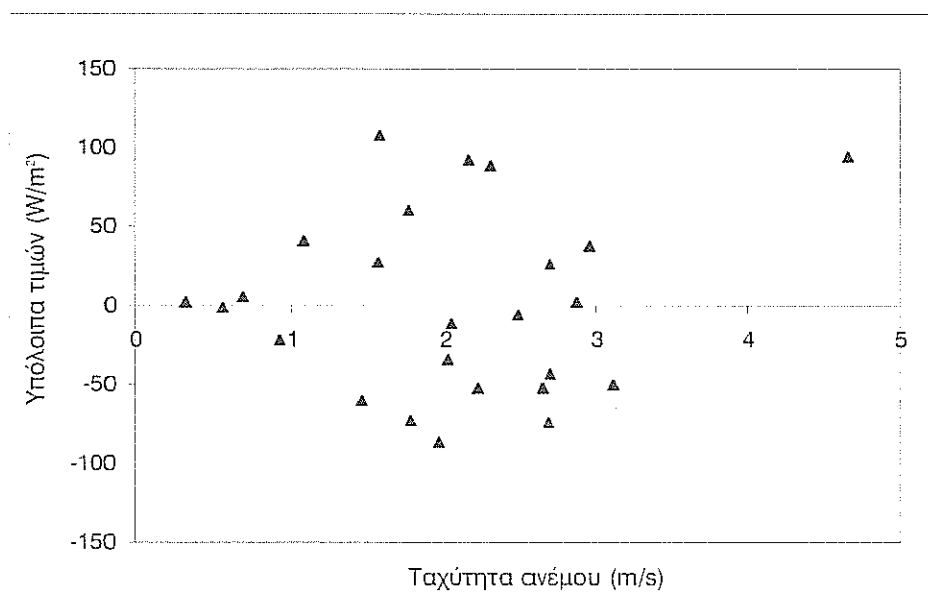
Οι σταθερές  $a$  και  $b$  υπολογίστηκαν εκ νέου στατιστικά βάσει των πειραματικών μετρήσεων και έδωσαν τιμές  $a = 7,56$  ( $W m^{-2} K^{-1}$ ) και  $b = 8,8$  ( $W s m^{-3} K^{-1}$ ) με τυπικό σφάλμα 4 και 2 αντίστοιχα και  $R^2=0,67$  (για  $N=28$ ).

Στο διάγραμμα 3 δίνεται η γραφική παράσταση των μετρημένων τιμών του  $Q_{tot}$  και των εκτιμήσεων από το μοντέλο (15) με  $U = 7,56 + 8,8 u$ .



Διάγραμμα 3. Γραφική παράσταση των μετρήσεων των απολειών θερμοτήτας του θερμοκηπίου συναρτήσει των εκτιμήσεων του  $Q_{tot}$  από τη σχέση (15) με  $U = 7,56 + 8,8 u$ .

Στο διάγραμμα 4 δίνεται η γραφική παράσταση μεταξύ των υπολοίπων των παρατηρημένων τιμών του  $Q_{tot}$  συναρτήσει των εκτιμήσεων του από τη σχέση (15) με  $U = a + bu$ .



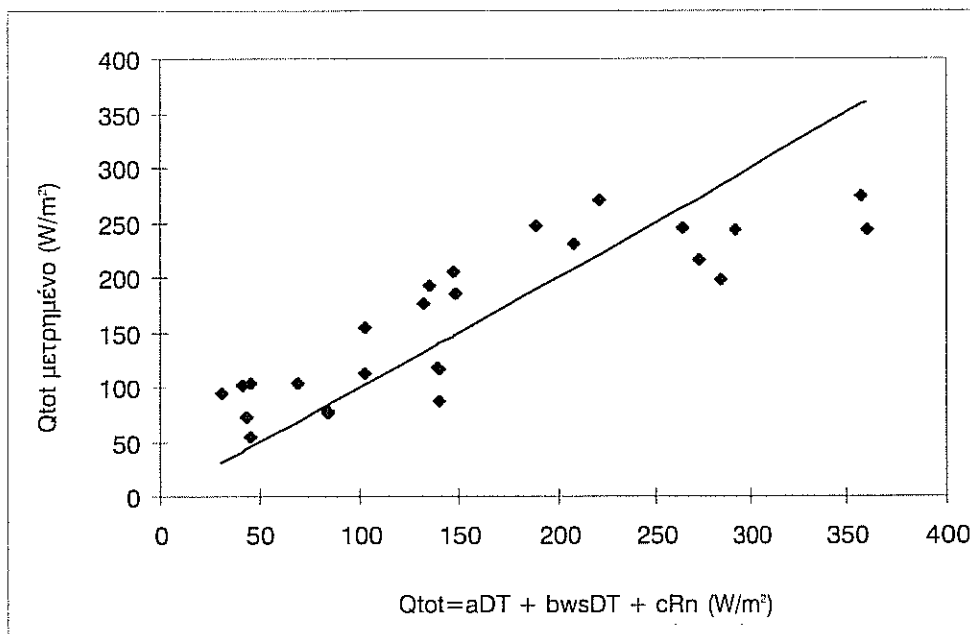
Διάγραμμα 4. Μεταβολή των αποκλίσεων μετρήσεων του  $Q_{tot}$  και εκτιμήσεών του σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου.

Από το διάγραμμα 4 βλέπουμε ότι οι τιμές των υπολοίπων είναι τυχαία κατανομημένες. Αυτό είναι ένας ακόμη λόγος που καθιστά το παραπάνω μοντέλο του  $Q_{tot}$  στατιστικά ικανοποιητικό.

Τέλος στην έκφραση του συντελεστή  $U$  επιχειρήθηκε να ληφθούν υπόψη και οι απώλειες με ακτινοβολία. Γι' αυτό επιλέχθηκε ένα μοντέλο που παρουσιάζει τις ολικές θερμικές απώλειες του θερμοκηπίου με τη σχέση:

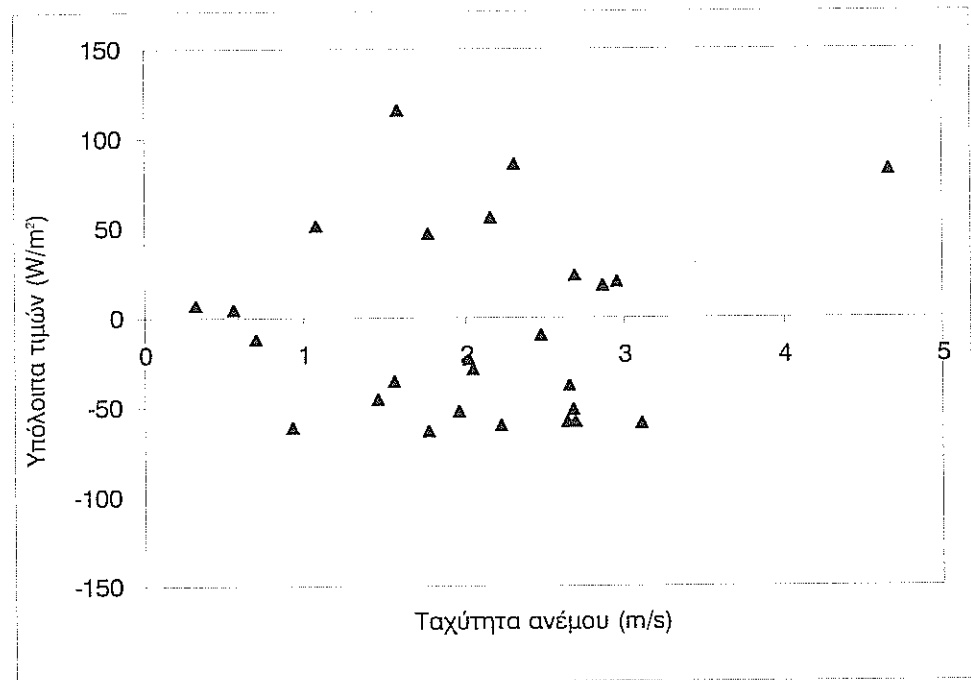
$$U = a + bu + cRn/DT \quad (16)$$

Οι νέες τιμές για τις σταθερές  $a$ ,  $b$  και  $c$  υπολογίστηκαν με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης εκ νέου και έδωσαν  $a=6,2$ ,  $b=5,8$  και  $c=-1$  με τυπικό σφάλμα 4,2, 5 και 0,5 αντίστοιχα και  $R^2=0,72$ . Φαίνεται έτσι ότι η προσθήκη του  $Rn$  στην έκφραση του  $U$  βελτίωσε κατά 5% την επεξηγηματικότητα του μοντέλου. Στο διάγραμμα 5 δίνεται η γραφική παράσταση των μετρήσεων του  $Q_{tot}$  συναρτήσει των εκτιμήσεων από το μοντέλο (16).



Διάγραμμα 5. Γραφική παράσταση των μετρήσεων των απωλειών θερμότητας του θερμοκηπίου συναρτήσει των εκτιμήσεων του  $Q_{tot}$  από το μοντέλο (16).

Στο διάγραμμα 6 δίνεται η γραφική παράσταση μεταξύ των υπολοίπων των παρατηρημένων τιμών του  $Q_{tot}$  συναρτήσει των εκτιμήσεων του από τη σχέση (16) με  $U = 6,2 + 5,8u - Rn$ .



Διάγραμμα 6. Μεταβολή των αποκλίσεων μετρήσεων του  $Q_{101}$  και εκτιμήσεών του σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου.

Από το διάγραμμα 6 φαίνεται ότι οι τιμές των υπολοίπων είναι τυχαία κατανεμιμένες, κάτι που δείχνει ότι το μοντέλο εκτίμησης του συντελεστή  $U$  παραμένει ικανοποιητικό.

#### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αρχικά επιχειρήθηκε η έκφραση του συντελεστή  $U$  συναρτήσει μόνο της ταχύτητας του ανέμου με  $U=au$  και η τιμή του  $a$  υπολογίστηκε στατιστικά και βρέθηκε  $a=12$  ( $Wm^{-2} K^{-1}$ ). Η τιμή του  $a$  που υπολογίστηκε βρίσκεται κοντά στα δεδομένα της βιβλιογραφίας. Η τιμή του  $R^2=0,62$  δείχνει ότι ο συντελεστής είναι ικανοποιητικός.

Κατόπιν ο συντελεστής  $U$  εκφράστηκε με τη σχέση  $U=a+bu$ , και τα  $a$  και  $b$  υπολογίστηκαν στατιστικά και βρέθηκαν  $a=7,56$  ( $W m^{-2} K^{-1}$ ) και  $b=8,8$  ( $W s m^{-3} K^{-1}$ ), ενώ η εξίσωση έδωσε  $R^2=0,67$ .

Τέλος στην έκφραση του συντελεστή  $U$  συμπεριλήφθησαν και οι απώλειες με ακτινοβολία. Έτσι ο συντελεστής υπολογίστηκε από τη σχέση  $U = a + bu + cRn/DT$  και οι σταθερές  $a$ ,  $b$ ,  $c$  βρέθηκαν  $a=6,2$ ,  $b=5,8$  και  $c=-1$ . Η έκφραση αυτή του συντελεστή  $U$  είναι καλύτερη από τις προηγούμενες κάτι το οποίο φαίνεται και από την βελτιωμένη τιμή του  $R^2$  της εξίσωσης με  $R^2 = 0,72$ .

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η καλύτερη έκφραση του ολικού συντελεστή απωλειών θερμότητας είναι αυτή που λαμβάνει υπόψη τις απώλειες με μεταφορά, συναγωγή, λόγω διαφυγών του αέρα και ακτινοβολία. Επειδή όμως η μέτρηση της καθαρής θερμικής ακτινοβολίας και της θερμο-

κρυσίας του ουρανού, που συνδέονται άμεσα, είναι δύσκολη, οι προσπάθειες για περισσότερες και καλύτερες μετρήσεις πρέπει να συνεχιστούν έτσι ώστε το μοντέλο εκτίμησης του ολικού συντελεστή απωλειών θερμότητας  $U$  να εξηγεί όσο το δυνατόν περισσότερο από την παραλλακτικότητα των μετρήσεων των απωλειών θερμότητας του θερμοκηπίου.

#### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Bailey, B. J. , Seginer, J. . 1989. Optimum Control of Greenhouse heating. *Acta Horticulturae* 245: 512-518.
2. Bailey, R. J. and Cotton, R. F. , 1980. Glasshouse thermal screen: Influence of single and double screens on heat loss and crop environment. *NJAE Dep. Note DN/G/821/04013*, 15 pp.
3. Baille, M. , Laury, j. C. , Baille, A. , 1983. Influence du matetieriau de couverture sur les echanges energetiques d'une serre: Etude comparative verre normal/verre faible emissivite. I. Influence sur les deperditions thermiques. II. Influence sur le micrichimat interieur. *Agronomie*, 3 (3): 197-206.
4. Boulard, T. , Baille, A. , 1987. Analysis of thermal performance of a greenhouse as a solar collector. *Energy in Agriculture*, 6 (1): 17-26.
5. Breuer, J. and Short, T. , 1989. Greenhouse energy demand comparisons for the Netherlands and Ohio, USA. *Acta Horticulturae*, 245: 141-147.
6. Garzoli, K. V. and Blackwell, J. , 1981. Analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse. *J. Agric. Eng. Res.* , 26: 203-214.
7. Kittas, C. , 1980. Contribution theorique et experimentale a l'etude du bilan d'energie des serres, These de Docteur Ingenieur, Université de Perpignan, p 160.
8. Κίττας, Κ. , 1984. Ενεργειακές απώλειες θερμοκηπίου. Διατηρηβή για νηηγεσία, Πάτρα, 136 p.
9. Kittas, C. , 1986. Greenhouse cover conductances. *Boundary-Layer Meteorology*, 36: 213-225.
10. Μαυρογιαννόπουλος, Γ. , 1990. Θερμοκήπια. Έκδοση Β. Σταμούλης. Αθήνα.
11. Μαυρογιαννόπουλος, Γ. Ν. , Χουστουλάκης, Π. , Κυρίτσης, Σ. , , 1994. Μετρήσεις του συντελεστή ολικής θερμοπερατότητας του θερμοκηπίου. *Γεωργική Έρευνα*, 18: 12-17.
12. Παπαδάκης, Γ. , 1989. Πειραματική ανάλυση και δυναμική προσομοίωση του μικροκλίματος στο θερμοκήπιο. Διδακτορική διατριβή. Αθήνα, 166p.
13. Seginer, I. and Albright, L. D. , 1983. Greenhouse operation for best aerial environment. Final Researsh Report, BARD project I-177-179. Technics, Israel Institute of Technology.

# ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΤΩΝ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ: ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ

Κ. Κίττας<sup>1</sup>, Α. Baille<sup>2</sup>, Θ. Μπαριζάνας<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής και Ζωικής Παραγωγής, Βόλος  
<sup>2</sup>INRA, Unite de Bioclimatologie d'Avignon, France

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται μια επισκόπηση των επιστημονικών και τεχνικών θεμάτων που πρέπει να επιλυθούν ώστε να γίνει δυνατή η ρύθμιση και διαχείριση του κλίματος στα χαμηλού κόστους πλαστικά θερμοκήπια της Μεσογείου. Εμφαση δίνεται στην ανάλυση του ρόλου του εξωτερικού κλίματος, της κατασκευής, του κλιματικού εξοπλισμού και της συμπεριφοράς της καλλιέργειας στην διαμόρφωση του κλίματος υπό κάλυψη. Επισημαίνονται η σημασία των εξατμιστικών φαινομένων (εξατμισσοδιαπνοή της καλλιέργειας, συστήματα δροσισμού) στα ισοζύγια θερμότητας και μάζας του θερμοκηπίου καθώς και ο ρόλος "κλειδί" του αερισμού στον έλεγχο του εσωτερικού μικροκλίματος. Τέλος, συζητούνται οι ανάγκες για έρευνα και εκπαίδευση στον τομέα του ελέγχου του θερμοκηπιακού μικροκλίματος.

## ABSTRACT

This paper presents an overview of the scientific and technical issues that have to be solved in order to reach suitable climate control and management in the low- cost plastic mediterranean greenhouses. Emphasis will be directed to the respective roles of external climate, greenhouse structure, climate control equipment and crop behaviour in the establishment of the internal climate. It is also pointed the importance of evaporative processes (evapotranspiration of the crop, evaporative cooling) in the heat and mass balance of the greenhouse, and the key role of ventilation rates in controlling the internal climate. Finally, the needs of research and training in the field of greenhouse environmental control are discussed.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες, κατά την διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών γνώρισαν σημαντική εξάπλωση στην περιοχή της Μεσογείου (Νότια Ευρώπη, Μαρόκο, Τυνησία, Αλγερία, Αίγυπτος). Η ενεργειακή κρίση και η εισαγωγή των πλαστικών φύλλων ήταν οι κύριοι παράγοντες που συντέλεσαν στην μετατόπιση των προστατευομένων καλλιέργειων από την Βόρεια Ευρώπη στις Μεσογειακές χώρες. [1]. Οι χαμηλού κόστους πλαστικές κατασκευές, σε συνδυασμό με ορισμένες προσαρμογές της Βόρειας τεχνολογίας, κατέστησε δυνατό την εμφάνιση, μεσογειακών συστημάτων παραγωγής προϊόντων εκτός εποχής. Σύντομα, η συνολική καλλιεργησιμη έκταση σ' αυτές τις περιοχές θα είναι περίπου 60. 000 εκτάρια, [2], με την πλειοψηφία τους να είναι πλαστικές κατασκευές.

Τα μεσογειακά θερμοκήπια απαιτούν λιγότερη ενέργεια συγκρινόμενα με τις καλλιέργειες αγρού. Η αιτία είναι ότι οι αγρότες χρησιμοποιούν μικρά ποσά ενέργειας για να ελέγξουν το περιβάλλον του θερμοκηπίου. Οι περισσότερες μονάδες δεν θερμαίνονται (ή στην καλύτερη περι-

πώση υπάρχει ένα υποτυπώδες σύστημα θέρμανσης), ενώ ο αερισμός γίνεται με χειροκίνητα συστήματα. Ο ανεπαρκής αερισμός (κατά την διάρκεια του καλοκαιριού), και η έλλειψη θέρμανσης (κατά την διάρκεια του χειμώνα), οδηγούν σε ακατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Επιπροσθέτως, η κατασκευή και το σχήμα των μονάδων (χαμηλό ύψος, μικρός όγκος, επίπεδες οροφές) είναι συχνά ακατάλληλα για τις κλιματικές συνθήκες αυτών των περιοχών, [3], με αποτέλεσμα να οξύνουν αντί να μειώνουν τα προβλήματα.

Συνέπεια των παραπάνω είναι το εσωτερικό μικροκλίμα που δημιουργείται στο χώρο του θερμοκηπίου να είναι ακατάλληλο για την καλλιέργεια, για ένα μεγάλο διάστημα του έτους. Αρκετές εργασίες έχουν περιγράψει τις κλιματικές συνθήκες, που επικρατούν στις χαμηλού κόστους μονάδες, στις οποίες η έλλειψη εξοπλισμού ελέγχου του περιβάλλοντος έχει ως αποτέλεσμα ανεπαρκείς συνθήκες και αδυναμία για παραγωγή καθόλη την διάρκεια του έτους, [4].

Το αποτέλεσμα του μη ικανοποιητικού ελέγχου του περιβάλλοντος στη παραγωγή (απόδοση, ποιότητα) είναι αρνητικό. Λόγω των υψηλών τιμών της θερμοκρασίας και του ελείμματος κορεσμού, οι καλλιεργητές δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν την υψηλής έντασης ακτινοβολία κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, αλλά και αργά την άνοιξη. Το δυναμικό παραγωγής καλλιέργειας τομάτας στην Νότια Ισπανία κατά τους καλοκαιρινούς μήνες είναι 50% υψηλότερο από ότι στην Ολλανδία, [2]. Παρόλα αυτά δεν είναι δυνατό να επιτύχουμε ικανοποιητικά επίπεδα παραγωγής και ποιότητας στα θερμοκήπια των Μεσογειακών χωρών κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, όταν στην Βόρειο Ευρώπη κατά την ίδια περίοδο, επιτυγχάνονται υψηλές αποδοσεις και καλή ποιότητα. Οι λόγοι της υψηλής παραγωγής στα θερμοκήπια της Βόρειας Ευρώπης είναι δύο:

- Οι εξωτερικές κλιματικές συνθήκες δεν δημιουργούν ιδιαίτερα προβλήματα στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου.
- Οι παραγωγοί έχουν αποκτήσει επιδεξιότητα στην διαχείριση του κλίματος, σύγχρονων γυάλινων θερμοκηπίων με τη βοήθεια υπολογιστών, [5].

Σύμφωνα με τον Castilla, [4], στις βόρειες χώρες υπάρχει η τάση να βελτιστοποιήσουν το περιβάλλον του θερμοκηπίου με σκοπό να επιτύχουν το μέγιστο της παραγωγής. Σε αντίθεση, στη μεσογειακή περιοχή η κύρια έννοια είναι μάλλον να προσαρμόσουν την καλλιέργεια σε ένα μη βέλτιστο περιβάλλον. Επειδή όμως υπάρχουν όρια στη στρατηγική αυτή της προσαρμογής θα ήταν συνετό να αναζητηθούν τεχνολογικές λύσεις οι οποίες θα μειώσουν τις ακραίες συνθήκες στις μεσογειακές κατασκευές, κυρίως κατά την διάρκεια του καλοκαιριού.

Ερευνητές και καλλιεργητές είναι πλέον πεπεισμένοι ότι οι θερμοκηπιακές κατασκευές πρέπει να σχεδιάζονται ειδικά για την κάθε περιοχή και ότι το περιβάλλον μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά ακολουθώντας ορισμένους απλούς κανόνες στην διαχείριση του θερμοκηπίου, [6].

Έτσι, για τους μεσογειακούς καλλιεργητές, μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις είναι προσαρμόζοντας και βελτιώνοντας τις κατασκευές τους και τον εξοπλισμό τους και διαχειριζόμενοι επιτυχώς τους διάφορους συντελεστές της παραγωγής (μικροκλίμα, καλλιέργεια, ...) να κατορθώσουν:

- Να παρατείνουν την καλλιεργητική περίοδο, και την περίοδο χρήσης των μονάδων.
- Να επιτύχουν υψηλά επίπεδα ποιότητας και ποσότητας.
- Να αυξήσουν το κέρδος που τους αποδίδουν τα καλλιεργητικά τους συστήματα.

Πάντως, πολλά εμπόδια πρέπει ακόμη να ξεπεραστούν. Η υπάρχουσα τεχνολογία και τεχνογνωσία η οποία αναπτύχθηκε στις χώρες της Βόρειας Ευρώπης δεν μπορεί να μεταφερθεί κατευθείαν στους καλλιεργητές της Μεσογείου. Η υψηλού επιπέδου τεχνολογία δεν μπορεί να

υποθετηθεί από πολλούς αγρότες γιατί το κόστος της είναι πολύ υψηλό συγκρινόμενο με τη μικρή επενδυτική ικανότητα αυτών των αγροτών. Η τεχνογνωσία της Βόρειας Ευρώπης είναι συχνά ακατάλληλη για προβλήματα τα οποία συναντώνται σε μεσογειακές μονάδες. Στην περίπτωση που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν θα ήταν απαραίτητη η κατάρτιση και εκπαίδευση των μεσογειακών αγροτών.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω ειδικά προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης άρχισαν από ερευνητικά ινστιτούτα και σταθμούς γεωργικών εφαρμογών στις χώρες της Μεσογείου. Στην εργασία αυτή γίνεται περιγραφή των μέσων και πρακτικών με τα οποία οι καλλιεργητές της Μεσογείου μπορούν να ελέγξουν τις συνθήκες "stress" που δημιουργούνται από το κλίμα και οι οποίες περιορίζουν την αύξηση και ανάπτυξη των καλλιεργειών κατά την διάρκεια παρατεταμένων θερμών περιόδων. Πριν από όλα όμως θα αναπτυχθούν μερικά βασικά στοιχεία, για τα ισοζύγια ενέργειας και υγρασίας στο θερμοκήπιο και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαδικασιών και παραγόντων οι οποίες καθορίζουν το περιβάλλον του θερμοκηπίου

### ΤΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΑΤΜΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

#### Το ενεργειακό ισοζύγιο

Για την ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου του θερμοκηπίου χρησιμοποιούνται μαθηματικά πρότυπα του θερμοκηπίου. Απλοποιημένα προσομοιώματα, τα οποία βασίζονται κυρίως στα ισοζύγια ενέργειας και μάζας ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ), είναι διαθέσιμα. Τα απλοποιημένα αυτά προσομοιώματα μας επιτρέπουν να διερευνήσουμε τους παράγοντες και τα φαινόμενα που προσδιορίζουν το εσωτερικό μικροκλίμα, [7], [8].

Το θερμοκήπιο μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ηλιακός συλλέκτης. Η μόνη διαφορά στην προσομοίωση του με τις εξισώσεις των ηλιακών συλλεκτών είναι η παρουσία μιας διαπνέουσας επιφάνειας, η οποία τροποποιεί τα φαινόμενα μεταφοράς λανθάνουσας θερμότητας. Χρησιμοποιώντας αυτή την αναλογία με τον ηλιακό συλλέκτη μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η καθαρή ακτινοβολία ( $R_n$ ) του θερμοκηπίου αποτελείται από δύο συνιστώσες (Σχήμα 1):

- Μια συνιστώσα αισθητής θερμότητας,  $H_s$  η οποία χρησιμεύει για την θέρμανση του αέρα του θερμοκηπίου (και αντιπροσωπεύει το κύριο μέρος της "χρήσιμης" ενέργειας η οποία μπορεί να εξαχθεί από ένα ηλιακό συλλέκτη).
- Μια συνιστώσα λανθάνουσας θερμότητας,  $\lambda E$ , η οποία αντιπροσωπεύει τον ρυθμό εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας.

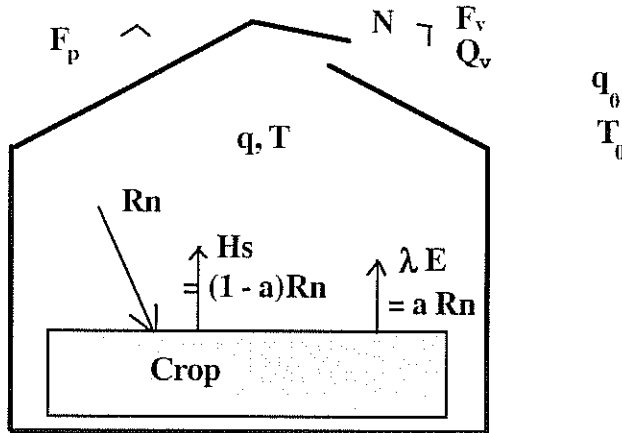
Η κατανομή της καθαρής ενέργειας μεταξύ αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας συχνά εκφράζεται από μία παράμετρο, η οποία ονομάζεται λόγος του Bowen,  $\beta = H_s/\lambda E$  και εξαρτάται από την ένταση των φαινομένων εξατμισοδιαπνοής, [9]. Σ' αυτή την παράγραφο θα χρησιμοποιήσουμε τις ακόλουθες απλοποιημένες σχέσεις:

$$H_s = (1-a) R_n \quad (1)$$

$$\lambda E = a R_n \quad (2)$$

όπου  $a$  ο λόγος της λανθάνουσας θερμότητας προς το ηλιακό κέρδος (καθαρή ακτινοβολία,  $R_n$ ). Η εξίσωση (2) αποτελεί μια προσεγγιστική εκτίμηση του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής η ολοκληρωμένη έκφραση του οποίου είναι περισσότερο σύνθετη.





Σχήμα 1. Απλοποιημένο ενεργειακό ισοζύγιο σε ένα μη θερμαινόμενο θερμοκήπιο (τα σύμβολα εξηγούνται στο κείμενο).

Οι απώλειες αισθητής θερμότητας του θερμοκηπίου κυρίως αποτελούνται από:

1) τις απώλειες με μεταφορά και ακτινοβολία από τα τοιχώματα του θερμοκηπίου, ( $\Phi_p$ ), οι οποίες συνολικά μπορούν να εκφραστούν ως ακολούθως:

$$\Phi_p = KG (T - T_0) = KG \Delta T \quad (3)$$

όπου  $KG$  είναι ο συνολικός συντελεστής απωλειών ( $Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ), και  $\Delta T$  η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα του θερμοκηπίου ( $T$ ), και της εξωτερικής θερμοκρασίας, ( $T_0$ ).

2) οι απώλειες με μεταφορά οι οποίες οφείλονται στην μη καλή στεγανότητα και στον αερισμό,  $\Phi_V$

$$\Phi_V = KV \Delta T \quad (4)$$

όπου  $KV$  ( $Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ) είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω του αερισμού, ο οποίος μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του ρυθμού ανανέωσης του αέρα,  $N(s^{-1})$ :

$$KV = \rho CP N (V/S) \quad (5)$$

όπου:  $\rho$  = πυκνότητα του αέρα ( $kg \text{ m}^{-3}$ ),  $CP$  = η ειδική θερμότητα του αέρα ( $J \text{ kg}^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ) και  $V/S$  = ο λόγος του όγκου του θερμοκηπίου ( $V$ ) προς την επιφάνεια του εδάφους ( $S$ ).

Τότε από το ισοζύγιο αισθητής θερμότητας, εξίσωση (1) λαμβάνουμε:

$$(1-a) R_n = \Phi_p + \Phi_V \quad (6)$$

Από την σχέση (6) μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου, είναι σε σταθερές συνθήκες ( $dT/dt = 0$ ):

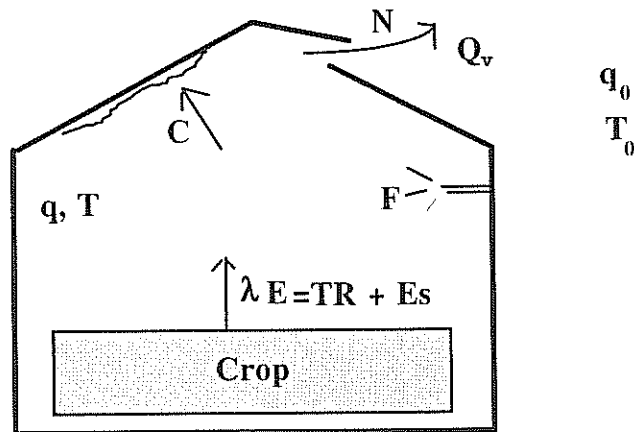
$$T = T_0 + \frac{(1-a) R_n}{K_G + \rho C_p N (V/S)} \quad (7)$$

Από την εξίσωση (7) βλέπουμε ότι για να μειώσουμε την θερμοκρασία του αέρα του θερμοκηπίου μπορούμε να επεμβούμε με τους ακόλουθους τρόπους:

- Μειώνοντας την καθαρή ακτινοβολία  $R_n$  (κουρτίνες σκίασης, άσπρισμα ...).
- Αυξάνοντας το συντελεστή  $a$  δηλαδή το μέρος του  $R_n$  που εξατμίζεται, με διοχέτευση υδρατμών στο θερμοκήπιο (ψεκασμός, τεχνητή ομίχλη...).
- Αυξάνοντας το  $K_G$  (ψεκασμός νερού στην οροφή).
- Αυξάνοντας το ποσοστό ανανεώσεως του αέρα  $N$ .
- Ψύχοντας τον εξωτερικό αέρα  $T_0$  πριν τον διοχετεύσουμε στο θερμοκήπιο (σύστημα δροσισμού με βρεγμένη παρειά, Cooling - system).
- Αυξάνοντας τον όγκο  $V$  του θερμοκηπίου.

#### Το ισοζύγιο υδρατμών

Με τρόπο ανάλογο όπως και για αισθητή θερμότητα, μπορούμε να διατυπώσουμε το ισοζύγιο της υγρασίας του θερμοκηπίου.



Σχήμα 2. Το ισοζύγιο υγρασίας του θερμοκηπίου (τα σύμβολα εξηγούνται στο κείμενο)

Η γενική μορφή του ισοζυγίου υγρασίας του θερμοκηπίου μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$$\frac{V}{S} \frac{dq}{dt} = TR + E_s + F - Q_v - C \quad (8)$$

όπου:

$dq/dt$  = ο ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής υγρασίας ( $\text{kg νερού m}^{-3} \text{s}^{-1}$ );

$q$  = συζέντρωση υδρατμών στον αέρα του θερμοκηπίου (kg νερού m<sup>-3</sup>)

$V, S$  = όγκος θερμοκηπίου (m<sup>3</sup>) και η επιφάνεια εδάφους του θερμοκηπίου (m<sup>2</sup>) αντίστοιχα

$TR$  = διαπνοή της καλλιέργειας (kg νερού m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

$Es$  = εξάτμιση από το έδαφος (kg νερού m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

$F$  = ποσότητα νερού που συμπληρώνεται στο θερμοκήπιο από υδρονέφωση, σύστημα βρεγμένης παρειάς (Cooling pad), (kg νερού m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

$Q_v$  = απώλειες υγρασίας λόγω μη καλής στεγανότητας και αερισμού (kg νερού m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

$C$  = ρυθμός συμπύκνωσης στο έδαφος ή στην καλλιέργεια (kg νερού m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

Κατά την διάρκεια της ημέρας το ισοζύγιο υγρασίας εξαρτάται κυρίως από την εξατμισοδιαπνοή,  $E = TR + ES$ , και από τις απώλειες λόγω αερισμού,  $Q_v$ . Κατά την διάρκεια της ημέρας η συμπύκνωση είναι σπάνια (ωστόσο δεν μπορεί να αγνοηθεί κατά την διάρκεια της νύχτας). Η εξάτμιση του εδάφους είναι αμελητέα εάν εφαρμόζεται τοπική άρδευση, στις υδροπονικές καλλιέργειες ή εάν το έδαφος ή το υπόστρωμα καλύπτονται από λευκό ανακλαστικό κάλυμμα. Τότε για την πλειοψηφία των περιπτώσεων (χωρίς συμπλήρωμα νερού από ένα σύστημα υφρονέφωσης), οι όροι  $Es, F$  και  $C$  μπορεί να αγνοηθούν και θα έχουμε:

$$\frac{V}{S} \frac{dq}{dt} = TR - Q_v \quad (9)$$

Για σταθερές συνθήκες ( $dq/dt=0$ ), ισχύει κατά συνέπεια:

$$TR = Q_v \quad (10)$$

Σε πρώτη προσέγγιση, λοιπόν, μπορεί να θεωρηθεί ότι η διαπνοή  $TR$  ισούται με τις απώλειες λόγω αερισμού  $Q_v$ . Εάν υπάρχουν διαθέσιμες σχέσεις εκτίμησης του ποσοστού ανανέωσης του αέρα  $N$ , είναι δυνατός ο υπολογισμός του ρυθμού διαπνοής της καλλιέργειας υπολογίζοντας τον ρυθμό ανταλλαγής του αέρα του θερμοκηπίου, [10].

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2) και εκφράζοντας την ποσότητα  $Q_v$  ως ακολούθως:

$$Q_v = N(V/S)(q - q_0) \quad (11)$$

όπου  $q_0$  είναι η εξωτερική υγρασία, λαμβάνουμε τη σχέση:

$$q = q_0 + \frac{aR_n / \lambda}{N(V/S)} \quad (12)$$

Σύμφωνα με την εξίσωση (12) η υγρασία του θερμοκηπίου μπορεί να τροποποιηθεί ενεργώντας στους ακόλουθους παράγοντες:

- Αυξάνοντας το συντελεστή  $a$ , δηλαδή αυξάνοντας τον ρυθμό εξατμισοδιαπνοής, αυξάνοντας έτσι την υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου.
- Μειώνοντας το  $R_n$ , χρησιμοποιώντας κουρτίνες σκίασης ελατώνοντας έτσι την διαπνοή της καλλιέργειας.
- Αυξάνοντας το  $N$ , δηλαδή τον ρυθμό ανανέωσης του αέρα, μειώνοντας έτσι την υγρασία.

Πάντως η εξίσωση (12) δίνει μια υπεραπλουστευμένη έκφραση των εξατμιστικών φαινομένων σ' ένα θερμοκήπιο, γιατί θεωρεί ότι η εξατμισοδιαπνοή είναι ανάλογη μόνο της ακτινοβολίας. Στην πραγματικότητα η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από την υγρασία πιο πολύπλοκα και υπάρχουν διάφορες αλληλεπιδράσεις μεταξύ της εξατμισοδιαπνοής και του ρυθμού διαπνοής οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη για μια αντικειμενική πρόβλεψη της υγρασίας του θερμοκηπίου.

### Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΩΝ ΕΞΑΤΜΙΣΤΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟ

#### Διαπνοή καλλιέργειας σε θερμοκήπιο

Ο ρυθμός διαπνοής εξαρτάται από την καθαρή ακτινοβολία η οποία απορροφάται από την φυλλική επιφάνεια,  $R_n$ , καθώς και από το έλλειμμα κορεσμού,  $D = e_s(T) - e$ ,  $e_s(T)$ , όπου  $e_s$  η πίεση υδρατμών στο κορεσμό στη θερμοκρασία  $T_a$  (PaK-1) και  $e$  η πίεση υδρατμών του αέρα (PaK-1). Η διαπνοή,  $TR$ , γενικά εκφράζεται με την εξίσωση των Penman-Monteith, [11], θεωρώντας όλη την καλλιέργεια την σαν ένα "μεγάλο φύλλο":

$$\lambda TR = \frac{\delta R_n}{\delta + \gamma^*} + \rho C_p \frac{g_a D}{\delta + \gamma^*} \quad (13)$$

όπου:

$R_n$  = καθαρή ακτινοβολία στο επίπεδο της καλλιέργειας, ( $W m^{-2}$ ).

$\lambda$  = λαθάνουσα θερμότητα εξατμησης του νερού, ( $J kg^{-1}$ ).

$\gamma^* = \gamma (1 + g_a/g_s)$ , όπου  $\gamma$  η θερμοδυναμική ψυχομετρική σταθερά (PaK-1),  $g_a$  και  $g_s$  ( $m s^{-1}$ ) αντίστοιχα είναι η αεροδυναμική και στοματική αντίστασεις της καλλιέργειας στη ροή των ατμών.

$\delta$  = είναι η κλίση της καμπύλης κορεσμένων υδρατμών σε θερμοκρασία  $T$ , (PaK-1).

Η στοματική αντίσταση,  $g_s$ , εξαρτάται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Η Stanghellini, [12], βρήκε ότι η  $TR$  εξαρτάται από την ακτινοβολία και το έλλειμμα κορεσμού και ξεφρασσε την στοματική αντίσταση  $g_s$  ως ακολούθως:

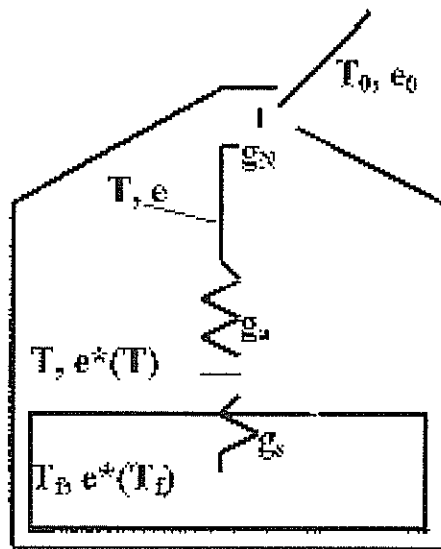
$$g_s = g_{smax} f_1(R_n) f_2(D) \quad (14)$$

Από τις εξισώσεις (13), (14), μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει μία σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ της υγρασίας του αέρα της διαπνοής και της καλλιέργειας. Εάν το έλλειμμα κορεσμού  $D$  αυξάνεται, τότε η διαπνοή  $TR$  αυξάνεται αλλά η στοματική αγωγιμότητα  $g_s$ , ελλοιώνεται αντιδρώντας έτσι στην αύξηση της διαπνοής. Πάντως επειδή ο περιοριστικός παράγοντας για την διαπνοή στα θερμοκήπια είναι η αεροδυναμική αγωγιμότητα ( $g_a \ll g_s$ ) η ελάττωση της τιμής  $g_s$  δεν έχει σημαντική επίδραση στην τιμή της συνολικής αγωγιμότητας και στο ρυθμό της διαπνοής, [13], μέχρι η καλλιέργεια να υποστεί ένα δυνατό stress οφειλόμενο στην υψηλή τιμή του ελλείματος κορεσμού. Μόνο στην τελευταία περίπτωση η στοματική ρύθμιση είναι αρκετά σημαντική ώστε να επιδρά καθοριστικά στο ρυθμό διαπνοής της καλλιέργειας υπό κάλυψη.

#### Ο καθοριστικός ρόλος του αερισμού στο σύστημα θερμοκήπιο

Πρόσφατα ο Boulard, [14], έδειξε ότι ο βαθμός σύζευξης μεταξύ της καλλιέργειας του θερμοκηπίου και του εξωτερικού περιβάλλοντος ρυθμίζεται κυρίως από τον ρυθμό αερισμού και σε μι-

κρότερο βαθμό από τον δείκτη φυλλικής επιφάνειας. Σύμφωνα με αυτόν ένας περιοριστικός παράγοντας στην διαπνοή μιας καλλιέργειας υπό κάλυψη είναι η αγωγιμότητα λόγω αερισμού, (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Σχηματική παράσταση των αγωγιμοτήτων που εμπλέκονται στις ανταλλαγές νερού σε ένα θερμοκήπιο.

Σε ένα κλειστό θερμοκήπιο η  $g_N$  μπορεί να είναι μικρότερη από τη  $g_A$  και ο αερισμός να αποτελεί το κύριο περιοριστικό παράγοντα της διαπνοής. Ένας ελάχιστος ρυθμός αερισμού είναι ως εκ τούτου απαραίτητος ώστε να διατηρείται η  $g_N$  μεγαλύτερη από τη  $g_A$  επιτρέποντας έτσι στον ρυθμό διαπνοής να φθάνει την μέγιστη τιμή που επιβάλλεται από την  $g_A$ .

Φαίνεται κατά συνέπεια, ότι ο αερισμός παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του εσωτερικού κλίματος και κατά συνέπεια στη συμπεριφορά των καλλιεργειών υπό κάλυψη. Ο ταυτόχρονος έλεγχος της θερμοκρασίας και υγρασίας είναι χωρίς αμφιβολία ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα καθόσον οι δύο αυτοί κλιματικοί παράγοντες του θερμοκηπίου δεν εξαρτώνται μόνο από τις εσωτερικές συνθήκες αλλά και από την ακτινοβολία και την φυσιολογική απόκριση των φυτών. Σε μη θερμαινόμενα θερμοκήπια ο μόνος τρόπος ελέγχου των δύο αυτών παραμέτρων είναι ο αερισμός. Ο αερισμός επίσης παραμένει ο μόνος τρόπος αποφυγής των υγροποιήσεων στα φυτά κατά τη νύχτα και αυτό αποτελεί την κοινή πρακτική σε πολλές περιοχές.

## ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΩΝ

### Κατασκευή και σχήμα

Οι χαμηλού κόστους κατασκευές οι οποίες συνήθως χρησιμοποιούνται στις μεσογειακές χώρες έχουν μικρή γλίση οροφής η οποία προσφέρει καλή αντίσταση στους ανέμους, αλλά μειώνει

σημαντικά την περατότητα του φωτός κατά το χειμώνα. Θα ήταν σκόπιμο να κατασκευαστούν θερμοκήπια με κατάλληλη κλίση (συμμετρικά, ασύμμετρα, γοθικά...) έτσι ώστε και η διαπερατότητα του θερμοκηπίου να βελτιωθεί αλλά και να αποφεύγονται οι συσσωρεύσεις νερού στην οροφή, [15]. Πολλά μεσογειακά θερμοκήπια έχουν μικρό ύψος και όγκο. Υψηλότερες κατασκευές θα μπορούσαν να βελτιώσουν την διαπερατότητα και τον αερισμό και να προσφέρουν μεγαλύτερη αδράνεια σε αλλαγές της θερμοκρασίας και της υγρασίας.

### Εξοπλισμός για τον έλεγχο του κλίματος

Η βασική τεχνική που εφαρμόζεται στα μεσογειακά θερμοκήπια για έλεγχο του μικροκλίματος είναι ο αερισμός, λόγω της ισχυρής επίδρασης που έχει σε όλες τις άλλες κλιματικές παραμέτρους (εκτός της ακτινοβολίας). Μια ακόμη διαδεδομένη πρακτική είναι και το άσπρισμα. Ορισμένες μονάδες έχουν υιοθετήσει και άλλες τεχνικές όπως, κουρτίνες σκίασης, υδρονέφωση, συστήματα υγρής παρειάς, παθητικά συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, συστήματα θέρμανσης με νερό χαμηλής ενθαλπίας κ. α. Η χρησιμοποίηση εναλλακτικών μορφών ενέργειας (γεωθερμική, νερό από ανακύκλωση βιολογικών καθαρισμών κ. α...), βρίσκει εφαρμογή μόνο σαν συμπληρωματική θέρμανση κατά την διάρκεια πολύ κρύων περιόδων.

### Έλεγχος θερμοκρασίας

#### Θέρμανση

Η χρησιμοποίηση συμβατικών ή εναλλακτικών συστημάτων θέρμανσης δεν είναι διαδεδομένη στα μεσογειακά θερμοκήπια. Το οικονομικό κέρδος από την θέρμανση των θερμοκηπίων δεν έχει ξεκαθαριστεί πλήρως για την περιοχή της μεσογείου. Σύμφωνα με τους Abou-Hadid et al., [16], η θέρμανση πρέπει να αυξάνει την ποιότητα, την ποσότητα και την πρωιμότητα της παραγωγής ώστε να καλύπτει τα επενδυτικά και λειτουργικά έξοδα της. Η χρησιμοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας είναι περιορισμένη κυρίως λόγω οικονομικών παρά τεχνικών προβλημάτων. Μερικά απλά παθητικά ηλιακά συστήματα με σωλήνες νερού για αποθήκευση της θερμότητας, [17], μπορούν να εφαρμοστούν με μειωμένη όμως αποτελεσματικότητα όταν αυξάνεται η βλάστηση. Η θέρμανση ενός θερμοκηπίου δεν είναι τεχνικό πρόβλημα. Είναι γνωστό πώς μπορεί να θερμανθεί ένα θερμοκήπιο με συμβατικά καύσιμα ή με εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Το θέμα είναι η απόφαση για χρήση ενός συστήματος θέρμανσης και αυτό θα γίνει με οικονομικά κριτήρια.

#### Ψύξη

Αντιπροσωπεύει τον σημαντικότερο παράγοντα στη ρύθμιση του μικροκλίματος. Αρκετές μέθοδοι είναι διαθέσιμες:

- Στατικός ή δυναμικός αερισμός.
- Δροσισμός (συστήματα υγρής παρειάς, υδρονέφωση...).
- Σκίαση (κουρτίνες, άσπρισμα...).

Υπάρχουν και άλλες διαθέσιμες τεχνολογίες για την ψύξη (αντλίες θερμότητας, εναλλάκτες κ. α...), όμως λόγω του υψηλού τους κόστους δεν χρησιμοποιούνται σε θερμοκήπια, ούτε και στις ανεπτυγμένες χώρες. Τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος όσο αφορά την τεχνολογία των συστημάτων ψύξης. Η επίδραση των διαφόρων συστημάτων αερισμού στο εσωτερικό περιβάλλον έχει μελετηθεί από αρκετούς ερευνητές, [18]. Πειραματικά δεδομένα του ρυθμού ανταλλαγής μέσω του αερισμού στα θερμοκήπια είναι διαθέσιμα με αποτέλεσμα να γί-

νονται κατανοητοί οι μηχανισμοί και οι παράγοντες οι οποίοι οδηγούν στην μεταφορά της ενέργειας μεταξύ θερμοκηπίου και εξωτερικού περιβάλλοντος, [19]. Τα δεδομένα αυτά επιτρέπουν την ανάπτυξη και την βαθμονόμηση προσομοιωμάτων για τον υπολογισμό του ρυθμού αερισμού αλλά και για τον καλύτερο σχεδιασμό των ανοιγμάτων αερισμού. Ο αερισμός με ανοίγματα οροφής μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός σε θερμοκήπια κατά την διάρκεια περιόδων υψηλής ακτινοβολίας, [20], και η αύξηση του ύψους των κατασκευών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τον αερισμό. Η εγκατάσταση όμως ανοιγμάτων οροφής δεν είναι εύκολη σε αυτές τις κατασκευές. Ορισμένες πρωτότυπες λύσεις για αερισμό οροφής προταθεί πρόσφατα από τους Montero J. I and Sevilla A., [21].

Η ψύξη με εξάτμιση, είναι χωρίς αμφιβολία η αποτελεσματικότερη μέθοδος, [22], ιδιαίτερα εάν η εξωτερική ατμόσφαιρα είναι ξηρή. Η τεχνολογία για την χρήση τέτοιων συστημάτων είναι διαθέσιμη, αλλά αυτή η τεχνική απαιτεί νερό πολύ καλής ποιότητας. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος της περιορισμένης χρήσης του συστήματος υδρονέφωσης με υψηλή πίεση (fog-system).

Η σκίαση είναι η έσχατη λύση για να ψύξουμε ένα θερμοκήπιο, γιατί η ψύξη μ' αυτόν τον τρόπο επηρεάζει την παραγωγή σύμφωνα με τους Cockshull et al., [23]. Εντούτοις σε ορισμένες περιπτώσεις με τη σκίαση μπορούμε να πετύχουμε καλύτερη ποιότητα. Περισσότερη γνώση σχετικά με την επίδραση της σκίασης στην παραγωγή και ποιότητα καρπών και ανθέων πρέπει να αποκτηθεί ώστε να προσδιοριστεί η κατάλληλη σκίαση.

#### **Αφύγρανση**

Η πλέον συνηθισμένη λύση, η οποία έχει υιοθετηθεί από το σύνολο των Ευρωπαϊκών καλλιέργειών, είναι η συνδυασμένη χρήση των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού, μια λύση η οποία είναι ενεργειακά και αντιοικονομική. Στα μεσογειακά θερμοκήπια η αφύγρανση γίνεται μόνο με την χρήση των συστημάτων αερισμού. Τελευταία για την αφύγρανση των θερμοκηπίων έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα υγρασκοπικά υλικά, [24].

#### **Εμπλουτισμός CO<sub>2</sub>**

Η τεχνική αυτή δεν είναι απαραίτητη για θερμοκήπια της περιοχής της μεσογείου. Οι περίοδοι που είναι δυνατός ο εμπλουτισμός σε CO<sub>2</sub> είναι πολύ μικρές λόγω των αναγκών σε αερισμό, [25]. Ουσιαστικά το πρόβλημα δεν είναι τεχνικό αλλά οικονομικό.

### **Η ΑΝΑΓΚΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΕΛΕΓΧΟ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ**

Ακόμη και με τα πιο εξελιγμένα συστήματα κλιματισμού, δεν θα ήταν δυνατός ο έλεγχος του θερμοκηπιακού μικροκλίματος χωρίς δεδομένα που να μας πληροφορούν για την συμπεριφορά του συστήματος. Το να έχουμε, συνεπώς, στην διάθεσή μας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και πληροφορίες (αισθητήρες, παρατηρήσεις του παραγωγού) είναι απαραίτητα για την διαχείριση του κλίματος του θερμοκηπίου. Δυστυχώς, ελάχιστες πληροφορίες σχετικές με κλιματικές και φυσιολογικές παραμέτρους είναι διαθέσιμες στα μεσογειακά θερμοκήπια λόγω έλλειψης αισθητήρων και σχετικών μικροεπεξεργαστών. Ετσι οι παρατηρήσεις στην καλλιέργεια και η εμπειρία των παραγωγών παραμένει μέχρι τώρα το κλειδί για τον έλεγχο του κλίματος και της συμπεριφοράς της καλλιέργειας.

Παρόλα αυτά αν λάβουμε υπόψη το συνεχώς μειούμενο κόστος των μικροεπεξεργαστών, των ηλεκτρονικών υπολογιστών και του ηλεκτρονικού εξοπλισμού, θεωρούμε ότι η φυσιολογική εξέλιξη της τεχνολογίας για τον έλεγχο του κλίματος στα μεσογειακά θερμοκήπια θα πρέπει να ακολου-

θήσει αυτή που παρατηρείται στην Βόρεια Ευρώπη. Δεν υπάρχει λόγος να θεωρούμε ότι ο έλεγχος του αερισμού σε πραγματικό χρόνο ή ο έλεγχος της άρδευσης με μικροεπεξεργαστές με βάση την ηλιακή ακτινοβολία και το έλλειμα κορεσμού είναι χρήσιμος και επωφελής μόνο για τους παραγωγούς της Βόρειας Ευρώπης. Θα είναι χωρίς αμφιβολία ακόμη πιο χρήσιμα εργαλεία στους παραγωγούς της Μεσογείου. Το πρόβλημα θεωρούμε ότι είναι περισσότερο συνδεδεμένο με την εκπαίδευση και εξάσκηση των καλλιεργητών παρά με το κόστος αυτών των τεχνολογιών.

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπάρχει ακόμη ευρύτατο πεδίο για την βελτίωση των μεσογειακών θερμοκηπίων. Τα πιο σημαντικά προβλήματα των θερμοκηπίων της μεσογειακής λεκάνης δεν είναι συνδεδεμένα με την ανάπτυξη ειδικών τεχνολογιών, καθόσον οι τεχνικές λύσεις είναι γνωστές και διαθέσιμες. Τα προβλήματα είναι συνδεδεμένα, κυρίως, με τα ακόλουθα θέματα:

- Προσαρμογή και βελτιστοποίηση της υπάρχουσας τεχνολογίας ώστε να είναι κατάλληλη για τις συνθήκες της Μεσογείου.
- Εκπαίδευση και εξάσκηση των παραγωγών, κυρίως στην απαραίτητη τεχνογνωσία για την σωστή διαχείριση του θερμοκηπιακού περιβάλλοντος.

Όσον αφορά το πρώτο θέμα και ύστερα από την προιγηθείσα ανάλυση σχετικά με τον έλεγχο του περιβάλλοντος των μεσογειακών θερμοκηπίων, τα κύρια συμπεράσματα για τις ερευνητικές προτεραιότητες, φαίνεται να είναι τα ακόλουθα:

- Βελτίωση των συστημάτων αερισμού και της διαχείρισής του.
- Βελτίωση της διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία.
- Έλεγχος της θερμοκρασίας του θερμοκηπίου με ταυτόχρονο όμως έλεγχο και της υγρασίας υπό κάλυψη.

Το δεύτερο θέμα είναι συνδεδεμένο με την μεταφορά γνώσης και τεχνολογίας στους παραγωγούς της Μεσογείου. Η εμπειρία σχετικά με την διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπίων έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια και θα πρέπει να διαχυθεί όσο πιο γρήγορα και αποτελεσματικά γίνεται. Είναι σε όλους γνωστό ότι η αποτελεσματικότητα στην διαχείριση ενός γεωργικού συστήματος, εξαρτάται πρώτα απόλα από την ικανότητα των παραγωγών να αντιληφθούν και να ελέγξουν την συνολική συμπεριφορά του συστήματος παραγωγής.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Tognoni F. and Serra G., 1982. Biological aspects of energy savings in protected cultivation. *Acta Horticulturae*, 220: 17-20.
2. Baille A., 1995. Serres plastiques, climat et production. *PHM-Revue Horticole*, 357 : 15-19.
3. Castilla N., Lopez Galvez J., 1994. Vegetable responses in improved low-plastic greenhouses. *J. Hort. Science*, 69 (5), 915-21
4. Castilla N., 1994. Greenhouses in the Mediterranean area: technological level and strategic management. *Acta Horticulturae*, 361, 44-56.
5. Challa H., Bot G. P. A., Nederhoff E. M. and van de Braak N. J., 1988. Greenhouse climate control in the nineties. *Acta Horticulturae*, 230: 459-70.
6. Baille A., 1989. Greenhouse microclimate and its management in mild winter climates. *Acta Horticulturae*, 246: 23-36.
7. Boulard T. and Baille A., 1987. Analysis of thermal performances of greenhouse as solar collector. *Energy in Agriculture*, 5 : 175-84.



8. Boulard T. and Baille A., 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of aeration and evaporative cooling. *Agric. Forest Meteorol.*, 65 : 145-57.
9. Landsberg J. J., White B. and Thorpe M. R., 1979. Computer analysis of the efficiency of evaporative cooling for glasshouse in a high energy environment. *J. agric. Engng. Res.*, 2 : 29-39. 1979
10. Bakker J. C., 1986. Measurement of canopy transpiration or evapotranspiration in greenhouses by means of a simple vapour balance model. *Agric. Forest Meteorol.*, 37 : 133-41.
11. Monteith J. L., 1973. *Principles of environmental Physics*. Arnold Ed., London, 241 pp.
12. Stanghellini C., 1987. *Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management*. Ph. D. Dissertation, Agricultural University, Wageningen, 150pp.
13. Hsiao T. C., 1990. Plant atmosphere interactions, evapotranspiration and irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, 278 : 55-66.
14. Boulard T., 1996. *Caracterisation et modelisation du climat des serres. Application a la climatisation estivale*. PhD. thesis, ENSA Montpellier, France, 121pp.
15. von Zabeltitz C., 1988. Greenhouse design for warmer climates. *Plasticulture*, 80, 4, 39-50
16. Abou-Adid A. F., El-Beltagy A. S., Mohamedien S. A., Saleh M. M. and Medany M. A., 1995. Options for simple greenhouse heating. *Acta Horticulturae*, 399: 87-93.
17. Graffiadellis M., 1986. Development of a passive solar system for heating greenhouses. *Acta Horticulturae*, 191: 245-52.
18. Fernandez J. E. and Bailey B. J., 1994. The influence of fans on environmental conditions in greenhouses. *J. agric. Engng. Res.*, 58: 201-210.
19. Kittas C., Draoui B. and Boulard T., 1995. Quantification du taux d'aeration d'une serre a ouvrant continu en toiture. *Agric. Forest Meteorology*, 69: 205-221.
20. Brun R. and Lagier J., 1985. A new greenhouse structure adapted to the mediterranean growing conditions. *Acta Horticulturae*, 170: 34-46.
21. Montero J. I. and Sevilla A., 1992. Innovative greenhouse design for warm summer climates. *Proceedings of the European Seminar "Thermie"*, Heraklion, Greece, 12-14 Nov. 1992.
22. Montero J. I., Anton A., Beil C. and Franquet A., 1990. Cooling of greenhouses with compressed air fogging nozzles. *Acta Horticulturae*, 281: 199-209.
23. Cockshull K. E., Graves C. J. and Cave C. R. J., 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *J. Hort. Science*, 67: 1-24.
24. Assaf G., Doron B. and Yogen M., 1988. Applications of latent heat converters in horticulture. *ISHS Internal Symposium*, Cambridge, 4-8 sept. 1988
25. Bellamy B. A. and Kimball B. A., 1986. CO<sub>2</sub> duration and heating credit as determined by climate. In *"Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouse Crops"*, Vol. II : 167-97.