

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ
ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΡΓΙΚΟΥ ΦΥΤΙΚΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
& ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Αριθμ. Πρωτοκ

354

Ημερομηνία

1-7-2011

**Βαθμονόμηση προσομοιώματος για τον υπολογισμό
της θερμοκρασίας του καλύμματος
και του εδάφους του θερμοκηπίου**

Αννης Νικόλαος

**Επιβλέπων:
Κ. Κίττας
Καθηγητής**





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

Αριθ. Εισ.: 9715/1
Ημερ. Εισ.: 15-09-2011
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΦΠΑΠ
2011
ANN

**Βαθμονόμηση προσομοιώματος για τον υπολογισμό
της θερμοκρασίας του καλύμματος
και του εδάφους του θερμοκηπίου**

Άννης Νικόλαος

2011



**Βαθμονόμηση προσομοιώματος για τον υπολογισμό της
θερμοκρασίας του καλύμματος
και του εδάφους του θερμοκηπίου**

Άννης Νικόλαος

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κ. Κίττας (Επιβλέπων)
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Καθηγητής
Γεωργικές Κατασκευές

Ν. Κατσούλας
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Επ. Καθηγητής
Γεωργικές Κατασκευές με
έμφαση στα Θερμοκήπια

Θ. Γέμτος
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Καθηγητής
Γεωργική Μηχανολογία

Περίληψη

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η βαθμονόμηση προσομοιώματος για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του καλύμματος και του εδάφους. Η βαθμονόμηση αυτών των δύο τμημάτων θα βοηθήσει στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου κλιματικού και κατ' επέκταση βιοφυσικού προσομοιώματος. Τα αποτελέσματα μπορούν να βοηθήσουν στην καλύτερη λειτουργικότητα του θερμοκηπίου και την καλύτερη αποδοτικότητά του σε παραγωγή και ποιότητα, παράλληλα με μείωση κόστους για απώλειες ενέργειας και φυτοπροστασία. Αρχικά, έγινε βιβλιογραφική έρευνα για να αποδοθούν οι τρόποι λειτουργίας διάφορων προσομοιωμάτων, ειδικότερα κλιματικών, πως αναπτύχθηκαν στο πέρας των ετών, αλλά και πως διαφοροποιούνται μεταξύ τους. Έπειτα, αναπτύχθηκαν κατάλληλα αυτά τα δύο επί μέρους τμήματα του κλιματικού προσομοιώματος που βαθμονομήθηκαν, δηλαδή το ισοζύγιο ενέργειας του καλύμματος και του εδάφους. Ακολούθησε αναφορά στα υλικά και μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν. Η βαθμονόμηση έγινε, αρχικά, με μετρήσεις στο θερμοκήπιο του αγροκτήματος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο και κατόπιν με επεξεργασία των μετρήσεων σε υπολογιστικά φύλλα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων έδειξε ότι υπάρχει μικρή διαφοροποίηση ανάμεσα στις μετρημένες και τις υπολογισμένες τιμές για τη θερμοκρασία του καλύμματος και του εδάφους. Επίσης, αναλύθηκε η θερμική αγωγιμότητα του αέρα, υπολογίστηκε με χρήση εμπειρικών τύπων και συγκρίθηκε με την κύρια μέθοδο που ακολουθήθηκε, δηλαδή με χρήση αδιάστατων αριθμών. Τέλος, αναφέρθηκαν προτάσεις σχετικά με το τι θα μπορούσε να βελτιωθεί και πως μπορεί η εργασία αυτή να βοηθήσει παραγωγούς και άλλους στο μέλλον.

Ευχαριστίες

Αισθάνομαι πραγματικά χαρούμενος που αυτή η πτυχιακή διατριβή ολοκληρώθηκε. Θα ήταν μεγάλη παράλειψη, όμως, να μην ευχαριστήσω δημόσια όλους αυτούς τους ανθρώπους που μου παρείχαν την πολυτιμότερη βοήθειά τους για να περατώσω αυτό το εγχείρημα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου και επιβλέποντα της εργασίας αυτής, κ. Κωνσταντίνο Κίττα, ο οποίος μέσα απ' την μεταδοτικότητα του στα μαθήματα με παρακίνησε να ασχοληθώ με τον τομέα των θερμοκηπίων. Ειδικότερα, με αυτό το ερευνητικό θέμα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για την εμπιστοσύνη και την υπομονή που κατέδειξε.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επ. Καθηγητή και μέλος του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος κ. Νικόλαο Κατσούλα. Η ενθάρρυνσή του και η υπομονή του καθώς και η προθυμία του να με βοηθήσει όταν αυτό ήταν απαραίτητο ήταν καταλυτικές για να ολοκληρωθεί με τον κατάλληλο τρόπο αυτή η πτυχιακή διατριβή.

Ιδιαίτερη ήταν η συμβολή του Διδάκτορα και συνεργάτη του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος κ. Γεώργιου Δημόκα. Ο ίδιος με βοήθησε στην κατανόηση του θέματος και στην πορεία που θα έπρεπε να ακολουθήσω. Ακόμα για τη βοήθειά του στην υλοποίηση του πειράματος και στην επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων.

Η διατριβή αυτή δε θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς την παρακολούθηση, τη διόρθωση και βαθμολόγηση των κυρίων Κ. Κίττα, Ν. Κατσούλα και Θ. Γέμτου, τους οποίους ευχαριστώ.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές που στάθηκαν δίπλα μου και με βοήθησαν όπου μπορούσαν αλλά και τους υπόλοιπους πολύ καλούς φίλους μου για την παρακίνηση και την ενθάρρυνσή τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω και να μοιραστώ τη χαρά της ολοκλήρωσης αυτής της εργασίας με τους γονείς μου και τα αδέρφια μου οι οποίοι μου συμπαραστάθηκαν και με υποστήριξαν υλικά και συναισθηματικά.

Στους φίλους μου και τον αδερφό μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1^ο. Εισαγωγή	1
1. Εισαγωγή	2
1.1. Γενική Εισαγωγή	2
1.2. Διαχείριση θερμοκηπίων	4
1.3. Σκοπός και δομή της εργασίας	5
Κεφάλαιο 2^ο. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	7
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	8
2.1. Εισαγωγή	8
2.2 Τύποι Προσομοιώματων	9
2.3. Προσομοιώματα	10
Κεφάλαιο 3^ο. Ανάπτυξη Προσομοιώματος	13
3. Ανάπτυξη Προσομοιώματος.....	14
3.1. Ανάπτυξη του κλιματικού προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε.....	14
3.2. Ισοζύγιο Ενέργειας στο Κάλυμμα του Θερμοκηπίου	14
3.2.1. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα και της καλλιέργειας, εδάφους και καλύμματος	15
3.2.2. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του περιβάλλοντος αέρα και της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος	18
3.2.3. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα και της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος	18
3.2.4. Πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στο κάλυμμα (υγροποίηση).	18
3.2.5. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του καλύμματος και του εδάφους.	20
3.2.6. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του καλύμματος.	20
3.2.7. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του καλύμματος και του ουρανού.	21
3.2.8. Ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στο κάλυμμα του θερμοκηπίου.	22

3.3 Ισοζύγιο ενέργειας του εδάφους.....	22
3.3.1 Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα και του εδάφους.....	23
3.3.2. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του καλύμματος και του εδάφους	23
3.3.3. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του εδάφους.....	24
3.3.4. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του εδάφους και του ουρανού.	25
3.3.5. Ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος.....	25
Κεφάλαιο 4^ο. Υλικά & Μέθοδοι.....	26
4. Υλικά & Μέθοδοι.....	27
4.1. Θερμοκήπιο	27
4.2. Καλλιέργεια.....	27
4.3. Εγκατάσταση της καλλιέργειας και καλλιεργητικές επεμβάσεις.....	30
4.4. Κλιματικές Μετρήσεις	30
4.4.1. Μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον	30
4.4.2 Μετρήσεις στο εσωτερικό περιβάλλον.....	31
Κεφάλαιο 5^ο. Αποτελέσματα	34
5. Αποτελέσματα	35
5.1. Βαθμονόμηση κλιματικού προσομοιώματος (SimGrec)	35
5.1.1. Υπολογισμός της θερμοκρασίας καλύμματος και εδάφους με χρήση της θεωρίας των αδιάστατων αριθμών.	36
5.1.2. Υπολογισμός της θερμοκρασίας καλύμματος με χρήση εμπειρικών τύπων	45
5.2.1. Υπολογισμός της καθαρής θερμικής ακτινοβολίας καλύμματος και εδάφους.....	55
Κεφάλαιο 6^ο. Συμπεράσματα - Συζήτηση	58
6. Συμπεράσματα – Συζήτηση	59

Κεφάλαιο 7^ο. Βιβλιογραφία	60
7. Βιβλιογραφία	61

Κεφάλαιο 1^ο. Εισαγωγή

1. Εισαγωγή

1.1. Γενική Εισαγωγή

Στην παρούσα κατάσταση διαρκούς ζήτησης φρέσκων φρούτων και λαχανικών και με την ολοένα αυξανόμενη συρρίκνωση της γης, η καλύτερη επιλογή είναι η χρήση θερμοκηπιακών μονάδων ή η προστατευμένη καλλιέργεια υπό κάλυψη ώστε η γη και οι άλλοι πόροι που χρειάζονται να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά (Aldrich and Bartok, 1989). Ουσιαστικά, η τεχνολογία των θερμοκηπίων είναι μια επανάσταση στην αγροτική παραγωγή η οποία ακολουθεί τις εμπορικές παραμέτρους ποιότητας που απαιτούνται, διατηρώντας το κέρδος για τον παραγωγό (Mahajan and Singh, 2006).

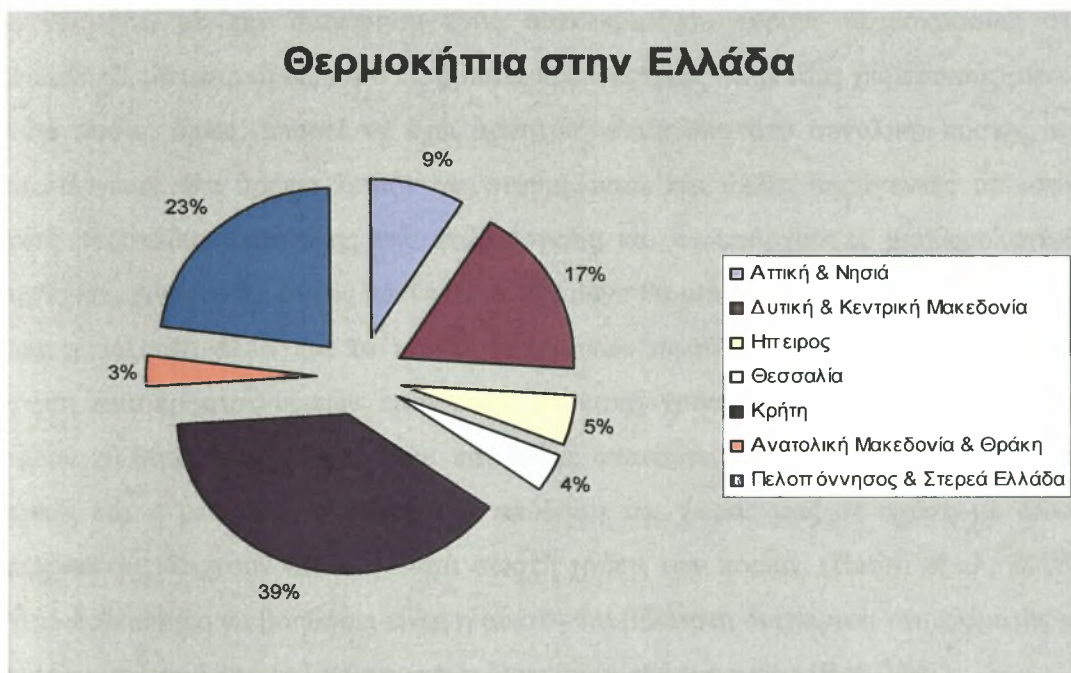
Υπάρχουν περισσότερες από 50 χώρες παγκόσμια, οι οποίες υποστηρίζουν ενεργά την εμπορική καλλιέργεια φρούτων και λαχανικών. Το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης που καλύπτουν τα θερμοκήπια παγκόσμια ανήκει στην Ασία (~50%) με χαρακτηριστικό παράδειγμα την Τουρκία, στην οποία υπάρχουν 600.000 στρέμματα. Η Ευρώπη ακολουθεί δεύτερη (~35%). Χαρακτηριστική είναι η Αλμερία στην Ισπανία, όπου υπάρχουν 250.000 στρέμματα θερμοκηπιακών καλλιεργειών, αν και άρχισαν να δημιουργούνται από το 1980 και μετά (Anastasiou and Papageorgiou, 1999). Το μεγαλύτερο σε κατανάλωση λαχανικό είναι η τομάτα με παραγωγή 99,4 εκατομμύρια τόνους ετησίως (Charagain and Wiesman, 2003).



Εικόνα 1.1. Θερμοκήπιο με τομάτες.

Η χώρα μας, κατέχει μόνο το 1% της παγκόσμιας έκτασης, 49.000 στρέμματα, εκ των οποίων τα 45.000 στρέμματα είναι λαχανοκομικά και τα 4.000 στρέμματα ανθοκομικά, με το μεγαλύτερο μέρος να ανήκει στην Κρήτη (σχήμα 1.1) (ΕΣΥΕ, 2006).

Όσον αφορά τα είδη που καλλιεργούνται, στα λαχανοκομικά κυρίαρχο ρόλο έχουν η τομάτα και το αγγούρι, με την τομάτα και στη χώρα μας να κατέχει τα πρωτεία με ετήσια παραγωγή ισοδύναμη με 234.000 τόνους (Ομιρού et al., 2009). Απ, την άλλη, στα ανθοκομικά, το μεγαλύτερο ποσοστό κατέχουν τα δρεπτά άνθη, κυρίως τριαντάφυλλα και γαρύφαλλα.



Σχήμα 1.1 Έκταση θερμοκηπίων στην Ελλάδα κατά περιοχές

Αν λάβουμε υπ' όψη το γεγονός ότι η χώρα μας διαθέτει όλες εκείνες τις προϋποθέσεις για ανάπτυξη του κλάδου, όπως την καλή εμπορική της θέση και τις ποσότητες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι αξιο απορίας πώς τα τελευταία 20 χρόνια τα θερμοκήπια στην Ελλάδα αυξήθηκαν ελάχιστα, 10.000 στρέμματα από το 1985-2005.

1.2. Διαχείριση θερμοκηπίων.

Όταν κάποιος παραγωγός σχεδιάζει την καλλιέργεια του σε ένα θερμοκήπιο έχει ως στόχο του ένα συγκεκριμένο κέρδος. Για να επιτύχει αυτό το στόχο, πρέπει να διαχειριστεί κατάλληλα διάφορους παράγοντες. Κατ' αρχάς, πρέπει να διατηρήσει το μικροκλίμα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου σε βέλτιστα επίπεδα, ιδιαίτερα τους χειμερινούς μήνες χωρίς όμως να κάνει αλόγιστη χρήση πόρων. Αυτό επιτυγχάνεται με τον σωστό προγραμματισμό των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού.

Στην Ελλάδα, η διαχείριση του κλίματος του θερμοκηπίου ταυτίζεται, λανθασμένα, με την διατήρηση ενός συγκεκριμένου εύρους θερμοκρασίας στο εσωτερικό, με επαρκή αερισμό τις πρώτες πρωινές ώρες κατά τους χειμερινούς μήνες. Κάτι τέτοιο, όμως, μπορεί να έχει αρνητικό αντίκτυπο στο συνολικό κόστος της καλλιέργειας. Θα πρέπει λοιπόν να σταθμίζονται και άλλοι παράγοντες υπ' όψη, όπως το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και οι υπάρχουσες μετεωρολογικές συνθήκες. Αν γίνεται, όντως κάτι τέτοιο, όχι μόνο θα μειώνεται το ενεργειακό κόστος που χρειάζεται, αλλά και το κόστος φαρμάκων αφού θα γίνεται πιο ορθολογική χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Η κακή χρήση πόρων που γίνεται όσον αφορά τη θέρμανση, τα φάρμακα και άλλες απαιτήσεις (λιπάσματα, ηλεκτρισμός), καθώς και η μειωμένη στρεμματική απόδοση της χώρας μας σε σχέση με άλλες ευρωπαϊκές, δείχνουν ότι δε γίνεται σωστή χρήση των πόρων. (Hatirli et al., 2005). Αυτό που μπορεί να βοηθήσει είναι η σωστή και βέλτιστη διαχείριση του κλίματος με προσανατολισμό στην ολοκληρωμένη διαχείριση της ενέργειας (Bot, 2001).

Είναι αλήθεια ότι το σοβαρότερο πρόβλημα στα θερμοκήπια είναι οι ασθένειες. Οι ιογενείς ασθένειες ήταν και παραμένουν από τους κυριότερους παράγοντες οικονομικών απωλειών στην καλλιέργεια της τομάτας (Pico et al., 1996). Έξισου σημαντικό κίνδυνο όμως αποτελούν και οι υπόλοιπες ασθένειες. Έχουν γίνει πάμπολλες εργασίες σε σχέση με αυτό το θέμα και πως μπορούν να περιοριστούν σε ικανοποιητικό βαθμό. Σε σχέση με τις μυκητολογικές ασθένειες, κάτι που μπορεί να βοηθήσει και έχει σχέση με την διαχείριση του θερμοκηπίου είναι η απομάκρυνση της υγρασίας. (Campen and Bot, 2001). Αυτό μπορεί να γίνει με διατήρηση ομογενούς μικροκλίματος σε όλα τα σημεία του θερμοκηπίου, κάτι τέτοιο, όμως, είναι πρακτικά δύσκολο. Κάτι που μπορεί να βοηθήσει και χρησιμοποιείται είναι ένας αφυγραντήρας (Campen et al., 2009).

Η ικανότητα της πρόβλεψης του μικροκλίματος μέσα σ' ένα θερμοκήπιο μπορεί να βοηθήσει τους παραγωγούς να διαχειριστούν κατάλληλα την παραγωγή τους και τους κατασκευαστές να βελτιώσουν τα συστήματα θέρμανσης και αερισμού. Το μικροκλίμα στο εσωτερικό μπορεί να διερευνηθεί με πειραματισμό και προσομοίωση. Συγκρίνοντας την με τον πειραματισμό, η προσομοίωση μπορεί να εκτελεστεί φθηνότερα και με πιο ελαστικό τρόπο και επαναλαμβανόμενες φορές (Wang and Boulard, 1999).

Εξίσου σημαντική, όμως, είναι και η διαχείριση της καλλιέργειας. Μετρώντας από πειραματικά φυτά σε ένα θερμοκήπιο μπορεί να εξακριβωθεί η επίδραση παραγόντων όπως ο αερισμός, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία στην καλλιέργειά μας, τόσο σε ποσοτικό όσο και σε ποιοτικό επίπεδο, με σύγκριση των μετρήσεων με θεωρητικά δεδομένα. (Impron et al., 2008).

Τα προσομοιώματα, που χωρίζονται σε κλιματικά και βιολογικά, μπορούν να είναι ισχυρά εργαλεία που μπορούν να μας οδηγούν αξιόπιστα καθ' όλη την παραγωγική περίοδο. Μας δίνουν ακριβείς και λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε δεδομένη στιγμή καθώς και με την ανάπτυξη της καλλιέργειας, αντίστοιχα. Το κάθε προσομοίωμα χωρίζεται σε μικρότερα προσομοιώματα καθένα από τα οποία ειδικεύεται σε κάτι συγκεκριμένο.

1.3. Σκοπός και δομή της εργασίας.

Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι η βαθμονόμηση δύο επί μέρους τμημάτων ενός κλιματικού προσομοιώματος (SimGrec), μέρος ενός ολοκληρωμένου βιοφυσικού προσομοιώματος, που αφορούν τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του καλύμματος και τη θερμοκρασία του εδάφους.

Μετά από αυτήν την εισαγωγή, ακολουθεί η Βιβλιογραφική Ανασκόπηση (Κεφάλαιο 2) σχετικά με την εξέλιξη των θερμοκηπίων και των προσομοιωμάτων στη σύγχρονη εποχή.

Το Κεφάλαιο 3 (Ανάπτυξη Προσομοιώματος) αναλύει διεξοδικά τα επί μέρους τμήματα του προσομοιώματος με τα οποία ασχολήθηκε η παρούσα εργασία

Έπειτα, στο Κεφάλαιο 4 (Υλικά και μέθοδοι), γίνεται αναφορά στο πειραματικό μέρος της εργασίας: εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε και τρόποι διαχείρισης του, καλλιέργεια και καλλιεργητικές μέθοδοι, και εργαλεία μέτρησης, καταγραφής και επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων.

Στο Κεφάλαιο 5 (Αποτελέσματα) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης των τμημάτων του προσομοιώματος με τα οποία ασχολήθηκε η εργασία. Παρουσιάζεται η συγκριτική διερεύνηση που έγινε για τις πειραματικές περιόδους μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών για τη θερμοκρασία του καλύμματος και του εδάφους καθώς και για την καθαρή θερμική ακτινοβολία για κάλυμμα και έδαφος αντίστοιχα.

Στο Κεφάλαιο 6 (Συμπεράσματα), παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτή την εργασία, αλλά γίνονται και προτάσεις για την εξέλιξη προσομοιωμάτων αλλά και για την διαχείριση των θερμοκηπίων.

Κατόπιν, στο Κεφάλαιο 7 (Συζήτηση – Προοπτικές), αναφέρονται οι προοπτικές και προτάσεις πάνω στο θέμα με το οποίο ασχολήθηκε η εργασία, σχετικά με το τι θα μπορούσε να προστεθεί αλλά και να βελτιωθεί.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 8 (Βιβλιογραφία), αναφέρονται οι βιβλιογραφικές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν.

Κεφάλαιο 2°. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1. Εισαγωγή

Η βιβλιογραφία όσον αφορά τα θερμοκήπια είναι πολύ εκτεταμένη. Σ' ένα βάθος χρόνου 2000 ετών, τα θερμοκήπια εξελίχθηκαν, από τις πρώτες μορφές τους σε τεχνολογικά θαύματα. Κατά την εποχή του Τιβέριου στην αρχαία Ρώμη, σε ειδικά διαμορφωμένες εγκαταστάσεις καλλιεργούσαν ένα είδος φρούτου που έμοιαζε με αγγούρι, ώστε να μπορούν να το έχουν καθημερινά οι άρχοντες της εποχής (Janick et al., 2007). Τον 13^ο αιώνα εμφανίζονται πιο σύγχρονα θερμοκήπια (βοτανικοί κήποι) στην Ιταλία, τα οποία φιλοξενούσαν διάφορα τροπικά φυτά. Αργότερα, τον 19^ο αιώνα, έχουμε αύξηση των θερμοκηπίων διεθνώς με θερμοκήπια να κατασκευάζονται στην Αγγλία, την Ολλανδία και σε άλλες χώρες της Ευρώπης αλλά και σε χώρες της Ασίας, όπως την Ιαπωνία. Από τότε έχουν εξελιχθεί σε εγκαταστάσεις τελευταίας τεχνολογίας, όπως για παράδειγμα το πρόγραμμα Εδέμ (The Eden Project) στην Αγγλία.

Τα σύγχρονα θερμοκήπια, με την εξέλιξη της ψηφιακής τεχνολογίας, έχουν μετατραπεί σε βιομηχανικές μονάδες, οι οποίες μπορούν να προσφέρουν τεράστια κέρδη στους παραγωγούς τους. Η διαχείριση του θερμοκηπίου με χρήση βιοφυσικών προσομοιωμάτων έχει αρχίσει σιγά-σιγά να μπαίνει στο προσκήνιο, αν και συνεχίζει να υπάρχει αμφιβολία από μέρους των περισσότερων παραγωγών.

2.2. Τύποι Προσομοιωμάτων

Τα προσομοιώματα είναι μια αναπαράσταση ενός πραγματικού συστήματος. Τα μαθηματικά προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια χρησιμοποιούν σύνολα μαθηματικών εκφράσεων για να περιγράψουν τη συμπεριφορά διάφορων μεταβλητών.

Τα μαθηματικά προσομοιώματα χωρίζονται κυρίως σε δύο κατηγορίες, τα βιολογικά και τα κλιματικά . Αν και συχνά μας ενδιαφέρουν και οι δύο κατηγορίες, ο πειραματισμός και η επαλήθευσή τους γίνεται σε ξεχωριστό επίπεδο.

Τα βιολογικά χωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες, αρχικά σε στατιστικά και σε μηχανικά. Τα στατιστικά χρησιμοποιούν πολυωνυμικές, εκθετικές και σιγμοειδείς σχέσεις για να περιγράψουν τη σχέση μεταξύ ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών. Περιλαμβάνουν από απλά μέχρι πολύ πολύπλοκα λογισμικά τα οποία μας δίνουν πληροφορίες για ποικίλα χαρακτηριστικά και μεγέθη (Donatelli et al., 2006). Ενώ μας δίνουν χρήσιμα αποτελέσματα στην έρευνά μας, δε μας δίνουν την ακριβή σχέση αιτίου-αποτελέσματος και χρειάζεται να παγιώσουμε κάποιες συνθήκες αλλά και να συγκρίνουμε με άλλες διαθέσιμες εργασίες έρευνας πάνω σ' ένα συγκεκριμένο θέμα ώστε να αποφανθούμε γι' αυτή τη σχέση, και πάλι, μόνο όσον αφορά τις ισχύουσες στο πείραμά μας συνθήκες (Yang, 1995). Τα μηχανικά χρησιμοποιούν τις σχέσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών για να αναπαραστήσουν το σύστημα της καλλιέργειας. Το μειονέκτημα τέτοιων προσομοιωμάτων είναι το γεγονός ότι η κατασκευή τους είναι ιδιαίτερα δύσκολη και χρειάζονται συχνά πολυετείς έρευνες και πειραματισμοί για την έκφραση και την επαλήθευσή τους (Uding ten Kate, 1987). Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχουν μηχανικά που να λαμβάνουν υπ' όψη τους τον κάθε παράγοντα που μπορεί να παίζει ένα μικροσκοπικό ρόλο. Επιπλέον, χωρίζονται και σε στατικά, στα οποία ο χρόνος είναι ανεξάρτητη μεταβλητή και δυναμικά στα οποία ο χρόνος επηρεάζει άλλες μεταβλητές σε συνεχή ή διακεκομμένο ρυθμό (Frausto et al., 2003).

Τα κλιματικά προσομοιώματα χωρίζονται σε τρεις υποκατηγορίες. Τα στατικά, που αποτελούν την πιο απλή μορφή προσομοιωμάτων, τα οποία υπολογίζουν την κατανάλωση ενέργειας από τις απώλειες θερμότητας. Τα δυναμικά, τα οποία, αναλύοντας τα ενεργειακά ισοζύγια του θερμοκηπίου, μας δίνουν ακριβείς πληροφορίες για την κατανάλωση ενέργειας αλλά και για το κλίμα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου μας, ενώ το μειονέκτημά τους είναι προφανώς η δυσκολία χειρισμού λόγω της πολυπλοκότητάς τους αλλά και η μικρή περίοδος χρόνου την οποία δύνανται να προσομοιώνουν. Τέλος, υπάρχουν και τα ενδιάμεσα, τα οποία υπολογίζουν την κατανάλωση ενέργειας όπως τα δυναμικά χωρίς να μας δίνουν επιπρόσθετες πληροφορίες για το κλίμα αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγαλύτερο διάστημα (Bojaca et al., 2009).

2.3. Προσομοιώματα

Διάφορα προσομοιώματα έχουν δημιουργηθεί από τη δεκαετία του 1990 και μετά και το κάθε προσομοίωμα βελτιώνει τα ήδη υπάρχοντα. Το 1990 εμφανίζεται το HORTICERN (Jolliet et al., 1990), ένα στατικό προσομοίωμα το οποίο στηρίζεται στο ενεργειακό ισοζύγιο του θερμοκηπίου, όσον αφορά τις ανταλλαγές θερμότητας. Το χαρακτηριστικό του ήταν η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του τα οποία μπορούσαν να συγκριθούν με αυτά πολύπλοκων δυναμικών μοντέλων (διαφορά μικρότερη από 5%). Πιο συγκεκριμένα, υπολόγιζε την καθαρή κατανάλωση ενέργειας με βάση τις μεικτές θερμικές απαιτήσεις, τον τύπο και την κατασκευή του θερμοκηπίου και τον τρόπο και χρόνο χρήσης του. Έπειτα, υπολογιζόταν το ποσοστό συνεισφοράς χρήσιμης ηλιακής ενέργειας στις θερμικές απαιτήσεις. Κατόπιν, αφαιρούσε το ποσοστό συνεισφοράς της καθαρής ηλιακής ενέργειας από τις θερμικές απαιτήσεις και διαιρούσε το αποτέλεσμα με την αποδοτικότητα του συστήματος θέρμανσης για να μας δώσει το τελικό αποτέλεσμα.

Το 1993, παρουσιάζεται το HOTRITRANS (Jolliet, 1993), μια επέκταση του HOTRICERN, το οποίο υπολόγιζε την υγρασία και την διαπνοή των φυτών με βάση τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες με στόχο το βέλτιστο έλεγχο της υγρασίας στα θερμοκήπια. Περιλάμβανε τις μεθόδους που ακολουθούνταν για τον αερισμό, την ύγρανση και αφύγρανση του θερμοκηπίου, την συμπύκνωση στο κάλυμμα καθώς και τη διαπνοή των φυτών. Το μοντέλο επέτρεπε τον υπολογισμό της εσωτερικής ατμοσφαιρικής πίεσης ως λειτουργία των εξωτερικών συνθηκών του θερμοκηπίου. και περιλάμβανε γραμμική σχέση ανάμεσα σ' αυτήν και τη διαπνοή των φυτών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η συμπύκνωση στο εσωτερικό του καλύμματος υπολογιζόταν από την σχετική υγρασία και κατόπιν διορθωνόταν από έναν παράγοντα που βασιζόταν στο υλικό κατασκευής. Το μοντέλο υπολόγιζε την σχετική υγρασία, την ατμοσφαιρική πίεση στο εσωτερικό, την συμπύκνωση και τη διαπνοή με πολύ καλά αποτελέσματα απόκλισης ως 8%.

Το 1991, παρουσιάστηκε κι ένα βιολογικό προσομοίωμα με το όνομα TOMGRO (Jones et al., 1991) το οποίο βελτιώθηκε αρχικά 2 χρόνια μετά (Bertin, 1993) και ξανά το 1995 (Gary et al., 1995). Το TOMGRO περιέγραφε την αύξηση σε ξηρό βάρος και την φαινολογική ανάπτυξη της τομάτας από την ημερομηνία φύτευσης μέχρι το τέλος της συγκομιδής με βάση την θερμοκρασία μέσα στο θερμοκήπιο, την ηλιακή ακτινοβολία και την περιεκτικότητα του αέρα σε CO₂ (Peet

and Willits, 1984). Τα αποτελέσματά του ήταν ικανοποιητικά, με αποκλίσεις 2-6% στα διάφορα στοιχεία που μας έδινε.

Το 1997 παρουσιάζεται το GDGCM (Gembloux Dynamic Greenhouse Climate Model), το οποίο αποτελεί ορόσημο στα προσομοιώματα καθώς περιγράφει την ανταλλαγή ενέργειας σε επτά διαφορετικά επίπεδα, τέσσερα επίπεδα εδάφους, επίπεδο καλλιέργειας, επίπεδο εσωτερικού αέρα και επίπεδο καλύμματος (Pieters and Deltour, 1997).

Το 1998 παρουσιάζεται το HORTISIM (Gijzen et al.), ένα δυναμικό και μηχανιστικό μοντέλο για τον υπολογισμό του κλίματος του θερμοκηπίου και την ανάπτυξη καλλιέργειας της τομάτας. Αποτελούνταν από 7 μικρότερα προσομοιώματα καθώς και ένα διαχειριστή. Το HORTISIM ήταν μοναδικό καθώς ενσωμάτωνε κλιματικά προσομοιώματα και προσομοιώματα για την καλλιέργεια. Υπολόγιζε πλήθος αποτελεσμάτων με βάση την ταχύτητα του αέρα, τη σχετική υγρασία, τη θερμοκρασία του εδάφους, τη θερμοκρασία του ουρανού και την ηλιακή ακτινοβολία. Τα αποτελέσματά του ήταν πολύ ικανοποιητικά τόσο στα κλιματικά δεδομένα όσο και στην καλλιέργεια.

Από τότε, προσομοιώματα έχουν συνεχίσει να αναπτύσσονται, επικεντρώνοντας σε διαφορετικά σημεία που χρίζουν υπολογισμού, για να μας δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για τον ολικό έλεγχο του θερμοκηπίου. Στόχος είναι η ανάπτυξη προσομοιώματος το οποίο θα μας δώσει τη δυνατότητα να αναπτύξουμε στρατηγικές αυξημένης ποιότητας και ποσότητας προϊόντων αλλά και εξοικονόμηση ενέργειας (Max et al., 2009).

Κάτι τέτοιο επιδίωξε να πετύχει το προσομοίωμα με το οποίο ασχοληθήκαμε (BioSiGreT). Αποτελείται από 2 υπο-προσομοιώματα, το SimGrec, το οποίο ασχολείται με το κλιματικό κομμάτι και το SimTom το οποίο ασχολείται με το βιολογικό, τα οποία αλληλεπιδρούν και συνεργάζονται μεταξύ τους (Dimokas G., 2009). Το κλιματικό προσομοίωμα (SimGrec) περιγράφει ποσοτικά τη μεταβολή της θερμοκρασίας του καλύμματος, της καλλιέργειας, του εδάφους, του αέρα και τη μεταβολή της μάζας των υδρατμών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Αυτό το κάνει χρησιμοποιώντας 5 υπο-προσομοιώματα που περιγράφουν το καθένα αντίστοιχα τα ισοζύγια ενέργειας αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας, εδάφους και ισοζύγιο μάζας του αέρα. Το SimTom υπολογίζει την αύξηση της καλλιέργειας της τομάτας και πιο αναλυτικά το σχηματισμό νέων οργάνων και τη συσσώρευση ξηρού βάρους στα κύρια μέρη του φυτού το οποίο προέρχεται από το ισοζύγιο του διοξειδίου του

άνθρακα και τον καταμερισμό του βάρους μεταξύ των οργάνων. Η καλλιέργεια αποτελείται από 7 ομάδες (αριθμό φύλλων, κόμβων βλαστού, καρπών, ξηρό βάρος φύλλων, βλαστών, καρπών και φυλλική επιφάνεια).

Κεφάλαιο 3^ο. Ανάπτυξη προσομοιώματος

3. Ανάπτυξη Προσομοιώματος

3.1. Ανάπτυξη του κλιματικού προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε

Για τον υπολογισμό του ισοζυγίου ενέργειας του θερμοκηπίου χρειάζεται να υπολογιστεί και να αναλυθεί το κάθε επιμέρους ισοζύγιο. Τα ισοζύγια στα οποία χωρίζεται το κλιματικό προσομοίωμα είναι τα:

- Ισοζύγιο ενέργειας του αέρα
- Ισοζύγιο ενέργειας της καλλιέργειας
- Ισοζύγιο ενέργειας του καλύμματος
- Ισοζύγιο ενέργειας του εδάφους

Η παρούσα πτυχιακή διατριβή ασχολήθηκε με το ισοζύγιο ενέργειας του καλύμματος και το ισοζύγιο ενέργειας του εδάφους.

3.2. Ισοζύγιο Ενέργειας στο Κάλυμμα του Θερμοκηπίου

Σύμφωνα με τους Pieters and Deltour (1999), η θερμοκρασία του καλύμματος υπολογίζεται από την πυκνότητα ροής θερμότητας μέσω της συναγωγής της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος με τον αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, συναρτήσει της συναγωγής της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος με τον εξωτερικό αέρα, της πυκνότητας ροής θερμότητας μέσω της συμπυκνώσεως υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια, την πυκνότητα ροής θερμότητας με θερμική ακτινοβολία μεταξύ καλύμματος και καλλιέργειας, καλύμματος και εδάφους, καλύμματος και ουρανού, καθώς και την πυκνότητα ροής που αποδίδεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας στο κάλυμμα.

$$c'_c \frac{dT_c}{dt} = \frac{A_{gr}}{A_c} * (q_{v(i,c)} - q_{v(c,e)} + q_{p(i,c)} + q_{R(s,c)} + q_{R(v,c)} - q_{R(c,sky)} + q_{S(c)}) \quad (3.1)$$

Όπου:

C'_c : θερμοχωρητικότητα

dT_c/dt : ρυθμός μεταβολής θερμοότητας στο κάλυμμα

A_{gr} : επιφάνεια θερμοκηπίου

A_c : επιφάνεια καλύμματος

$q_{v(i,c)}$: συναγωγή ανάμεσα στον εσωτερικό αέρα και στο κάλυμμα

$q_{v(c,e)}$: συναγωγή ανάμεσα στο κάλυμμα και στον εξωτερικό αέρα

$q_{p(L,c)}$: αγωγιμότητα ανάμεσα στο κάλυμμα και στον εσωτερικό αέρα που συνεπάγεται φαινόμενα αλλαγής φάσης (υγροποίηση)

$q_{R(s,c)}$: ροή της θερμικής ακτινοβολίας από το έδαφος στο κάλυμμα

$q_{R(v,c)}$: ροή της θερμικής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια στο κάλυμμα

$q_{R(c,sky)}$: ροή της θερμικής ακτινοβολίας από το κάλυμμα στον ουρανό

$q_{S(c)}$: ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από το κάλυμμα

3.2.1. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα και της καλλιέργειας, εδάφους και καλύμματος

Η συναγωγή ανάμεσα στον εσωτερικό αέρα και στο κάλυμμα υπολογίζεται από τη σχέση (Moneith and Unsworth, 1990):

$$q_{v(i,c)} = Nu\lambda \frac{(T_i - T_c)}{d} \quad (3.2)$$

$$q_{v(c,e)} = Nu\lambda \frac{(T_c - T_e)}{d} \quad (3.3)$$

$$h_v = Nu \frac{\lambda}{d} \quad (3.4)$$

Όπου:

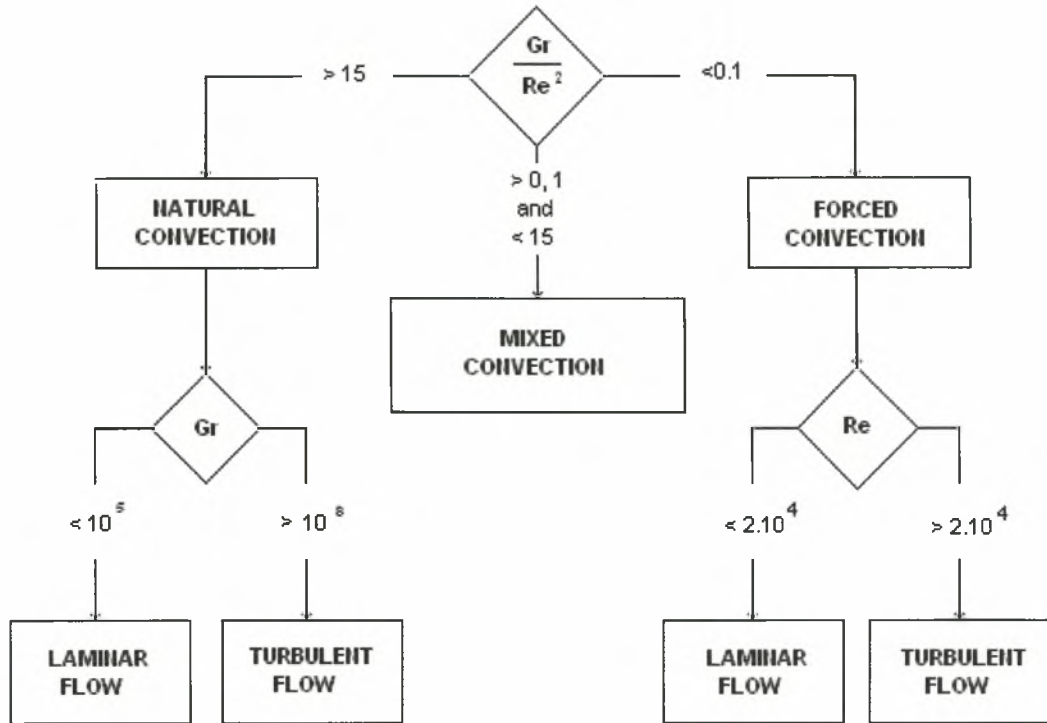
Nu = αριθμός Nusselt

λ = θερμική αγωγιμότητα

T = θερμοκρασία (i = εσωτερικός αέρας, e = εξωτερικός αέρας, c = κάλυμμα)

d = χαρακτηριστικό μήκος

Για τον υπολογισμό του αριθμού Nusselt, πρέπει να υπολογίσουμε αν έχουμε εξαναγκασμένη ή ελεύθερη συναγωγή (Ahmad, 2001), ακολουθώντας την εξής μεθοδολογία:



Σχήμα 3.1. Υπολογισμός του αριθμού Nusselt ανάλογα με το είδος ροής

Όσον αφορά τον όρο $\frac{Gr}{Re^2}$ (3.5)

Gr = αριθμός Grassholf

Re = αριθμός Reynolds

Για τον υπολογισμό του αριθμού Grassholf χρησιμοποιούμε τη σχέση (Stanghellini, 1995):

$$Gr = \frac{\beta g d^3 \Delta T}{\nu^2} \quad (3.6)$$

Όπου:

β = συντελεστής θερμικής διαστολής

g = επιτάχυνση της βαρύτητας

d = χαρακτηριστικό μήκος καλύμματος

ΔT = διαφορά θερμοκρασίας

Για τον υπολογισμό του αριθμού Reynolds χρησιμοποιούμε τη σχέση (Roy et al., 2002):

$$Re = \frac{ud}{\nu} \quad (3.7)$$

Όπου:

u = ταχύτητα του ανέμου

d = χαρακτηριστικό μήκος καλύμματος

ν '= κινηματικό ιξώδες αέρα.

Ελεύθερη συναγωγή (Miguel et al., 1998):

$$Sh = A * (Gr * Sc)^m \quad (3.8)$$

Όπου:

A και m = σταθερές που προκύπτουν από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που βρίσκουμε από τον τύπο της ροής.

Gr = αριθμός Grasshof

Sc = αριθμός Schmidt

Βεβιασμένη συναγωγή

$$Sh = B * Re^n * Sc^m \quad (3.9)$$

Όπου:

B και m = σταθερές που προκύπτουν από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που βρίσκουμε από τον τύπο της ροής.

Re = αριθμός Reynolds

Sc = αριθμός Schmidt

3.2.2. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του περιβάλλοντος αέρα και της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος

$$q_v = Nu\lambda \frac{(T_c - T_e)}{d} \quad (3.10)$$

Όπου:

Nu= αριθμός Nusselt

λ = θερμική αγωγιμότητα

T= θερμοκρασία (c= κάλυμμα, e= εξωτερικός αέρας)

d= χαρακτηριστικό μήκος

3.2.3. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα και της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος

$$q_v = Nu\lambda \frac{(T_c - T_i)}{d} \quad (3.11)$$

Όπου:

Nu= αριθμός Nusselt

λ = θερμική αγωγιμότητα

T= θερμοκρασία (c= κάλυμμα, i= εσωτερικός αέρας)

d= χαρακτηριστικό μήκος

3.2.4. Πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στο κάλυμμα (υγροποίηση).

Συμπύκνωση είναι το φαινόμενο υγροποίησης των υδρατμών σε μια επιφάνεια, στη δική μας περίπτωση στην επιφάνεια του καλύμματος, που αποκτά θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου του εξωτερικού αέρα. Η ροή υδρατμών που συγκεντρώνονται στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_{p(l,c)} = g_r * (c_i - c_c) * h_{fg} \quad (3.12)$$

Όπου:

g_r = αγωγιμότητα μεταφοράς υδρατμών στην επιφάνεια του καλύμματος

c_i = απόλυτη υγρασία του αέρα

C_c = απόλυτη υγρασία της επιφάνειας του καλύμματος

h_{fg} = λανθάνουσα θερμοκρασία συμπύκνωσης του νερού

Για τον υπολογισμό της αγωγιμότητας χρησιμοποιείται η εξής εξίσωση (Monteith and Unsworth, 1990):

$$g_r = \frac{D_v}{d_x} Sh \quad (3.13)$$

Όπου:

D_v = συντελεστής μοριακής διάχυσης υδρατμών

Sh = αριθμός Sherwood

Για τον υπολογισμό του αριθμού Sherwood, πρέπει να υπολογίσουμε αν έχουμε εξαναγκασμένη ή ελεύθερη συναγωγή, ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία που ακολουθήσαμε και για τον αριθμό Nusselt.

Ο έλεγχος για συμπύκνωση στην επιφάνεια του καλύμματος γίνεται σύμφωνα με την ανίσωση:

$$T_{cover} < dpa \text{ (σημείο δρόσου αέρα)} \quad (3.14)$$

Ο υπολογισμός του dpa γίνεται ως εξής:

$$dpa = \frac{237.7 f_{dew}}{17.27 - f_{dew}} \quad (3.15)$$

$$f_{dew} = \frac{17.27 * T_i}{237.7 + T_i} + \ln\left(\frac{RH_i}{100}\right) \quad (3.16)$$

Όπου:

RH_i = σχετική υγρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

3.2.5. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του καλύμματος και του εδάφους.

Η πυκνότητα ροής θερμότητας μεταξύ καλύμματος και εδάφους εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο σωμάτων και υπολογίζεται από τη σχέση (Pieters et al., 1994):

$$q_{R(s \rightarrow c)} = (1 - p_{cf})(1 - p_v)\sigma \frac{\varepsilon_s \varepsilon_{ci}}{(1 - \rho_s \rho_{ci})} (T_s^4 - T_c^4) + p_{cf}(1 - p_v)\sigma \frac{T_s^4 - T_c^4}{\left(\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1\right)} \quad (3.17)$$

Όπου:

p = ποσοστό ως προς την επιφάνεια του καλύμματος (cf = φιλμ υγροποίησης, v = καλλιέργεια)

ρ = ανακλαστικότητα του εδάφους στη θερμική ακτινοβολία (s = έδαφος, ci = εσωτερική επιφάνεια καλύμματος)

σ = σταθερά Stefan-Boltzmann

ε = εκπεμπικότητα του εδάφους

T = απόλυτη θερμοκρασία (c = κάλυμμα, s = έδαφος, v = καλλιέργεια)

3.2.6. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του καλύμματος.

Η ροή της θερμικής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια στο κάλυμμα εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο σωμάτων και υπολογίζεται από τη σχέση (Pieters et al., 1994):

$$q_{R(v \rightarrow c)} = (1 - p_{cf})p_v\sigma \frac{\varepsilon_v \varepsilon_{ci}}{(1 - \rho_v \rho_{ci})} (T_v^4 - T_c^4) + p_{cf}p_v\sigma \frac{T_v^4 - T_c^4}{\left(\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1\right)} \quad (3.18)$$

Όπου:

p = ποσοστό ως προς την επιφάνεια του καλύμματος (c_f = φιλμ υγροποίησης, v = καλλιέργεια)

ρ = ανακλαστικότητα του εδάφους στη θερμική ακτινοβολία (s = έδαφος, c_i = εσωτερική επιφάνεια καλύμματος)

σ = σταθερά Stefan-Boltzmann

ε = εκπεμπικότητα του εδάφους

T = απόλυτη θερμοκρασία (c = κάλυμμα, s = έδαφος, v = καλλιέργεια)

3.2.7. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του καλύμματος και του ουρανού.

Η ροή της θερμικής ακτινοβολίας από το κάλυμμα στον ουρανό εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο σωμάτων και υπολογίζεται από τη σχέση (Pieters et al., 1994):

$$q_{R(c \rightarrow sky)} = \varepsilon_{ce} \sigma (T_c^4 - T_{sky}^4) + (1 - p_{cf}) p_v \frac{\tau_c \rho_v \varepsilon_{ci}}{(1 - \rho_v \rho_{ci})} \sigma (T_c^4 - T_{sky}^4) + (1 - p_{cf})(1 - p_v) \frac{\tau_c \rho_s \varepsilon_{ci}}{(1 - \rho_s \rho_{ci})} \sigma (T_c^4 - T_{sky}^4) \quad (3.19)$$

Όπου:

ε = εκπεμπικότητα ακτινοβολίας (c_e = εξωτερική επιφάνεια καλύμματος, c_i = εσωτερική επιφάνεια θερμοκηπίου)

σ = σταθερά Stefan-Boltzmann

T = απόλυτη θερμοκρασία (c = κάλυμμα, sky = ουρανός)

p = ποσοστό (c_f = φιλμ υγροποίησης, v = καλλιέργεια) ως προς την επιφάνεια του καλύμματος

τ_c = μετάδοση υπέρυθρης ακτινοβολίας από το κάλυμμα

ρ = ανακλαστικότητα της υπέρυθρης ακτινοβολίας (v = καλλιέργεια, c_i = εσωτερική επιφάνεια καλύμματος, s = έδαφος)

3.2.8. Ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στο κάλυμμα του θερμοκηπίου.

Η ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από το κάλυμμα εξαρτάται από τη διάχυτη και την άμεση πυκνότητα ροής στον περιβάλλοντα χώρο και από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και υπολογίζεται από τη σχέση (Pieters et al., 1994):

$$q_{S(c)} = \tau_{fr} \alpha_{sc,bm} q_{Sbm} + \tau_{fr} \alpha_{sc,d} q_{Sd} + p_v \rho_{Sv} \alpha_{Sc,d} q_{Sint} + (1 - p_v) \rho_{Sv} \alpha_{Sc,d} q_{Sint} \quad (3.20)$$

Όπου:

τ_{fr} = μετάδοση υπέρυθρης ακτινοβολίας από τον σκελετό του θερμοκηπίου

α = πορρόφηση υπέρυθρης ακτινοβολίας ($\alpha_{sc,bm}$ = κάθετης, $\alpha_{sc,d}$ = διάχυτης)

q_{Sbm} = θερμική ροή της ακτινοβολίας στο έδαφος

q_{Sd} = μήκος κύματος ροής της ακτινοβολίας στο έδαφος

p_v = ποσοστό της καλλιέργειας ως προς την επιφάνεια του καλύμματος

ρ = ανακλαστικότητα της υπέρυθρης ακτινοβολίας (ρ_{Sv} = της ακτινοβολίας από την καλλιέργεια, ρ_{Ss} = της ακτινοβολίας από το έδαφος)

q_{Sint} = θερμική ροή της ακτινοβολίας από το έδαφος στο εσωτερικό περιβάλλον

3.3 Ισοζύγιο ενέργειας του εδάφους

Σύμφωνα με τους Pieters and Deltour (1999), η θερμοκρασία του εδάφους υπολογίζεται από την πυκνότητα ροής θερμότητας μέσω της συναγωγής μεταξύ αέρα και εδάφους, την πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ εδάφους και καλύμματος, εδάφους και καλλιέργειας, εδάφους και ουρανού, καθώς και τη ροή θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία.

$$\rho'_s * l_s * c_s \frac{dT_s}{dt} = -q_{v(s,i)} - q_{R(s,v)} - q_{R(s,c)} - q_{R(s,skv)} + q_{S(s)} \quad (3.21)$$

Όπου:

ρ'_s = πυκνότητα του εδάφους

c_s = ειδική θερμότητα του εδάφους

l_s = λεπτότητα στρώματος εδάφους

$q_{v(s,i)}$: συναγωγή ανάμεσα στον εσωτερικό αέρα και στο έδαφος

$q_{R(s,c)}$: ροή της θερμικής ακτινοβολίας από το κάλυμμα στο έδαφος

$q_{R(s,v)}$: ροή της θερμικής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια στο έδαφος

$q_{R(s,sky)}$: ροή της θερμικής ακτινοβολίας από το έδαφος στον ουρανό

$q_{S(s)}$: ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από το έδαφος

3.3.1 Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα και του εδάφους

Η συναγωγή ανάμεσα στον εσωτερικό αέρα και στο κάλυμμα υπολογίζεται από τη σχέση (Moneith and Unsworth, 1990):

$$q_{v(s,i)} = Nu\lambda \frac{(T_s - T_i)}{d} \quad (3.22)$$

Όπου:

Nu = αριθμός Nusselt

λ = θερμική αγωγιμότητα

T = θερμοκρασία (i = εσωτερικός αέρας, s = έδαφος)

d = χαρακτηριστικό μήκος

3.3.2. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του καλύμματος και του εδάφους

Η πυκνότητα ροής θερμότητας μεταξύ καλύμματος και εδάφους εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο σωμάτων και υπολογίζεται από τη σχέση (Pieters et al., 1994):

$$q_{R(s \rightarrow c)} = (1 - p_{cf})(1 - p_v)\sigma \frac{\epsilon_s \epsilon_{ci}}{(1 - \rho_s \rho_{ci})} (T_s^4 - T_c^4) + p_{cf}(1 - p_v)\sigma \frac{T_s^4 - T_c^4}{\left(\frac{1}{\epsilon_s} + \frac{1}{\epsilon_w} - 1\right)} \quad (3.23)$$

Όπου:

p = ποσοστό ως προς την επιφάνεια του καλύμματος (cf = φιλμ υγροποίησης, v = καλλιέργεια)

ρ = ανακλαστικότητα του εδάφους στη θερμική ακτινοβολία (s = έδαφος, ci = εσωτερική επιφάνεια καλύμματος)

σ = σταθερά Stefan-Boltzmann

ε = εκπεμπικότητα του εδάφους

T = απόλυτη θερμοκρασία (c = κάλυμμα, s = έδαφος, v = καλλιέργεια)

3.3.3. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του εδάφους

Η ροή της θερμικής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια στο έδαφος εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο σωμάτων και υπολογίζεται από τη σχέση (Pieters et al., 1994):

$$q_{R(v \rightarrow s)} = (1 - p_{cf}) p_v \sigma \frac{\varepsilon_v \varepsilon_{ci}}{(1 - \rho_v \rho_{ci})} (T_v^4 - T_s^4) + p_{cf} p_v \sigma \frac{T_v^4 - T_s^4}{\left(\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1\right)} \quad (3.24)$$

Όπου:

p = ποσοστό ως προς την επιφάνεια του καλύμματος (cf = φιλμ υγροποίησης, v = καλλιέργεια)

ρ = ανακλαστικότητα του εδάφους στη θερμική ακτινοβολία (s = έδαφος, ci = εσωτερική επιφάνεια καλύμματος)

σ = σταθερά Stefan-Boltzmann

ε = εκπεμπικότητα του εδάφους

T = απόλυτη θερμοκρασία (c = κάλυμμα, s = έδαφος, v = καλλιέργεια)

3.3.4. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του εδάφους και του ουρανού.

Η ροή της θερμικής ακτινοβολίας από το έδαφος στον ουρανό εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας των δύο σωμάτων και υπολογίζεται από τη σχέση (Pieters et al., 1994):

$$q_{R(s,sky)} = (1 - p_{cf})(1 - p_v) \frac{\tau_c \varepsilon_s}{(1 - \rho_s \rho_{cl})} \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4) \quad (3.25)$$

3.3.5. Ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος.

Η ροή θερμότητας που αποδίδει η ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος εξαρτάται από την πυκνότητα ροής της εισερχόμενης ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και την απορροφητικότητα του εδάφους και υπολογίζεται από τη σχέση (Pieters et al., 1994):

$$q_{S(s)} = ((1 - p_v) + p_v * \tau_{sv}) * a_s * Rg_m \quad (3.26)$$

Όπου:

a_s = απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από το έδαφος



Κεφάλαιο 4^ο. Υλικά & Μέθοδοι

4. Υλικά και Μέθοδοι

4.1. Θερμοκήπιο

Το θερμοκήπιο που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα βρίσκεται στο αγρόκτημα του Βελεστίου που υπάγεται στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Το αγρόκτημα βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος $39^{\circ} 44'$ και γεωγραφικό μήκος $22^{\circ} 79'$, το υψόμετρο της περιοχής είναι 85 m, και απέχει 17 km από τον Βόλο. Όσον αφορά το κλίμα, συνήθως έχουμε ζεστά και ξηρά καλοκαίρια με μέση μέγιστη θερμοκρασία τον θερμότερο μήνα 37°C και ήπιους χειμώνες με ελάχιστη μέση θερμοκρασία 4°C . Στην περιοχή πνέουν νοτιοανατολικοί ή βορειοδυτικοί άνεμοι.

Όσον αφορά το κατασκευαστικό μέρος, το θερμοκήπιο στο οποίο διεξάχθηκαν τα πειράματα είναι τροποποιημένο τοξωτό με επιφάνεια 160 m^2 (20 μέτρα μήκος και 8 μέτρα πλάτος), ύψος κορυφιά 4,1 m και ύψος ορθοστάτη 2,9 m. Το έδαφος του θερμοκηπίου ήταν καλυμμένο με αδιαφανές, διπλής όψεως, ασπρόμαυρο πλαστικό.

Για τον αερισμό, υπήρχαν πλαϊνά ανοίγματα, κατά μήκος των δύο μεγάλων πλευρών, με διαστάσεις $0.9\text{m} \times 15\text{m}$ ($\sim 13\text{ m}^2$), οπότε και επαρκούσαν για το φυσικό αερισμό (de Jong et al., 1992). Τα παράθυρα άνοιγαν ούτως ή άλλως σε ποσοστό 40% το πρωί σε καθορισμένες ώρες (9:00 πμ. - 10:00 πμ.) για λόγους αφύγρανσης. Ο έλεγχος του αερισμού το υπόλοιπο της μέρας γινόταν με μικροελεγκτή στον οποίο είχαν δοθεί τα επιθυμητά όρια (23°C - 30°C). Έτσι για μια διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού αέρα 7°C ($=30 - 23^{\circ}\text{C}$) το άνοιγμα αερισμού έπαιρνε τη μέγιστη τιμή του, ενώ για μια διαφορά ίση με 3.5°C τα παράθυρα άνοιγαν σε ποσοστό 50% της συνολικής της επιφάνειας (Mistriotis et al., 1997).

4.2. Καλλιέργεια

Για την καλλιέργεια, χρησιμοποιήθηκε υδροπονικό σύστημα, με περλίτη ως υπόστρωμα σε σάκους μήκους 1 m. Χρησιμοποιήθηκαν 136 σάκοι στο θερμοκήπιο οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε πάγκους, σε ύψος 0.5 m από το έδαφος, οι οποίοι είχαν κλίση 1-2% για την υποβοήθηση της στράγγισης.



Εικόνα 4.1 Το εσωτερικό του θερμοκηπίου μας.

Για την άρδευση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MACQU (Management and Control for Quality in Greenhouse). Η δόση άρδευσης, ο χρόνος και η ποιότητα του θρεπτικού διαλείμματος ελεγχόντουσαν από αυτό. Οι κύριες γραμμές άρδευσης (PVC, διάμετρος 32 mm) ξεκινούσαν απ' την υδροπονική κεφαλή και στη συνέχεια διακλαδίζονταν σε δευτερεύουσες γραμμές (PVC, διάμετρος 16 mm) οι οποίες έφταναν σε όλα τα φυτά. Στο τέλος των δευτερευουσών γραμμών υπήρχαν σταλλάκτες τύπου στενής οπής οι οποίοι είχαν παροχή 1 Lt/h. Στην κεντρική εγκατάσταση άρδευσης, στην αρχή κάθε κύριας γραμμής υπήρχε ηλεκτροβάννα, η οποία τροφοδοτούνταν με τάση 24 V και ενεργοποιούνταν από το MACQU, εφοδιασμένη με ηθμό για τη συγκράτηση των ανεπιθύμητων υλικών και προστασία του συστήματος από αποφράξεις των σωληνώσεων. Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του θρεπτικού διαλύματος για την καλλιέργεια μας, ήταν $2,1 \text{ mScm}^{-1}$ και το pH ήταν 5,6 με μικρές τροποποιήσεις, ανάλογα με της συνθήκες και το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας.



Εικόνα 4.2 Φυτά τομάτας στο θερμοκήπιο μας.

Η τροφοδοσία νερού και λιπασμάτων πραγματοποιούνται μέσω συστήματος στάγδην άρδευσης, το οποίο ελέγχεται αυτόματα μέσω Η/Υ. Η άρδευση βασίζεται στην ηλιακή ακτινοβολία και εκτελούνται όταν το άθροισμα της εξωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας (R_{go}) έφθανε τα 600 KJ m^{-2} (συχνότητα άρδευσης). Το σύνολο του νερού που εφαρμοζόταν ήταν 0.3 mm . Ο ρυθμός απορροής dr διατηρούνταν κοντά στο 35% . Το σύνολο του νερού που εφαρμοζόταν E (kg m^{-2}) υπολογίζονταν με τη χρήση της σχέσης:

$$E = \frac{TR}{(1 - dr)} \quad (4.1)$$

όπου Tr είναι η διαπνοή της καλλιέργειας (kg m^{-2}) η οποία εκτιμήθηκε από τη σχέση:

$$Tr = A * RGo \quad (4.2)$$

όπου Rgo είναι η ηλιακή ακτινοβολία έξω από το θερμοκήπιο (Kj m^{-2}) και $A = Kc * \text{της} * a / \lambda$, Kc είναι ο καλλιεργητικός συντελεστής, της είναι η διαπερατότητα του θερμοκηπίου στην Rgo , a είναι ο συντελεστής εξάτμισης και λ είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού (Kj kg^{-1}).

4.3. Εγκατάσταση της καλλιέργειας και καλλιεργητικές επεμβάσεις

Το φυτό που χρησιμοποιήθηκε για την καλλιέργειά μας ήταν τομάτα (*Lycopersicon lycopersicum*) Karsten ποικιλίας *Belladonna*, ποικιλία η οποία είναι αυτογονιμοποιούμενη, με χαρακτηριστικό τη μεγάλη διάρκεια ζωής στον καρπό. Η μεταφύτευση των φυτών πραγματοποιήθηκε στις 6 Οκτωβρίου 2007, στο στάδιο των έξι πραγματικών φύλλων. Η διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ήταν 135 ημέρες από τη μεταφύτευση μέχρι 25^η Φεβρουαρίου 2008.

Τα φυτά τομάτας ήταν εγκατεστημένα σε τέσσερις διπλές σειρές με αποστάσεις φύτευσης επί της γραμμής 0,37 m και μεταξύ των γραμμών της διπλής σειράς 0,75 m. Η εγκατάσταση αυτή είχε ως αποτέλεσμα πυκνότητα 2,4 φυτά/m².

Η καλλιεργητική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ήταν “κύριος βλαστός και 5 καρποί σε κάθε ταξικαρπία”. Τα φυτά υποστηρίζονταν με σπάγκο δεμένο στα οριζόντια σύρματα του θερμοκηπίου. Οι πλάγιοι βλαστοί αφαιρούνταν χειρωνακτικά μία φορά την εβδομάδα. Μετά τη συγκομιδή των καρπών κάθε ταξικαρπίας αφαιρούνταν τα υποκείμενα φύλλα, για τη μείωση της σχετικής υγρασίας στα κατώτερα μέρη του φυτού και για την αύξηση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας και τη συμβολή στην ταχύτερη ωρίμανση των καρπών. Οι κορυφές των φυτών αποκόπτονταν πριν την όγδοη ταξικαρπία. Για την υποβοήθηση της επικονίασης και της γονιμοποίησης χρησιμοποιήθηκαν εμπορικές κυψέλες με βομβύνους (*Bombus terrestris*). Στο θερμοκήπιο γινόταν συστηματικός έλεγχος των εντόμων και των ασθενειών. Τοποθετήθηκαν μπλε και κίτρινες παγίδες για τον έλεγχο του θρίπα και του αλευρώδη αντίστοιχα.

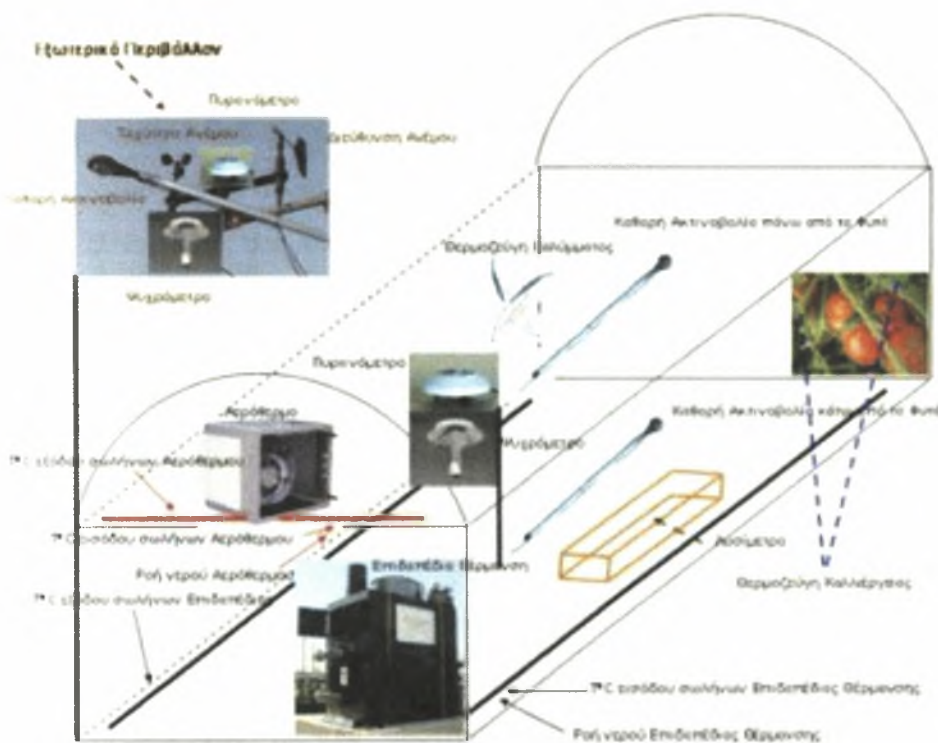
4.4 Κλιματικές Μετρήσεις

4.4.1. Μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον

Στο εξωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου καταγράφονταν:

➤ Η θερμοκρασία (T_0 , °C) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (D_0 , kPa) με αεριζόμενο ψυχρόμετρο τύπου Assman (τύπος VPI, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Το ψυχρόμετρο μετρούσε της θερμοκρασίες ξηρού και υγρού θερμομέτρου από τις οποίες υπολογίζεται το έλλειμμα κορεσμού του αέρα.

- Η ηλιακή ακτινοβολία (R_{G_o} , Wm^{-2}) με πυρανόμετρο (CM-6B, Kipp and Zonen, Delft, The Netherlands).
- Η ταχύτητα του αέρα (u , $m s^{-1}$) με ανεμόμετρο κυπέλλων (τύπος AN1-UM-3, Delta-T Devices, Cambridge, UK).
- Η διεύθυνση του αέρα (WD °) με ανεμοδείκτη (τύπος WD1-UM3-3, Delta-T Devices, Cambridge, UK).
- Η καθαρή ακτινοβολία ($R_{n,o}$, $W m^{-2}$) εξωτερικά του θερμοκηπίου με ραδιόμετρα (τύπος Q-7, REBS, Seattle, Washington).



Εικόνα 4.3 Σχηματική αναπαράσταση αισθητήρων και οργάνων μέτρησης και καταγραφής.

4.4.2. Μετρήσεις στο εσωτερικό περιβάλλον

Στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου καταγράφονται:

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

➤ Η καθαρή ακτινοβολία πάνω ($R_{n,a}$, $W m^{-2}$) και κάτω ($R_{n,b}$, $W m^{-2}$) από την καλλιέργεια με ραδιόμετρα (τύπος Q-7, REBS, Seattle, Washington). Από τη διαφορά των δύο ραδιομέτρων, πάνω και κάτω από την καλλιέργεια ($R_{n,a}-R_{n,b}$) υπολογίζεται η απορροφόμενη καθαρή ενέργεια από την καλλιέργεια $R_{n,int}$ ($W m^{-2}$).

➤ Η θερμοκρασία (10) φύλλων (T_l , $^{\circ}C$) με θερμοζεύγη χαλκού – κωνσταντάνης (τύπος Της, Omega, UK), διαμέτρου 0.1mm, τα οποία προσαρμόζονταν στην κεντρική νεύρωση των φύλλων σε φυτά στο κέντρο του θερμοκηπίου. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας της καλλιέργειας (T_l , $^{\circ}C$) υπολογίζονταν από της μέσες τιμές της θερμοκρασίας των φύλλων.

➤ Η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος οροφής (T_l , $^{\circ}C$) με θερμοζεύγη χαλκού – κωνσταντάνης (τύπος Της, Omega, UK), διαμέτρου 0.5mm. Η θερμοκρασία του καλύμματος καταγράφονταν σε δύο σημεία στο κέντρο του θερμοκηπίου από τα οποία εξάγονταν ο μέσος όρος.

➤ Η διαπνοή της καλλιέργειας με διάταξη λυσιμέτρου, τοποθετημένου στο κέντρο του θερμοκηπίου. Η συσκευή αποτελείται από μια ηλεκτρονική ζυγαριά, με δίσκο που περιλαμβάνει 3 φυτά. Παράλληλα υπάρχει ανεξάρτητο σύστημα τροφοδοσίας και στράγγισης του θρεπτικού διαλύματος. Έτσι, καθώς η εξάτμιση από το υπόστρωμα είναι μηδενική, η απώλεια βάρους που καταγράφεται στη ζυγαριά ισοδυναμεί με τη διαπνοή των φυτών.

➤ Η παροχή ενέργειας από τα αερόθερμα και από της επιδαπέδιους σωλήνες. Για κάθε ένα από τα δύο συστήματα θέρμανσης χρησιμοποιήθηκε ξεχωριστή διάταξη, έτσι ώστε να είναι εφικτή η μέτρηση της παρεχόμενης ενέργειας από τα δύο συστήματα, η οποία περιελάμβανε: ένα ροόμετρο (WZE, απλής ριπής τύπου περωτής), τοποθετημένο στην είσοδο του ζεστού νερού σε ηλεκτρονικούς παλμούς και ένα ζεύγος αισθητήρων (Thermistor 5 K Ω) και στην έξοδο του νερού επιστροφής. Η παροχή ενέργειας E_h σε W από κάθε σύστημα χωριστά υπολογίζονταν σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{th} = [pq_w Q_w (T_{in} - T_{out})] \Delta t \quad (4.3)$$

Όπου q_w είναι η ειδική θερμότητα του νερού σε $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$, Q_w είναι η παροχή του νερού σε m^3s^{-1} , T_{in} και T_{out} είναι οι θερμοκρασίες εισόδου και εξόδου του νερού σε $^\circ C$ και Δt είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο το νερό κυκλοφορεί στο σύστημα σε s.

Για την συλλογή, την αρχική επεξεργασία και την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε σύστημα συλλογής και καταγραφής δεδομένων (DL 3000, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Οι μετρήσεις που αφορούσαν στην ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καθώς και στη θερμοκρασία των φύλλων της καλλιέργειας λαμβάνονταν κάθε 10 δευτερόλεπτα (10s) και καταγράφονταν η μέση τιμή τους κάθε 10 λεπτά (10m). Όλες οι υπόλοιπες μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε 30 δευτερόλεπτα (30s) και καταγράφονταν η μέση τιμή τους κάθε 10 λεπτά (10m).

Κεφάλαιο 5^ο. Αποτελέσματα

5. Αποτελέσματα

5.1 Βαθμονόμηση κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή αφορούν μετρημένες και υπολογισμένες τιμές για τη θερμοκρασία του καλύμματος και του εδάφους του θερμοκηπίου.

Για την βαθμονόμηση του κλιματικού προσομοιώματος απαιτήθηκε ο στατιστικός προσδιορισμός των παραμέτρων των μαθηματικών εξισώσεων. Τα στοιχεία για τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από την αναζήτηση της βιβλιογραφίας. Οι κλιματικές μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την τροφοδότηση του κλιματικού προσομοιώματος, αποτελούν τα κλιματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά την πειραματική περίοδο από την 28^η Σεπτεμβρίου 2007 έως την 25^η Φεβρουαρίου 2008. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση του βιολογικού προσομοιώματος.

5.1.1 Υπολογισμός της θερμοκρασίας καλύμματος και εδάφους με χρήση της θεωρίας των αδιάστατων αριθμών.

Η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος και του εδάφους για τις πειραματικές περιόδους παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.1 (a-d), 5.3 (a-c) αντίστοιχα. Η τάση της καμπύλης για τις υπολογισμένες τιμές είναι παρόμοια με αυτή των μετρημένων. Για όλες τις πειραματικές περιπτώσεις παρατηρείται ότι η κλίση για τις περιόδους αύξησης και μείωσης της θερμοκρασίας για τις μετρημένες και υπολογισμένες τιμές είναι οι ίδιες. Τα Σχήμα 5.2 (a-d), 5.4 (a-c) παρουσιάζουν την 1:1 καμπύλη, μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών σε κάλυμμα και έδαφος αντίστοιχα.

Τα Σχήματα 5.2 (a-d), 5.5 (a-c) και ο Πίνακας 5.2 αποδεικνύουν ότι το Κλιματικό προσομοίωμα (SimGreC), έκανε ακριβή εκτίμηση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του καλύμματος και του εδάφους αντίστοιχα. Η στατιστική ανάλυση επιβεβαιώνει την 1:1 καμπύλη καθώς ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών προσδιορίστηκε μεταξύ 96-98% στο κάλυμμα και 79-99% στο έδαφος ενώ η μέση τιμή της διαφοράς των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών υπολογίστηκε από 0.3-1.5 °C στο κάλυμμα και 0.1-0.2 °C στο έδαφος. Τέλος η

ποσοστιαία διαφορά τους ήταν μικρότερη του 6% για το κάλυμμα και μικρότερη του 1% για το έδαφος για όλες τις πειραματικές περιόδους και αυτό μπορεί να χαρακτηρίσει ικανοποιητική τη συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του προσομοιωτή (SimGreC) και των πραγματικών πειραματικών δεδομένων. Ο προσομοιωτής (SimGreC) δείχνει να υπερεκτιμά τη θερμοκρασία του καλύμματος και να υποεκτιμά τη θερμοκρασία του εδάφους.

Πίνακας 5.1. Τιμές παραμέτρων του κλιματικού προσομοιώματος

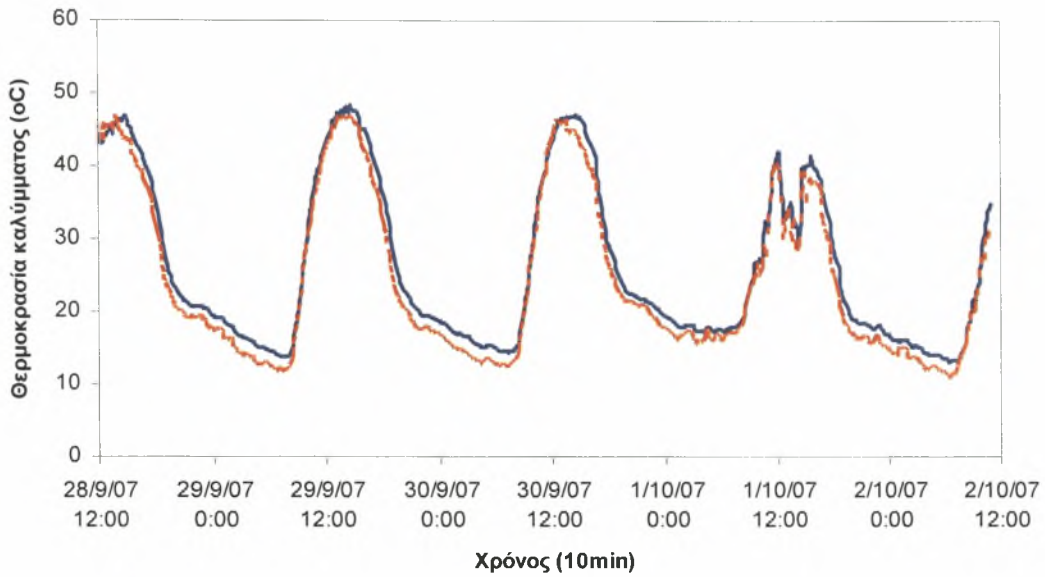
Σύμβολο	Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
A_c	επιφάνεια καλύμματος	303	m^2
A_{gr}	επιφάνεια εδάφους	160	m^2
$Blanch$	ποσοστό επικάλυψης της επιφάνειας του καλύμματος με υλικό σκίασης	0	-
c'_c	ειδική θερμότητα του καλύμματος	725	$J m^{-2} K^{-1}$
c_i	θερμοχωρητικότητα του αέρα	1000	$J kg^{-1} K^{-1}$
c_s	θερμοχωρητικότητα του εδάφους	700	$J kg^{-1} K^{-1}$
d_c	χαρακτηριστικό μήκος του καλύμματος	1.7	m
d_s	χαρακτηριστικό μήκος του εδάφους	10	m
g	επιτάχυνση βαρύτητας	9.81	$m s^{-2}$
h_{fg}	λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης του νερού	$2.46 \cdot 10^6$	$J kg^{-1}$
l_s	λεπτότητα στρώματος εδάφους	1.00	m
Pr	αδιάστατος αριθμός Prandtl	0.71	-
β	συντελεστής θερμικής διαστολής του αέρα	0.00342	K^{-1}
ϵ_{ce}	εκπεμπικότητα της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος	0.23	-
ϵ_{ci}	εκπεμπικότητα της ες. επιφάνειας του καλύμματος	0.23	-
ϵ_s	εκπεμπικότητα του εδάφους	0.40	-
ϵ_w	εκπεμπικότητα του νερού	0.97	-
ϵ_v	εκπεμπικότητα της καλλιέργειας	0.95	-
λ	θερμική αγωγιμότητα του αέρα	$25.63 \cdot 10^{-3}$	$W m^{-1} K^{-1}$
ν	κινηματικό ιξώδες	$1.55 \cdot 10^{-5}$	$m^2 s^{-1}$
ρ	πυκνότητα αέρα	1.25	$kg m^{-3}$
ρ_{ce}	ανακλαστικότητα της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος	0.07	-
ρ_{ci}	ανακλαστικότητα της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος	0.07	-
ρ_s	ανακλαστικότητα του εδάφους στη θερμική ακτινοβολία	0.85	-
ρ'_s	πυκνότητα του εδάφους	1300	$kg m^{-3}$
ρ_{ss}	ανακλαστικότητα του εδάφους στην ηλιακή ακτινοβολία	0.20	-
ρ_{sv}	ανακλαστικότητα της καλλιέργειας στην ηλιακή ακτινοβολία	0.20	-
ρ_v	ανακλαστικότητα της καλλιέργειας	0.22	-
σ	σταθερά του Steffan-Boltzmann	$5.67 \cdot 10^{-8}$	$W m^{-2} K^{-4}$
τ_c	περατότητα ηλιακής ακτινοβολίας από το κάλυμμα	0.7	-
τ_{fr}	περατότητα ηλιακής ακτινοβολίας μέσω των παραθύρων	0.85	-

Πίνακας 5.2 Ο βαθμός συσχέτισης (r^2), η μέση τιμή της διαφοράς μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών (*dif*), η τυπική απόκλιση (*std*), και η ποσοστιαία διαφορά (%) για τις θερμοκρασίες αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας και εδάφους αντίστοιχα. Όπου u.e: υποεκτίμηση, o.e: υπερεκτίμηση.

<i>Πειραματική περίοδος</i>	<i>Θερμοκρασία Καλύμματος</i>				
	<i>r²</i>	<i>dif</i>	<i>std</i>	<i>%</i>	<i>est</i>
1 ⁿ	0.99	1.5	0.9	6.0	o.e.
2 ⁿ	0.97	1.3	1.0	6.0	o.e.
3 ⁿ	0.96	0.3	0.9	2.0	o.e.
4 ⁿ	0.96	0.6	2.0	4.0	u.e.

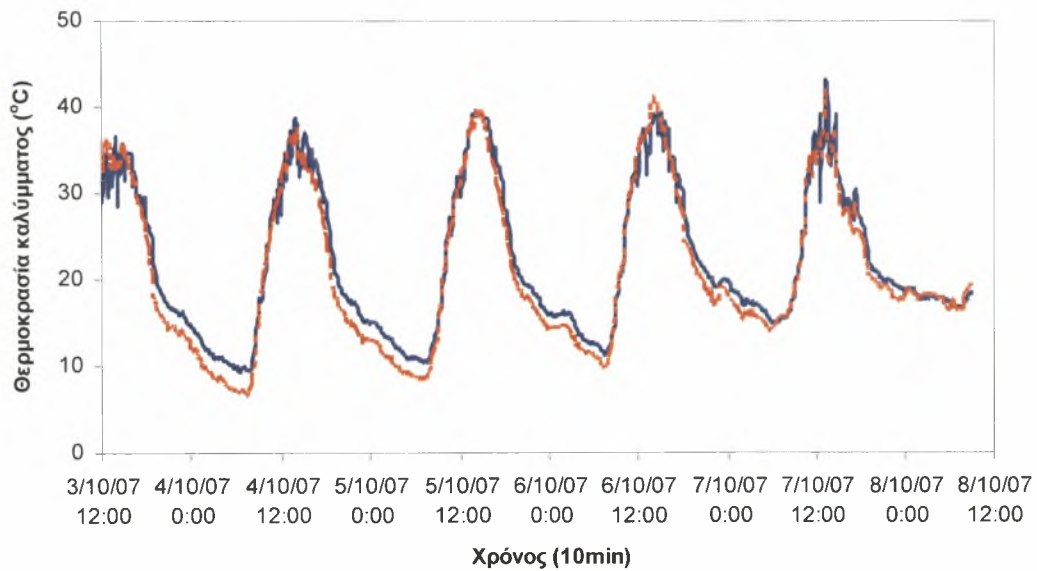
<i>Πειραματική περίοδος</i>	<i>Θερμοκρασία Εδάφους</i>				
	<i>r²</i>	<i>dif</i>	<i>std</i>	<i>%</i>	<i>est</i>
1 ⁿ	0.99	0.1	0.1	1.0	u.e.
2 ⁿ	0.90	0.1	0.1	1.0	u.e.
3 ⁿ	0.88	0.2	0.2	1.0	u.e.

(a)



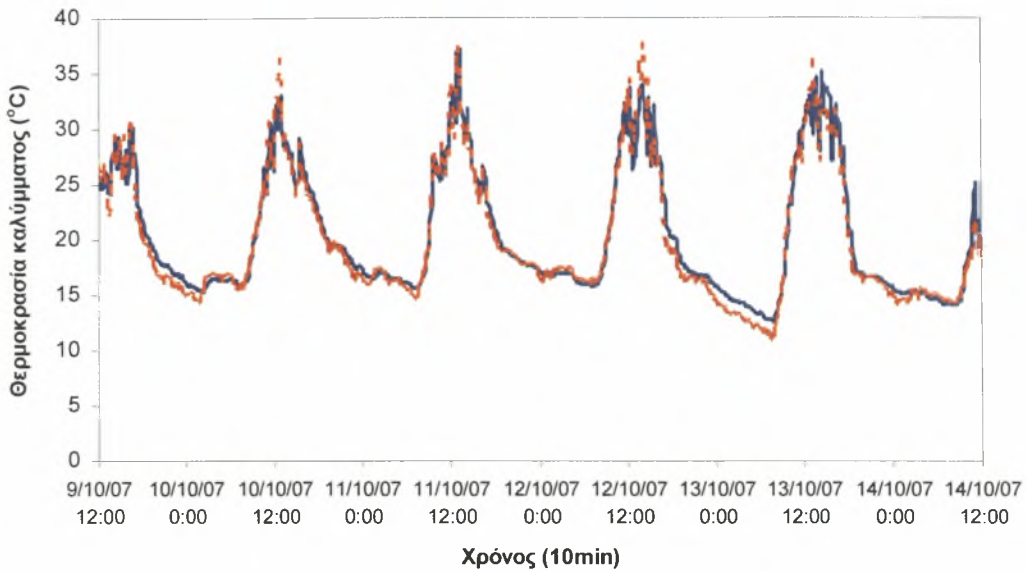
Σχήμα 5.1 (a). Διακύμανση των μετρημένων (---) και υπολογισμένων (—) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος για την πρώτη πειραματική περίοδο.

(b)



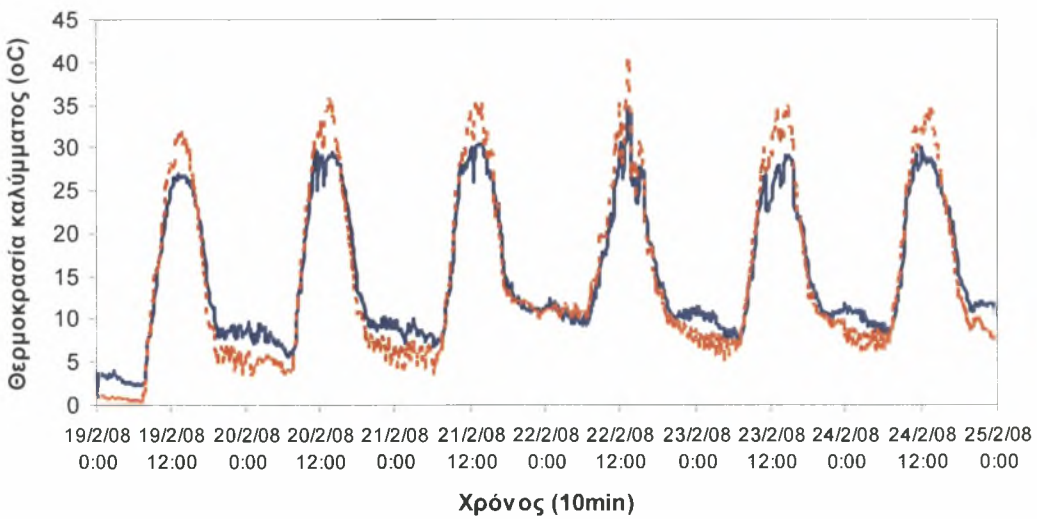
Σχήμα 5.1 (b). Διακύμανση των μετρημένων (---) και υπολογισμένων (—) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος για τη δεύτερη πειραματική περίοδο.

(c)



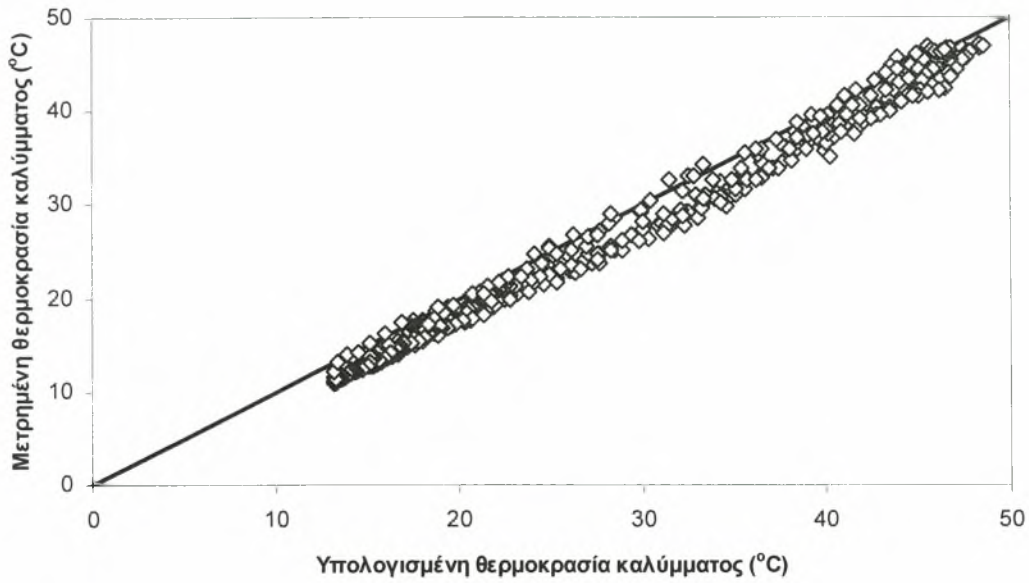
Σχήμα 5.1 (c). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος για τη τρίτη πειραματική περίοδο.

(d)



Σχήμα 5.1 (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος για την τέταρτη πειραματική περίοδο.

(a)

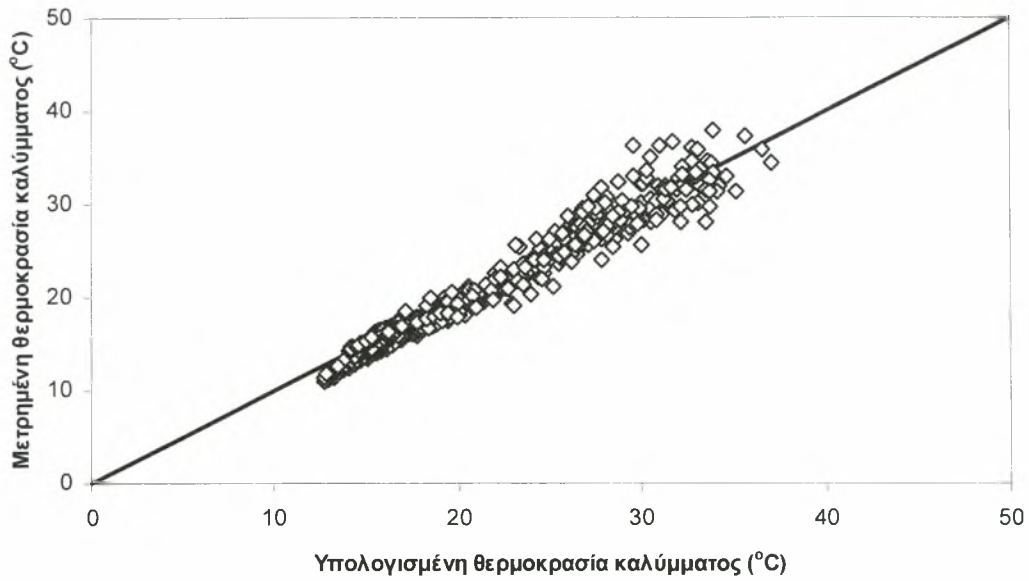


Σχήμα 5.2 (a). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για την πρώτη πειραματική περίοδο
(b)



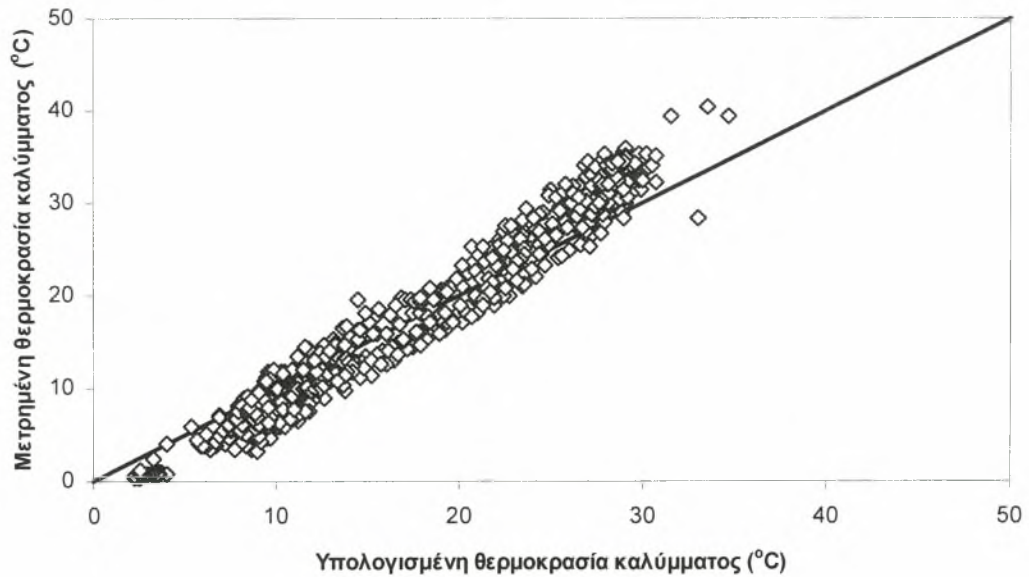
Σχήμα 5.2 (b). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για τη δεύτερη πειραματική περίοδο

(c)



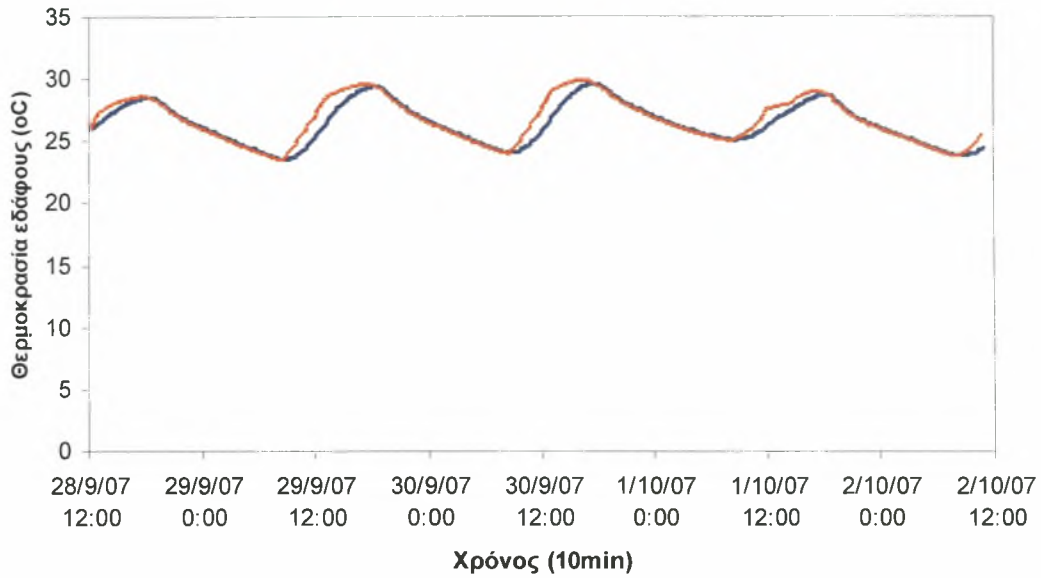
Σχήμα 5.2 (c). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για την τρίτη πειραματική περίοδο

(d)

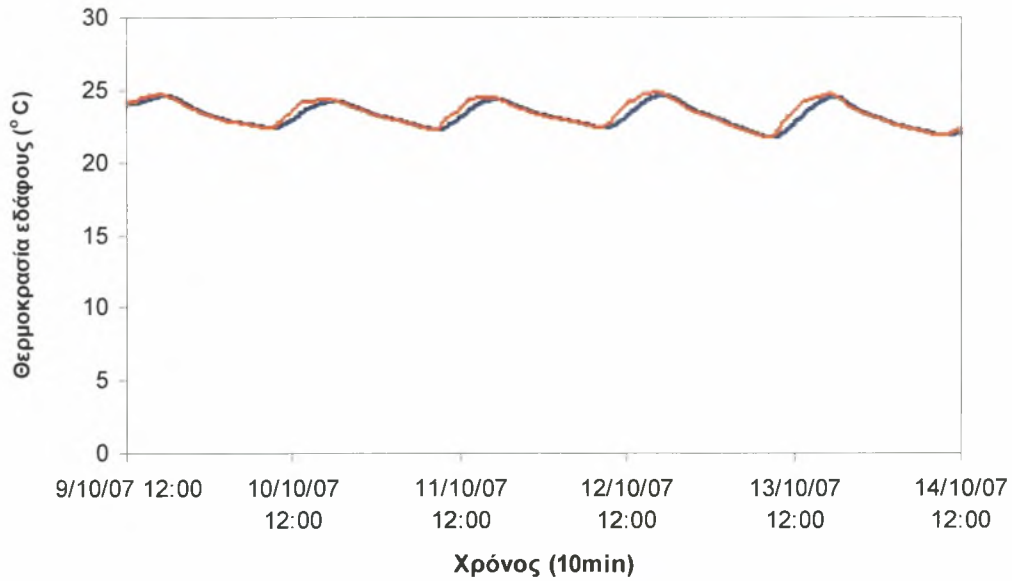


Σχήμα 5.2 (d). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για την τέταρτη πειραματική περίοδο

(a)

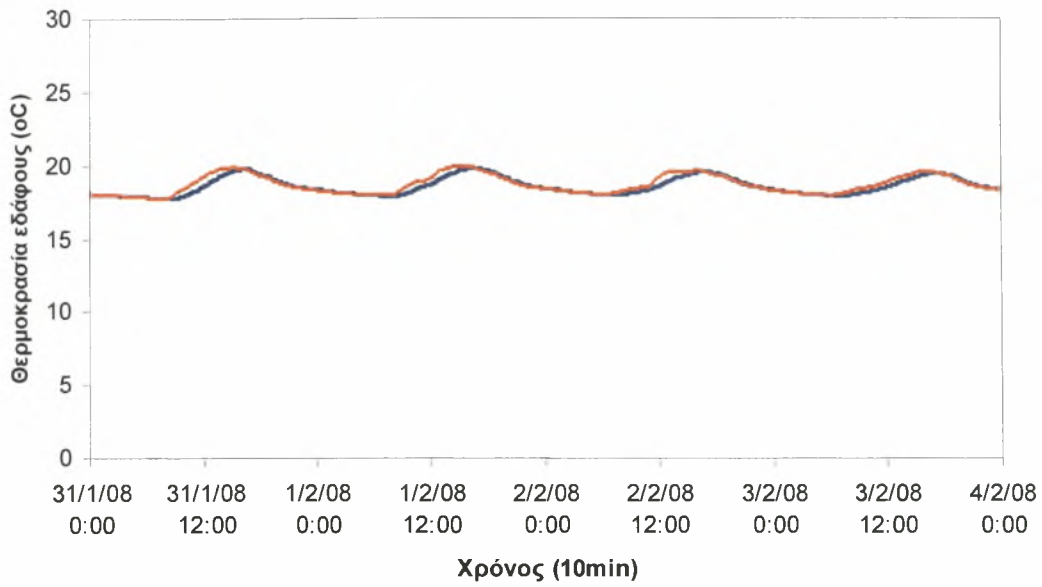


Σχήμα 5.3 (a). Διακύμανση των μετρημένων (---) και των υπολογισμένων (—) τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους για την πρώτη πειραματική περίοδο.
(b)



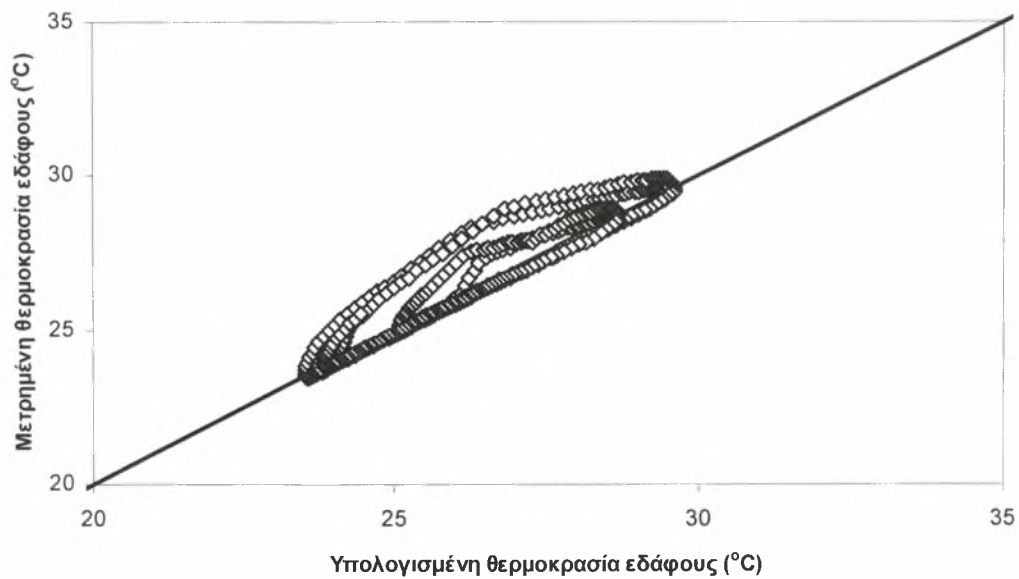
Σχήμα 5.3 (b). Διακύμανση των μετρημένων (---) και των υπολογισμένων (—) τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους για τη δεύτερη πειραματική περίοδο.

(c)



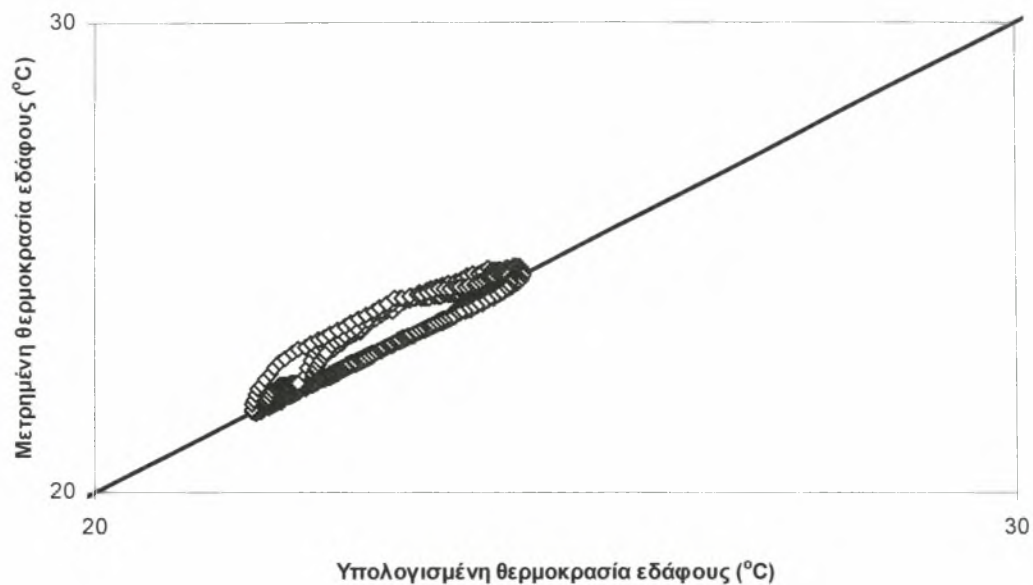
Σχήμα 5.3 (c). Διακύμανση των μετρημένων (---) και των υπολογισμένων (—) τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους για την τρίτη πειραματική περίοδο.

(a)



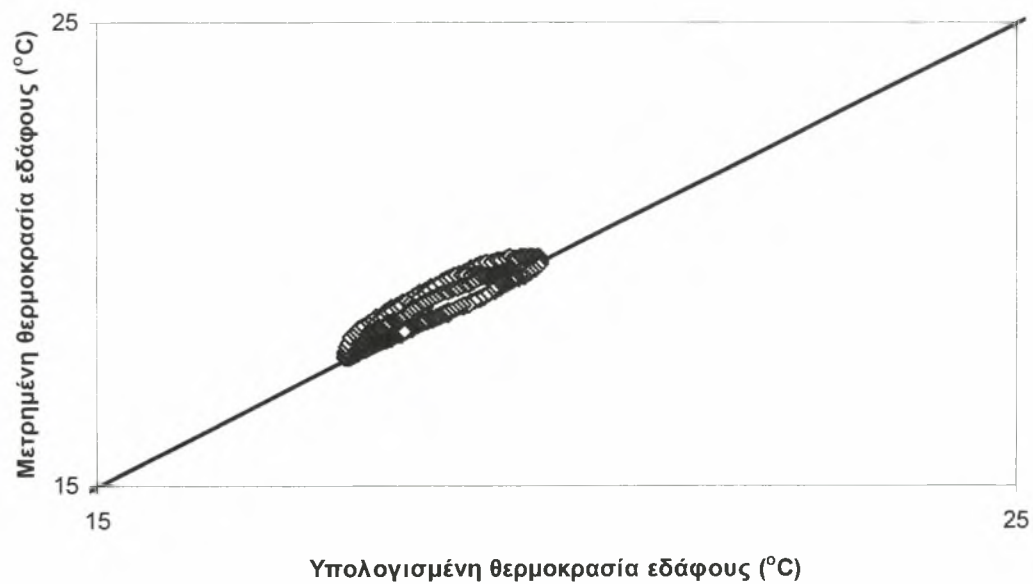
Σχήμα 5.4 (a). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του εδάφους σε (1:1) απεικόνιση, για την πρώτη πειραματική περίοδο.

(b)



Σχήμα 5.4 (b). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του εδάφους σε (1:1) απεικόνιση, για τη δεύτερη πειραματική περίοδο.

(c)



Σχήμα 5.4 (c). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του εδάφους σε (1:1) απεικόνιση, για την τρίτη πειραματική περίοδο.

5.1.2. Υπολογισμός της θερμοκρασίας καλύμματος και εδάφους με χρήση εμπειρικών τύπων για την εξωτερική θερμοκρασία του καλύμματος.

Για τον υπολογισμό της εξωτερικής θερμοκρασίας του καλύμματος έχουν διατυπωθεί στα πρόσφατα χρόνια διάφοροι εμπειρικοί τύποι οι οποίοι στηρίζονται κυρίως στην ταχύτητα του εξωτερικού αέρα.

Το 1986 ο C. Kittas υπολόγισε τη θερμική αγωγιμότητα του αέρα με τον τύπο:

$$\lambda = 1.22(T_p - T_e) + 3.12 * u^{0.8} \quad (5.1)$$

Όπου:

u = ταχύτητα του ανέμου

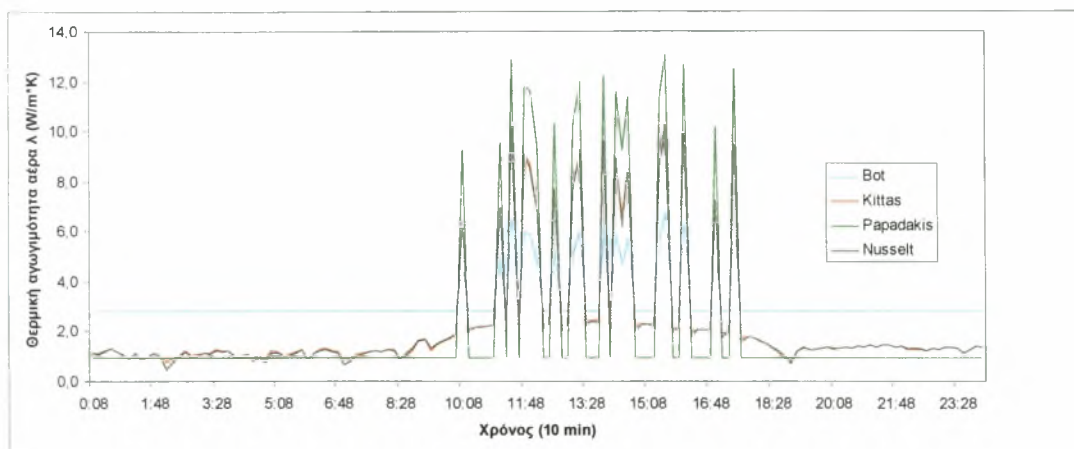
Το 1991 οι Papadakis et al υπολόγισαν τη θερμική αγωγιμότητα του αέρα με τον τύπο:

$$\lambda = 0.947 + 6.758 * u^{0.488} \quad (5.2)$$

Το 1997 οι Bot et al υπολόγισαν τη θερμική αγωγιμότητα του αέρα με τον τύπο:

$$\lambda = 2.8 + 1.2 * u \quad (5.3)$$

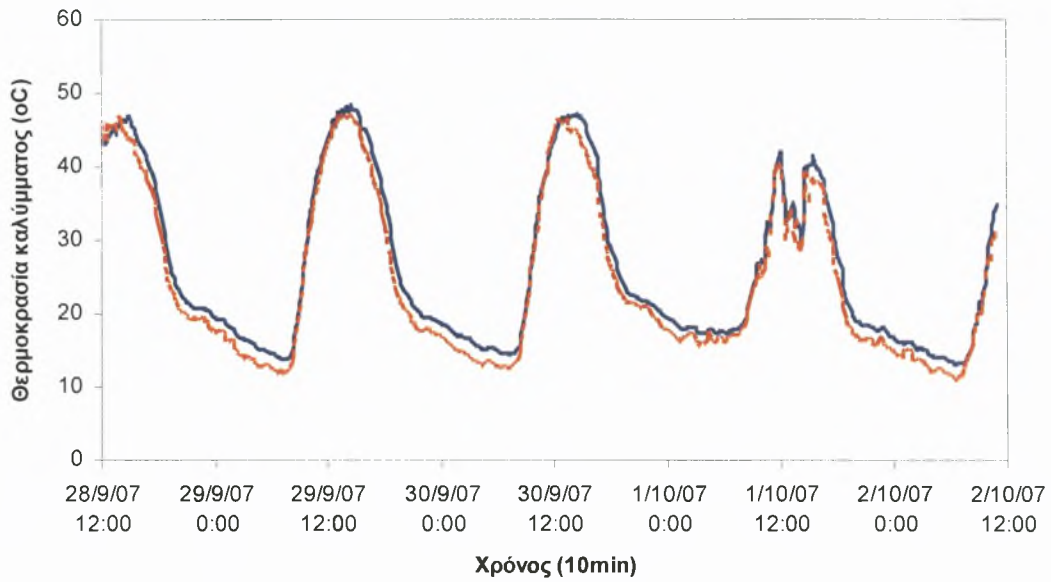
Έτσι κάναμε μια συγκριτική διερεύνηση της πολύπλοκης μεθόδου που ακολουθήσαμε με τις παραπάνω. Τα αποτελέσματα του εμπειρικού τύπου του C. Kittas ήταν σχεδόν εφάμιλλα με τα δικά μας με ελάχιστες αποκλίσεις ($s=2.41\%$). Ο εμπειρικός τύπος του Bot κυμαινόταν σε μικρότερο εύρος και του Papadakis σε μεγαλύτερο ενώ και οι 2 αυτοί τύποι έχουν ελάχιστη τιμή (2.8 W/m*K για τον Bot, 0.947 W/m*K για τον Papadakis), παρ' όλα αυτά όλες ακολουθούν το ίδιο μοτίβο.



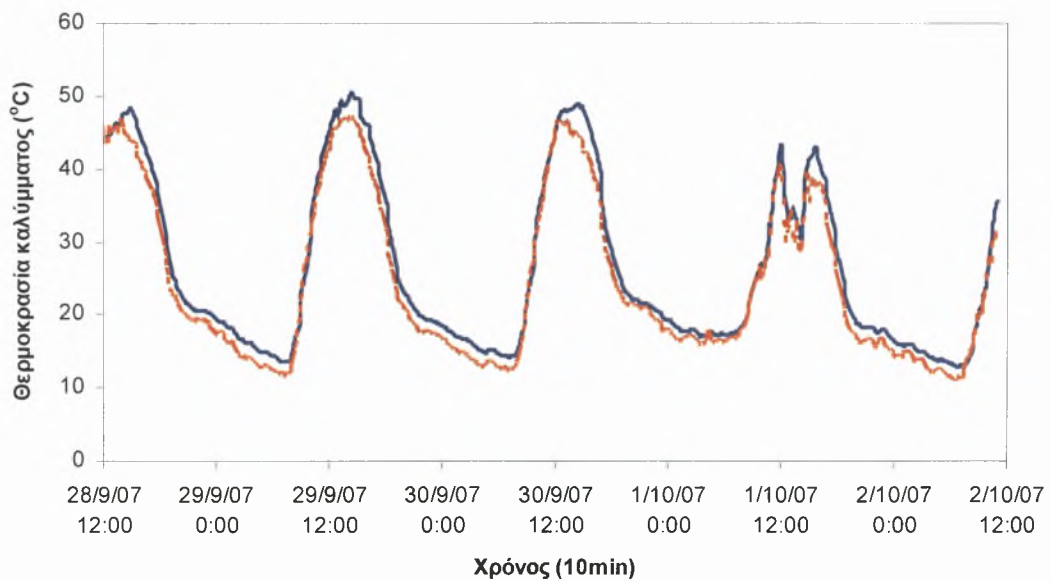
Σχήμα 5.5. Συντελεστής συναγωγής όπως προκύπτει από τη χρήση αδιάστατου αριθμού Nusselt (—) και χρήση εμπειρικών τύπων των Bot (—), Kittas (—) και Papadakis (—) στην 3^η πειραματική περίοδο για διάρκεια 23 λεπτών.

Όσον αφορά τη θερμοκρασία του καλύμματος, ακολουθεί συγκριτικό διάγραμμα της κάθε μεθόδου με τις διακυμάνσεις των τιμών και 1:1 απεικόνισή τους.

(Nusselt)

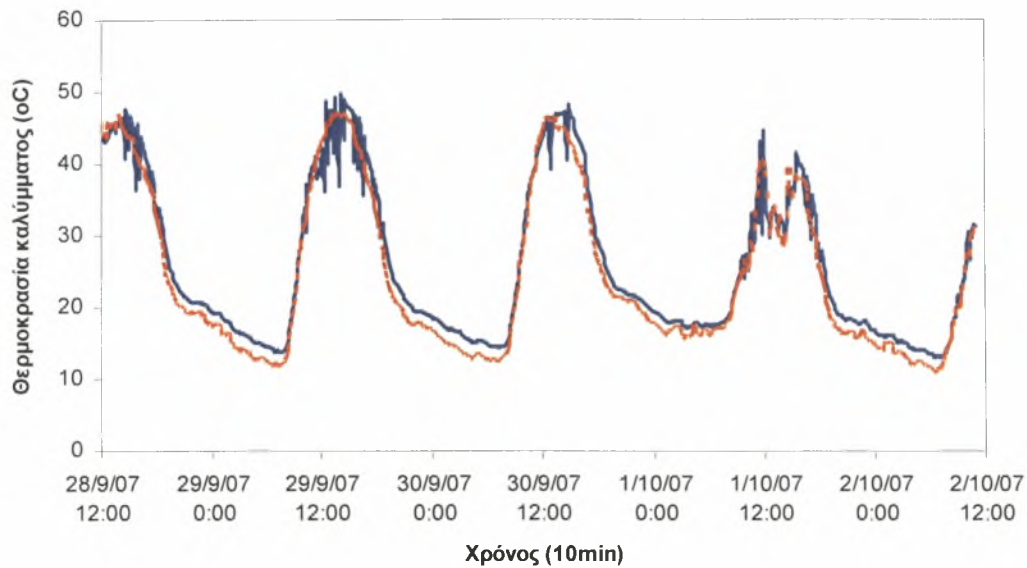


Σχήμα 5.6 (Nusselt). Διακύμανση των μετρημένων (---) και υπολογισμένων (—) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος για την πρώτη πειραματική περίοδο με χρήση αριθμού Nusselt.
(Bot)

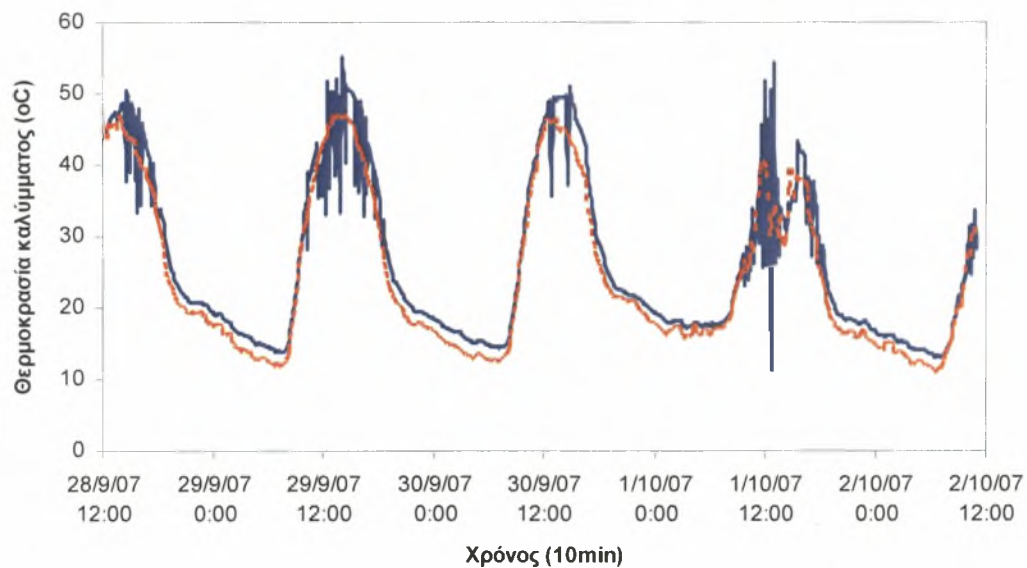


Σχήμα 5.6 (Bot). Διακύμανση των μετρημένων (---) και υπολογισμένων (—) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος για την πρώτη πειραματική περίοδο με χρήση του εμπειρικού τύπου του Bot.

(Kittas)

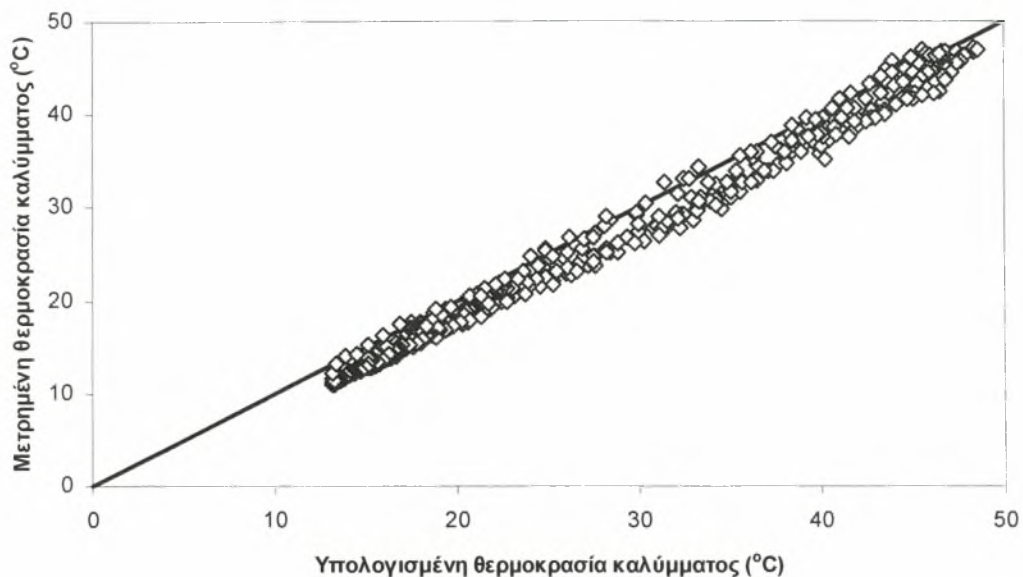


Σχήμα 5.6 (Kittas). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος για την πρώτη πειραματική περίοδο με χρήση του εμπειρικού τύπου του Kittas.
(Paradakis)



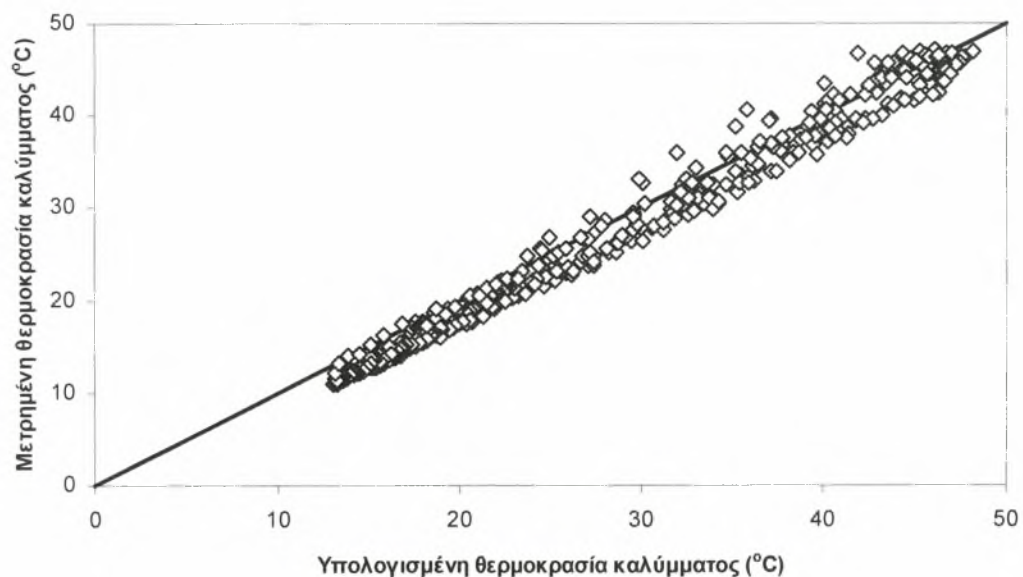
Σχήμα 5.6 (Paradakis). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος για την πρώτη πειραματική περίοδο με χρήση του εμπειρικού τύπου του Paradakis.

(Nusselt)



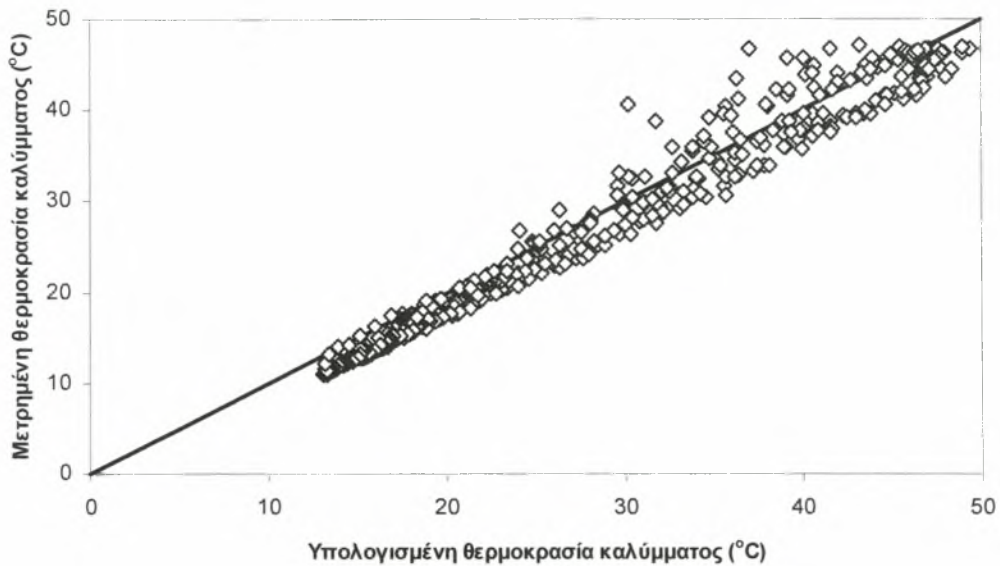
Σχήμα 5.7 (Nusselt) Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για την πρώτη πειραματική περίοδο με χρήση αριθμού Nusselt.

(Bot)

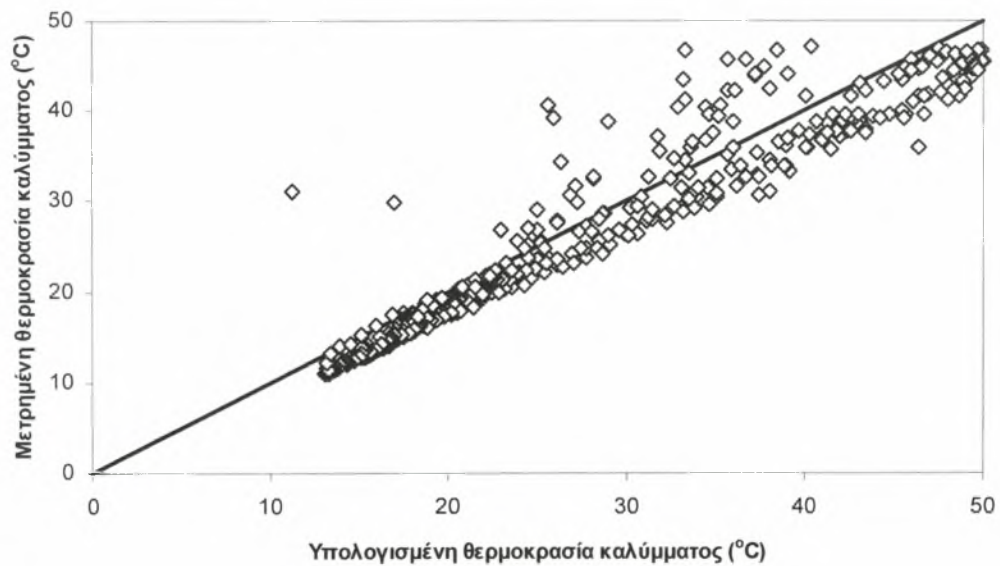


Σχήμα 5.7 (Bot) Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για την πρώτη πειραματική περίοδο με χρήση του εμπειρικού τύπου του Bot.

(Kittas)

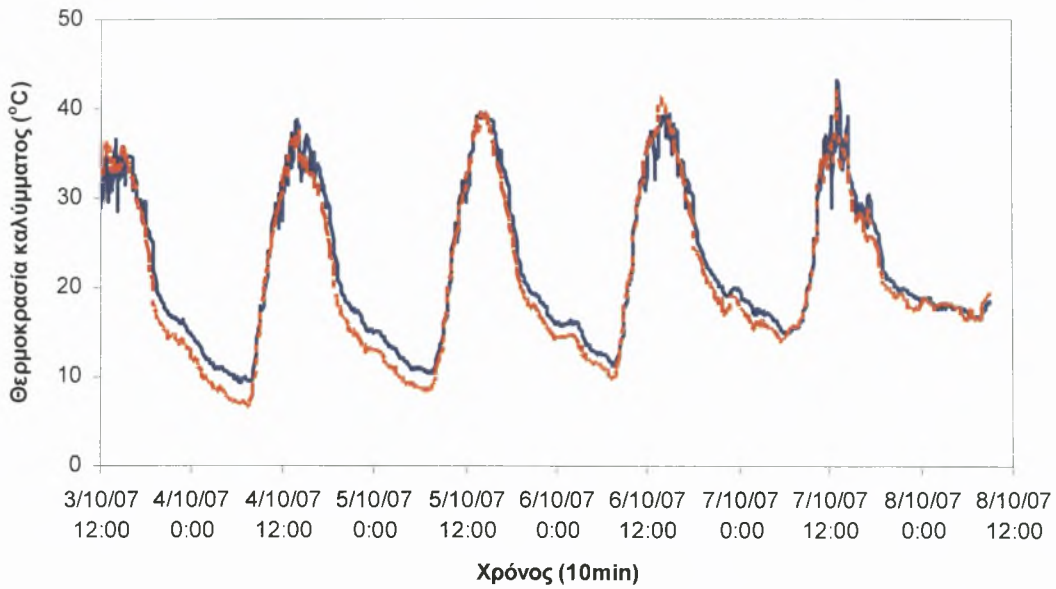


Σχήμα 5.7 (Kittas) Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για την πρώτη πειραματική περίοδο με χρήση του εμπειρικού τύπου του Kittas.
(Papadakis)



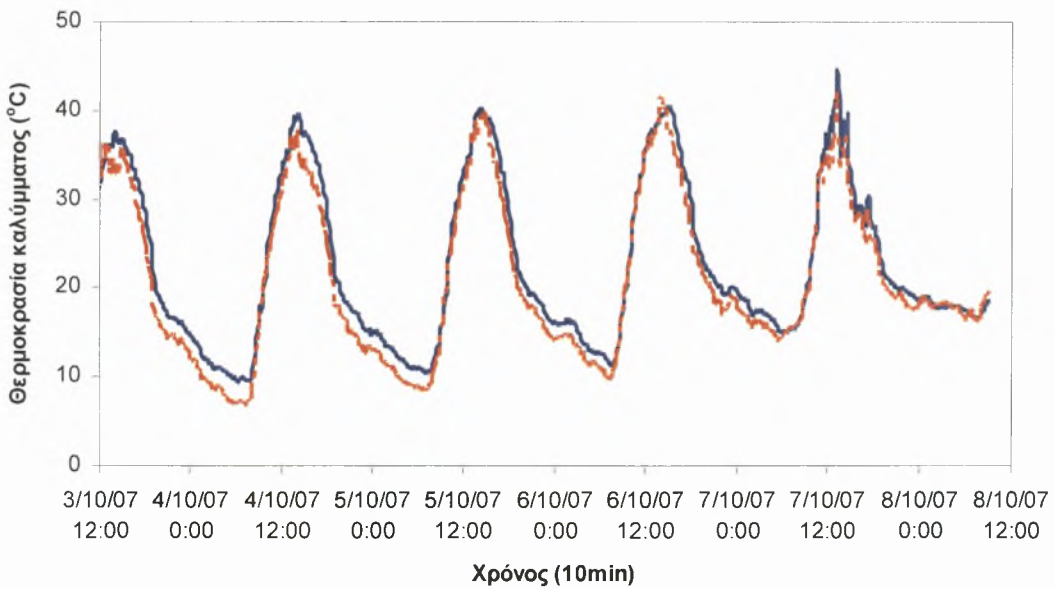
Σχήμα 5.7 (Papadakis) Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για την πρώτη πειραματική περίοδο με χρήση του εμπειρικού τύπου του Papadakis.

(Nusselt)



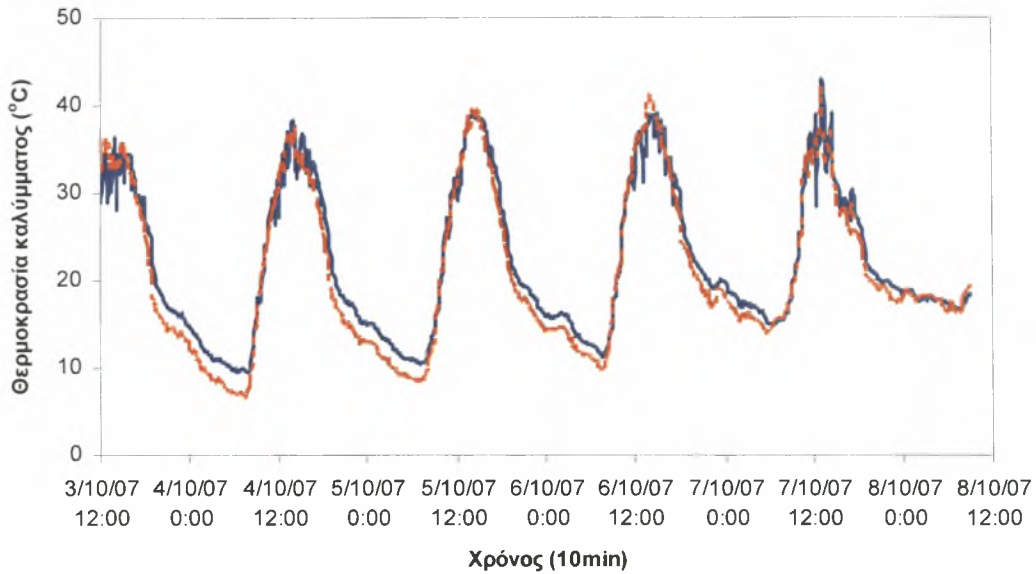
Σχήμα 5.8 (Nusselt). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος για τη δεύτερη πειραματική περίοδο με χρήση αριθμού Nusselt.

(Bot)

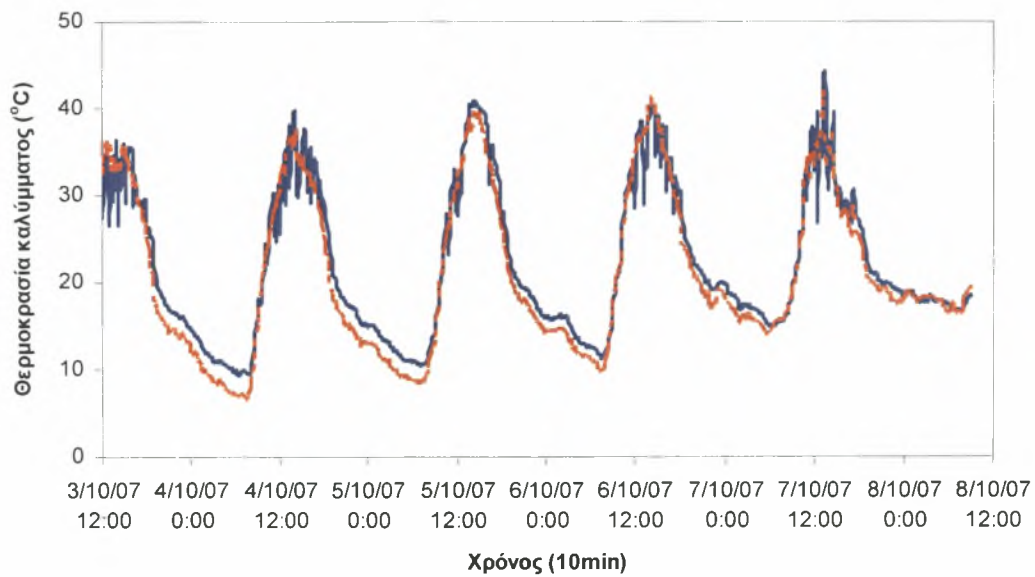


Σχήμα 5.6 (Bot). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος για τη δεύτερη πειραματική περίοδο με χρήση του εμπειρικού τύπου του Bot.

(Kittas)

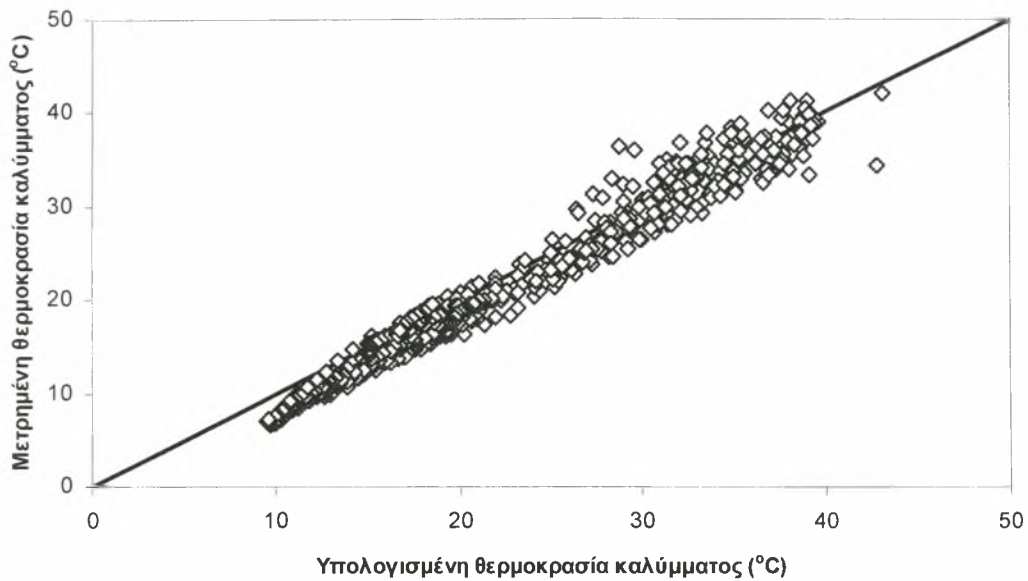


Σχήμα 5.6 (Kittas). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος για τη δεύτερη πειραματική περίοδο με χρήση του εμπειρικού τύπου του Kittas.
(Paradakis)



Σχήμα 5.6 (Paradakis). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος για τη δεύτερη πειραματική περίοδο με χρήση του εμπειρικού τύπου του Paradakis.

(Nusselt)



Σχήμα 5.7 (Nusselt) Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για την πρώτη πειραματική περίοδο με χρήση αριθμού Nusselt.

(Bot)



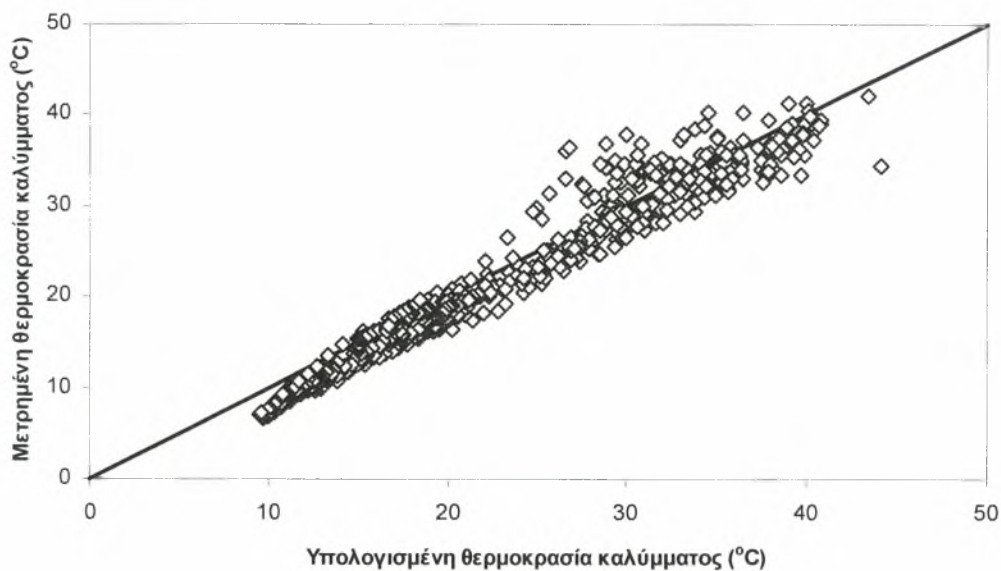
Σχήμα 5.9 (Bot) Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για τη δεύτερη πειραματική περίοδο με χρήση του εμπειρικού τύπου του Bot.

(Kittas)



Σχήμα 5.9 (Kittas) Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για τη δεύτερη πειραματική περίοδο με χρήση του εμπειρικού τύπου του Kittas.

(Papadakis)



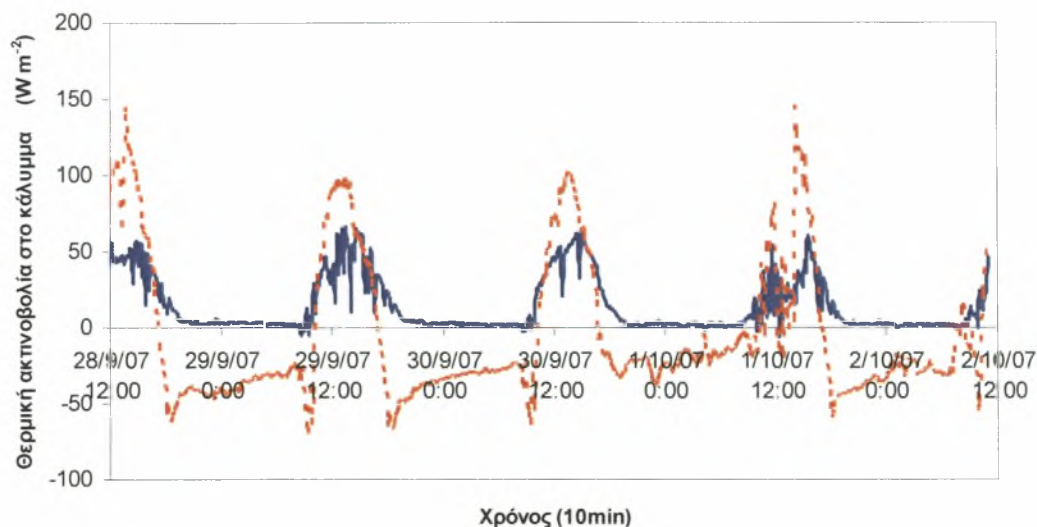
Σχήμα 5.9 (Papadakis) Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για τη δεύτερη πειραματική περίοδο με χρήση του εμπειρικού τύπου του Papadakis.

5.2.1. Υπολογισμός της καθαρής θερμικής ακτινοβολίας καλύμματος και εδάφους.

Η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών για την καθαρή ακτινοβολία στο κάλυμμα και το έδαφος για δύο πειραματικές περιόδους παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η θερμική ακτινοβολία είναι ο κύριος παράγοντας για την απώλεια ή κέρδος ποσοτήτων θερμότητας για το κάλυμμα και το έδαφος. Τα παρακάτω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τους Jolliet and Baille (1999) που αναφέρουν ότι η θερμική ενέργεια αποθηκεύεται στο κάλυμμα, την καλλιέργεια και το έδαφος κατά τη διάρκεια της ημέρας και απελευθερώνεται στον αέρα κατά τη διάρκεια της νύχτας.

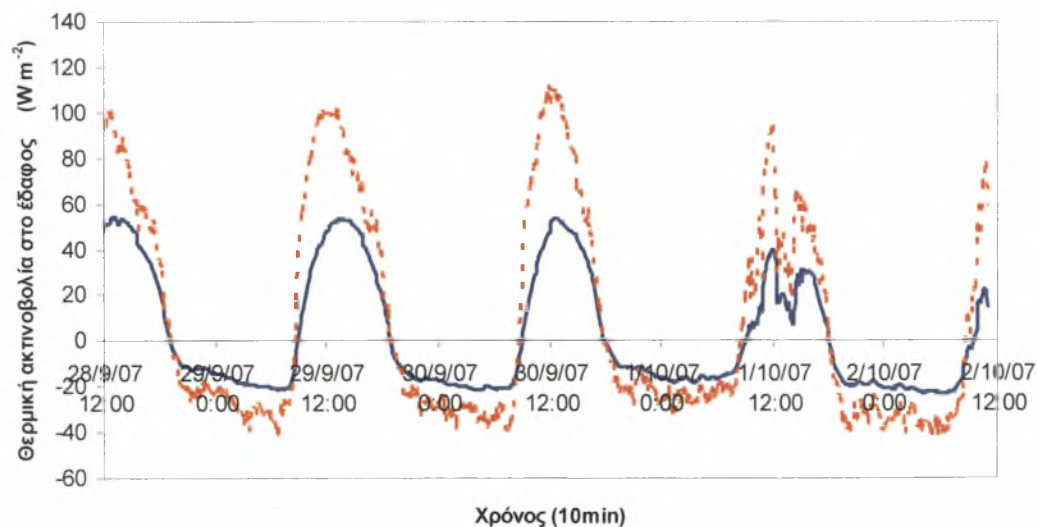
Οι τιμές για τη θερμοκρασία του αέρα και του καλύμματος ήταν παρόμοιες κατά την 3^η πειραματική περίοδο, με συνέπεια μικρή μεταφορά ενέργειας, σε αντίθεση με την 4^η πειραματική περίοδο, η ενέργεια που αποθηκεύτηκε κατά τη διάρκεια της ημέρας απελευθερώθηκε κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η καλλιέργεια αποτελεί τον παράγοντα που αποθηκεύει και απελευθερώνει τη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας στο θερμοκήπιο καθώς η ενέργεια που αποθηκεύεται στο κάλυμμα απελευθερώνεται κυρίως στον περιβάλλον χώρο του θερμοκηπίου. Στα επίπεδα του εδάφους τα αποτελέσματα πιστοποίησαν ότι μια ποσότητα ενέργειας απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της νύχτας με σκοπό να συνεισφέρει στη θέρμανση του θερμοκηπίου.

(a)



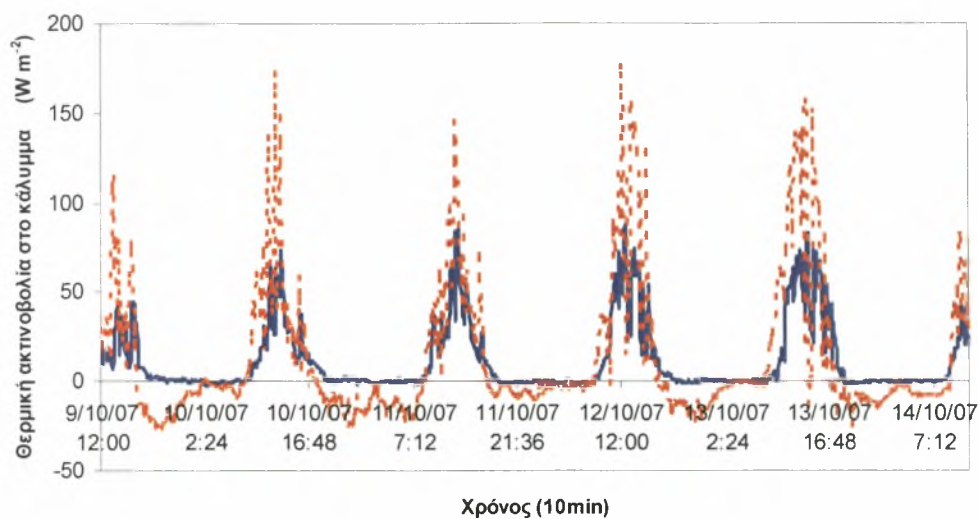
Σχήμα 5.10 (a). Διακύμανση των μετρημένων (—) και των υπολογισμένων (---) τιμών της καθαρής θερμικής ακτινοβολίας στο κάλυμμα κατά τη διάρκεια της πρώτης πειραματικής περιόδου..

(b)



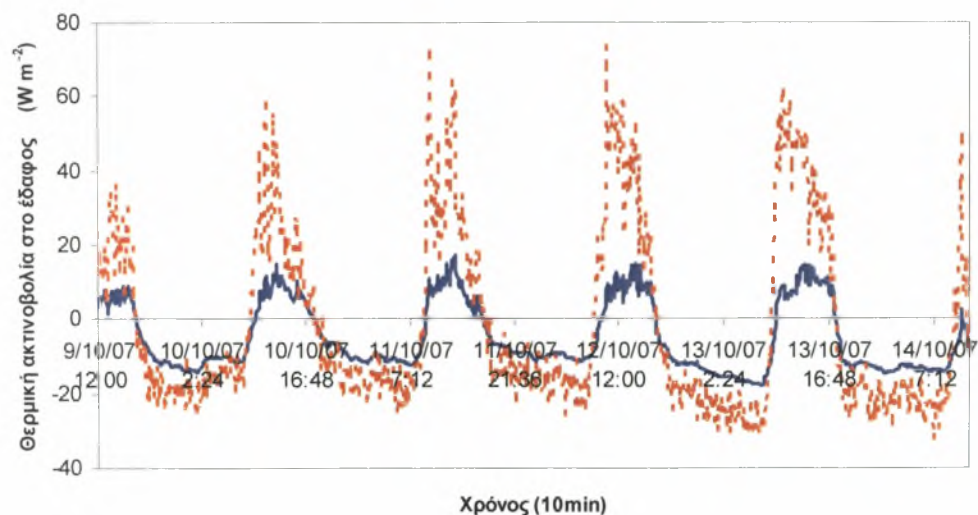
Σχήμα 5.10 (b). Διακύμανση των μετρημένων (—) και των υπολογισμένων (---) τιμών της καθαρής θερμικής ακτινοβολίας στο έδαφος κατά τη διάρκεια της πρώτης πειραματικής περιόδου..

(c)



Σχήμα 5.10 (c). Διακύμανση των μετρημένων (---) και των υπολογισμένων (—) τιμών της καθαρής θερμικής ακτινοβολίας στο κάλυμμα κατά τη διάρκεια της τρίτης πειραματικής περιόδου..

(d)



Σχήμα 5.10 (d). Διακύμανση των μετρημένων (---) και των υπολογισμένων (—) τιμών της καθαρής θερμικής ακτινοβολίας στο έδαφος κατά τη διάρκεια της τρίτης πειραματικής περιόδου..

Κεφάλαιο 6°. Συμπεράσματα

7. Συμπεράσματα – Συζήτηση

Με βάση τη σύγκριση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών για τη θερμοκρασία του καλύμματος και του εδάφους, μπορεί να λεχθεί ότι το μοντέλο μπορεί να υπολογίζει με στατιστικά σημαντική ακρίβεια τις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Τα αποτελέσματα συμφωνούν για τη βαθμονόμηση και επιβεβαίωση της θερμοκρασίας του αέρα και του εδάφους. Οι μικρές διαφοροποιήσεις που παρουσιάζονται μεταξύ υπολογισμένων και μετρημένων τιμών οφείλονται κυρίως στην υποεκτίμηση των φαινομένων συμπύκνωσης στην επιφάνεια του καλύμματος όταν το θερμοκήπιο ήταν κλειστό ή στην υποεκτίμηση της μεταφερόμενης μάζας και ενέργειας από τον περιβάλλοντα χώρο του θερμοκηπίου σε τυχόν μη ακριβούς απόκρισης των παραθύρων στο πρόγραμμα του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Όλα αυτά καθιστούν τα μέρη αυτά του κλιματικού προσομοιώματος και ευρύτερα του βιοφυσικού προσομοιώματος αξιόπιστα και χρήσιμα.

Ο περαιτέρω εμπλουτισμός του προσομοιώματος αναμένεται να το καταστήσει χρήσιμο εργαλείο στη λήψη αποφάσεων μεταβάλλοντας, ίσως, τη στρατηγική που ακολουθείται για την μείωση του κόστους παραγωγής και την αύξηση της κερδοφορίας μιας θερμοκηπιακής μονάδας.

Κεφάλαιο 7^ο. Βιβλιογραφία

7. Βιβλιογραφία

- **Ahmad N.T., 2001.** Agricultural solar air collector made from low-cost plastic packing film. *Renewable Energy* **23**, 663-671.
- **Anastasiou A., Papageorgiou G., 1999.** Agriculture via Hydroponics and Nutrition Control. *Agriculture-Livestock* **9**, 60-74.
- **Bartok, J.W. Aldrich R.A., 1989.** Greenhouse Engineering. *Northeast Regional Agricultural Engineering Services* **7**, 90-97.
- **Bertin N., 1993.** Climatic environment, competition for assimilates and modeling fruit-set of greenhouse tomato. PhD. Thesis. Institut National Agronomique Paris-Grignon, France.
- **Bojaca Carlos Ricardo, Gil Rodrigo, Cooman Alexander, 2009.** Use of geostatistical and crop growth modeling to assess the variability of greenhouse tomato yields caused by spatial temperature variations. *Computers and Electronics in Agriculture* **65**, 219-227.
- **Bot Gerard P.A., 2001.** Developments in indoor sustainable plant production with emphasis on energy saving. *Computers and Electronics in Agriculture* **30**, 151-165.
- **Campen J.B., Bot G.P.A., 2001.** Design of a Low-Energy Dehumidifying System for Greenhouses. *J. agric. Engng Res.* **78**, 65-73.
- **Campen J.B., Kempkes F.L.K., Bot G.P.A., 2009.** Mechanically controlled moisture removal from greenhouses. *Biosystems Engineering* **102**, 424-432.
- **Chapagain B.P., Wiesman Z., 2003.** Effect of Nutri-Vant-Peak foliar spray on plant development, yield and fruit quality in greenhouse tomatoes. *Scientia Horticulturae* **102**, 177-188.
- **Dimokas G., Tchamitchian M., Kittas C., 2009.** Calibration and validation of a biological model to simulate the development and production of tomatoes in Mediterranean greenhouses during winter period. *Biosystems Engineering* **103**, 217-227.
- **Donatelli Marcello, Bellocchi Gianni, Carlini Laura, 2006.** Sharing knowledge via software components: Models on reference evapotranspiration. *Europ. J. Agronomy* **24**, 186-192.

- **Frausto H. Uchida, Pieters J.G, Deltour J.M., 2003.** Modelling Greenhouse Temperature by means of Auto Regressive Models. *Biosystems Engineering* **84** (2), 147-157.
- **Gary C., Barczy J.F., Bertin N., Tchamitchian M., 1995.** Simulations of individual organ growth and development on a tomato plant: a model and user-friendly interface. *Acta Horticulturae* **399**, 199-205.
- **Gary C., Bertin N., Tchamitchian M., 1996.** TOMGRO, an explicatory model of the functioning of greenhouse crops: a research and decision support tool. *Actes du Seminaire de l' AIP Intersectorielle "Serres."*1, 90-99.
- **Hatirli Selim Adem, Ozkan Burhan, Fert Cemal, 2006.** Energy inputs and crop yield relationship in greenhouse tomato production. *Renewable Energy* **31**, 427-438.
- **Impron I., Hemming S., Bot G.P.A., 2008.** Effects of cover properties, ventilation rate, and crop leaf area on tropical greenhouse climate. *Biosystems Engineering* **99**, 553-564.
- **Janick Jules, Paris S. Harry, Parrish C. David, 2007.** The cucurbits of Mediterranean Antiquity: Identification of Taxa from Ancient Images and Descriptions. *Annals of Botany* **10**, 193-242.
- **Jolliet O., 1994.** HORTITRANS, a Model for Predicting and Optimizing Humidity and Transpiration in Greenhouses. *J. agric. Engng Res* **57**, 23-37.
- **Jolliet O. and Bailey B.J., 1992.** The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses: measurements and models comparison. *Agricultural and Forest Meteorology* **58**, 43-62.
- **Jolliet O., Dandloy L, Gay J.B., Munday G.L. and Reist, A., 1991.** HORTICERN: an improved static model for predicting the energy consumption of a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* **55**, 265-294.
- **Jong T. de and Bot G.P.A., 1992.** Air exchange caused by wind effects through (window) openings distributed evenly on a quasi-infinite surface. *Energy and Buildings* **19**, 93-103.
- **Jong T. de and Bot G.P.A., 1992.** Flow characteristics of one-side-mounted windows. *Energy and Buildings* **19**, 105-112.
- **Kittas C., 1994.** Overall heat transfer coefficient of a greenhouse cover. *Agricultural and Forest Meteorology* **69**, 205-221.

- **Mahajan Gulshan, Singh K.G., 2006.** Response of Greenhouse tomato to irrigation and fertigation. *Agricultural Water Management* **84**, 202-206.
- **Max Johannes F.J., Horst Walter J., Mutwiwa Ubranus N., Tantau Hans-Jurgen, 2009.** Effects of greenhouse cooling method on growth, fruit yield and quality of tomato (*Solanum Lycopersicum L.*) in a tropical climate. *Scientia Horticulturae* **122**, 179-186.
- **Miguel A.F., Braak N.J. van de, Silva A.M., Bot G.P.A., 1998.** Free-Convection Heat Transfer in Screened Greenhouses. *J. agric. Engng Res* **69**, 133-139.
- **Mistriotis A., Arcidiacono C., Picuno P., Bot G.P.A., Scarascia-Mugnozza G., 1997.** Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low-wind-speeds. *Agricultural and Forest Meteorology* **88**, 121-135.
- **Mistriotis A., Bot G.P.A., Picuno P., Scarascia-Mugnozza G., 1997.** Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology* **85**, 217-228.
- **Monteith J.L., Unsworth M.H., 1990.** Principles of Environmental Physics. London: Edward Arnold.
- **Omrou M., Vryzas Z., Papadopoulou-Mourkidou E., Economou A., 2009.** Dissipation rates of iprodione and thiacloprid during tomato production in greenhouse. *Food Chemistry* **116**, 499-504.
- **Papadakis G., Frangoudakis A., Kyritsis S., 1992.** Mixed, Forced and Free Convection Heat Transfer at the Greenhouse Cover. *J. agric Engng Res* **51**, 191-205.
- **Peet M.M. and Willits D.H., 1984.** CO₂ enrichment of greenhouse tomatoes using a closed-loop heat storage: effects of cultivar and nitrogen. *Scientia Horticulturae* **24**, 21-32.
- **Pico Belen, Diez Maria Jose, Nuez Fernando, 1996.** Viral diseases causing the greatest economic losses to the tomato crop. II. The Tomato yellow leaf curl virus – a review. *Scientia Horticulturae* **67**, 151-196.
- **Pieters J.G., Deltour J.M., 1997.** Performances of greenhouses with the presence of condensation on cladding materials. *Journal of Agricultural Engineering Research* **68** (2), 125-137.

- **Pieters J.G., Deltour J.M., 1999.** Modelling Solar Energy Input in Greenhouses. *Solar Energy* **67**,119-130.
- **Pieters J.G., Deltour J.M., Debruyckere M.J, 1994.** Condensation and static heat transfer through greenhouse covers during night. *Transactions of the ASAE* **37** (6), 1965-1972.
- **Pieters J.G., Deltour J.M., Debruyckere M.J, 1995.** Onset of Condensation on the Inner and Outer Surface of Greenhouse Covers during Night. *J. agric Engng Res.* **61**, 165-171.
- **Pieters J.G., Pollet I.V., Deltour J., Verschoore R., 2003.** Angular dependence of forward scattering induced by condensate on greenhouse cladding materials. *Agricultural and Forest Meteorology* **119**, 23-36.
- **Roy J., Boulard T., Kittas C., Wang S., 2002.** Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosystems Engineering*,**83**, 1-20.
- **Stanghellini C., 1995.** Response to comments on “Thermal and aerodynamic conditions in greenhouses in relation to estimation of heat flux and evaporotranspiration”. *Agricultural and Forest Meteorology*, **77**, 137-138.
- **Uding ten Kate A.J., 1987.** Analysis and Synthesis of greenhouse climate controllers. *Computer Applications in Agricultural Environments*, **1**, 1-19.
- **Wang S., Boulard T., 1999.** Predicting the Microclimate in a Naturally Ventilated Plastic House in a Mediterranean Climate. *J. agric. Engng Res. (2000)* **75**, 27-38.
- **Yang Xiusheng, 1995.** Comments on ‘Thermal and aerodynamic conditions in greenhouses in relation to estimation of heat flux and evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology* **77**, 131-136.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ

Τηλ.: 24210-~~422634~~ 93141



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000106328

