

**«Ανάπτυξη βιοφυσικού προσομοιώματος καλλιέργειας
τομάτας, για βελτιστοποίηση της διαχείρισης του κλίματος, σε
μεσογειακά θερμοκήπια, κατά τη χειμερινή περίοδο»**

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Κ. Κίττας (Επιβλέπων)

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Γ. Μαυρογιαννόπουλος (Μέλος)

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Ν. Συγριμής (Μέλος)

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Καθηγητής

Γεωργικές Κατασκευές

Καθηγητής

Θερμοκήπια και Υδροπονικές Καλλιέργειες

Καθηγητής

Εξηλεκτρισμός και Αυτοματισμοί στη

Γεωργία

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κ. Κίττας (Επιβλέπων)

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Γ. Μαυρογιαννόπουλος (Μέλος)

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Ν. Συγριμής (Μέλος)

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Γ. Παπαδάκης (Μέλος)

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Χ. - Ν. Μαρτζοπούλου (Μέλος)

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσ/νίκης

Δημήτριος Σάββας (Μέλος)

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Ν. Κατσούλας (Μέλος)

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Καθηγητής

Γεωργικές Κατασκευές

Καθηγητής

Θερμοκήπια και Υδροπονικές Καλλιέργειες

Καθηγητής

Εξηλεκτρισμός και Αυτοματισμοί στη

Γεωργία

Καθηγητής

Ανανεώσιμες πηγές Ενέργειας-

Μηχανολογικός Εξοπλισμός και Γεωργικές

Εφαρμογές

Καθηγήτρια

Αγροτικές Κατασκευές και Θερμοκήπια

Επίκουρος Καθηγητής

Λαχανοκομία

Λέκτορας

Γεωργικές Κατασκευές με έμφαση στο

Περιβάλλον του Θερμοκηπίου

Γεώργιος Χ. Δημόκας

**«Ανάπτυξη βιοφυσικού προσομοιώματος καλλιέργειας
τομάτας, για βελτιστοποίηση της διαχείρισης του κλίματος, σε
μεσογειακά θερμοκήπια, κατά τη χειμερινή περίοδο»**

ISBN

Γεώργιος Χ. Δημόκας, 2009, «Ανάπτυξη βιοφυσικού προσομοιώματος καλλιέργειας τομάτας, για βελτιστοποίηση της διαχείρισης του κλίματος, σε μεσογειακά θερμοκήπια, κατά τη χειμερινή περίοδο», Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Νέα Ιωνία.

32 Προκαταρκτικές σελίδες, 300 Σελίδες, 15 Πίνακες, 88 Σχήματα, 14 Εικόνες, 194 Βιβλιογραφικές παραπομπές, 1 Δημοσιευμένη εργασία.

Περίληψη

Το αντικείμενο της εργασίας αυτής είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος για την υποστήριξη λήψης αποφάσεων, που να επιτρέπει τη διαχείριση του κλίματος ενός θερμοκηπίου κατά τη χειμερινή περίοδο σε 24ωρη βάση. Απώτερος στόχος η βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας του θερμοκηπίου σε συνάρτηση με τα κριτήρια που τίθενται από τον παραγωγό (π.χ. αύξηση παραγωγής, βελτίωση ποιότητας, μείωση κόστους, αποφυγή φυτοϋγειονομικών προβλημάτων). Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε αρχικά αναζήτηση και μελέτη του τρόπου λειτουργίας των υπαρχόντων βιολογικών και κλιματικών προσομοιωμάτων με στόχο τη δημιουργία ενός λειτουργικού προσομοιώματος ικανού να παρέχει στο χρήστη πλήθος πληροφοριών που να σχετίζονται με τις κλιματικές συνθήκες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καθώς και με την ανάπτυξη και την παραγωγή της καλλιέργειας τομάτας. Έπειτα καταρτίστηκαν ερωτηματολόγια και πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις σε παραγωγούς σε θερμοκηπιακές μονάδες της ελληνικής επικράτειας, με σκοπό την αναζήτηση των κριτηρίων που σύμφωνα με την εμπειρία των παραγωγών, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τη διαχείριση του κλίματος κατά τη χειμερινή περίοδο. Μεγάλη έμφαση δόθηκε στην ανάπτυξη του βιοφυσικού προσομοιώματος το οποίο αποτελείται από δύο προσομοιώματα, ένα κλιματικό που προσομοιώνει το μικροκλίμα του θερμοκηπίου και ένα βιολογικό που προσομοιώνει την ανάπτυξη και την παραγωγή της καλλιέργειας τομάτας. Η ανάπτυξη του κλιματικού προσομοιώματος στηρίχθηκε στη παράλληλη λειτουργία 5 υπό-προσομοιωμάτων που προβλέπουν την κατανομή των κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ανάλογα με τη γεωμετρία του θερμοκηπίου, τα κατασκευαστικά του χαρακτηριστικά και τον χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό (συστήματα θέρμανσης – αερισμού). Για την περίπτωση του βιολογικού προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε μετατροπή του προσομοιωτή TOMGRO σύμφωνα με τις καλλιεργητικές ανάγκες των παραγωγών της Μεσογείου και πιο συγκεκριμένα την εφαρμογή κορυφολογήματος στην καλλιέργεια και το σταμάτημα της ανάπτυξης. Για τη βαθμονόμηση και πειραματική επιβεβαίωση του βιοφυσικού προσομοιώματος πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε θερμοκήπιο στο Αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο Βελεστίνο. Η πειραματική επιβεβαίωση των προσομοιωμάτων έδειξε τη μικρή διαφοροποίηση που παρουσιάζουν οι μετρημένες από τις υπολογισμένες τιμές για το πλήθος των μεταβλητών που αναλύθηκαν. Παράλληλα αναπτύχθηκε και βαθμονομήθηκε γεννήτρια παραγωγής εξωτερικών κλιματικών δεδομένων για ολόκληρη τη χειμερινή περίοδο. Η λειτουργία της γεννήτριας στηρίζεται σε πρόβλεψη κλιματικών παραμέτρων από web-site και παράγει κλιματικά δεδομένα σε βάθος χρόνου ανάλογα με αυτό της πρόβλεψης. Η πειραματική επιβεβαίωση της γεννήτριας έδειξε τη μικρή διαφοροποίηση που παρουσιάζουν οι μετρημένες από τις υπολογισμένες τιμές. Ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε και ανάλυση σεναρίων για να εκτιμηθεί η επίδραση της διαφοροποίησης του μικροκλίματος στην ανάπτυξη και την παραγωγή της καλλιέργειας τομάτας. Τέλος αναπτύχθηκε λογισμικό για τη βελτιστοποίηση του βιοφυσικού προσομοιώματος με τη χρήση αλγορίθμων Branch & Bound. Πρόκειται ουσιαστικά για τη φάση της ανάπτυξης του συστήματος

υποστήριξης λήψης αποφάσεων. Επιβάλλεται στο βιοφυσικό προσομοίωμα μια αλληλουχία αποφάσεων (όχι κατ' ανάγκην βέλτιστων) και η εξέλιξη του συστήματος προσομοιώνεται κάτω από διαφορετικά «σενάρια» συνθηκών του εξωτερικού κλίματος που παράγονται από τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων.

Πρόλογος και Ευχαριστίες

Όταν το ταξίδι φτάνει προς το τέλος νιώθεις την ανάγκη να αναπολήσεις, να θυμηθείς όλα αυτά που σημάδεψαν την πορεία προς το τέλος της διαδρομής. Αρχίζοντας τη συγγραφή της διδακτορικής διατριβής μου αισθάνομαι χαρούμενος που το έργο ολοκληρώνεται και συνάμα κουρασμένος από την συνεχή και επίπονη προσπάθεια αναζήτησης της γνώσης. Νιώθω ωστόσο μια βαθύτερη ανάγκη να ευχαριστήσω δημόσια όλους όσους με ευγένεια, καλοσύνη και επιδεξιότητα συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της διατριβής.

Πρώτον από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου και επιβλέποντα της εργασίας αυτής, κ. Κωνσταντίνο Κίττα, ο οποίος με ενθάρρυνε να ασχοληθώ με το θέμα αυτό και αποτέλεσε το βασικό καθοδηγητή της όλης διατριβής. Η δυνατότητα που μου έδωσε αρχικά, όταν ακόμη ήμουν φοιτητής του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, να ασχοληθώ με ερευνητικά θέματα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, αποτέλεσε το έναυσμα για να διαπιστώσω το ιδιαίτερο ενδιαφέρον που παρουσιάζει το ερευνητικό αυτό πεδίο. Η συνεχής παρότρυνση και ενθάρρυνσή του, το ιδιαίτερο ενδιαφέρον του για την πρόοδο του ερευνητικού πεδίου με το οποίο ασχολήθηκα, καθώς και η αμέριστη συμπαράστασή του καθ'όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής συνέβαλαν καθοριστικά στην άρτια διαμόρφωση και ολοκλήρωση της εν λόγω διατριβής. Τον ευχαριστώ θερμά για την αγάπη με την οποία με περιέβαλε και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Στο σημαντικό αυτό σταθμό της πορείας μου θα ήταν παράληψη εάν δεν αναφερόμουν στον ερευνητή του INRA της Αβινιόν της Γαλλίας και συνεργάτη του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος, κ. Marc Tchamitchian. Η καθοδήγησή του καθ'όλη τη διάρκεια της εργασίας μου και η συνεχής συμβολή του στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων και στην υλοποίηση του λογισμικού ήταν καθοριστική για την εξέλιξη της διατριβής μου. Η ουσιαστική βοήθειά του συνετέλεσε στο να τελεσφορήσει η προσπάθειά μου αυτή.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, κ.κ. Γ. Μαυρογιαννόπουλο, Καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών και Ν. Συργιμή, Καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών για την επίβλεψη, παρακολούθηση και διόρθωση της παρούσας διατριβής.

Σημαντική στάθηκε η οικονομική βοήθεια που μου πρόσφερε η Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (Γ.Γ.Ε.Τ.) μέσω του υποέργου ΠΕΝΕΔ 2003 καθώς κατόρθωσα να ανταπεξέλθω στις οικονομικές υποχρεώσεις κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής μου διατριβής. Το έργο συγχρηματοδοτήθηκε κατά:

- ✘ 75% της Δημόσιας Δαπάνης από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
- ✘ 25% της Δημόσιας Δαπάνης από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας
- ✘ και από τον Ιδιωτικό Τομέα (ΑΓΡΕΚ Κ. ΣΑΜΑΝΤΟΥΡΟΣ Α.Ε.)

στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα – Γ΄ Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης.

Ιδιαίτερα σημαντική υπήρξε και η συμβολή του Λέκτορα και μέλους του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Π.Θ., κ. Νικόλαου Κατσούλα. Οι εποικοδομητικές συζητήσεις που είχα στο ξεκίνημα της προσπάθειάς μου, συνέβαλαν στην κατανόηση της πορείας που θα έπρεπε να ακολουθήσω για την πραγματοποίηση της παρούσης εργασίας. Παράλληλα κατά τη διάρκεια της πορείας της εργασίας πολύτιμη στάθηκε η συνεισφορά του στην επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Διδάκτορες και συνεργάτες του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος κ.κ. Χ. Λύκα και Θ. Μπαρτζάνα για τη συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια της έρευνάς μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη όλους όσους εργάστηκαν μαζί μου στην εγκατάσταση των απαραίτητων μετρητικών διατάξεων και στην φροντίδα της καλλιέργειας στο θερμοκήπιο.

Ιδιαίτερη ήταν η ηθική συμπαράσταση της αρραβωνιαστικιάς μου, Π. Νικολαΐδου καθώς με την υπομονή, την κατανόηση και την υποστήριξή της σε κάθε βήμα της εργασίας, μου έδινε θάρρος να συνεχίσω το έργο μου και για το λόγο αυτό την ευχαριστώ πολύ.

Τέλος αισθάνομαι την ανάγκη να μοιραστώ τη χαρά της επιτυχίας με τους γονείς μου και τον αδερφό μου, οι οποίοι μόχθησαν για να φέρω εις πέρας το δύσκολο αυτό έργο. Η αμέριστη ηθική συμπαράσταση και υλική υποστήριξή τους συνέβαλαν καθοριστικά στην υλοποίηση της διατριβής μου.

“ Ἐν οἶδα, ὅτι οὐδὲν οἶδα”
Σωκράτης

Στους γονείς μου, τον αδερφό μου και τη Νούλα

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1°. Εισαγωγή.....	1
1. Εισαγωγή	3
1.1. Γενική εισαγωγή	3
1.2. Διαχείριση θερμοκηπιακών μονάδων και σύγχρονοι προβληματισμοί.....	6
1.3. Προσομοιώματα και συμβολή στη διαχείριση των θερμοκηπίων.....	8
1.4. Προϋποθέσεις και προβλήματα για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των θερμοκηπιακών μονάδων.....	10
1.5. Αντικείμενο και δομή της εργασίας	12
Κεφάλαιο 2°. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	15
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	17
2.1. Προσομοιώματα	18
2.1.1. Τύποι προσομοιωμάτων.....	18
2.1.1.1. Τύποι κλιματικών προσομοιωμάτων	18
2.1.1.2. Τύποι βιολογικών προσομοιωμάτων	19
2.1.2. Ανάπτυξη προσομοιωμάτων	22
2.1.3. Κλιματικά προσομοιώματα.....	24
2.1.4. Σύγκριση κλιματικών προσομοιωμάτων	25
2.1.5. Βιολογικά προσομοιώματα	27
2.1.6. Σύγκριση βιολογικών προσομοιωμάτων TOMGRO και TOMSIM.....	30
2.1.7. Βιοφυσικά προσομοιώματα	31
2.2. Γεννήτριες παραγωγής εξωτερικών κλιματικών δεδομένων.....	35
2.3. Αρχές και μέθοδος βελτιστοποίησης.....	36
2.4. Συμπεράσματα ανασκόπησης	39
Κεφάλαιο 3°. Ανάλυση προσομοιωμάτων.....	43
3. Ανάλυση προσομοιωμάτων	45
3.1. Ανάπτυξη κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)	45
3.1.1. Εισαγωγή.....	45
3.1.1.1. Υλοποίηση του λογισμικού.....	46
3.1.1.2. Μεταβλητές εισόδου – εξόδου.....	50
3.1.2. Ισοζύγιο Ενέργειας του Αέρα	52
3.1.2.1. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα με την καλλιέργεια, το έδαφος και το κάλυμμα.....	52
3.1.2.2. Αερισμός	54
3.1.3. Ισοζύγιο Ενέργειας στο Κάλυμμα του θερμοκηπίου.....	56
3.1.3.1. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του περιβάλλοντος αέρα και της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος.....	57
3.1.3.2. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα και της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος	57
3.1.3.3. Πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στο κάλυμμα.....	57
3.1.3.4. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του καλύμματος	59
3.1.3.5. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του καλύμματος και του εδάφους.....	60
3.1.3.6. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του καλύμματος και του ουρανού	60

3.1.3.7. Ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στο κάλυμμα του θερμοκηπίου.....	61
3.1.4. Ισοζύγιο Ενέργειας της Καλλιέργειας	62
3.1.4.1. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ της καλλιέργειας με τον αέρα	63
3.1.4.2. Διαπνοή της καλλιέργειας.....	63
3.1.4.2.1. Υπολογισμός της αεροδυναμικής αντίστασης r_a	64
3.1.4.2.2. Υπολογισμός της στοματικής αντίστασης r_s	65
3.1.4.2.3. Υπολογισμός της απορροφόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.....	65
3.1.4.3. Πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στην καλλιέργεια	67
3.1.4.4. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του καλύμματος	67
3.1.4.5. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του εδάφους και της καλλιέργειας.....	67
3.1.4.6. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του ουρανού	67
3.1.4.7. Ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στην καλλιέργεια.....	68
3.1.5. Ισοζύγιο Ενέργειας του Εδάφους.....	68
3.1.5.1. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα και του εδάφους	69
3.1.5.2. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του εδάφους	69
3.1.5.3. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του καλύμματος και του εδάφους.....	69
3.1.5.4. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του εδάφους και του ουρανού	69
3.1.5.5. Ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος	70
3.1.6. Ισοζύγιο Μάζας του Αέρα	70
3.1.6.1. Πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στο κάλυμμα	71
3.1.6.2. Διαπνοή της καλλιέργειας.....	71
3.1.6.3. Πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στην καλλιέργεια	71
3.1.6.4. Μεταβολή της μάζας λόγω αερισμού	71
3.2. Περιγραφή του βιολογικού προσομοιώματος και της τροποποίησης της λειτουργίας του (SimTom)	73
3.2.1. Εισαγωγή.....	73
3.2.2. Το Χρονικό Βήμα του Μοντέλου	74
3.2.3. Σταθερές Μεταβλητές και Ηλικιακές Κλάσεις.....	74
3.2.4. Οργανογέννηση.....	75
3.2.4.1. Ρυθμός αλλαγής του αριθμού των οργάνων (rx)	75
3.2.4.2. Ρυθμός ανάπτυξης-σηματισμού νέων βλαστών (Rn).....	76
3.2.4.3. Ρυθμός εμφάνισης νέων φύλλων (Rl)	77
3.2.4.4. Ρυθμός μείωσης των φύλλων ($rdI(i)$)	78
3.2.4.5. Ρυθμός σχηματισμού νέων καρπών (Rf).....	78
3.2.4.6. Ρυθμός αποβολής καρπών (Ra)	79
3.2.4.7. Μεταβολής της Ηλικίας των Φύλλων ($RDVLV$).....	80
3.2.4.8. Μεταβολή της Ηλικίας των Καρπών ($RDVFR$).....	80
3.2.5. Παραγωγή Ξηρού Βάρους	81

3.2.5.1.	Υπολογισμός ρυθμού της Φωτοσύνθεσης (Pgd)	81
3.2.5.2.	Υπολογισμός ρυθμού αφομοίωσης CO_2 (Pm)	82
3.2.5.3.	Υπολογισμός της αναπνοής διατήρησης (rmr)	83
3.2.5.4.	Υπολογισμός της αναπνοής αύξησης (rg)	83
3.2.5.5.	Συνολική αφομοίωση των ελεύθερων υλικών για ανάπτυξη (Pn) των φυτών	84
3.2.5.6.	Αποθήκευση αφομοιώσιμων στοιχείων στην «Δεξαμενή» ($CPOOL$)	84
3.2.6.	Κατανομή της παραγόμενης βιομάζας.....	84
3.2.6.1.	Δυνάμενος ρυθμός αύξησης της φυλλικής επιφάνειας $Al(i)$	85
3.2.6.2.	Δυνάμενος ρυθμός αύξησης του ξηρού βάρους των φύλλων $rDp(i)$	86
3.2.6.3.	Συνολική απαίτηση ξηρού βάρους για την αύξηση των φύλλων (DI)	88
3.2.6.4.	Συνολική απαίτηση ξηρού βάρους για την αύξηση των καρπών Df	88
3.2.6.5.	Συνολική απαίτηση ξηρού βάρους για την αύξηση των κόμβων των βλαστών Ds	89
3.2.6.6.	Συνολική απαίτηση ξηρού βάρους για τα υπέργεια μέρη του φυτού (DEMAND)	89
3.2.7.	Αύξηση των οργάνων του φυτού	90
3.2.8.	Τροποποιήσεις στον τρόπο λειτουργίας του βιολογικού προσομοιώματος	92
3.2.8.1.	Κορυφολόγημα της καλλιέργειας	92
3.2.8.2.	Ηλικία των καρπών	92
3.2.8.3.	Συντελεστής μετατροπής των αφομοιώσιμων στοιχείων (C_f)	93
3.3.	Ανάπτυξη βιοφυσικού προσομοιώματος (BioSiGreT).....	95
3.4.	Περιγραφή γεννήτριας κλιματικών δεδομένων	97
3.4.1.	Περιγραφή τρόπου λειτουργίας	97
3.4.2.	Θερμοκρασία του αέρα	98
3.4.3.	Σχετική υγρασία του αέρα	98
3.4.4.	Ταχύτητα αέρα	99
3.4.5.	Ηλιακή ακτινοβολία.....	99
3.5.	Περιγραφή μεθόδου βελτιστοποίησης	102
3.5.1.	Εισαγωγή.....	102
3.5.2.	Γενική περιγραφή της μεθόδου διακλάδωσης και φραγμού (<i>Branch & Bound</i>).....	102
3.5.2.1.	Περιορισμοί χρήσης της μεθόδου διακλάδωσης και φραγμού (<i>Branch & Bound</i>).....	104
3.5.2.2.	Συνάρτηση περιορισμού	105
3.5.2.3.	Στρατηγική επιλογής του επόμενου προβλήματος	106
3.5.2.4.	Κανόνας δημιουργίας δενδρικών διακλαδώσεων	106
3.5.3.	Βελτιστοποίηση Βιο-φυσικού Προσομοιώματος	106
Κεφάλαιο 4^ο.	Υλικά & μέθοδοι	109
4.	Υλικά και μέθοδοι	111
4.1.	Υλικά και μέθοδοι ερωτηματολογίων	111
4.1.1.	Σχεδιασμός του ερωτηματολογίου.....	111
4.1.2.	Η εκλογή και ο καθορισμός του δείγματος.....	112
4.1.3.	Συλλογή των πληροφοριών.....	113
4.1.4.	Ανάλυση των δεδομένων	114
4.2.	Πειραματικός εξοπλισμός.....	115
4.2.1.	Το θερμοκήπιο	115

4.2.2. Αερισμός.....	115
4.2.3. Θέρμανση.....	117
4.2.4. Καλλιέργεια	117
4.2.4.1. Υπόστρωμα	117
4.2.4.2. Άρδευση - Λίπανση	118
4.2.4.3. Εγκατάσταση της καλλιέργειας και καλλιεργητικές επεμβάσεις ...	119
4.3. Μετρήσεις για βαθμονόμηση & επιβεβαίωση κλιματικού προσομοιώματος.....	122
4.3.1. Μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον	122
4.3.2. Μετρήσεις στο εσωτερικό περιβάλλον	123
4.3.3. Πειραματικοί περίοδοι	125
4.3.4. Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανανέωσης του αέρα	126
4.4. Μετρήσεις για βαθμονόμηση & επιβεβαίωση βιολογικού προσομοιώματος	128
4.4.1. Κλιματικές μετρήσεις για το βιολογικό προσομοίωμα.....	128
4.4.2. Καταστροφικές μετρήσεις καρπών.....	128
4.4.3. Καταστροφικές μετρήσεις ολόκληρου του φυτού	129
4.4.4. Απομάκρυνση των φύλλων.....	131
4.4.5. Μετρήσεις Ανάπτυξης των Μορφολογικών χαρακτηριστικών	131
4.4.5.1. Ολόκληρου του φυτού	131
4.4.5.2. Φύλλων	132
4.5. Μετρήσεις για βαθμονόμηση γεννήτριας κλιματικών δεδομένων	134
4.5.1. Πειραματικές μετρήσεις.....	134
4.6. Τιμές για μελέτη περιπτώσεων του βιολογικού προσομοιώματος (SimTom)	134
4.7. Μετρήσεις για βελτιστοποίηση του προσομοιώματος.....	136
Κεφάλαιο 5°. Ανάλυση των απαντήσεων των παραγωγών	137
5. Ανάλυση των απαντήσεων των παραγωγών.....	139
5.1. Αποτελέσματα.....	139
5.1.1. Κατασκευαστικά στοιχεία των θερμοκηπιακών μονάδων.....	139
5.1.2. Εξοπλισμός των θερμοκηπίων	141
5.1.3. Συστήματα ελέγχου του κλίματος του Θερμοκηπίου	143
5.1.4. Είδη καυσίμων και κατανάλωση κατά τη χειμερινή περίοδο	146
5.1.5. Πρακτική των παραγωγών για τη διαμόρφωση του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπίων	148
5.1.5.1. Θέρμανση.....	148
5.1.5.2. Φυσικός αερισμός	149
5.1.6. Καλλιεργητικές πρακτικές κατά την παραγωγική διαδικασία.....	151
5.1.7. Ακαθάριστη πρόσδοδος των παραγωγών	153
5.1.8. Μέθοδοι φυτοπροστασίας και οικονομικές συνέπειες από τη μη ορθή εφαρμογή κατά την καλλιεργητική περίοδο	154
5.1.8.1. Ανωμαλίες στον καρπό	154
5.1.8.2. Μυκητολογικές Ασθένειες.....	155
5.1.8.3. Προσβολές από έντομα	157
5.2. Συζήτηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις απαντήσεις των παραγωγών	160
Κεφάλαιο 6°. Βαθμονόμηση & επιβεβαίωση κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)	165
6. Βαθμονόμηση & επιβεβαίωση κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC) ..	167

6.1. Αποτελέσματα κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)	167
6.1.1. Βαθμονόμηση κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)	167
6.1.1.1. Βαθμονόμηση συντελεστών ανεμοφόρτησης και ανεμοπίεσης για τον υπολογισμό αερισμού του πειραματικού θερμοκηπίου.....	169
6.1.1.2. Υπολογισμός της θερμοκρασίας αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας, εδάφους (κατά τη βαθμονόμηση του SimGreC)	171
6.1.1.3. Υπολογισμός της σχετικής υγρασίας του αέρα και της διαπνοής της καλλιέργειας (κατά τη βαθμονόμηση του SimGreC)	177
6.1.1.4. Υπολογισμός της καθαρής θερμικής ακτινοβολίας καλύμματος, καλλιέργειας, εδάφους (κατά τη βαθμονόμηση του SimGreC).....	178
6.1.1.5. Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας και της (PAR) φωτοσυνθετικά ενεργούς ακτινοβολίας (κατά τη βαθμονόμηση του SimGreC)	179
6.1.2. Επιβεβαίωση του κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)	182
6.1.3. Υπολογισμός των κλιματικών παραμέτρων (κατά την επιβεβαίωση του SimGreC)	182
6.2. Συζήτηση βαθμονόμησης και επιβεβαίωσης του κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC).....	184
Κεφάλαιο 7°. Βαθμονόμηση & επιβεβαίωση βιολογικού προσομοιώματος (SimTom).....	187
7. Βαθμονόμηση & επιβεβαίωση βιολογικού προσομοιώματος (SimTom)	189
7.1. Αποτελέσματα βιολογικού προσομοιώματος (SimTom)	189
7.1.1. Βαθμονόμηση του βιολογικού προσομοιώματος (SimTom).....	189
7.1.1.1. Βαθμονόμηση του συντελεστή μετατροπής (C_f)	190
7.1.1.2. Αποτελέσματα του προσομοιώματος (TOMGRO®) πριν την χρήση του συντελεστή (FRAGCOEF).....	192
7.1.1.3. Αποτελέσματα ανάπτυξης (κατά τη βαθμονόμηση)	195
7.1.1.4. Αποτελέσματα παραγόμενης βιομάζας (κατά τη βαθμονόμηση)	197
7.1.1.5. Αποτελέσματα παραγωγής καρπών (κατά τη βαθμονόμηση).....	198
7.1.2. Επιβεβαίωση βιολογικού προσομοιώματος (SimTom)	200
7.1.2.1. Αποτελέσματα ανάπτυξης (κατά την επιβεβαίωση).....	200
7.1.2.2. Αποτελέσματα παραγόμενης βιομάζας (κατά την επιβεβαίωση)	202
7.1.2.3. Αποτελέσματα παραγωγής καρπών (κατά την επιβεβαίωση)	203
7.2. Συζήτηση βαθμονόμησης και επιβεβαίωσης βιολογικού προσομοιώματος	205
Κεφάλαιο 8°. Επιβεβαίωση βιοφυσικού προσομοιώματος (BioSiGreT).....	207
8. Επιβεβαίωση βιοφυσικού προσομοιώματος (BioSiGreT)	209
8.1. Αποτελέσματα βιοφυσικού προσομοιώματος (BioSiGreT).....	209
8.1.1. Αποτελέσματα κλιματικών παραμέτρων	209
8.1.1.1. Χρήση του BioSiGreT για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας και εδάφους	209
8.1.1.2. Χρήση του BioSiGreT για τον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας του αέρα και της διαπνοής της καλλιέργειας.....	210
8.1.2. Αποτελέσματα ανάπτυξης, παραγωγής βιομάζας και παραγωγής καρπών	211
8.1.2.1. Χρήση του BioSiGreT για υπολογισμό της ανάπτυξης των φυτών	211
8.1.2.2. Χρήση του BioSiGreT για υπολογισμό της παραγόμενης βιομάζας	213
8.1.2.3. Χρήση του BioSiGreT για υπολογισμό της παραγωγής καρπών ...	214

8.2. Συζήτηση για την επιβεβαίωση του βιοφυσικού προσομοιώματος (BioSiGreT)	216
8.2.1. Συμπεράσματα από τον υπολογισμό των κλιματικών παραμέτρων	216
8.2.2. Συμπεράσματα από τον υπολογισμό της ανάπτυξης και παραγωγής φυτών τομάτας	217
Κεφάλαιο 9°. Βαθμονόμηση & επιβεβαίωση γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων	219
9. Βαθμονόμηση & επιβεβαίωση γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων	221
9.1. Αποτελέσματα γεννήτριας κλιματικών δεδομένων.....	221
9.1.1. Πρόβλεψη της διακύμανσης της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης της γεννήτριας	223
9.1.2. Πρόβλεψη διακύμανσης της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα κατά τη διαδικασία επιβεβαίωσης της γεννήτριας.....	225
9.1.3. Πρόβλεψη διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας.....	228
9.1.4. Πρόβλεψη διακύμανσης της ταχύτητας του αέρα	230
9.2. Συζήτηση των αποτελεσμάτων της γεννήτριας κλιματικών δεδομένων	231
Κεφάλαιο 10°. Μελέτη περιπτώσεων και ανάλυση ευαισθησίας χρήσης του βιολογικού προσομοιώματος	233
10. Μελέτη περιπτώσεων και ανάλυση ευαισθησίας χρήσης του βιολογικού προσομοιώματος.....	235
10.1. Μελέτη περιπτώσεων	235
10.1.1. Μελέτη επίδρασης της ημερήσιας και νυχτερινής μεταβολής της θερμοκρασίας.....	236
10.1.2. Μελέτη επίδρασης μεταβολής της θερμοκρασίας για ορισμένο χρονικό διάστημα 238	
10.1.3. Μελέτη επίδρασης αυξομείωσης της θερμοκρασίας και το αντίστροφο της, για ορισμένο χρονικό διάστημα.....	241
10.1.4. Μελέτη επίδρασης της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας με σταθερή μέση τιμή	243
10.2. Συζήτηση από τη μελέτη περιπτώσεων χρήσης του βιοφυσικού προσομοιώματος.....	244
Κεφάλαιο 11°. Βελτιστοποίηση του βιοφυσικού προσομοιώματος.....	247
11. Βελτιστοποίηση του βιοφυσικού προσομοιώματος	249
11.1. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....	249
11.1.1. Αποτελέσματα 1 ^{ου} σεναρίου	250
11.1.2. Αποτελέσματα 2 ^{ου} σεναρίου	253
11.1.3. Αποτελέσματα 3 ^{ου} σεναρίου	256
11.2. Συζήτηση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης.....	260
Κεφάλαιο 12°. Συμπεράσματα	263
12. Συμπεράσματα.....	265
Κεφάλαιο 13°. Βιβλιογραφία	271
13. Βιβλιογραφία	273
Δημοσίευση Εργασίας	287

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1. Τιμές για τις εξισώσεις $F_n(T)$ και $PGRED$ για διάφορα επίπεδα θερμοκρασίας	77
Πίνακας 3.2. Τιμές του δυνάμενου ρυθμού αύξησης της φυλλικής επιφάνειας (POL, cm^2 φύλλο $^{-1}$ d $^{-1}$) και του δυνάμενου ρυθμού αύξησης του βάρους των καρπών (POF, g καρπό $^{-1}$ d $^{-1}$).....	86
Πίνακας 3.3. Όνομα παραμέτρων και αριθμητικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό το συντελεστή μετατροπής (C_T).....	94
Πίνακας 5.1. Μέσες τιμές καυσίμων τη χειμερινή περίοδο 2004-2005	148
Πίνακας 6.1. Τιμές παραμέτρων προσδιορισμού του κλιματικού προσομοιώματος	167
Πίνακας 6.2. Υπολογισμένες τιμές και τυπικό σφάλμα του του γινομένου των συντελεστών ανεμοφόρησης και ανεμοπίεσης $C_d \cdot \sqrt{C_w}$	169
Πίνακας 6.3. 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.....	172
Πίνακας 6.4. 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 την εισερχόμενη και φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία αντίστοιχα.	181
Πίνακας 6.5. 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 σχετική υγρασία του αέρα αντίστοιχα.	183
Πίνακας 7.1. Παράμετροι που απαιτούνται για την προσομοίωση της αύξησης της καλλιέργειας από το Tomgro.....	190
Πίνακας 9.1. Συντελεστής $Kt(h)$ για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας	221
Πίνακας 9.2. Συντελεστής $Kr(h)$ για τον υπολογισμό της Σχετικής Υγρασίας.....	222
Πίνακας 10.1. Μελέτη περιπτώσεων μεταβολής της θερμοκρασίας για ορισμένο χρονικό διάστημα (i).	238
Πίνακας 10.2. Μελέτη περιπτώσεων μεταβολής της θερμοκρασίας για ορισμένο χρονικό διάστημα (ii).	239
Πίνακας 10.3. Μελέτη περιπτώσεων αυξομείωσης της θερμοκρασίας και το αντίστροφο της, για ορισμένο χρονικό διάστημα.....	241

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1. Μερικοί από τους κυριότερους προσομοιωτές κλίματος των θερμοκηπίων.....	25
Εικόνα 2.2. Προσομοιωτές καλλιέργειας τομάτας.....	29
Εικόνα 2.3. Βιοφυσικά προσομοιώματα	32
Εικόνα 2.4. Σχηματική απεικόνιση των υπο-προσομοιωμάτων του Hortisim	35
Εικόνα 3.1. Απεικόνιση της σύνδεσης των επιμέρους ισοζυγίων με το κλιματικό προσομοίωμα.....	46
Εικόνα 3.2. Αρχιτεκτονική υλοποίησης του προσομοιωτή.....	47
Εικόνα 3.3. Γραφική απεικόνιση του κλιματικού μοντέλου	49
Εικόνα 3.4. Παραγόμενο αρχείο του Excel με αποτελέσματα του κλιματικού μοντέλου.....	50
Εικόνα 3.5. Υπολογισμός του αριθμού Nusselt σύμφωνα με το είδος ροής.....	53
Εικόνα 3.6. Διαγραμματική ροή του Βιολογικού Μοντέλου	73
Εικόνα 4.1. Γραφική απεικόνιση του προγράμματος ελέγχου κλίματος και άρδευσης του πειραματικού θερμοκηπίου.....	118
Εικόνα 4.2. Καλλιέργεια στο εσωτερικό του θερμοκηπίου	120
Εικόνα 4.3. Φυτά τομάτας σε διάφορα στάδια ανάπτυξης.....	121
Εικόνα 4.4. Καρποί σε διάφορα στάδια ωρίμανσης.....	130

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1. Έκταση καλλιεργούμενων θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα το 2001 (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων).....	4
Σχήμα 1.2. Διαχωρισμός θερμοκηπιακών καλλιεργειών το 2001 (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων).....	5
Σχήμα 1.3. Διαχωρισμός λαχανοκομικών καλλιεργειών το 2001 (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων).....	5
Σχήμα 3.1. Απεικόνιση με τη μορφή δένδρου της μεθόδου διακλάδωσης και φραγμού (Branch & Bound)	104
Σχήμα 4.1. Περιοχές δειγματοληψίας	112
Σχήμα 4.2. Απεικόνιση πειραματικού θερμοκηπίου	116
Σχήμα 4.3. Σχηματική απεικόνιση των αισθητήρων καταγραφής του κλίματος	122
Σχήμα 4.4. Σχηματική απεικόνιση της ανταλλαγής θερμικής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο	124
Σχήμα 4.5. Πειραματικό σχέδιο βιολογικών μετρήσεων	129
Σχήμα 5.1. Απεικόνιση της ποσοστιαίας κατανομής των τύπων των θερμοκηπιακών μονάδων	140
Σχήμα 5.2. Απεικόνιση της ποσοστιαίας κατανομής των υλικών κάλυψης στα θερμοκήπια της έρευνας	141
Σχήμα 5.3. Ποσοστιαία κατανομή των ανοιγμάτων αερισμού.....	142
Σχήμα 5.4. Ποσοστιαία κατανομή χρήσης διχτύων εντομοστεγανότητας.....	143
Σχήμα 5.5. Ποσοστιαία κατανομή των συστημάτων θέρμανσης.....	144
Σχήμα 5.6. Ποσοστιαία κατανομή της θέσης εφαρμογής των συστημάτων θέρμανσης.....	145
Σχήμα 5.7. Ποσοστιαία κατανομή του εξοπλισμού των θερμοκηπιακών μονάδων.....	146
Σχήμα 5.8. Ποσοστιαία κατανομή τους είδους καυσίμων	147
Σχήμα 5.9. Ποσοστιαία κατανομή ενεργειών για την αποφυγή των υγροποιήσεων.....	150
Σχήμα 5.10. Υγροποίηση στο κάλυμμα (α) και στην καλλιέργεια (β).....	151
Σχήμα 5.11. Ποσοστιαία κατανομή της μεθόδου επικονίασης των φυτών	152
Σχήμα 5.12. Ποσοστιαίος διαχωρισμός των ποιοτήτων τομάτας σε Extra και A	153
Σχήμα 5.13. Διακύμανση τιμής (€/ kg) χονδρικής πώλησης νωπής τομάτας στις Κεντρικές Λαχαναγορές Αθηνών-Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 1995-2004.....	154
Σχήμα 5.14. Ποσοστιαία κατανομή ανωμαλιών του καρπού	155
Σχήμα 5.15. Ποσοστιαία κατανομή μυκητολογικών ασθενειών.....	156
Σχήμα 5.16. Ποσοστιαία κατανομή προσβολών από έντομα.....	158
Σχήμα 6.1. Μετρημένος ρυθμός αερισμού (G_v) σε σχέση με τη μισή επιφάνεια ανοίγματος των παραθύρων και την ταχύτητα του αέρα ($A_{s,u}$), σε θερμοκήπιο με πλευρικά ανοίγματα χωρίς καλλιέργεια, η ευθεία γραμμή υπολογίστηκε από γραμμική συσχέτιση.	170
Σχήμα 6.2. Μετρημένος ρυθμός αερισμού (G_v) σε σχέση με τη μισή επιφάνεια ανοίγματος των παραθύρων και την ταχύτητα του αέρα ($A_{s,u}$), σε θερμοκήπιο με πλευρικά ανοίγματα με καλλιέργεια, η ευθεία γραμμή υπολογίστηκε από γραμμική συσχέτιση.	170
Σχήμα 6.3 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (— —) τιμών της θερμοκρασίας του αέρα, για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους.....	173
Σχήμα 6.4. (a), (b), (c), (d). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα σε (1:1) απεικόνιση, για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους.	173
Σχήμα 6.5 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (— —) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος, για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους.	174
Σχήμα 6.6 (a), (b), (c), (d). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους.	174
Σχήμα 6.7 (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (— —) τιμών της θερμοκρασίας της καλλιέργειας, για τις τρεις πειραματικές περιόδους.	175
Σχήμα 6.8 (a), (b), (c), (d). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας της καλλιέργειας σε (1:1) απεικόνιση, για τις τρεις πειραματικές περιόδους.....	175

Σχήμα 6.9 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (— —) τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους, για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους.	176
Σχήμα 6.10 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (— —) τιμών της σχετικής υγρασίας και των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (— —) τιμών της διαπνοής της καλλιέργειας, για δύο από τις τέσσερις πειραματικές περιόδους.	177
Σχήμα 6.11 (a), (b), (c), (d), (e), (f). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (— —) τιμών της καθαρής θερμικής ακτινοβολίας στο κάλυμμα, στην καλλιέργειας και στο έδαφος κατά τη διάρκεια δύο πειραματικών περιόδων.	179
Σχήμα 6.12 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (— —) τιμών της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) για δύο πειραματικές περιόδους.	180
Σχήμα 6.13. (a), (b), (c), (d). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) σε (1:1) απεικόνιση, για δύο πειραματικές περιόδους.	180
Σχήμα 6.14. (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (— —) τιμών της θερμοκρασίας του αέρα, του καλύμματος της καλλιέργειας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, για την πειραματική περίοδο 2005-2006.	182
Σχήμα 7.1. Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του συντελεστή μετατροπής (Cf), κατά τη διάρκεια των καταστροφικών μετρήσεων της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου.	191
Σχήμα 7.2. Ποσοστιαία κατανομή του ξηρού βάρους των φύλλων, βλαστού, καρπών και ρίζας σε σχέση με το συνολικό ξηρό βάρος του φυτού κατά τη διάρκεια των καταστροφικών μετρήσεων της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου.	191
Σχήμα 7.3. Σύγκριση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (—) μέσω τιμών πριν από τη βαθμονόμηση, του αριθμού των ώριμων καρπών.	192
Σχήμα 7.4. Σύγκριση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (—) μέσω τιμών πριν από τη βαθμονόμηση, του ξηρού βάρους των ώριμων καρπών.	192
Σχήμα 7.5. Σύγκριση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (◆) μέσω τιμών πριν από τη βαθμονόμηση, του αθροίσματος θερμοκρασιών (ανά καρπό) από την άνθιση έως τον σχηματισμό του καρπού.	193
Σχήμα 7.6. Σύγκριση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (◆) μέσω τιμών πριν από τη βαθμονόμηση, του αθροίσματος θερμοκρασιών (ανά καρπό) από τον σχηματισμό των καρπών έως την ωρίμανση και συγκομιδή.	194
Σχήμα 7.7 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (—) μέσω τιμών του αριθμού των κόμβων, σχηματισμένων, πραγματικών και αφαιρούμενων φύλλων κατά τη διάρκεια της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου.	195
Σχήμα 7.8 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (—) μέσω τιμών της φυλλικής επιφάνειας, του αριθμού των ταξιανθιών, του αριθμού των ώριμων-συγκομιζόμενων και πράσινων-σχηματιζόμενων καρπών, κατά τη διάρκεια της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου.	196
Σχήμα 7.9 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (—) μέσω τιμών του συνολικού ξηρού βάρους του φυτού, του ξηρού βάρους των φύλλων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών και του ξηρού βάρους του βλαστού, κατά τη διάρκεια της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου.	198
Σχήμα 7.10 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (—) μέσω τιμών του ξηρού βάρους των πράσινων καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών, του ξηρού βάρους των πράσινων και ώριμων καρπών και του ξηρού βάρους ανά αριθμό ώριμων καρπών, κατά τη διάρκεια της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου.	199
Σχήμα 7.11 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (—) μέσω τιμών του αριθμού των κόμβων, σχηματισμένων, πραγματικών και αφαιρούμενων φύλλων κατά τη διάρκεια της 2 ^{ης} πειραματικής περιόδου.	201
Σχήμα 7.12 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (—) μέσω τιμών της φυλλικής επιφάνειας, του αριθμού των ταξιανθιών, του αριθμού των ώριμων-συγκομιζόμενων και πράσινων-σχηματιζόμενων καρπών, κατά τη διάρκεια της 2 ^{ης} πειραματικής περιόδου.	202

Σχήμα 7.13 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (–) μέσων τιμών του συνολικού ξηρού βάρους του φυτού, του ξηρού βάρους των φύλλων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών και του ξηρού βάρους του βλαστού, κατά τη διάρκεια της 2 ^{ης} πειραματικής περιόδου.....	203
Σχήμα 7.14 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (–) μέσων τιμών του ξηρού βάρους των πράσινων καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών, του ξηρού βάρους των πράσινων και ώριμων καρπών και του ξηρού βάρους ανά αριθμό ώριμων καρπών, κατά τη διάρκεια της 2 ^{ης} πειραματικής περιόδου.....	204
Σχήμα 8.1 (a), (b) (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (– –) με χρήση του BioSiGreT τιμών, της θερμοκρασίας του αέρα, του καλύμματος της καλλιέργειας και του εδάφους, στις 11 Μαρτίου 2006.....	210
Σχήμα 8.2 (a), (b). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (– –) με χρήση του BioSiGreT τιμών, της σχετικής υγρασίας του αέρα και της διαπνοής της καλλιέργειας στις 11 Μαρτίου 2006.....	211
Σχήμα 8.3 (a), (b). Διακύμανση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων με το SimTom (–) & το BioSiGreT (–) μέσων τιμών, του αριθμού των κόμβων και των σχηματισμένων, φύλλων κατά τη διάρκεια της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου.....	211
Σχήμα 8.4 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων με το SimTom (–) & το BioSiGreT (–) μέσων τιμών της φυλλικής επιφάνειας, του αριθμού των ταξιανθιών, του αριθμού των ώριμων-συγκομιζόμενων και πράσινων-σχηματιζόμενων καρπών, κατά τη διάρκεια της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου.	212
Σχήμα 8.5 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων με το SimTom (–) & το BioSiGreT (–) μέσων τιμών του συνολικού ξηρού βάρους του φυτού, του ξηρού βάρους των φύλλων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών και του ξηρού βάρους του βλαστού, κατά τη διάρκεια της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου.....	214
Σχήμα 8.6 (a), (b), (c). Διακύμανση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων με το SimTom (–) & το BioSiGreT (–) μέσων τιμών του ξηρού βάρους των πράσινων καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών, του ξηρού βάρους των πράσινων και ώριμων καρπών, κατά τη διάρκεια της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου.	215
Σχήμα 9.1. Διακύμανση των μετρημένων ■ και υπολογισμένων ◇ τιμών της θερμοκρασίας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων στις 10 Οκτωβρίου 2005.	223
Σχήμα 9.2. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα στις 10 Οκτωβρίου 2005.....	224
Σχήμα 9.3. Διακύμανση των μετρημένων ■ και υπολογισμένων ◇ τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων στις 10 Οκτωβρίου 2005.	224
Σχήμα 9.4. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα στις 10 Οκτωβρίου 2005.....	225
Σχήμα 9.5. Διακύμανση των μετρημένων ■ και υπολογισμένων ◇ τιμών της θερμοκρασίας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων για τις περιόδους: a). 1 Οκτωβρίου 2007, b). 5 Οκτωβρίου 2007, c). 10 Φεβρουαρίου 2008, d). 15 Μαρτίου 2008.	226
Σχήμα 9.6. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα για τις περιόδους: a). 1 Οκτωβρίου 2007, b). 5 Οκτωβρίου 2007, c). 10 Φεβρουαρίου 2008, d). 15 Μαρτίου 2008.....	227
Σχήμα 9.7. Διακύμανση των μετρημένων ■ και υπολογισμένων ◇ τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων για τις περιόδους: a). 1 Οκτωβρίου 2007, b). 5 Οκτωβρίου 2007, c). 10 Φεβρουαρίου 2008, d). 15 Μαρτίου 2008.	227
Σχήμα 9.8. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα για τις περιόδους: a). 1 Οκτωβρίου 2007, b). 5 Οκτωβρίου 2007, c). 10 Φεβρουαρίου 2008, d). 15 Μαρτίου 2008.....	228

Σχήμα 9.9. Διακύμανση των μετρημένων ■ και υπολογισμένων ϙ τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων για τις περιόδους: a). 1 Οκτωβρίου 2007, b). 5 Οκτωβρίου 2007, c). 10 Φεβρουαρίου 2008, d). 15 Μαρτίου 2008.	229
Σχήμα 9.10. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας για τις περιόδους: a). 1 Οκτωβρίου 2007, b). 5 Οκτωβρίου 2007, c). 10 Φεβρουαρίου 2008, d). 15 Μαρτίου 2008.....	229
Σχήμα 9.11. Διακύμανση των μετρημένων ■ και υπολογισμένων ϙ τιμών της ταχύτητας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων για τις περιόδους: a). 1 Οκτωβρίου 2007, b). 5 Οκτωβρίου 2007, c). 10 Φεβρουαρίου 2008, d). 15 Μαρτίου 2008.	230
Σχήμα 10.1 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (ϙ, 20/15°C), (■, 24/15°C), (▲, 30/15°C).....	237
Σχήμα 10.2 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (ϙ, 20/15°C), (■, 20/13°C), (▲, 20/11°C).....	237
Σχήμα 10.3 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (ϙ, 20/15°C), (■, 18/13°C για την περίοδο από την 21 ^η έως 30 ^η ημέρα), (▲, 18/13°C για την περίοδο από την 21 ^η έως 30 ^η ημέρα και 22/17°C για την περίοδο από την 41 ^η έως 50 ^η ημέρα).....	240
Σχήμα 10.4 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (ϙ, 20/15°C), (■, 18/13°C για την περίοδο από την 21 ^η έως 30 ^η ημέρα), (▲, 18/13°C για την περίοδο από την 41 ^η έως 50 ^η ημέρα).....	240
Σχήμα 10.5 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (ϙ, 20/15°C), (■, 22/17°C για την περίοδο από την 21 ^η έως 30 ^η ημέρα και 18/13°C για την περίοδο από την 41 ^η έως 50 ^η ημέρα), (▲, 18/13°C για την περίοδο από την 21 ^η έως 30 ^η ημέρα και 22/17°C για την περίοδο από την 41 ^η έως 50 ^η ημέρα).	242
Σχήμα 10.6 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (ϙ, 20/15°C), (■, 25/13°C).....	242
Σχήμα 11.1 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων με SimTom (▲) και των βέλτιστα υπολογισμένων (■) τιμών, ανάπτυξης και παραγωγής βιομάζας φυτών τομάτας κατά τη διάρκεια της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης.....	251
Σχήμα 11.2. Ποσοστό ανοίγματος (%) των παραθύρων κατά τη διάρκεια της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης.....	251
Σχήμα 11.3. Διακύμανση των μετρημένων (–) και των βέλτιστα υπολογισμένων (–) τιμών, της θερμοκρασίας του αέρα (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης.....	252
Σχήμα 11.4. Διακύμανση των μετρημένων (–) και των βέλτιστα υπολογισμένων (–) τιμών, της θερμοκρασίας του καλύμματος (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 1 ^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης.....	252
Σχήμα 11.5 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων με SimTom (▲) και των βέλτιστα υπολογισμένων (■) τιμών, ανάπτυξης και παραγωγής βιομάζας φυτών τομάτας κατά τη διάρκεια της 2 ^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης.....	254
Σχήμα 11.6. Ποσοστό ανοίγματος (%) του συστήματος θέρμανσης και των παραθύρων κατά τη διάρκεια της 2 ^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης.....	254

Σχήμα 11.7. Διακύμανση των μετρημένων (–) και των βέλτιστα υπολογισμένων (–) τιμών, της θερμοκρασίας του αέρα (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 2 ^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης.....	255
Σχήμα 11.8. Διακύμανση των μετρημένων (–) και των βέλτιστα υπολογισμένων (–) τιμών, της θερμοκρασίας του καλύμματος (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 2 ^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης	255
Σχήμα 11.9 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων με SimTom (▲) και των βέλτιστα υπολογισμένων (■) τιμών, ανάπτυξης και παραγωγής βιομάζας φυτών τομάτας κατά τη διάρκεια της 3 ^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης.....	257
Σχήμα 11.10. Ποσοστό ανοίγματος (%) του συστήματος θέρμανσης και των παραθύρων κατά τη διάρκεια της 3 ^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης	257
Σχήμα 11.11. Διακύμανση των μετρημένων (–) και των βέλτιστα υπολογισμένων (–) τιμών, της θερμοκρασίας του αέρα (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 3 ^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης.....	258
Σχήμα 11.12. Διακύμανση των μετρημένων (–) και των βέλτιστα υπολογισμένων (–) τιμών, της θερμοκρασίας του καλύμματος (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 3 ^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης	258

Κατάλογος Συμβόλων

Σύμβολο	Επεξήγηση	Μονάδες	Αρ. Εξίσωσης
abs_i	απόλυτη υγρασία του αέρα	kg m^{-3}	(3.10)
a_1	παράμετρος της εξίσωσης Gompertz	-	(3.75)
abs_x	απόλυτη υγρασία επιφάνειας του καλύμματος, της καλλιέργειας	kg m^{-3}	(3.10)
A_c	επιφάνεια του καλύμματος	m^2	(3.9)
A_{gr}	επιφάνεια του καλυμμένου εδάφους	m^2	(3.1)
Al	φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας	m^2	(3.59)
$Al(i)$	δυναμικός ρυθμός αύξησης της φυλλικής επιφάνειας	-	(3.74)
$albedo$	ανάκλαση των κατασκευαστικών στοιχείων του θερμοκηπίου	-	(3.35)
ASR_{fr}	αφομοιώσιμα στοιχεία που απαιτούνται για το σχηματισμό του καρπού	$\text{g CH}_2\text{O g}^{-1} \text{DM}$	(3.91)
ASR_l	αφομοιώσιμα στοιχεία που απαιτούνται για το σχηματισμό του φύλλου	$\text{g CH}_2\text{O g}^{-1} \text{DM}$	(3.91)
ASR_{rt}	αφομοιώσιμα στοιχεία που απαιτούνται για το σχηματισμό της ρίζας	$\text{g CH}_2\text{O g}^{-1} \text{DM}$	(3.91)
ASR_{st}	αφομοιώσιμα στοιχεία που απαιτούνται για το σχηματισμό του βλαστού	$\text{g CH}_2\text{O g}^{-1} \text{DM}$	(3.91)
b_1	παράμετρος της εξίσωσης Gompertz	-	(3.75)
Bc	μεταβολή της ειδικής φυλλικής επιφάνειας σε $\mu\text{mol mol}^{-1}$ εξαιτίας της συγκέντρωσης του CO_2 του περιβάλλοντος	$(\mu\text{mol mol}^{-1})^{-1}$	(3.78)
$Blanch$	ποσοστό επικάλυψης της επιφάνειας του καλύμματος με υλικό σκίασης	-	(3.37)
BT	μεταβολή της ειδικής φυλλικής επιφάνειας ανά $^{\circ}\text{C}$	-	(3.79)
c_1	παράμετρος της εξίσωσης Gompertz	-	(3.75)
Ca	συγκέντρωση του CO_2 στο εσωτερικό του θερμοκηπίου	$\mu\text{mol mol}^{-1}$	(3.56)
c'_c	ειδική θερμότητα του καλύμματος	$\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1}$	(3.9)
C_d	συντελεστής ανεμοπίεσης	-	(3.8)
C_f	συντελεστής μετατροπής των αφομοιώσιμων στοιχείων σε ξηρό βάρος	-	(3.64)
c_i	ειδική θερμότητα του αέρα – θερμοχωρητικότητα	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	(3.1)
$Ci(t)$	συγκέντρωση του τροχιοδεικτικού αερίου τη στιγμή t εντός του θερμοκηπίου	ppm	(4.4)
$Ci(to)$	αρχική συγκέντρωση του N_2O	ppm	(4.5)
cp	τιμή παραγωγής του άνθρακα	$\text{g DM g}^{-1} (\text{CH}_2\text{O})$	(3.71)
C_{pool}	δεξαμενή αποθήκευσης αφομοιώσιμων στοιχείων	$\text{g CH}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$	(3.64)
c_s	ειδική θερμότητα του εδάφους	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	(3.46)
c_v	ειδική θερμότητα της καλλιέργειας	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	(3.22)
C_w	συντελεστής ανεμοφόρτησης	-	(3.8)
$C_o(t)$	συγκέντρωση του τροχιοδεικτικού αερίου τη στιγμή t εκτός θερμοκηπίου	ppm	(4.4)
D	παράγοντας μετατροπής από $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ σε $\text{gr CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	-	(3.65)
d_c	χαρακτηριστικό μήκος του καλύμματος	m	(3.3)
dC_i	μεταβολή συγκέντρωσης των υδρατμών	kg m^{-3}	(3.49)
dC_{ip}	μεταβολή της συγκέντρωσης του αερίου δείκτη	ppm	(4.4)
D_d	διάρκεια της ημέρας	hours	(3.97)
$DEMAND$	συνολική απαίτηση ξηρού βάρους για τα υπέργεια	$\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$	(3.85)

	μέρη του φυτού		
Df	συνολική απαίτηση ξηρού βάρους για την αύξηση των καρπών		(3.82)
Dl	συνολική απαίτηση ξηρού βάρους για την αύξηση των φύλλων		(3.81)
d_n	αριθμός της ημέρας του έτους		(3.104)
d_o	οι απώλειες του θερμοκηπίου	$m^3 sec^{-1}$	(3.8)
dp	πυκνότητα των φυτών	φυτά m^{-2}	(3.53)
dpa	σημείο δρόσου του αέρα	K	(3.13)
dr	ρυθμός απορροής	-	(4.1)
d_s	χαρακτηριστικό μήκος του εδάφους	m	(3.3)
Ds	συνολική απαίτηση ξηρού βάρους για την αύξηση των βλαστών	$g m^{-2} d^{-1}$	(3.83)
dt	χρονικό διάστημα μεταβολής του ισοζυγίου	s	(3.1)
dT_c	μεταβολή θερμοκρασίας στο κάλυμμα	K	(3.9)
$DTFAST$	διάρκεια ημέρας	-	(3.62)
dT_i	διαφορά θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου	K	(3.1)
dT_s	μεταβολή θερμοκρασίας του εδάφους	K	(3.46)
dT_v	μεταβολή θερμοκρασίας της καλλιέργειας	K	(3.22)
d_v	χαρακτηριστικό μήκος της καλλιέργειας,	m	(3.3)
Dv	συντελεστής μοριακής διάχυσης των υδρατμών	$m^2 s^{-1}$	(3.11)
d_{vap}	διάχυση των υδρατμών του νερού	m	(3.16)
d_x	χαρακτηριστικό μήκος καλλιέργειας, εδάφους, καλύμματος	m	(3.3)
E	το σύνολο του νερού εφαρμογής	$kg m^{-2}$	(4.1)
e_i	πίεση στο εσωτερικό του θερμοκηπίου	kPa	(3.50)
e_o	πίεση στον περιβάλλον χώρο του θερμοκηπίου	kPa	(3.50)
E_{th}	παροχή ενέργειας από το σύστημα θέρμανση	W	(4.3)
F	αριθμός νέων καρπών	no καρπών	(3.61)
$F(C)$	παράγοντας υπολογισμού επίδρασης της συγκέντρωση του CO ₂ του περιβάλλοντος στο σχηματισμό των κόμβων των βλαστών		(3.53)
$Fa(t)$	ροή του αερίου δείκτη που εισήχθη εντός του θερμοκηπίου	$mg^3 s^{-1}$	(4.4)
Fc	παράγοντας επίδρασης της συγκέντρωσης του CO ₂ του περιβάλλοντος στην ειδική φυλλική επιφάνεια		(3.77)
f_{dew}	παράγοντας του σημείου δρόσου του αέρα	m^2	(3.14)
F_{fr}	λόγος των αφομοιώσιμων στοιχείων που μεταφέρονται της καρπούς προς το συνολικό βάρος του φυτού	-	(3.91)
F_l	λόγος των αφομοιώσιμων στοιχείων που μεταφέρονται στα φύλλα, προς το συνολικό βάρος του φυτού	-	(3.91)
$Fn(T)$	παράγοντας υπολογισμού επίδρασης της (υπο-όπτιμης) θερμοκρασίας στο σχηματισμό των οργάνων του φυτού	-	(3.53)
$FRAGCOEF$	συντελεστής υπολογισμού της ηλικίας των καρπών	-	-
F_{rt}	λόγος των αφομοιώσιμων στοιχείων που μεταφέρονται στη ρίζα προς το συνολικό βάρος του φυτού	-	(3.91)
fs	λόγος απαίτησης ξηρού βάρους των φύλλων και των βλαστών	-	(3.84)
F_{st}	λόγος των αφομοιώσιμων στοιχείων που μεταφέρονται στο βλαστό προς το συνολικό βάρος	-	(3.91)

	του φυτού		
Ft	παράγοντας επίδρασης της θερμοκρασίας στην ειδική φυλλική επιφάνεια	-	(3.77)
fl	παράγοντας υπολογισμού της επίδρασης του <i>plastochron index</i> στον αριθμό των καρπών ανά ταξιανθία	-	(3.60)
f_{wc}	μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της σκίασης της καλλιέργειας	m^2	(3.34)
g	επιτάχυνση της βαρύτητας	$m\ s^{-2}$	(3.4)
$G(t)$	ροή του αέρα που ανανεώθηκε	$m^3\ s^{-1}$	(4.4)
G_{abs}	απορροφώμενη από την καλλιέργεια ηλιακή ακτινοβολία	$W\ m^{-2}$	(3.23)
$g_{Al(i)}$	πραγματικός ρυθμός αύξησης της φυλλικής επιφάνειας	$m^2\ m^{-2}\ d^{-1}$	(3.90)
G_{cabs}	εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία	$W\ m^{-2}$	(3.34)
$g_{F(i)}$	πραγματικός ρυθμός αύξησης του ξηρού βάρους των καρπών	$g\ m^{-2}\ d^{-1}$	(3.87)
$g_{L(i)}$	πραγματικός ρυθμός αύξησης του ξηρού βάρους των φύλλων	$g\ m^{-2}\ d^{-1}$	(3.88)
g_r	αγωγιμότητα μεταφοράς των υδρατμών στην επιφάνεια του καλύμματος	$m\ s^{-1}$	(3.10)
Gr	αδιάστατος αριθμός Grashof	-	(3.4)
$g_{S(i)}$	πραγματικός ρυθμός αύξησης του ξηρού βάρους των κόμβων των βλαστών	$g\ m^{-2}\ d^{-1}$	(3.89)
G_v	ρυθμός ανανεώσεων του αέρα	$m^3\ sec^{-1}$	(3.7)
h	ύψος της καλλιέργειας	m	(3.40)
h_{fg}	λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης των υδρατμών	$J\ kg^{-1}$	(3.10)
h_s	υπολογίζεται από την έναρξη της ημέρας		(3.97)
$h_{V(x,i)}$	συντελεστής μεταβολής με συναγωγή μεταξύ του αέρα και καλλιέργειας, εδάφους, καλύμματος	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$	(3.2)
K	συντελεστής μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία	-	(3.65)
Kc	καλλιεργητικός συντελεστής	-	(4.2)
K_l	συντελεστής μεταφοράς λανθάνουσας θερμότητας	$J\ kPa^{-1}\ s^{-1}\ m^{-2}$	(3.50)
$Kr(h)$	συντελεστής υπεύθυνος για τον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας του αέρα	-	(3.93)
K_s	συντελεστής μεταφοράς αισθητής θερμότητας	$J\ K^{-1}\ s^{-1}\ m^{-2}$	(3.6)
$Kt(h)$	συντελεστής υπεύθυνος για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του αέρα	K	(3.92)
k_v	καλλιεργητικός συντελεστής μείωσης της ακτινοβολίας	-	(3.45)
La	ενεργή φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας	m^2	(3.65)
LAI	δείκτης φυλλικής επιφάνειας	m^2	(3.25)
Lax	κρίσιμο σημείο της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας, πάνω από το οποίο τα φύλλα πεθαίνουν λόγω σκίασης	m^2	(3.59)
Le	αδιάστατος αριθμός Lewis	-	(3.15)
l_s	λεπτότητα στρώματος εδάφους	m	(3.46)
m	συντελεστής περατότητας της ηλιακής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια	-	(3.65)
$MAINT_{fr}$	συντελεστής για την αναπνοής διατήρησης των καρπών	$g\ CH_2O\ g^{-1}\ DM\ d^{-1}$	(3.70)
max	μέγιστη τιμή όσων βρίσκονται εντός παρενθέσεων	-	(3.69)
m_v	μάζα της καλλιέργειας ανά μονάδα καλυμμένου εδάφους	$kg\ m^{-2}$	(3.22)

$MAINT_l$	συντελεστής για την αναπνοής διατήρησης των φύλλων	$g\ CH_2O\ g^{-1}\ DM\ d^{-1}$	(3.70)
N	συνολικός αριθμός των ηλικιακών κλάσεων	-	(3.52)
n	αριθμός των ημερών του έτους	-	(3.104)
$Nf(i)$	αριθμός καρπών της ηλικιακής κλάσης (i)	-	(3.82)
$Nl(i)$	αριθμός αυξανόμενων φύλλων στην ηλικιακή κλάση (i)	$no\ m^{-2}$	(3.74)
Nn	στιγμαίος αριθμός των κόμβων του βλαστού	-	(3.57)
$Ns(i)$	αριθμός αυξανόμενων κόμβων του βλαστού στην ηλικιακή κλάση (i)	$no\ m^{-2}$	(3.84)
Nt	αριθμός των κόμβων του βλαστού στον οποίο σχηματίζεται η πρώτη ταξιανθία	-	(3.57)
$Nu_{(x,i)}$	αδιάστατος αριθμός Nusselt r	-	(3.3)
ρ	πυκνότητα του νερού	-	(4.3)
ρ_l	πλάτος διπλής σειράς της καλλιέργειας	m	(3.39)
PAR	φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία	$\mu mol\ photons\ m^{-2}\ s^{-1}$	(3.80)
p_{cf}	κλάσμα συμπυκνώσεως λεπτού στρώματος της επιφάνειας του καλύμματος	-	(3.17)
p_{cl}	μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια	-	(3.20)
pf	εξίσωση των μίσχων στο συνολικό βάρος των φύλλων	-	(3.81)
Pgd	ρυθμός φωτοσύνθεσης	$g\ CH_2O\ m^{-2}\ d^{-1}$	(3.64)
$PGRED$	παράγοντας επίδρασης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος σε συνθήκες κορεσμένου φωτός στο ρυθμό αφομοίωσης της συγκέντρωσης του CO_2	-	(3.68)
Pm	ρυθμός αφομοίωσης της συγκέντρωσης του CO_2 από τα φύλλα σε περιβάλλον κορεσμένου φωτός	$\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$	(3.65)
Pmc	εξίσωση της συγκέντρωσης του CO_2 σε συνθήκες κορεσμένου φωτός	$\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$	(3.68)
Pn	συνολική αφομοίωση των ελεύθερων υλικών	$g\ CH_2O\ m^{-2}\ d^{-1}$	(3.72)
$POF(i)$	δυναμικός ρυθμός αύξησης ανά καρπό ηλικιακής κλάσης I σε όπτιμη θερμοκρασία και συγκέντρωση CO_2	$g\ fruit^{-1}\ d^{-1}$	(3.82)
$POL(i)$	μέγιστος ρυθμός αύξησης της φυλλικής επιφάνειας για κάθε μεμονωμένο φύλλο	$cm^2\ \phi\acute{y}\lambda\lambda o^{-1}\ d^{-1}$	(3.74)
Pr	αδιάστατος αριθμός Prandtl	-	(3.5)
p_v	κλάσμα της επιφάνειας της καλλιέργειας προς τη συνολικά καλυπτόμενη επιφάνεια του εδάφους	-	(3.17)
$Q_{V(i,ci)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα και της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος	$W\ m^{-2}$	(3.1)
$Q_{V(o,co)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του περιβάλλοντος αέρα και της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος	$W\ m^{-2}$	(3.9)
$Q_{V(v,i)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ καλλιέργειας και αέρα	$W\ m^{-2}$	(3.1)
$Q_{V(x,i)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή	$W\ m^{-2}$	(3.2)
$Q(i)$	αριθμός οργάνων ανάλογος της ηλικιακής κλάσης i	$no\ m^{-2}$	(3.52)
$Q_{l0,c}$	επίδραση της θερμοκρασίας στην αναπνοή διατήρησης	-	(3.70)
$Q_{C(c)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στο κάλυμμα	$W\ m^{-2}$	(3.9)
$Q_{C(v)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στην καλλιέργεια	$W\ m^{-2}$	(3.22)

Q_e	συντελεστής απορροφητικότητας του CO ₂	$\mu\text{mol CO}_2$ $\mu\text{mol}^{-1} \text{ photons}$	(3.65)
$Q_{R(c, sky)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του καλύμματος και του ουρανού	W m^{-2}	(3.9)
$Q_{R(s, c)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του εδάφους και του καλύμματος	W m^{-2}	(3.9)
$Q_{R(s, sky)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του εδάφους και του ουρανού	W m^{-2}	(3.46)
$Q_{R(s, v)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του εδάφους και της καλλιέργειας	W m^{-2}	(3.22)
$Q_{R(v, c)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του καλύμματος	W m^{-2}	(3.9)
$Q_{R(v, sky)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του ουρανού	W m^{-2}	(3.22)
Q_{rh}	πυκνότητα ροής θερμότητας από το σύστημα θέρμανσης	W m^{-2}	(3.1)
$Q_{S(c)}$	ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στο κάλυμμα	W m^{-2}	(3.9)
$Q_{S(s)}$	ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος	W m^{-2}	(3.46)
$Q_{S(v)}$	ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στην καλλιέργεια	W m^{-2}	(3.22)
Q_{Tr}	πυκνότητα ροής θερμότητας μεταξύ του αέρα και της καλλιέργειας μέσω της διαπνοής	W m^{-2}	(3.22)
$Q_{V(ei, eo)}$	μεταβολή της μάζας λόγω ανταλλαγής με τον εξωτερικό αέρα	W m^{-2}	(3.49)
$Q_{V(i, o)}$	ροή θερμότητας λόγω ανταλλαγής με τον εξωτερικό αέρα	W m^{-2}	(3.1)
$Q_{V(s, i)}$	πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ εδάφους και αέρα	W m^{-2}	(3.1)
q_w	ειδική θερμότητα του νερού	$\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	(4.3)
Q_w	η παροχή του νερού	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	(4.3)
R	ρυθμός αύξησης των οργάνων	d^{-1}	(3.52)
$R(h)$	σχετική υγρασία του αέρα στον περιβάλλον χώρο	-	(3.93)
r_a	αεροδυναμική αντίσταση της μιας πλευράς των φύλλων	s m^{-1}	(3.27)
Ra	ρυθμός αποβολής καρπών	no καρπών d^{-1}	(3.61)
r_{ae}	αεροδυναμική αντίσταση των φύλλων	s m^{-1}	(3.27)
Rc	λόγος της παραγόμενης ποσότητας προς την απαιτούμενη	-	(3.86)
$rd(i)$	ρυθμός θανάτου του αριθμού των οργάνων	$\text{no m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	(3.52)
$rdI(i)$	ρυθμός μείωσης των φύλλων	$\text{no m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	(3.58)
$rDp(i)$	δυναμικός ρυθμός αύξησης του ξηρού βάρους των φύλλων ηλικιακής κλάσης i	$\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	(3.76)
$rdr(i)$	ρυθμός νέκρωσης των φύλλων ανάλογα με την ηλικιακή κλάση i	$\text{no m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	(3.58)
$rdrs$	μέγιστος ρυθμός νέκρωσης λόγω σκίασης των φύλλων	$\text{no m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	(3.59)
$rDs(i)$	απαιτούμενο ξηρό βάρος για την αύξηση των βλαστών στην ηλικιακή κλάση (i)	$\text{g φυτό}^{-1} \text{ d}^{-1}$	(3.83)
$RDVFR$	ηλικία των καρπών της προηγούμενης μέρας	-	(3.63)
$RDVFRF$	ηλικία των καρπών τελευταίας ημέρας	-	(3.63)
$RDVLV$	ηλικία των φύλλων της προηγούμενης μέρας	-	(3.62)
$RDVLVF$	ηλικία των φύλλων τελευταίας ημέρας	-	(3.62)
r_e	συνολική αντίσταση μεταφοράς των υδρατμών στα φύλλα	s m^{-1}	(3.27)
Re	αδιάστατος αριθμός Reynolds	-	(3.5)
Rf	ρυθμός σχηματισμού νέων καρπών	$\text{no m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	(3.60)

rg	αναπνοή αύξησης	$\text{g CH}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$	(3.71)
$Rg(h)$	ηλιακή ακτινοβολία στον περιβάλλον χώρο	W m^{-2}	(3.97)
Rg_{Ext}	πυκνότητα ροής της εξωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας	W m^{-2}	(3.36)
Rg_{ExtDif}	πυκνότητα ροής της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας	W m^{-2}	(3.21)
Rg_{ExtDir}	πυκνότητα ροής της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας	W m^{-2}	(3.21)
Rg_{In}	πυκνότητα ροής της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου	W m^{-2}	(3.21)
Rh_{max}	μέγιστη τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας	-	(3.93)
Rh_{min}	ελάχιστη τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας	-	(3.93)
RI	ρυθμός εμφάνισης νέων φύλλων	$\text{no m}^{-2} \text{d}^{-1}$	(3.57)
rm	μέγιστος ρυθμός σχηματισμού των κόμβων των βλαστών ανά φυτό	$\text{no φυτό}^{-1} \text{d}^{-1}$	(3.53)
Rm	πυκνότητα ροής φωτονίων	$\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$	(3.65)
rmr	ρυθμός αναπνοής διατήρησης	$\text{g CH}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$	(3.64)
Rn	ρυθμός εμφάνισης των νέων κόμβων των βλαστών	no m^{-2}	(3.53)
rra	σχετικός ρυθμός αποβολής	no καρπών d^{-1}	(3.61)
rx	ρυθμός αλλαγής του αριθμού των οργάνων	$\text{no m}^{-2} \text{d}^{-1}$	(3.52)
RH_i	σχετική υγρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου	-	(3.14)
S_f	επιφάνεια διαφυγών	m^2	(3.8)
Sh	αδιάστατος αριθμός Sherwood	-	(3.11)
SLA	ειδική φυλλική επιφάνεια των φύλλων της ηλικιακής κλάσης (i)	$\text{m}^2 \text{g}^{-1}$	(3.76)
SLA_{max}	μέγιστη τιμή της ειδικής φυλλικής επιφάνειας	g m^{-2}	(3.80)
SLA_{min}	ελάχιστη τιμή της ειδικής φυλλικής επιφάνειας	g m^{-2}	(3.80)
S_o	συνολική επιφάνεια των πλευρικών παραθύρων	m^2	(3.8)
Sp	παράγοντας επίδρασης της πυκνότητας ροής των φωτονίων στην ειδική φυλλική επιφάνεια		(3.77)
SUPPLY	παραγόμενη βιομάζα της καλλιέργειας	$\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$	(3.64)
T	εικονική θερμοκρασία τόσο του περιβάλλοντος αέρα όσο και της επιφάνειας του καλύμματος	K	(3.4)
tI	εμπειρική σταθερά	-	(3.69)
t_1	ο αριθμός των ημερών για την εμφάνιση του φύλλου μήκους 2cm	-	(3.75)
t_2	εμπειρική σταθερά	-	(3.69)
Ta	παράγοντας υπολογισμού της επίδρασης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στον ρυθμό αφομοίωσης	-	(3.65)
$T_a(h)$	θερμοκρασία του αέρα στον περιβάλλον χώρο	K	(3.92)
T_{amax}	μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας	K	(3.92)
T_{amin}	ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας	K	(3.92)
T_c	θερμοκρασία του καλύμματος	K	(3.17)
t_c	ώρα ανατολής του ηλίου		(3.98)
T_i	θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου	K	(3.2)
T_{in}	θερμοκρασία εισόδου του νερού	$^{\circ}\text{C}$	(4.3)
t_l	ώρα δύσης του ηλίου		(3.98)
T_o	θερμοκρασία αέρα του περιβάλλοντος	K	(3.6)
T_{out}	θερμοκρασία εξόδου του νερού	$^{\circ}\text{C}$	(4.3)

tpl	ο λόγος σχηματισμού των ταξιανθιών προς τα φύλλα	-	(3.57)
$Trans$	περατότητα των κατασκευαστικών στοιχείων του θερμοκηπίου	-	(3.35)
Tr_{con}	περατότητα του υλικού κάλυψης	-	(3.37)
Tr_{gh}	περατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από το υλικό κάλυψης	-	(3.37)
T_s	θερμοκρασία του εδάφους	K	(3.18)
T_{sky}	θερμοκρασία του ουρανού	K	
T_v	θερμοκρασία της καλλιέργειας	K	(3.17)
T_x	θερμοκρασία καλλιέργειας, εδάφους, καλύμματος	K	(3.2)
u	ταχύτητα του αέρα	$m\ sec^{-1}$	(3.5)
V	όγκος του θερμοκηπίου	m^3	(3.1)
$V(h)$	ταχύτητα του αέρα στον περιβάλλον χώρο	$m\ s^{-1}$	(3.94)
V_{ave}	μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας	$m\ s^{-1}$	(3.95)
V_{max}	μέγιστη τιμή της ταχύτητας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας	$m\ s^{-1}$	(3.94)
V_{min}	ελάχιστη τιμή της ταχύτητας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας	$m\ s^{-1}$	(3.94)
VPD_{int}	έλλειμμα κορεσμού του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου	kPa	(3.23)
w	ποσοστό ανοίγματος των παραθύρων	-	(3.8)
w_l	πλάτος διπλής σειράς της καλλιέργειας	m	(3.39)
w_c	γωνία πρόσπτωσης του ηλίου		(3.100)
W_{fr}	ξηρό βάρος καρπών	$g\ m^{-2}$	(3.70)
W_l	ξηρό βάρος φύλλων	$g\ m^{-2}$	(3.70)
w_l	γωνία πρόσπτωσης του ηλίου		(3.99)
W_{st}	ξηρό βάρος βλαστού	$g\ m^{-2}$	(3.70)
x	καλλιέργεια, έδαφος, κάλυμμα	-	(3.2)
α	λόγος των νέων ταξιανθιών προς τα νέα φύλλα.	-	(3.57)
α_l	διάχυση της θερμότητας του αέρα	-	(3.5)
α_e	συντελεστής εξάτμισης	-	(4.2)
$\alpha_{Sc,dif}$	απορροφητικότητα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας	-	(3.21)
$\alpha_{Sc,dir}$	απορροφητικότητα της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας	-	(3.21)
α_{Ss}	απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από το έδαφος	-	(3.48)
α_{Sv}	απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια	-	(3.43)
β	συντελεστής θερμικής διαστολής του αέρα t	K^{-1}	(3.4)
γ	ψυχρομετρική σταθερά	$kPa\ K^{-1}$	(3.51)
Γ	η συγκέντρωση του CO ₂ στο αντισταθμιστικό σημείο	$\mu mol\ mol^{-1}$	(3.66)
Γ_d	ημερήσια γωνία		(3.104)
Δ	κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδρατμών	-	(3.24)
δ	γωνία διακύμανσης του ήλιου		(3.101)
Δt	το χρονικό διάστημα στο οποίο το νερό κυκλοφορεί στο σύστημα	s	(4.3)
ϵ_{ce}	εκπεμπικότητα της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος	-	(3.19)
ϵ_{ci}	εκπεμπικότητα της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος	-	(3.17)
ϵ_s	εκπεμπικότητα του εδάφους	-	(3.18)
ϵ_w	εκπεμπικότητα του νερού	-	(3.17)
ϵ_v	εκπεμπικότητα της καλλιέργειας	-	(3.17)
ϵ_o	φωτοχημική δραστηριότητα σε συνθήκες απουσίας	$mol\ CO_2\ mol^{-1}$	(3.66)

	οξυγόνου	photons μmol mol^{-1}	
λ	θερμική αγωγιμότητα του αέρα	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	(3.3)
λ_l	λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού	kJ kg^{-1}	(4.2)
ν	κινηματικό ιξώδες του αέρα	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	(3.4)
ρ	πυκνότητα του αέρα του θερμοκηπίου	kg m^{-3}	(3.1)
ρ_{ce}	ανακλαστικότητα της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος στη θερμική ακτινοβολία	-	(3.19)
ρ_{ci}	ανακλαστικότητα της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος στη θερμική ακτινοβολία	-	(3.17)
ρ_s	ανακλαστικότητα του εδάφους στη θερμική ακτινοβολία	-	(3.18)
ρ'_s	πυκνότητα εδάφους	kg m^{-3}	(3.46)
ρ_{S_s}	ανακλαστικότητα του εδάφους στην ηλιακή ακτινοβολία	-	(3.21)
ρ_{S_v}	ανακλαστικότητα της καλλιέργειας στην ηλιακή ακτινοβολία	-	(3.21)
ρ_v	ανακλαστικότητα της καλλιέργειας στη θερμική ακτινοβολία	-	(3.17)
σ	σταθερά του Steffan-Boltzmann	$\text{W m}^2 \text{K}^{-4}$	(3.17)
τ	διαπερατότητα του θερμοκηπίου στην εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία	-	(4.2)
τ_{fr}	περατότητα ηλιακής ακτινοβολίας μέσω των παραθύρων	-	(3.21)
τ_{sv}	περατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια	-	(3.43)
Φ	γεωγραφικό πλάτος της περιοχής		(3.101)

Κεφάλαιο 1°. Εισαγωγή

1. Εισαγωγή

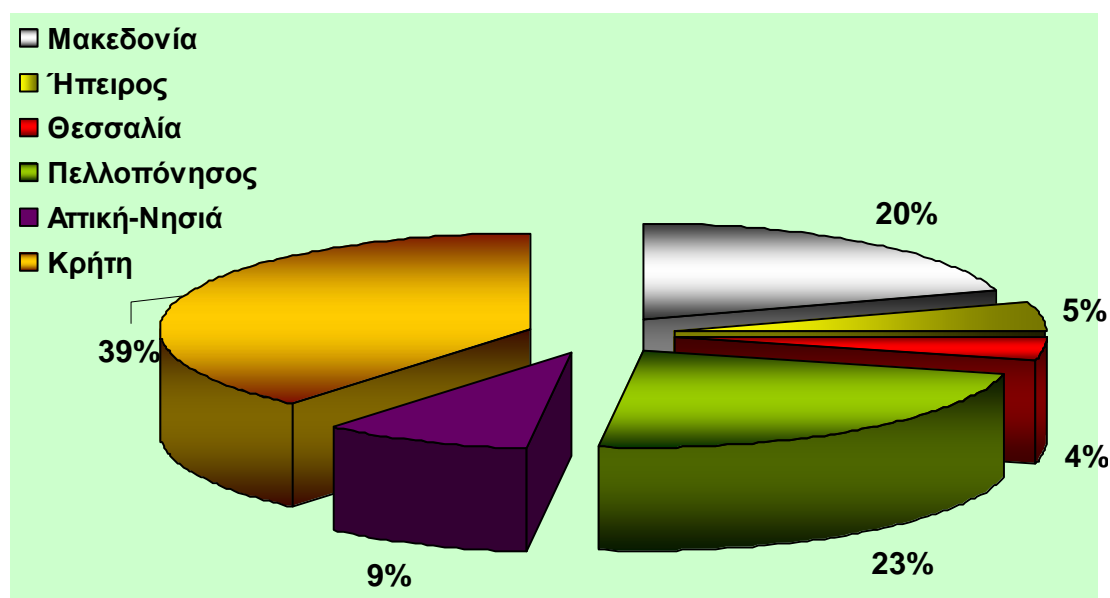
1.1. Γενική εισαγωγή

Οι προστατευμένες καλλιέργειες των κηπευτικών, των δρεπτών ανθέων και των διακοσμητικών φυτών αποτελούν το πεδίο με τη μεγαλύτερη ανάπτυξη την τελευταία εικοσαετία στα αγροτικά θέματα (Heuvelink 1996). Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες μπορούν πλέον, να θεωρηθούν ως η πιο εντατική και σύνθετης μορφής παραγωγική διαδικασία και πολλές φορές αναφέρονται ως η βιομηχανία των θερμοκηπίων για να τονιστεί ο ρόλος της τεχνολογίας στην όλη διαδικασία (Bakker και Challa 1995). Σύγχρονα θερμοκήπια καθιστούν δυνατή την εκλεπτυσμένη διαχείριση της παραγωγικής διαδικασίας (Challa 1990), μέσω της διαχείρισης της θερμοκρασίας του αέρα της σχετικής υγρασίας (θέρμανση και αερισμός) της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα, της ηλιακής ακτινοβολίας (τεχνητός φωτισμός, σκίαση των θερμοκηπίων) και του περιβάλλοντος της ριζόσφαιρας (καλλιέργεια σε υπόστρωμα, θέρμανση των πάγκων ανάπτυξης). Στις προστατευμένες καλλιέργειες ο έλεγχος του κλίματος κατά την παραγωγική διαδικασία έχει το αντίστοιχο κόστος, καθώς επιτυγχάνεται με την εισαγωγή στοιχείων, όπως η ανθρώπινη εργασία, η ενέργεια, το κεφάλαιο και άλλα.

Οι σύγχρονες απαιτήσεις για παραγωγή ανθέων και λαχανικών καθόλη τη διάρκεια του έτους και οι αυξημένες ανάγκες του αγοραστικού κοινού για προϊόντα ποιότητας οδηγεί τους παραγωγούς στις καλλιέργειες υπό κάλυψη. Οι θερμοκηπιακές καλλιέργειες, με τη χρήση των αυτοματισμών να επεκτείνεται συνεχώς και να συμβάλλει στην παραγωγική διαδικασία αποτελούν πεδίο πρακτικής εφαρμογής των σύγχρονων γνώσεων. Αισθητήρες ακριβείας είναι πλέον διαθέσιμοι, προσφέροντας τη δυνατότητα αξιόπιστων μετρήσεων του κλίματος, ενώ η εξέλιξη στο πεδίο των ψηφιακών και αναλογικών ηλεκτρονικών έχει ως αποτέλεσμα το υψηλό επίπεδο αυτοματισμού στον έλεγχο του κλίματος των θερμοκηπίων.

Η κατασκευή και ο εξοπλισμός των θερμοκηπιακών μονάδων εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις της κάθε περιοχής καθώς και από το είδος της καλλιέργειας. Σε μερικές χώρες όπως η Ολλανδία και η Ιαπωνία, η παραγωγή θερμοκηπιακών ειδών παίζει μεγάλο ρόλο στην οικονομία της χώρας ενώ σε άλλες χώρες, όπως η Ελλάδα, η παραγωγή θερμοκηπιακών ειδών αυξάνεται με

γοργούς ρυθμούς. Η καλυμμένη έκταση με θερμοκήπια σε παγκόσμια κλίμακα ανέρχεται στα 2800000 στρέμματα (εκτός της Κίνας η οποία έχει περίπου 6000000 στρέμματα καλυμμένα με απλές κατασκευές και για τα οποία δεν υπάρχουν επαρκή στατιστικά στοιχεία), εκ των οποίων το 50% περίπου βρίσκεται στην Ασία. Οι μεσογειακές χώρες κατέχουν το 36.5% της παγκόσμιας καλυμμένης έκτασης.

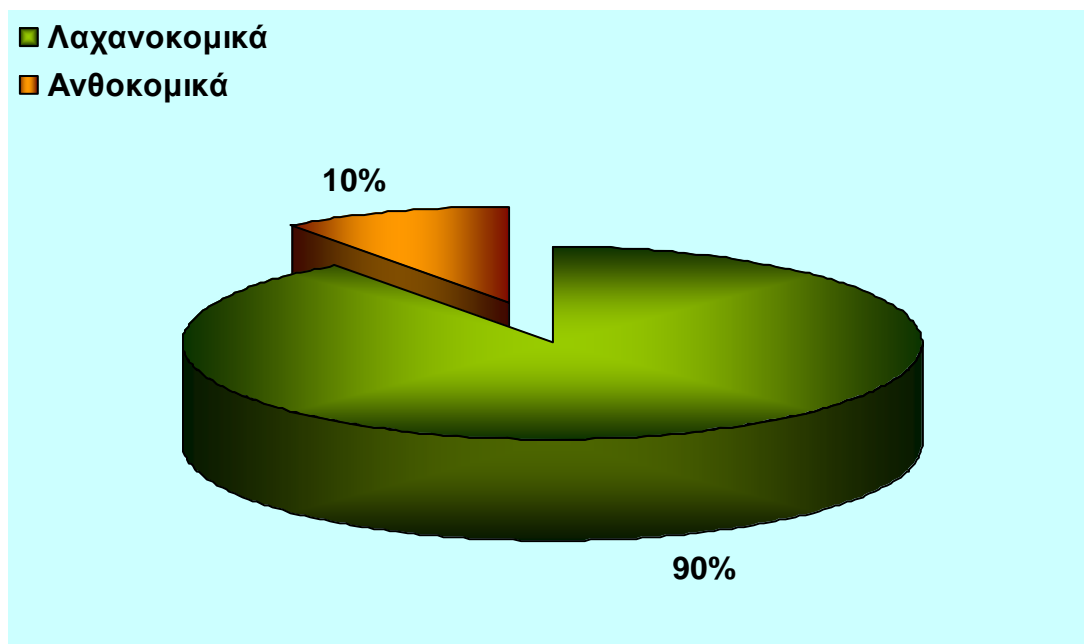


Σχήμα 1.1. Έκταση καλλιεργούμενων θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα το 2001 (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

Στην Ελλάδα, η οποία καλύπτει το 1.4% της παγκόσμιας έκτασης σε θερμοκήπια, η αύξηση των θερμοκηπιακών εκτάσεων ήταν ιδιαίτερα εντυπωσιακή την εικοσαετία 1960-1980. Κατά τη δεκαετία του '80 η αύξηση συνεχίστηκε αλλά με χαμηλότερους ρυθμούς, ενώ κατά την τελευταία δεκαετία οι ρυθμοί ήταν ακόμη χαμηλότεροι. Εν τούτοις, σε απόλυτα μεγέθη, οι θερμοκηπιακές εκτάσεις στην Ελλάδα δεν έχουν γνωρίσει την ανάπτυξη εκείνη που θα δικαιολογούσαν οι ευνοϊκοί παράγοντες που επικρατούν στην χώρα μας για τις καλλιέργειες αυτές. Κατά συνέπεια η χώρα μας υστερεί σημαντικά στον τομέα αυτό έναντι άλλων χωρών με παρόμοιες κλιματικές συνθήκες, όπως η Ισπανία και η Ιταλία.

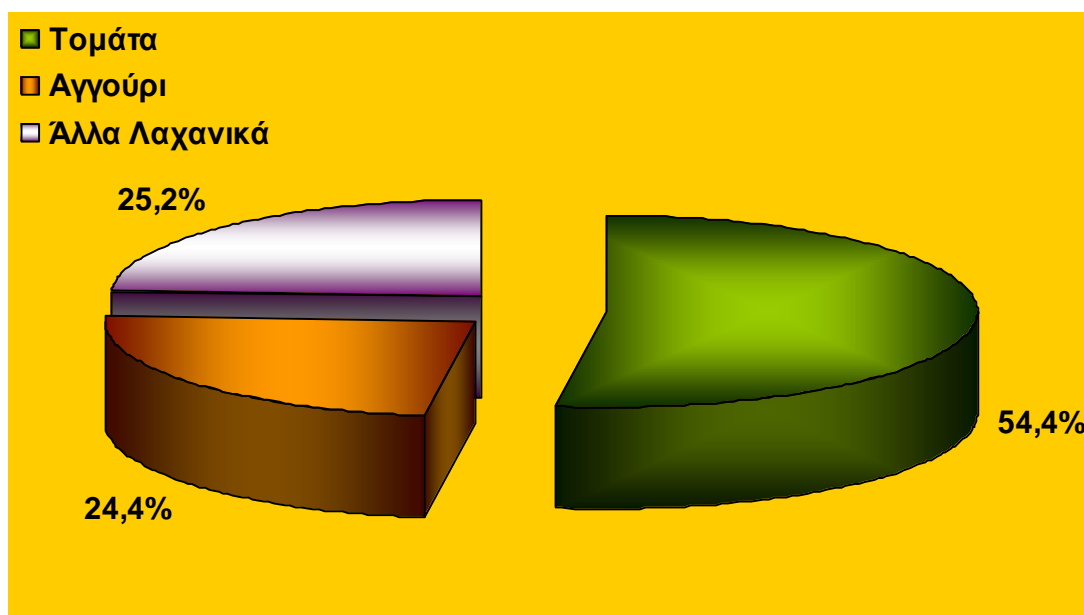
Στην Ελλάδα, η Κρήτη (Σχήμα 1.1) κατέχει το μεγαλύτερο τμήμα της καλλιεργούμενης έκτασης σε θερμοκήπια με ποσοστό 39%. Οι θερμοκηπιακές εκτάσεις στις οποίες καλλιεργούνται λαχανοκομικές καλλιέργειες αντιπροσωπεύουν ποσοστό μεγαλύτερο του 90% των συνολικών θερμοκηπιακών εκτάσεων (Σχήμα

1.2), ενώ αντίστοιχα οι εκτάσεις που καλλιεργούνται με ανθοκομικά είδη περιορίζονται σε ποσοστό μικρότερο του 10%.



Σχήμα 1.2. Διαχωρισμός θερμοκηπιακών καλλιεργειών το 2001 (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

Στα λαχανοκομικά, τις μεγαλύτερες εκτάσεις καλύπτουν η τομάτα και το αγγούρι (Σχήμα 1.3) καταλαμβάνοντας μερίδιο της τάξης του 80%, ενώ στα ανθοκομικά, τα δρεπτά άνθη (τριαντάφυλλα, γαρύφαλλα, χρυσάνθεμα κ.λ.π.) καλύπτουν συνολικά ποσοστό 65.5% του αντίστοιχου συνόλου.



Σχήμα 1.3. Διαχωρισμός λαχανοκομικών καλλιεργειών το 2001 (Πηγή: Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων)

Από τα στοιχεία που παρατίθενται, φαίνεται καθαρά ότι παρά την πρόοδο που έχει σημειωθεί στον τομέα των καλλιεργειών υπό κάλυψη, η χώρα μας δεν έχει φθάσει ακόμη στη μέγιστη δυνατή ανάπτυξη.

1.2. Διαχείριση θερμοκηπιακών μονάδων και σύγχρονοι προβληματισμοί

Η διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπίων αποτελεί μια καθημερινή δραστηριότητα των παραγωγών, η οποία παρά τη συχνότητά της θέτει πολλά προβλήματα. Η επιλογή του κλίματος που πρέπει να διατηρηθεί στο εσωτερικό των θερμοκηπίων είναι το αποτέλεσμα ενός συνδυασμού ανάμεσα σε πολλαπλούς στόχους, όπως να εξασφαλισθεί στην καλλιέργεια ένα ευνοϊκό κλιματικό περιβάλλον, να διασφαλισθεί μια ικανοποιητική παραγωγή σε ποσότητα, ποιότητα και ημερομηνία διάθεσης, να περιορισθούν το κόστος λειτουργίας του θερμοκηπίου και τα φυτοϋγειονομικά προβλήματα κ.α. Οι στόχοι αυτοί είναι συχνά αντιφατικοί και η σημασία τους εξελίσσεται κατά τη διάρκεια του παραγωγικού κύκλου. Σήμερα στην πλειοψηφία των ελληνικών θερμοκηπίων η διαχείριση του κλίματος τη χειμερινή περίοδο συνίσταται στη διατήρηση των επιθυμητών θερμοκρασιών για την ανάπτυξη των καλλιεργειών μέσω των συστημάτων θέρμανσης χωρίς να λαμβάνεται μέριμνα για το αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας στις υπόλοιπες παραμέτρους που καθορίζουν το τελικό οικονομικό αποτέλεσμα (αύξηση παραγωγής, ανάπτυξη ασθενειών, κατανάλωση ενέργειας).

Στα μεσογειακά θερμοκήπια, η θέρμανση κατά τη διάρκεια του χειμώνα αποτελεί τον κύριο καταναλωτή ενέργειας του θερμοκηπίου και αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό παράγοντα του συνολικού κόστους λειτουργίας του, που για καλλιέργειες απαιτητικές σε θέρμανση, όπως π.χ. το αγγούρι, μπορεί να φθάσει το 40% του κόστους παραγωγής, δηλαδή ένα κόστος ίσο ή μεγαλύτερο από αυτό των εργατικών χεριών. Μέχρι σήμερα η διαχείριση του κλίματος στην καθημερινή πρακτική περιορίζεται στη διαχείριση της θέρμανσης, μέσω του προσδιορισμού δύο επιθυμητών θερμοκρασιών ρύθμισης του θερμοστάτη. Η επιλογή των θερμοκρασιών αυτών γίνεται με βάση την εμπειρία του παραγωγού και αποσκοπεί κυρίως στην εξασφάλιση επιθυμητών συνθηκών για την ανάπτυξη των καλλιεργειών.

Μια ολοκληρωμένη προσέγγιση όμως της διαχείρισης του κλίματος κατά τη χειμερινή περίοδο θα πρέπει να στηρίζεται στην υπάρχουσα κατάσταση της

καλλιέργειας, στις μετεωρολογικές προγνώσεις και τους στόχους-κριτήρια που θέτει ο παραγωγός. Τα κριτήρια μπορεί να αφορούν:

- ✘ τη διατήρηση της καλλιέργειας σε μια ευνοϊκή κατάσταση για παραγωγή,
- ✘ τον έλεγχο των ρυθμών παραγωγής είτε πρόκειται για ταχύτητα δημιουργίας νέων ταξιανθιών και ωρίμανση των καρπών, στην περίπτωση π.χ. καλλιέργειας με συνεχή παραγωγή, όπως η τομάτα, είτε πρόκειται για δημιουργία της αρχιτεκτονικής του φυτού, στην περίπτωση π.χ. γλαστρικών φυτών,
- ✘ την αποφυγή ανάπτυξη μυκητολογικών ασθενειών (π.χ φαιά σήψη),
- ✘ τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και του συνολικού κόστους παραγωγής

Σήμερα η ελληνική παραγωγή θερμοκηπιακών προϊόντων κατά τη χειμερινή περίοδο εμφανίζεται ως ιδιαίτερα ενεργειοβόρος με ταυτόχρονη σημαντική χρήση χημικών για φυτοπροστασία. Ταυτόχρονα, ο ανταγωνισμός τόσο με τις χώρες της βόρειας Ευρώπης, όσο και με τις χώρες της μεσογειακής λεκάνης είναι ιδιαίτερα οξύς με αποτέλεσμα τη σχεδόν παντελή έλλειψη ελληνικών θερμοκηπιακών προϊόντων στις διεθνείς αγορές. Οι στρεμματικές αποδόσεις των ελληνικών θερμοκηπίων είναι σημαντικά μικρότερες από αντίστοιχες χωρών της βορείου Ευρώπης παρά τις καλύτερες κλιματικές συνθήκες της χώρας μας τη χειμερινή περίοδο. Ενδεικτικά για την καλλιέργεια της τομάτας, η οποία καλλιεργείται σε ποσοστό 55% περίπου της συνολικής έκτασης (Σχήμα 1.3) των θερμοκηπιακών καλλιεργειών στην Ελλάδα, η απόδοση φτάνει τους 10 τόνους ανά στρέμμα, όταν η αντίστοιχη απόδοση στην Ολλανδία φτάνει τους 60 τόνους ανά στρέμμα.

Η βέλτιστη διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπιακών μονάδων κατά τη χειμερινή περίοδο είναι ικανή να :

- ✘ βελτιώσει την ποιότητα και την ποσότητα των παραγόμενων προϊόντων,
- ✘ αυξήσει τις προοπτικές των εξαγωγών των παραγόμενων προϊόντων αφού πλέον η ποιότητα των προϊόντων θα είναι εφάμιλλη των αντίστοιχων Ευρωπαϊκών,
- ✘ βελτιώσει την αποτελεσματικότητα των ήδη υπαρχόντων θερμοκηπιακών μονάδων συμβάλλοντας στην αύξηση των κερδών των παραγωγών,
- ✘ δημιουργήσει ευνοϊκότερες προοπτικές εξάπλωσης των θερμοκηπιακών καλλιεργειών στην Ελλάδα, συγκρατώντας έτσι τον πληθυσμό στην ύπαιθρο και δίνοντας λύση στα διάφορα διαρθρωτικά προβλήματα της ελληνικής

γεωργίας, ιδιαίτερα μετά την πρόσφατη αναθεώρηση της κοινής αγροτικής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης,

- ✘ μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και κατά συνέπεια τους εκπεμπόμενους ρύπους συμβάλλοντας στην προστασία του περιβάλλοντος και στην υλοποίηση των στόχων της εθνικής ενεργειακής πολιτικής,
- ✘ μειώσει τη χρήση χημικών ουσιών συμβάλλοντας στην παραγωγή «καθαρότερων» προϊόντων αλλά και βελτιώνοντας τις συνθήκες εργασίας των εργαζομένων στα θερμοκήπια

1.3. Προσομοιώματα και συμβολή στη διαχείριση των θερμοκηπίων

Στον αγροτικό χώρο, όπως και σε άλλα πεδία, η σωστή απόφαση βασίζεται σε μια καθαρή απεικόνιση της πραγματικότητας. Κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών δεν παρουσιάστηκε ικανοποιητική ανάπτυξη στο χώρο της προσομοίωσης της παραγωγικής διαδικασίας της καλλιέργειας σε σχέση με το περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται. Τα προσομοιώματα αποτελούν ισχυρά εργαλεία για να ελεγχθούν υποθέσεις, να συνδυαστεί η γνώση, να περιγραφεί και να κατανοηθεί ένα περίπλοκο σύστημα και να συγκριθούν διάφορα σενάρια (Marcellis *et al.* 1998). Προσομοιώματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστήματα σχηματισμού απόφασης, για τον έλεγχο του κλίματος των θερμοκηπίων και για την πρόβλεψη και τον προγραμματισμό της παραγωγικής διαδικασίας.

Συχνά τα προσομοιώματα διακρίνονται σε περιγραφικά και επεξηγηματικά. Τα περιγραφικά καλούνται επίσης και ως στατιστικά, εμπειρικά ή μαύρα κουτιά, τα οποία αντιδρούν λίγο ή καθόλου σε μηχανισμούς οι οποίοι μεταβάλλουν τη συμπεριφορά του συστήματος (Marcellis *et al.* 1998). Αντίθετα τα επεξηγηματικά προσφέρουν ποσοτική περιγραφή όλων αυτών των μηχανισμών και των διαδικασιών. Τα επεξηγηματικά περιέχουν υπο- προσομοιώματα τα οποία αποδίδουν τουλάχιστον ένα επίπεδο βαθύτερης γνώσης κατά τη διάρκεια επιμερισμού των διεργασιών. Αν και τα επεξηγηματικά προσομοιώματα παρουσιάζουν αναλυτικά το σύνολο των διεργασιών σύμφωνα με τις υπάρχουσες θεωρίες, παρόλα αυτά δεν χρησιμοποιούν την πλήρη γνώση, καθώς αυτή εμπεριέχει πλήθος μηχανισμών. Όταν αυτό πραγματοποιείται, δεν είναι δυνατός ο χειρισμός και η χρήση των μοντέλων για την παραγωγή και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Ο έλεγχος του περιβάλλοντος των θερμοκηπιακών καλλιεργειών αποσκοπεί στη δημιουργία των βέλτιστων συνθηκών στο εσωτερικό των θερμοκηπίων για την αύξηση και την ανάπτυξη των καλλιεργειών. Το περιβάλλον του θερμοκηπίου συνίσταται από όλα τα φυσικά μεγέθη του χώρου που επιδρούν στην ανάπτυξη των φυτών (κλίμα, θρεπτικά στοιχεία, βιοτικοί παράγοντες). Για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής δεν αρκεί η μεγιστοποίηση καθενός από τους παράγοντες του περιβάλλοντος στο άριστο σημείο, αλλά απαιτείται η ρύθμιση του καθενός σε συνδυασμό με το επίπεδο όλων των άλλων παραγόντων. Από τους κλιματικούς παράγοντες η θερμοκρασία είναι ο παράγοντας που έχει την πιο πολύπλοκη επίδραση στην ανάπτυξη και παραγωγή των φυτών καθώς επηρεάζει το σύνολο των λειτουργιών του φυτού.

Η διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπίων μπορεί να γίνει πιο αποτελεσματική, αν με σαφήνεια ισορροπήσουν τα κέρδη ενός προϊόντος ονομαστικής αξίας στην αγορά, σε σχέση με το κόστος διαχείρισης του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας (van Henten 1994). Αυτό αποτελεί ένα τυπικό παράδειγμα του προβλήματος της βέλτιστης διαχείρισης και τον ουσιαστικό λόγο ύπαρξης και χρήσης των προσομοιωμάτων που απεικονίζουν τις κλιματικές συνθήκες στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων (*κλιματικά προσομοιώματα*) και την ανάπτυξη και την παραγωγή της καλλιέργειας (*βιολογικά προσομοιώματα*). Σκοπός ενός βιοφυσικού προσομοιώματος είναι τόσο η πρόβλεψη της επίδρασης των διαφόρων χειρισμών στο σύστημα (θερμοκήπιο) όσο και η παροχή των αναγκαίων πληροφοριών για τη δημιουργία των κριτηρίων βάσει των οποίων λαμβάνονται οι αποφάσεις ελέγχου.

Ένα πλήρες βιοφυσικό προσομοίωμα πρέπει να προσομοιώνει την εξέλιξη της καλλιέργειας σε σχέση με το περιβάλλον του θερμοκηπίου (*βιολογικό προσομοίωμα*), καθώς και το περιβάλλον του θερμοκηπίου σε σχέση με το χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό και τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες (*κλιματικό προσομοίωμα*).

Τα συνήθη προσομοιώματα ανάπτυξης των καλλιεργειών δημιουργήθηκαν για να προσδιορίζουν την εξέλιξη της καλλιέργειας στο περιβάλλον που αυτή αναπτύσσεται, όταν είναι γνωστή η αρχική κατάσταση του φυτού (αριθμός οργάνων, ξηρό βάρος). Η παραγωγή της ξηράς ουσίας προκύπτει από το ισοζύγιο της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής. Το βάρος των φυτικών οργάνων χρησιμοποιείται ως κριτήριο διατήρησης της αναπνοής, ενώ η ηλικία τους για τον καθορισμό της ποσότητας των θρεπτικών που απαιτείται. Ο αριθμός των οργάνων στο φυτό καθώς και η ηλικία τους

καθορίζονται από την οργανογέννηση και τον ρυθμό ανάπτυξης. Τέλος ο συνδυασμός του αριθμού των φύλλων, του ξηρού βάρους και της ειδικής φυλλικής επιφάνειας επιτρέπει τον προσδιορισμό της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας από το ξηρό βάρος πετυχαίνοντας έτσι τον προσδιορισμό του ρυθμού φωτοσύνθεσης. Προσομοιώματα αυτού του τύπου έχουν αναπτυχθεί κυρίως από οικοφυσιολόγους στην προσπάθειά τους να κατανοήσουν τόσο τη σχέση μεταξύ δευτερευόντων μηχανισμών αύξησης και ανάπτυξης των καλλιεργειών όσο και τη συνολική ανάπτυξη της καλλιέργειας. Ελάχιστα είναι τα προσομοιώματα τα οποία κατά την εκτέλεσή τους επιτρέπουν διόρθωση κάποιας από τις μεταβλητές που καθορίζουν τη συμπεριφορά του συστήματος.

Κύρια πρακτική στα κλιματικά προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπιακών μονάδων αποτελεί η ανάλυση και περιγραφή των ανταλλαγών ενέργειας που πραγματοποιείται μεταξύ των στοιχείων που αποτελούν μέρος του θερμοκηπίου. Η προσομοίωση του “ισοζυγίου ενέργειας και μάζας του θερμοκηπίου” επιβάλλει την ανάλυση του ισοζυγίου ενέργειας του κάθε επιμέρους συστήματος που αλληλεπιδρά θερμικά. Κάθε ισοζύγιο ενέργειας καθορίζεται από διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τις εισροές και εκροές ενέργειας καθώς και το ρυθμό αλλαγής της θερμοκρασίας των επιμέρους συστατικών συναρτήσει του χρόνου. Στα ισοζύγια ενέργειας και μάζας του θερμοκηπίου λαμβάνουν χώρα τα φαινόμενα συναγωγής, ακτινοβολίας και αγωγιμότητας, η διαπνοή των φυτών, ο αερισμός καθώς και τα φαινόμενα συμπύκνωσης και υγροποίησης στο κάλυμμα και την καλλιέργεια. Τα κλιματικά προσομοιώματα περιγράφουν ποσοτικά τη μεταβολή της θερμοκρασίας του καλύμματος, της καλλιέργειας, του εδάφους και του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, καθώς και τη μεταβολή της μάζας των υδρατμών στον αντίστοιχο χρόνο.

1.4. Προϋποθέσεις και προβλήματα για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των θερμοκηπιακών μονάδων

Η βελτιστοποίηση της διαχείρισης του περιβάλλοντος των θερμοκηπιακών μονάδων καλλιέργειας τομάτας αποσκοπεί στην αναζήτηση των κατάλληλων κλιματικών συνθηκών που θα συμβάλλουν στην επίτευξη των κριτηρίων στόχων που ορίζει ο παραγωγός κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Προκειμένου να αναπτυχθεί ένα σύστημα λήψης αποφάσεων για τον βέλτιστο έλεγχο της διαχείρισης των θερμοκηπιακών μονάδων είναι απαραίτητο:

- ✘ να καθοριστεί ο στόχος – πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί και το κατά πόσο αυτό είναι εφικτό
- ✘ να υπάρχουν διαθέσιμα τα απαραίτητα “εργαλεία” (λογισμικά) ικανά να ανταποκριθούν τόσο στις ανάγκες διαχείρισης του κλίματος στις θερμοκηπιακές μονάδες όσο και στον υπολογισμό της ανάπτυξης και παραγωγής της καλλιέργειας τομάτας
- ✘ να γίνουν βαθμονομήσεις των “εργαλείων” (λογισμικών) για τις αντίστοιχες θερμοκηπιακές μονάδες
- ✘ να οριστεί η στρατηγική και η μέθοδος βελτιστοποίησης, η οποία πρέπει να επιτευχθεί σύμφωνα με τα διάφορα σενάρια

Το πρόβλημα στην επίτευξη του βέλτιστου ελέγχου στο θερμοκήπιο έγκειται στο γεγονός ότι:

- ✘ η στρατηγική για το βέλτιστο έλεγχο δεν είναι πάντα η ίδια και εξαρτάται από την οπτική γωνία από την οποία εξετάζεται το πρόβλημα (π.χ. εξοικονόμηση ενέργειας, αύξηση κέρδους, μεγιστοποίηση παραγωγής, αποφυγή φυτοϋγειονομικών προβλημάτων κ.λ.π.)
- ✘ υπάρχουν πολλές παρατηρήσεις και μετρήσεις που περιγράφουν τους μηχανισμούς που εμπλέκονται, αλλά έχουν γίνει κάτω από διαφορετικές συνθήκες (κλίμα, καλλιέργεια) και κατά συνέπεια χρειάζονται πάντα εξακρίβωση πριν από την εφαρμογή τους και
- ✘ το μικροκλίμα του θερμοκηπίου επηρεάζεται τόσο από τον περιβάλλοντα χώρο όσο και από την καλλιέργεια, η οποία με τη σειρά της επηρεάζεται από το κλίμα που διαμορφώνεται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η αντίδραση της καλλιέργειας στην επίδραση του κλίματος δύναται να εμφανισθεί σε μεταγενέστερο χρονικό διάστημα, από τη στιγμή που πραγματοποιήθηκε.

Το κριτήριο για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη ρύθμιση του κλίματος στο θερμοκήπιο για τη βέλτιστη θερμοκρασία θα μπορούσε να διαφοροποιείται ανάλογα με το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και τους πιθανούς στόχους των παραγωγών. Για το λόγο αυτό η διαδικασία της βελτιστοποίησης θα πρέπει να δύναται να αξιολογεί και να αποφασίζει ανάλογα με τα επιμέρους κριτήρια που θα δίνονται σε κάθε φάση ανάπτυξης της καλλιέργειας.

1.5. Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια ανάπτυξης ενός συστήματος ικανού για την υποστήριξη λήψης αποφάσεων, που να επιτρέπει τη διαχείριση του κλίματος ενός θερμοκηπίου, κατά τη χειμερινή περίοδο σε 24ωρη βάση κατά τρόπο που να βελτιστοποιεί την αποτελεσματικότητα του θερμοκηπίου σε συνάρτηση με τα κριτήρια που τίθενται από τον παραγωγό.

Μετά τη γενική εισαγωγή, που προηγήθηκε, στη συνέχεια γίνεται (*Κεφάλαιο 2*) η βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα βιο-φυσικά προσομοιώματα και τη συμβολή τους στη διαχείριση των θερμοκηπιακών μονάδων, τις γεννήτριες παραγωγής εξωτερικών κλιματικών δεδομένων και τις μεθόδους βελτιστοποίησης του συστήματος.

Ακολουθεί η θεωρητική ανάλυση στο *Κεφάλαιο 3*: i). του κλιματικού προσομοιώματος που αναπτύχθηκε, με αναφορά στις μεταβλητές εισόδου του συστήματος και στα ισοζύγια ενέργειας και μάζας που συνεισφέρουν στην προσομοίωση των κλιματικών παραμέτρων του περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, ii). του βιολογικού προσομοιώματος TOMGRO και των τροποποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν για την εφαρμογή του, iii). της γεννήτριας παραγωγής εξωτερικών κλιματικών δεδομένων, iv). των αλγορίθμων Branch & Bound που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση του συστήματος.

Στο *Κεφάλαιο 4* ακολουθεί το πειραματικό τμήμα της εργασίας, όπου και παρουσιάζονται αναλυτικά: i). ο σχεδιασμός των ερωτηματολογίων και ο καθορισμός – εκλογή του δείγματος, ii). ο πειραματικός εξοπλισμός, iii). η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη συλλογή των απαραίτητων παραμέτρων για τη βαθμονόμηση και πειραματική επιβεβαίωση του κλιματικού και βιολογικού προσομοιώματος καθώς και της γεννήτριας εξωτερικών κλιματικών δεδομένων, iv). ο σχεδιασμός που εφαρμόστηκε για τη μελέτη ευαισθησίας του βιολογικού προσομοιώματος, v). οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση του συστήματος.

Στο *Κεφάλαιο 5* γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις συνεντεύξεις των παραγωγών, σύμφωνα με το περιεχόμενο των ερωτηματολογίων. Δίδονται πληροφορίες από τους παραγωγούς για: i). τον εξοπλισμό, τα συστήματα ελέγχου και τα είδη καυσίμων που χρησιμοποιούν στις θερμοκηπιακές μονάδες, ii). την πρακτική που ακολουθούν για τον έλεγχο του κλίματος, iii). τις καλλιεργητικές

πρακτικές κατά την παραγωγική διαδικασία, iv). τις μεθόδους φυτοπροστασίας και τις οικονομικές συνέπειες από τη μη ορθή εφαρμογή κατά την καλλιεργητική περίοδο.

Στο *Κεφάλαιο 6* αναπτύσσονται τα αποτελέσματα που αφορούν στη βαθμονόμηση και πειραματική επιβεβαίωση του κλιματικού προσομοιώματος SimGreC και τη συγκριτική διερεύνηση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών. Η διερεύνηση αφορά τις τιμές της θερμοκρασίας του αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας και του εδάφους στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Επίσης παρουσιάζονται οι τιμές για τη σχετική υγρασία του αέρα καθώς και το ρυθμό διαπνοής της καλλιέργειας. Παράλληλα παρουσιάζονται οι τιμές της θερμικής ακτινοβολίας του καλύμματος, της καλλιέργειας και του εδάφους καθώς και η εισερχόμενη και η φωτοσυνθετικά ενεργός ηλιακή ακτινοβολία.

Κατόπιν (*Κεφάλαιο 7*) παρουσιάζεται η ανάπτυξη των αποτελεσμάτων που αφορούν τη βαθμονόμηση και πειραματική επιβεβαίωση του τροποποιημένου βιολογικού προσομοιώματος SimTom και τη συγκριτική διερεύνηση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών. Η διερεύνηση αφορά το ρυθμό σχηματισμού νέων οργάνων (φύλλων, ταξιανθιών και καρπών) φυτών τομάτας, την παραγόμενη βιομάζα των φυτών και την παραγωγή καρπών.

Στο *Κεφάλαιο 8* παραθέτονται τα αποτελέσματα που αφορούν την πειραματική επιβεβαίωση του βιο-φυσικού προσομοιώματος BioSiGreT και τη συγκριτική διερεύνηση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών. Η διερεύνηση πραγματοποιείται τόσο στις κλιματικές παραμέτρους όσο και στις τιμές που χαρακτηρίζουν την ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών τομάτας.

Στη συνέχεια (*Κεφάλαιο 9*) παρουσιάζεται η διερεύνηση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της γεννήτριας κλιματικών δεδομένων. Η λειτουργία της γεννήτριας στηρίζεται στην πρόβλεψη που λαμβάνει από κάποιο web-site και η ακρίβεια των τιμών της πρόβλεψης οδηγεί τα αποτελέσματα της γεννήτριας που αφορούν τη διακύμανση των τιμών των παραμέτρων (θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιακής ακτινοβολίας, ταχύτητας του αέρα).

Στο *Κεφάλαιο 10* αναπτύσσεται η μελέτη περιπτώσεων χρήσης του βιολογικού προσομοιώματος και της επίδρασης των κλιματικών παραμέτρων στην ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών τομάτας. Η μελέτη εστιάζεται στη διαφοροποίηση των τιμών της θερμοκρασίας του αέρα και της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων.

Κατόπιν στο (*Κεφάλαιο 11*) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης του συστήματος με τη χρήση των αλγορίθμων Branch & Bound. Πραγματοποιείται συγκριτική διερεύνηση της επίδρασης της διαχείρισης του κλίματος από το σύστημα αποφάσεων σε σχέση με τη διαχείριση που ακολουθήθηκε κατά την πειραματική περίοδο. Τα αποτελέσματα αφορούν τόσο τη διαφοροποίηση των κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό του θερμοκηπίου όσο και τη μεταβολή στην ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών τομάτας. Ταυτόχρονα γίνεται διερεύνηση της διαφοροποίησης στην κατανάλωση ενέργειας από το σύστημα θέρμανσης της θερμοκηπιακής μονάδας.

Τέλος στο *Κεφάλαιο 12* παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής και γίνονται προτάσεις για την επέκταση των προσομοιωμάτων και τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε περισσότερα πιθανά σενάρια.

Κεφάλαιο 2°. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Αναζητώντας αναφορές στη βιβλιογραφία, διαπιστώθηκε ότι οι Ρωμαίοι ήταν οι πρώτοι που αναγνώρισαν ότι η χρήση καταφυγίων περατών στην ηλιακή ακτινοβολία προσφέρει κέρδος στην προστασία των καλλιεργειών από τις ανεπιθύμητες εξωτερικές συνθήκες κατά τη διάρκεια του χειμώνα και νωρίς την άνοιξη. Επιπλέον η ανθρώπινη ανησυχία εστιάστηκε από νωρίς στη βελτίωση των κλιματικών συνθηκών στα «πρότυπα» σχεδιασμένα καταφύγια, με στόχο την τροποποίηση της θέρμανσης και υγρασίας στο εσωτερικό τους (Stanghellini 1987). Παρόλα αυτά οι ελλείψεις γνώσεις στη διαδικασία της παραγωγής καθώς και η έλλειψη τεχνολογικού εξοπλισμού για τη μεταβολή των κλιματικών συνθηκών δεν επέτρεψαν τη δημιουργία στρατηγικών διαχείρισης του κλίματος.

Δύο χιλιετίες πέρασαν και ριζικές αλλαγές έχουν πραγματοποιηθεί στον τομέα της επιστήμης και της τεχνολογίας. Αισθητήρες ακριβείας είναι πλέον διαθέσιμοι προσφέροντας τη δυνατότητα μετρήσεων τόσο των αναγκών των καλλιεργειών όσο και του κλίματος, καθώς και της σχέσης μεταξύ τους. Ο τεχνολογικός εξοπλισμός επιτρέπει τροποποιήσεις ευρείας κλίμακας των κλιματικών παραγόντων που σχετίζονται με την ανάπτυξη της καλλιέργειας όπως τη θερμοκρασία, τα επίπεδα της υγρασίας, τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα, τα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας, τη διαθεσιμότητα του νερού και των θρεπτικών στοιχείων στο επίπεδο της ρίζας. Τέλος η εξέλιξη στο πεδίο των ψηφιακών και αναλογικών ηλεκτρονικών έχει ως αποτέλεσμα το υψηλό επίπεδο αυτοματισμού στον έλεγχο του κλίματος των θερμοκηπίων. Σήμερα η παραγωγή θερμοκηπιακών καλλιεργειών έχει μεταβληθεί σε βιομηχανική υπόθεση.

Παρά τη μεγάλη πρόοδο των τελευταίων ετών στη θεωρητική ανάλυση της ενεργειακής κατανάλωσης στον τομέα των θερμοκηπίων στην πράξη υπήρξε μικρή πρόοδος στην υλοποίηση και μοντελοποίηση των θεωρητικών προσεγγίσεων και των στρατηγικών διαχείρισης στο πεδίο της καθημερινής παραγωγής σε εμπορικά θερμοκήπια (van Straten *et al.* 2000), με συνέπεια η στρατηγική διαχείρισης να συνεχίζει να στηρίζεται στην πείρα των παραγωγών. Η αποδοχή των μοντέλων ελέγχου του κλίματος από τους παραγωγούς θα πρέπει να αποδεικνύει στην πράξη ότι παρέχει κέρδος σε κάποιο από τα προβλήματα διαχείρισης του κλίματος όπως π.χ. ο έλεγχος των ασθενειών. Οι εταιρίες που με τη χρήση των εργαλείων διαχείρισης

προσπαθούν να συμβάλλουν στον έλεγχο του κλίματος θεωρούν ότι βασική αρχή στο σχεδιασμό των μοντέλων είναι η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους για διαφορετικές καλλιέργειες. Κρίνεται επίσης απαραίτητο να είναι εύχρηστα και ταυτόχρονα να είναι ανεξάρτητα από το λογισμικό που χρησιμοποιείται, προκειμένου ο χρήστης να μπορεί να εκμεταλλεύεται τις δυνατότητές τους στην πράξη, σε εμπορικά θερμοκήπια. Παράλληλα θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα συστήματα σχηματισμού απόφασης (Clarke *et al.* 1999), που συμβουλεύουν τον παραγωγό πώς να εισάγει μοντέλα χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα πληροφορίες και γνώσεις από πολλές διαφορετικές πηγές.

2.1. Προσομοιώματα

2.1.1. Τύποι προσομοιωμάτων

Τα προσομοιώματα είναι μία απλοποιημένη αναπαράσταση ενός πραγματικού συστήματος. Τα προσομοιώματα μπορεί να είναι γραφικά (pictorial), εννοιολογικά (ή λεκτικά) (conceptual, verbal), φυσικά (physical) ή μαθηματικά (mathematical). Ένα μαθηματικό προσομοίωμα χρησιμοποιεί μαθηματικές εκφράσεις ή σύνολα μαθηματικών εκφράσεων για να περιγράψει ένα σύστημα ή τη συμπεριφορά του (Teh 2006). Παραπάνω αναφέρθηκε ο όρος σύστημα. Ένας ορισμός του συστήματος θα μπορούσε να είναι ο εξής: «Σύστημα είναι ένα σύνολο από αντικείμενα ή παράγοντες που η αλληλεπίδραση τους παράγει τη συμπεριφορά του συστήματος (τη λειτουργία και το σκοπό)»(Teh 2006).

2.1.1.1. Τύποι κλιματικών προσομοιωμάτων

Υπάρχουν πολλά είδη κλιματικών προσομοιωμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογίσουν την κατανάλωση ενέργειας στα θερμοκήπια. Αν και όλα βασίζονται στη διατήρηση της ενέργειας ο τρόπος που χρησιμοποιούν για τον υπολογισμό διαφέρει ανάλογα με το σκοπό και την οπτική που ακολουθούν.

Τρεις τύποι μοντέλων σύμφωνα με τους Jolliet *et al.* (1991), ορίζουν το ενεργειακό ισοζύγιο των θερμοκηπίων:

Τα στατικά προσομοιώματα, όπου η κατανάλωση ενέργειας υπολογίζεται προσεγγιστικά από τις ολικές απώλειες θερμότητας (Morris 1964, Chiapale *et al.* 1981). Το πλεονέκτημα των στατικών προσομοιωμάτων είναι η απλότητα, αλλά η ακρίβεια στις προβλέψεις είναι περιορισμένη, όσο η ηλιακή ακτινοβολία δεν λαμβάνεται υπόψη.

Τα πολύπλοκα δυναμικά προσομοιώματα, τα οποία επιτρέπουν τον υπολογισμό όχι μόνο των ενεργειακών απαιτήσεων, αλλά και το κλίμα στο εσωτερικό των θερμοκηπίων. Ακολουθώντας την επίπονη ανάλυση του ενεργειακού ισοζυγίου των θερμοκηπίων (Businger 1963, Walker 1965) μια σειρά από δυναμικά μοντέλα αναπτύχθηκαν από τα οποία το καθένα βελτιώνει το προηγούμενο (Takakura *et al.* 1971, van Bavel *et al.* 1981, Bot 1983, Deltour *et al.* 1985). Μια ενδιαφέρουσα σύγκριση τριών δυναμικών προσομοιωμάτων (van Bavel *et al.* 1985), απέδειξε ότι η παρουσίαση ήταν συγκρίσιμη για την πρόβλεψη στην θερμοκρασία του αέρα και του εδάφους καθώς και για τις ανάγκες θέρμανσης. Τα δυναμικά προσομοιώματα δίνουν καλές προβλέψεις αλλά παραμένουν πολύπλοκα και δεν είναι εύκολο να προσομοιώσουν μεγάλες περιόδους. Χρειάζεται ο υπολογισμός του χρονικού διαστήματος και απαιτείται η μελέτη των κλιματικών δεδομένων που εισάγονται.

Τα ενδιάμεσα προσομοιώματα (Jolliet *et al.* 1991), που οφείλουν ταυτόχρονα να επιτρέπουν: i). Τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας με πρόβλεψη ανάλογη με αυτή των πολύπλοκων δυναμικών μοντέλων, ii). Την προσαρμογή σε κάθε τύπο θερμοκηπίου και κλίματος iii). Λειτουργικότητα στη χρήση τους για μεγάλη χρονική περίοδο (μήνα ή χρόνο).

Από τα παραπάνω αναφερθέντα προσομοιώματα, τα δυναμικά είναι τα πιο χρηστικά. Και αυτό διότι προσφέρουν έναν τρόπο κατανόησης της συμπεριφοράς ενός συστήματος και επισήμανσης των περιοχών που απαιτούν περαιτέρω έρευνα. Επίσης αυτά και μόνον αυτά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πρόβλεψη και έλεγχο του συστήματος που προσομοιώνουν. Η χρήση της δυνατότητας για πρόβλεψη μπορεί να υποκαταστήσει (και όχι να αντικαταστήσει) πραγματικά πειράματα, επιτρέποντας την απόρριψη πειραματικών σχεδίων που θα προσέφεραν μικρή ή όχι ιδιαίτερα χρήσιμη γνώση και επιτρέποντας την εστίαση στα πιο ενδιαφέροντα.

2.1.1.2. Τύποι βιολογικών προσομοιωμάτων

Τα βιολογικά προσομοιώματα θα μπορούσαν να κατηγοριοποιηθούν κατά πολλούς τρόπους. Η κύρια κατηγοριοποίηση είναι στατιστικά ή εμπειρικά (correlative, statistical, empirical, descriptive, regression, black-box models) και μηχανικά (mechanistic, explanatory).

Τα στατιστικά, γνωστά και ως εμπειρικά ή σχετιστικά (correlative) περιγράφουν τη σχέση μεταξύ ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών, χωρίς όμως να προσφέρουν πληροφορία για τον τρόπο που σχετίζονται. Ούτε και μπορούν να αποδείξουν ότι υπάρχει πραγματικά σχέση αιτίου – αιτιατού μεταξύ τους. Εφόσον όμως ελέγχουμε όλους τους άλλους παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο και εξασφαλίσουμε ότι όλες οι συνθήκες, πλην των μελετούμενων, είναι ίδιες σε όλα τα πειραματικά τεμάχια, μπορούμε να υποστηρίξουμε τη σχέση μεταξύ ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών, ιδιαίτερα αν υπάρχει και άλλη διαθέσιμη βιβλιογραφία που να συνηγορεί σε αυτό. Και πάλι όμως η εξαγχθείσα σχέση ισχύει μόνο για τις συνθήκες κάτω από τις οποίες λήφθηκαν τα δεδομένα από τα οποία εξήχθη η σχέση. Η εφαρμογή, για παράδειγμα, μιας σχέσης που περιγράφει την ανάπτυξη του μαρουλιού συνάρτησει των ημεροβαθμών σε περιοχή άλλη από αυτή που έγινε το πείραμα θα δώσει λαθεμένα αποτελέσματα. Παρά τα μειονεκτήματα τους τα στατιστικά προσομοιώματα είναι εύκολο να χρησιμοποιηθούν και να κατασκευαστούν, καθώς δεν απαιτούν τη γνώση των μηχανισμών του συστήματος και εφόσον βαθμονομηθούν για τις συνθήκες που θα χρησιμοποιηθούν, προσφέρουν αρκετά καλή πρόβλεψη για διάφορες χρήσεις (π.χ. Jones *et al.* 1999). Η μικρή επεξεργαστική ισχύ που απαιτούν και ο μικρός αριθμός μεταβλητών κατάστασης που ενσωματώνουν τα καθιστούν χρήσιμα σε εφαρμογές on-line ελέγχου (Marcelis *et al.* 1998).

Μαθηματικές σχέσεις που συχνά χρησιμοποιούνται είναι πολυωνυμικές, εκθετικές ή σιγμοειδής. Σε περιπτώσεις που είναι επιθυμητό να περιγραφούν φαινόμενα που δεν ταιριάζουν στις παραπάνω σχέσεις (π.χ. καμπύλη με ασύμμετρη κορυφή) χρησιμοποιούνται πιο σύνθετες μαθηματικές σχέσεις. Για να ενσωματωθεί η επίδραση διάφορων παραγόντων απλές εξισώσεις συνδυάζονται σε αθροίσματα ή γινόμενα. Σε ορισμένες περιπτώσεις ενδέχεται να χρησιμοποιηθούν ως είσοδος και προγενέστερα δεδομένα παραγωγής ή άλλα χαρακτηριστικά του φυτού. Σε άλλες περιπτώσεις μία καλλιέργεια μπορεί να χωριστεί σε διαφορετικά στάδια και για κάθε στάδιο να αναπτυχθούν διαφορετικά στατιστικά προσομοιώματα (χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το προσομοίωμα γίνεται μηχανιστικό) (Marcelis *et al.* 1998).

Αντιθέτα με τα εμπειρικά, τα μηχανιστικά προσομοιώματα βασίζονται στην υφιστάμενη γνώση για τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης των διαφόρων μεταβλητών (ανεξάρτητων και εξαρτημένων) και προσομοιώνουν την κάθε διαδικασία. Αυτό τα κάνει δύσκολα στη κατασκευή τους, καθώς απαιτεί εκτεταμένα πειράματα και δεδομένα που συχνά είναι δύσκολο να αποκτηθούν. Ωστόσο είναι πιο εύρωστα και είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και σε συνθήκες διαφορετικές από τις συνθήκες στις οποίες έγιναν τα αρχικά πειράματα. Βέβαια προσομοιώματα που λαμβάνουν υπόψη όλους τους παράγοντες, στη γεωργία τουλάχιστον, δεν υπάρχουν. Και στα μηχανιστικά προσομοιώματα κάποιοι ελάσσονες παράγοντες αγνοούνται (π.χ. η ταχύτητα του αέρα) ή θεωρείται ότι οι καλλιεργητικές τεχνικές που εφαρμόζονται είναι τέτοιες ώστε αυτοί δεν επιδρούν αρνητικά (π.χ. επαρκής άρδευση με καλής ποιότητας νερό και σωστή λίπανση). Τέλος τα μηχανιστικά προσομοιώματα δεν φτάνουν στο σημείο να προσομοιώνουν βιοχημικές διαδικασίες στο κυτταρικό επίπεδο, καθώς αυτό θα έκανε αδύνατη τη χρήση τους σε επίπεδο καλλιέργειας (Marcelis *et al.* 1998).

Η δομή των μηχανιστικών προσομοιωμάτων είναι ιεραρχική (hierarchical) και αποτελούνται από υπο-προσομοιώματα (sub models). Τα υπο-προσομοιώματα αυτά βρίσκονται τουλάχιστον ένα ιεραρχικό επίπεδο χαμηλότερα από το χαρακτηριστικό που είναι επιθυμητό να περιγραφεί. Στο χαμηλότερο ιεραρχικά επίπεδο τα υπο-προσομοιώματα είναι στατιστικά. Οι δυνατότητες πρόβλεψης που έχει ένα μηχανιστικό προσομοίωμα περιορίζονται από τον αριθμό των επιπέδων που διαθέτει. Σε κάποιο βαθμό ισχύει και για τα μηχανιστικά προσομοιώματα ότι και για τα στατιστικά, ότι δηλαδή αν χρησιμοποιηθούν ως είσοδος δεδομένα έξω από το εύρος των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη βαθμονόμηση, τότε τα αποτελέσματα μπορεί να μην είναι αξιόπιστα (Marcelis *et al.* 1998).

Εκτός από τα μηχανιστικά και τα εννοιολογικά προσομοιώματα μπορούν να βοηθήσουν στην κατανόηση ενός συστήματος, αν και αυτά δεν είναι απαραίτητα ποσοτικά. Σε αυτά εισάγονται αφηρημένες έννοιες, όπως η κατηγοριοποίηση των φυτών ανάλογα με την αντίδραση τους σε κάποιο εξωτερικό παράγοντα. Αυτή η προσέγγιση έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη της θεωρίας της στρατηγικής των φυτών (plant strategy theory) (Marcelis *et al.* 1998).

Ένα προσομοίωμα, στατιστικό ή μηχανιστικό, μπορεί να είναι δυναμικό (dynamic) ή στατικό (static). Δυναμικά είναι τα προσομοιώματα στα οποία ο χρόνος αποτελεί ανεξάρτητη μεταβλητή. Αντίθετα στα στατικά ο χρόνος δεν υφίσταται ως μεταβλητή.

Στα δυναμικά ο χρόνος μπορεί να είναι συνεχής (continuous) ή διακριτός (discrete). Μια άλλη κατηγοριοποίηση μπορεί να είναι μεταξύ ντετερμινιστικών (deterministic) και στοχαστικών (stochastic) προσομοιωμάτων. Στα στοχαστικά, σε αντίθεση με τα ντετερμινιστικά, υπάρχει κάποιο στοιχείο τυχαιοποίησης ή κατανομής πιθανοτήτων. Έτσι για ίδια δεδομένα εισόδου, η έξοδος δεν είναι πάντα η ίδια (Teh 2006).

2.1.2. Ανάπτυξη προσομοιωμάτων

Η ανάπτυξη ενός μαθηματικού προσομοιώματος ξεκινά με την αναγνώριση και κατανόηση του προβλήματος. Η κατανόηση του προβλήματος που θέλουμε να λύσουμε με την ανάπτυξη ενός προσομοιώματος είναι απαραίτητη ώστε να καθοριστεί ο τύπος του προσομοιώματος που θέλουμε να αναπτύξουμε, τι εισόδους θα δέχεται, τι εξόδους θα παρέχει κτλ.

Στη συνέχεια με βάση τις γνώσεις που υπάρχουν για το πραγματικό σύστημα αναπτύσσονται υποθέσεις για τη λειτουργία των μηχανισμών του συστήματος, οι οποίες στη συνέχεια τυποποιούνται και δομούνται σε ένα εννοιολογικό προσομοίωμα. Η ανάπτυξη υποθέσεων είναι απαραίτητη διαδικασία για την προσέγγιση ενός σύνθετου συστήματος. Αυτό είναι ένα κρίσιμο σημείο, καθώς ο βαθμός στον οποίο οι υποθέσεις αυτές (στην ουσία απλοποιήσεις) προσεγγίζουν την πραγματικότητα επηρεάζει και την ακρίβεια και την ευαισθησία του τελικού προσομοιώματος.

Το εννοιολογικό προσομοίωμα εκφράζεται στη συνέχεια με μαθηματικές σχέσεις. Καθώς είναι πιθανό στο αρχικό εννοιολογικό προσομοίωμα να υπάρχουν ασαφείς περιγραφές ή περιγραφές που είναι αδύνατο να εκφραστούν μαθηματικά, ενδέχεται να γίνουν τροποποιήσεις, απλουστεύσεις ή εξειδικεύσεις σε ορισμένα σημεία.

Τέλος το μαθηματικό προσομοίωμα εκτελείται και με βάση τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε αξιολογείται. Αν η ακρίβεια του προσομοιώματος δεν ικανοποιεί τότε πραγματοποιείται επιστροφή στη διαδικασία ανάπτυξης όπου και πραγματοποιούνται οι απαραίτητες τροποποιήσεις. Συνήθως τα σφάλματα στην έξοδο οφείλονται στις υποθέσεις που έγιναν στην ανάπτυξη του εννοιολογικού προσομοιώματος ή στην μαθηματική έκφραση του εννοιολογικού προσομοιώματος.

Καθώς τα μαθηματικά προσομοιώματα σε πολλές περιπτώσεις περιέχουν φυσικές σταθερές με άγνωστη τιμή είναι απαραίτητο αυτά να βαθμονομηθούν (calibration). Η βαθμονόμηση πραγματοποιείται με κατάλληλα σχεδιασμένα πειράματα είτε σε ελεγχόμενες συνθήκες (θαλάμου ή θερμοκηπίου) είτε στον αγρό.

Το τελευταίο στάδιο της ανάπτυξης ενός προσομοιώματος είναι η επαλήθευση του (validation). Στο στάδιο αυτό το προσομοίωμα δοκιμάζεται με πειράματα υπό τις συνθήκες για τις οποίες σχεδιάστηκε να λειτουργήσει το προσομοίωμα.

Τα πειράματα υπό πραγματικές συνθήκες είναι απαραίτητα ακόμη και στο στάδιο της βαθμονόμησης του προσομοιώματος, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι η συμπεριφορά των φυτών είναι διαφορετική σε εξωτερικό περιβάλλον από ότι εντός ενός θαλάμου. Αυτό συμβαίνει λόγω διαφορών στην προσαρμογή των φυτών στο περιβάλλον τους. Έχουν παρατηρηθεί διαφορές στη μορφολογία και στην αντίδραση των φυτών ανάλογα με τις συνθήκες στις οποίες αναπτύχθηκαν. Αν και προκειμένου να προσεγγιστούν καλύτερα συνθήκες αγρού υπό ελεγχόμενο περιβάλλον, έχει επιχειρηθεί η προσομοίωση ημερήσιων κύκλων διαφόρων παραγόντων, όπως η ακτινοβολία, η θερμοκρασία και η υγρασία, δεν έχει προκύψει κάποιο ενθαρρυντικό αποτέλεσμα (Teh 2006).

Συνήθως είναι απαραίτητη η διεξαγωγή πειραμάτων σε ένα εύρος βαθμού ελέγχου του περιβάλλοντος, από αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες, έως πειράματα αγρού. Ο βαθμός στον οποίο είναι απαραίτητα πειράματα υπό αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες εξαρτάται από το βαθμό λεπτομέρειας του προσομοιώματος. Όσο πιο λεπτομερείς είναι η προσέγγιση του πραγματικού συστήματος από το προσομοίωμα, τόσο περισσότερα πειράματα χρειάζονται υπό αυστηρά ελεγχόμενες συνθήκες (Teh 2006).

Για την ανάπτυξη ενός εμπειρικού προσομοιώματος, όπως προαναφέρθηκε δεν απαιτείται γνώση των υποκείμενων μηχανισμών του συστήματος. Έτσι στα εμπειρικά προσομοιώματα η διαδικασία της ανάπτυξης περιορίζεται στον σχεδιασμό του πειράματος, την εξαγωγή των μαθηματικών σχέσεων με τη χρήση των κατάλληλων στατιστικών τεχνικών και στην επαλήθευση (Teh 2006).

Μεταξύ ενός αριθμού διαθέσιμων προσομοιωμάτων το καλύτερο θα είναι αυτό που (Pachepsky *et al.* 1996):

- 1) θα έχει το μικρότερο αριθμό παραμέτρων με κάποιο λογικό σφάλμα,
- 2) θα έχει την απλούστερη μορφή με το ελάχιστο σφάλμα,
- 3) θα βασίζεται όσο το δυνατό σε φυσικούς, χημικούς και βιολογικούς νόμους,
- 4) θα έχει την ελάχιστη απόκλιση μεταξύ προβλεπόμενης και παρατηρούμενης τιμής
- 5) θα έχει την ελάχιστη διακύμανση στην έξοδο.

Εδώ ίσως να ήταν χρήσιμη η αναφορά της «λεπίδας» του Όκαμ (Occam's Razor). Σύμφωνα με την αρχή αυτή «οι υποθέσεις δεν πρέπει να αυξάνονται πέρα από όσο

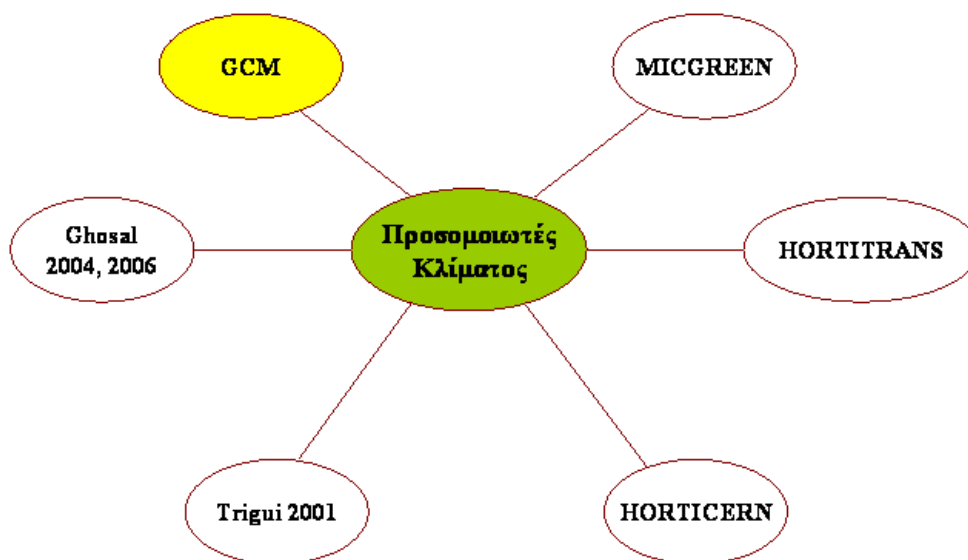
είναι απαραίτητο» ή αλλιώς μεταξύ δύο εξίσου καλών υποθέσεων, αυτή που θα πρέπει να υιοθετείται είναι η απλούστερη.

2.1.3. Κλιματικά προσομοιώματα

Η ενεργειακή κρίση στις αρχές της δεκαετίας του '70 και στα μέσα της δεκαετίας του '80 οδήγησαν τους παραγωγούς στην απαίτηση για θερμοκήπια μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας. Οι επενδύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τη διατήρηση της ενέργειας οδήγησαν στη χρήση των θερμοκουρτήνων, συμπυκνωτών καυσαερίων, διπλών πλαστικών, χαμηλότερων σημείων για τη διατήρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και στην ελαχιστοποίηση του αερισμού (Pluimers *et al.* 2000). Σήμερα, το κόστος λειτουργίας των πλήρως εξοπλισμένων θερμοκηπίων παραμένει υψηλό και απαιτείται η βέλτιστη δυνατή λειτουργία του. Ο χρήστης μιας θερμοκηπιακής μονάδας έχει ως αποστολή να διαχειριστεί και να επιλύσει ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα, καθώς θα πρέπει να γνωρίζει το διαθέσιμο εξοπλισμό για τη μεταβολή των κλιματικών συνθηκών και τη θρέψη των φυτών και να τα συσχετίσει με την τελική καθαρή πρόσοδο.

Το πρόβλημα του υψηλού κόστους κατά την παραγωγική διαδικασία σχετίζεται με τον έλεγχο του κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ιδιαίτερα σε περιόδους με χαμηλές θερμοκρασίες και υψηλή υγρασία. Τα τελευταία χρόνια η προσπάθεια για αποτελεσματική διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπιακών μονάδων οδήγησε στη δημιουργία νέων κλιματικών προσομοιωμάτων (Εικόνα 2.1). Οι Pieters και Deltour (1997), παρουσίασαν το GDGCM, κλιματικό προσομοίωμα που περιγράφει την ανταλλαγή ενέργειας σε επτά διαφορετικά επίπεδα (τέσσερα επίπεδα εδάφους, το επίπεδο της καλλιέργειας, του εσωτερικού αέρα του θερμοκηπίου και τέλος το επίπεδο του καλύμματος). Σύμφωνα με τους Singh *et al.* (2006), στο κλιματικό τους προσομοίωμα MICGREEN (MICroclimate GREENhouse) ο υπολογισμός των θερμοκρασιών του αέρα, της καλλιέργειας, του καλύμματος και του εδάφους γίνεται με τη χρήση τεσσάρων ισοζυγίων ενέργειας. Οι Ghosal *et al.*, (2004), (2006), χρησιμοποιούν στο κλιματικό τους προσομοίωμα την ύπαρξη του βόρειου τοίχου, καθώς οι περισσότερες κατασκευές στη συγκεκριμένη περιοχή καλύπτουν τη βορινή πλευρά του θερμοκηπίου για τη μείωση των απωλειών θερμότητας. Στο HORTITRANS ο Jolliet (1994), παρουσιάζει τον υπολογισμό της παραγόμενης υγρασίας και της διαπνοής των φυτών ως συνάρτηση της μεταβολής των εξωτερικών

κλιματικών συνθηκών. Στο προσομοίωμα περιλαμβάνονται οι διαδικασίες της διαπνοής, συμπύκνωσης, αερισμού, υγραποίησης και από-υγραποίησης.



Εικόνα 2.1. Μερικοί από τους κυριότερους προσομοιωτές κλίματος των θερμοκηπίων

Νωρίτερα στο HORTICERN οι Jolliet *et al.* (1991), παρουσιάζουν ένα βελτιωμένο στατικό προσομοίωμα στο οποίο οι υπολογισμοί στηρίζονται, στην καθαρή ενέργεια που παραμένει στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και είναι συνάρτηση της ενέργειας που εισέρχεται (από την ηλιακή ακτινοβολία και το σύστημα θέρμανσης), αυτής που χάνεται μέσω των θερμικών απωλειών και τέλος αυτής που αποθηκεύεται στο χώρο. Τέλος ο Trigui *et al.* (2001), παρασυστάζει ένα αναπτυγμένο μοντέλο, που στηρίζει τη λειτουργία του σε τρία ισοζύγια ενέργειας που υπολογίζουν την αισθητή θερμότητα, τη λανθάνουσα θερμότητα και τη συγκέντρωση του CO₂ στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

2.1.4. Σύγκριση κλιματικών προσομοιωμάτων

Αρχικά, παρουσιάζεται το HORTITRANS, του Jolliet (1994), ένα μοντέλο πρόβλεψης και βελτιστοποίησης της υγρασίας και της διαπνεόμενης ποσότητας στο εσωτερικό των θερμοκηπίων. Το μοντέλο υπολογίζει τη σχετική υγρασία λαμβάνοντας υπόψη τη διαπνοή της καλλιέργειας, τη συμπύκνωση στην επιφάνεια του καλύμματος, τον αερισμό του θερμοκηπίου και τα φαινόμενα υγροποίησης και από-υγροποίησης. Το έλλειμα κορεσμού του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου υπολογίζεται σύμφωνα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος χώρου του θερμοκηπίου. Η απλότητα του μοντέλου επιτρέπει τον καθορισμό της ποσότητας ενέργειας και της μάζας νερού που πρέπει να προστεθεί ή να αφαιρεθεί, προκειμένου να επιτευχθούν οι τιμές σχετικής υγρασίας και διαπνοής που έχουν εκ των προτέρων καθοριστεί από τους παραγωγούς. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων του HORTITRANS, έδειξε ότι η πρόβλεψη του μοντέλου για την υγρασία, την διαπνεόμενη ποσότητα από την καλλιέργεια και την ποσότητα του νερού που υγροποιείται, εμπεριέχει σφάλμα της τάξεως του 8%.

Οι Pieters και Deltour (1997), στο GDGCM (Gembloux Dynamic Greenhouse Climate Model), δίνουν αναλυτική παρουσίαση των φαινομένων συμπύκνωσης, αερισμού, υγροποίησης και από-υγροποίησης καθώς και της διαπνοής των φυτών. Παρουσιάζουν αναλυτικά τη μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους καθώς υπολογίζουν τη θερμοκρασία σε τέσσερα διαφορετικά επίπεδα χρησιμοποιώντας τη θερμοκρασία της επιφάνειας του εδάφους, για τον υπολογισμό της ενέργειας που μεταφέρεται μέσω συναγωγής μεταξύ εδάφους και αέρα, καλλιέργειας και καλύμματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν από τους Pieters και Deltour (1997), το GDGCM, υπο-υπολογίζει της απαιτήσεις σε θέρμανση των γυάλινων θερμοκηπίων κατά 15%, ενώ υπερ-εκτιμά της ανάγκες για τα πλαστικά θερμοκήπια κατά 20%. Παρόλα αυτά το προσομοίωμα παρέχει τη δυνατότητα για υπολογισμούς χρήσιμους για τη διαχείριση του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων. Η περαιτέρω βαθμονόμηση του GDGCM σε διαφορετικούς τύπους θερμοκηπίων αλλά και σε κλιματικές συνθήκες διαφορετικές από αυτές που επικρατούν στην κεντρική Ευρώπη, θα συμβάλλουν στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του προσομοιωτή.

Τέλος οι Singh *et al.* (2006), στο κλιματικό τους προσομοίωμα MICGREEN, υπολογίζουν την θερμοκρασία του αέρα, της καλλιέργειας, του καλύμματος και του εδάφους, θεωρώντας καλή την ανάμειξη του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, ενώ ταυτόχρονα δεν υπολογίζουν τη μεταβολή των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών

κατασκευής του θερμοκηπίου σε σχέση με το χρόνο και παράλληλα η ηλιακή ακτινοβολία περνάει από το κάλυμμα χωρίς να υπάρχει απορρόφηση από το υλικό. Οι εισερχόμενες μεταβλητές του προσομοιώματος είναι η θερμοκρασία του αέρα του περιβάλλοντος χώρου του θερμοκηπίου, η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία του εδάφους σε δύο επίπεδα, ένα στην επιφάνεια και ένα σε βάθος 6 cm. Το λογισμικό έχει γραφτεί σε γλώσσα προγραμματισμού C++, ενώ οι αλγεβρικές εξισώσεις επιλύθηκαν με την επαναληπτική μέθοδο των Gauss-Seidal. Τέλος ο υπολογισμός της σχετικής υγρασίας του αέρα γίνεται, με τη χρήση ψυχομετρικού χάρτη. Η αναλυτική παρουσίαση του προσομοιώματος οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι το προσομοίωμα δεν λαμβάνει υπόψη, τόσο την ενέργεια που εισάγει το σύστημα θέρμανσης στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, όσο και την μεταβολή της ενέργειας που εξέρχεται από το θερμοκήπιο με το άνοιγμα των παραθύρων του θερμοκηπίου. Ταυτόχρονα το προσομοίωμα δεν υπολογίζει τα φαινόμενα συμπύκνωσης τόσο στην επιφάνεια του καλύμματος όσο και της καλλιέργειας. Η απουσία πειραματικών δεδομένων χρήσης τόσο του συστήματος θέρμανσης όσο και άνοιγματος των παραθύρων, δεν οδηγεί σε επισφαλές συμπεράσματα για τη λειτουργία του προσομοιωτή.

2.1.5. Βιολογικά προσομοιώματα

Σήμερα το πρόβλημα του υψηλού κόστους παραγωγής των κηπευτικών καλλιεργειών δύναται να επιλυθεί με τη χρήση βιολογικών προσομοιωμάτων που αποτελούν ισχυρά εργαλεία για να ελεγχθούν υποθέσεις, να συνδυαστεί η γνώση, να περιγραφεί και να κατανοηθεί ένα περίπλοκο σύστημα και να συγκριθούν διάφορα σενάρια. Τα μοντέλα δύνανται να ορίσουν την ανάπτυξη και την παραγόμενη ποσότητα συνεισφέροντας στον προγραμματισμό και στη στρατηγική που θα ακολουθηθεί από τους παραγωγούς κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Τα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτός των άλλων ως συστήματα σχηματισμού απόφασης, ελέγχου του κλίματος των θερμοκηπίων καθώς και πρόβλεψης και προγραμματισμού της παραγωγικής διαδικασίας. Συνεπώς το ενδιαφέρον για τη μοντελοποίηση της παραγωγής βιομάζας για τις διάφορες καλλιέργειες ακόμη αυξάνεται, όπως αυτό καταδεικνύεται από την αυξανόμενη αναλογία των δημοσιευμένων εργασιών που σχετίζονται με την μοντελοποίηση.

Η ικανότητα απόκρισης των συστημάτων ελέγχου του κλίματος θεωρείται μια αρκετά δύσκολη υπόθεση, πόσο μάλλον η συνεχής και στιγμιαία μέτρηση της αντίδρασης της καλλιέργειας στη μεταβολή του κλίματος. Η καθυστέρηση στην αντίδραση είναι μεγάλη και δεν υπάρχουν μοντέλα που να υπολογίζουν τη μεταβολή που υφίσταται η καλλιέργεια σε μακρό χρονικό διάστημα από κάποια μεταβολή στις κλιματικές συνθήκες που πραγματοποιήθηκε σε κάποιο ορισμένο χρονικό διάστημα. Η ύπαρξη μοντέλων που θα ενσωματώνουν την απόκριση των καλλιεργειών για μεγάλα χρονικά διαστήματα θα συμβάλει στην καλύτερη στρατηγική διαχείριση για το σχεδιασμό των κλιματικών απαιτήσεων. Αυτός είναι ο λόγος όπου η θεωρητική ερευνητική προσέγγιση των «φυτών που μιλούν» και οι αντιδράσεις των φυτών καταγράφονται συνεχώς από συστήματα ελέγχου (Hashimoto *et al.* 1981) δεν είχε επιτυχία στην πράξη (Day 1998).

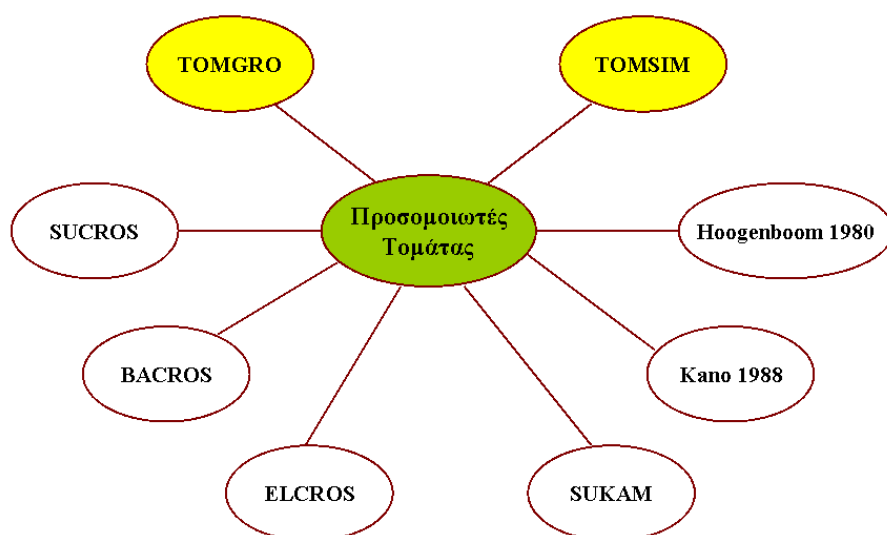
Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την εξαγωγή του βέλτιστου ελέγχου ακόμη εξετάζεται καθώς παρουσιάζεται έλλειψη στην επιβεβαίωση της ορθότητας των μοντέλων. Οι προσεγγιστικές θεωρίες για βέλτιστο έλεγχο με τη χρήση βιολογικών μοντέλων έχουν ήδη αναλυθεί από τον van Straten *et al.*, (2000). Οι Van Pee και Berckmans (1999), αναφέρουν μια σειρά από βιολογικά μοντέλα, λίγα από τα οποία έχουν στην πραγματικότητα επιβεβαιωθεί. Σε μια έρευνα για τα οικονομικά οφέλη, οι van Henten *et al.*, (1994) αναφέρει ότι υπολογίστηκε μια αύξηση των κερδών σε ποσοστό του 15% όταν για την ανάπτυξη της καλλιέργειας μαρουλιού χρησιμοποιήθηκε μοντέλο ανάπτυξης στη θέση των εμπειρικών μεθόδων.

Διάφορα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες τρεις δεκαετίες για τις θερμοκηπιακές καλλιέργειες, όπως για παράδειγμα το χρυσάνθεμο (Karlsson και Heins 1985), το αγγούρι (Liebig, 1985, Schapendonk και Gastra 1984, Marcellis 1994), το μαρούλι (Sweeney *et al.* 1981), το ραπανακι (Krug και Liebig 1979), το τριαντάφυλλο (Lieth και Pascian 1991) και την τομάτα (Hoogenboom 1980, Kano και van Bavel 1988, Elwell και Bauerle 1990, Jones *et al.* 1991, de Koning, 1994). Τέλος ένα περιεκτικό και γενικό μοντέλο για την προσομοίωση της φωτοσύνθεσης και της παραγωγής του ξηρού βάρους στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες έχει αναπτυχθεί από τον Gijzen (1992).

Για την αύξηση και την ανάπτυξη της καλλιέργειας της τομάτας έχουν εμφανιστεί διάφορα δυναμικά προσομοιώματα (Εικόνα 2.2), με γνωστότερα αυτών τα TOMGRO και TOMSIM. Αυτά τα δύο και ειδικά το TOMGRO, έχουν δοκιμαστεί πολλές φορές και έχουν αποδειχθεί αρκετά αξιόπιστα. Το μοντέλο TOMGRO των Jones *et al.*,

(1991) έχει τεκμηριωθεί, βαθμονομηθεί και επιβεβαιωθεί από τους Dayan et al. (1993a), (1993b). Το TOMSIM (TOMato SIMulator) παρουσιάστηκε μερικώς από τους Heuvelink και Marcellis (1989), και βασίζεται για τον υπολογισμό της παραγωγής της ξηρής ουσίας σε ένα άλλο προσομοίωμα, το SUKAM. Το SUKAM αποτελεί μετεξέλιξη του SUCROS87 (Goudrian και van Laar 1994), το οποίο με τη σειρά του βασίζεται σε ένα ακόμη παλαιότερο μοντέλο, το BACROS. Τα δύο τελευταία έχουν εκτενώς βαθμονομηθεί σε συνθήκες αγρού (Heuvelink 1995). Τέλος παράδειγμα επιτυχημένης εφαρμογής αποτελεί το «Greenhouse CARE System» (1996), ένα απλό μοντέλο ελέγχου για εμπορικά θερμοκήπια που ικανοποιεί τις ανάγκες για προγραμματισμό της ανθοφορίας και έλεγχος του ύψους για την καλλιέργεια της ανεμώνης και βασίζεται στις ρυθμίσεις των ημερήσιων και νυχτερινών θερμοκρασιών (Jewett και Jarvis 2001).

Οι περισσότερες δημοσιευμένες εργασίες που έχουν πραγματοποιηθεί στο πεδίο των θερμοκηπιακών καλλιεργειών, ασχολούνται με την ανάπτυξη και την παραγωγή της τομάτας. Τα περισσότερα μοντέλα παρουσιάζονται ελλιπή ή μη τελειοποιημένα όταν για παράδειγμα μοντελοποιείται μόνο η ανάπτυξη της καλλιέργειας, ενώ πολλές φορές έχουν επιβεβαιωθεί με δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης.



Εικόνα 2.2. Προσομοιωτές καλλιέργειας τομάτας

2.1.6. Σύγκριση βιολογικών προσομοιωμάτων TOMGRO και TOMSIM

Η λειτουργία των βιολογικών προσομοιωμάτων στηρίζεται στην παραγωγή του ξηρού βάρους. Η καλλιέργεια προσδιορίζεται από το παραγόμενο ξηρό βάρος, την οργανογένεση και την κατανομή του ξηρού βάρους στον αριθμό των παραγόμενων οργάνων. Αυτά τα χαρακτηριστικά σχετίζονται όχι μόνο με την ποσότητα της παραγωγής αλλά ταυτόχρονα και με την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Η παραγωγή του ξηρού βάρους, εξαρτάται από τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης καθώς και την αναπνοή διατήρησης και αύξησης που προκαλεί μείωση του παραγόμενου ξηρού βάρους των φυτών.

Τα προαναφερθέντα προσομοιώματα τομάτας και ειδικά το TOMGRO, έχουν δοκιμαστεί πολλές φορές και έχουν αποδειχθεί αρκετά αξιόπιστα. Οι Bertin και Gary (1993), είχαν δοκιμάσει την αρχική έκδοση του TOMGRO, όπως αυτή περιγράφεται από τους Jones *et al.* (1991), κάτω από διάφορες συνθήκες προσφοράς και ζήτησης μεταβολιτών. Το προσομοίωμα αν και παρουσιάζει διάφορες αδυναμίες, όπως στην περίπτωση εμπλουτισμού του θερμοκηπίου με CO₂, κρίθηκε ότι παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις πειραματικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες αγρού. Βασική έλλειψη του προσομοιώματος η απουσία δεξαμενής απόθεσης των υδρογονανθράκων που περισσεύουν όταν η προσφορά είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση. Ερώτημα που τέθηκε επίσης ήταν κατά πόσο υπό συνθήκες χαμηλής προσφοράς, η κατανομή των μεταβολιτών θα ήταν σωστή και το κατά πόσο κάποια όργανα έχουν προτεραιότητα έναντι άλλων.

Πρόσφατες εφαρμογές εμφανίζουν πιο ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Οι Ramirez *et al.* (2004), στις συνθήκες της Ισπανίας παρατήρησαν αποκλίσεις που ήταν κάτω του 10% για την ξηρά ουσία και για τα δύο προσομοιώματα. Για το TOMGRO υπήρχαν αποκλίσεις στο 2.4% για τον αριθμό των κόμβων και στο 6.4% για το LAI και το TOMSIM 3.4% στην εμφάνιση ταξιανθιών. Παρόμοια αποτελέσματα έλαβαν και οι Torcu και Baytorun (1998) για το TOMGRO στις συνθήκες της Τουρκίας. Υπήρχε καλή συμφωνία μεταξύ προβλεπόμενης και μετρούμενης τιμής στον αριθμό των κόμβων και η απόκλιση μεταξύ προβλεπόμενης και μετρούμενης παραγωγής ήταν 1-2%. Ο αριθμός των φύλλων και η φυλλική επιφάνεια που προέβλεπε ήταν μεγαλύτερη και ο προβλεπόμενος χρόνος συγκομιδής διέφερε 1-2 ημέρες από τον πραγματικό.

Η βελτίωση αυτή οφείλεται στην πρόοδο που σημειώθηκε στο προσομοίωμα αυτό σε ότι αφορά την αύξηση της φυλλικής επιφάνειας, την εμφάνιση νέων καρπών και την αύξηση τους και στη συμπεριφορά του προσομοιώματος σε υψηλές θερμοκρασίες (Jones *et al.* 1999).

Τα δύο προσομοιώματα εμφανίζουν ενδιαφέρουσες διαφορές αλλά και ομοιότητες. Μία σημαντική διαφορά μεταξύ του TOMGRO και του TOMSIM είναι η πιο λεπτομερής περιγραφή της ανάσχεσης (interception) του φωτός από την καλλιέργεια στο TOMSIM. Η επίδραση της συγκέντρωσης του CO₂ στη φωτοσύνθεση προσομοιώνεται διαφορετικά. Για παράδειγμα, στο TOMGRO η συγκέντρωση του CO₂ δεν επιδρά στην φωτοχημική αποτελεσματικότητα (ϵ) (Bertin και Heuvelink 1993).

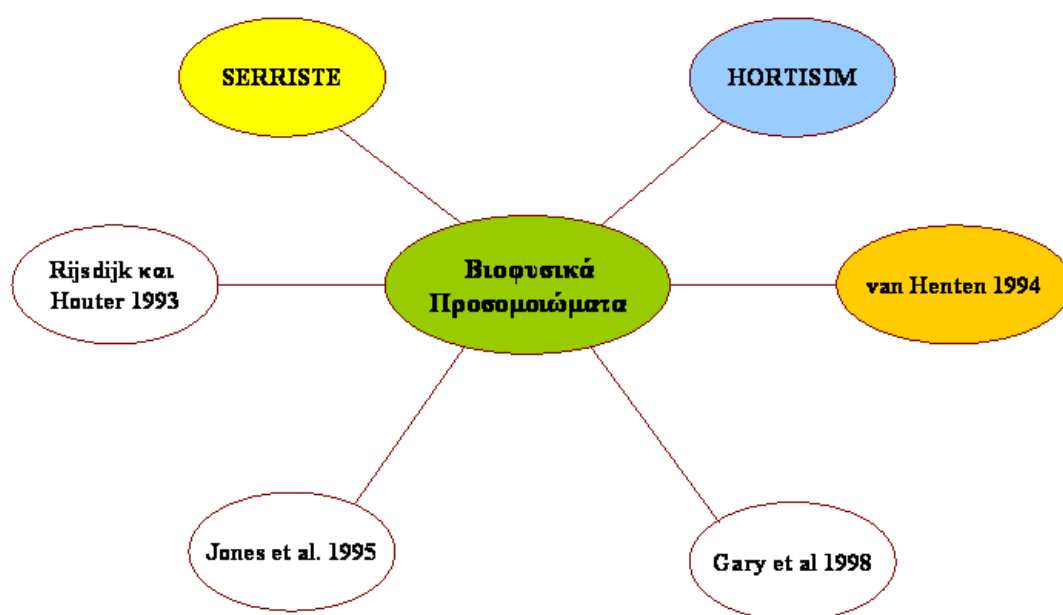
Η αναπνοή διατήρησης υπολογίζεται και στα δύο προσομοιώματα με τον ίδιο τρόπο, με μόνες διαφορές ότι το TOMGRO δεν λαμβάνει υπόψη την αναπνοή διατήρησης της ρίζας και ότι την τιμή του Q_{10,c} το TOMGRO τη λαμβάνει ίση με 1.4, ενώ το TOMSIM την λαμβάνει ίση με 2 (Bertin και Heuvelink 1993).

Στο TOMSIM η προσομοίωση ξεκινάει από τη στιγμή που θα έχει εμφανιστεί η πρώτη ταξιανθία. Η ξηρά ουσία έως την εμφάνιση της πρώτης ταξιανθίας αποτελεί είσοδο του προσομοιώματος (Heuvelink 1996). Ο υπολογισμός της ξηράς ουσίας συστήνεται να γίνεται σε ωριαία βάση. Ο υπολογισμός της ξηράς ουσίας σε ημερήσια και όχι σε ωριαία βάση έχει βρεθεί ότι οδηγεί σε υπερεκτίμηση της ξηράς ουσίας κατά 7-8%, σφάλμα που δεν μπορεί να αγνοηθεί. Το σφάλμα αυτό αποδίδεται στη μη γραμμική ανταπόκριση της καλλιέργειας στα επίπεδα της ακτινοβολίας και του CO₂ και στην ημερήσια διακύμανση των παραγόντων αυτών, με τις χαμηλότερες ημερήσιες τιμές συγκέντρωσης CO₂ να συμπίπτουν χρονικά με την υψηλότερη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (Heuvelink 1996).

Οι διαφορές που παρουσιάζουν τα δύο προσομοιώματα δεν διαφοροποιούν σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητά τους, όπως αναφέρει ο Bertin (1993), παρουσιάζοντας μετρημένες και υπολογισμένες τιμές των δύο προσομοιωμάτων. Παράλληλα το TOMGRO και το TOMSIM προσομοιώνουν παρόμοια την κατανομή του ξηρού βάρους που αποτελεί το βασικότερο μετρούμενο ποιοτικό χαρακτηριστικό των δύο μοντέλων.

2.1.7. Βιοφυσικά προσομοιώματα

Παρά το μεγάλο αριθμό μοντέλων που αναπτύχθηκαν για τη μελέτη του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπίων και την ανάπτυξη της καλλιέργειας της τομάτας λίγα είναι τα μοντέλα (Εικόνα 2.3), που προσομοιώνουν ταυτόχρονα και το κλίμα και την ανάπτυξη της καλλιέργειας (Rijsdijk και Houter 1993, van Henten 1994, Jones *et al.* 1995, Martin-Clouaire *et al.* 1996, Gary *et al.* 1998, Gijzen 1998). Στη συνέχεια ακολουθεί μια περιληπτική ανάλυση των τριών κυριότερων βιοφυσικών προσομοιωμάτων.



Εικόνα 2.3. Βιοφυσικά προσομοιώματα

Αρχικά ο van Hentel (1994), παρουσίασε ένα βιοφυσικό προσομοίωμα για την καλλιέργεια του μαρουλιού. Το κλιματικό προσομοίωμα που χρησιμοποιεί είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο, με τρία υπο-προσομοιώματα που αναφέρονται, στον υπολογισμό της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, καθώς και στον υπολογισμό της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Στο απλοποιημένο κλιματικό προσομοίωμα, ο van Hentel (1994), υπολογίζει τη θερμοκρασία του αέρα λαμβάνοντας υπόψη μόνο την επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο θερμοκήπιο, την ενέργεια που αποδίδει το σύστημα θέρμανσης και τέλος αυτή που χάνεται από το άνοιγμα των παραθύρων.

Παράλληλα στο ισοζύγιο μάζας που χρησιμοποιεί, οι υπολογισμοί στηρίζονται στη ποσότητα υδρατμών που παράγονται από τη διαπνοή των φυτών και αυτή που χάνεται μέσω του αερισμού του θερμοκηπίου. Στο βιοφυσικό προσομοίωμα του van Hentel (1994), δεν περιλαμβάνονται οι διαδικασίες συμπύκνωσης, συναγωγής, υγροποίησης και από-υγροποίησης ενώ ταυτόχρονα δεν υπολογίζονται οι θερμοκρασίες καλύμματος, καλλιέργειας και του εδάφους.

Στη συνέχεια ακολουθεί το SERRISTE που αποτελεί ένα σύστημα ελέγχου καθορισμού των τιμών των κλιματικών παραμέτρων από τον υπολογιστικό έλεγχο του μακροκλίματος. Αναπτύχθηκε από τους Martin-Clouaire *et al.* (1996), αλλά προς το παρόν δεν έχει εφαρμογή σε εμπορική χρήση (Jewett και Jarvis 2001).

Σύμφωνα με το SERRISTE η ανάλυση των αποφάσεων που εμπεριέχονται στη διαχείριση του θερμοκηπίου οδηγούν σε μια διαδοχή διάσπασης σε τρία επίπεδα (Udink ten Cate και Challa 1984, Baille *et al.* 1990). Στο υψηλότερο επίπεδο (επίπεδο 2) ο παραγωγός αποφασίζει το πότε η καλλιέργεια θα τοποθετηθεί (είδος και ποικιλία), την περίοδο της παραγωγής κ.λ.π. Ορίζει μια σχηματική απεικόνιση για την πορεία της παραγωγής. Το δεύτερο επίπεδο (επίπεδο 1) είναι το επίπεδο τακτικής, όπου ο παραγωγός θα πρέπει να αποφασίσει για τις κλιματικές συνθήκες που θα εισάγει και την βέλτιστη επιθυμητή συμπεριφορά της καλλιέργειας. Οι αποφάσεις που αφορούν τεχνικές διαδικασίες εφαρμόζονται απευθείας στην καλλιέργεια (αποφύλλωση, συγκομιδή κ.λ.π.) και αφορούν επίσης το συγκεκριμένο επίπεδο. Το τελικό επίπεδο (επίπεδο 0) είναι εκείνο όπου οι πράξεις έχουν σαν συνέπεια να φέρουν το σύστημα (θερμοκήπιο και καλλιέργεια) στη μελλοντική κατάσταση. Οι υπολογιστές που χρησιμοποιούνται σε εμπορικά θερμοκήπια σε αυτό το επίπεδο συμμετέχουν στον έλεγχο του κλίματος και στην λίπανση των καλλιεργειών καθώς είδη έχουν οριστεί από τον παραγωγό οι τιμές για τα κρίσιμα σημεία. Οι αποφάσεις που λαμβάνουν χώρα στο επίπεδο 1 και 2 είναι της αρμοδιότητας του παραγωγού (Tchamitchian *et al.* 2006).

Η εκλογή των ορισμένων τιμών για το κλίμα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου αναφέρεται στο 1^ο επίπεδο. Αποτελεί μια καθημερινή ή εβδομαδιαία δραστηριότητα η οποία πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Οι συνέπειες των αποφάσεων δεν είναι όλες άμεσα εμφανίσιμες και είναι πολύ δύσκολα αντιστρέψιμες σε πολλές περιπτώσεις. Για παράδειγμα μια μεταβολή στην ημερήσια μέση θερμοκρασία θα προκαλέσει μεταβολές στο ρυθμό σχηματισμού νέων οργάνων, κάτι το οποίο θα είναι δυνατό να παρατηρηθεί σε μία με δύο εβδομάδες, και θα έχει σαν παράλληλη

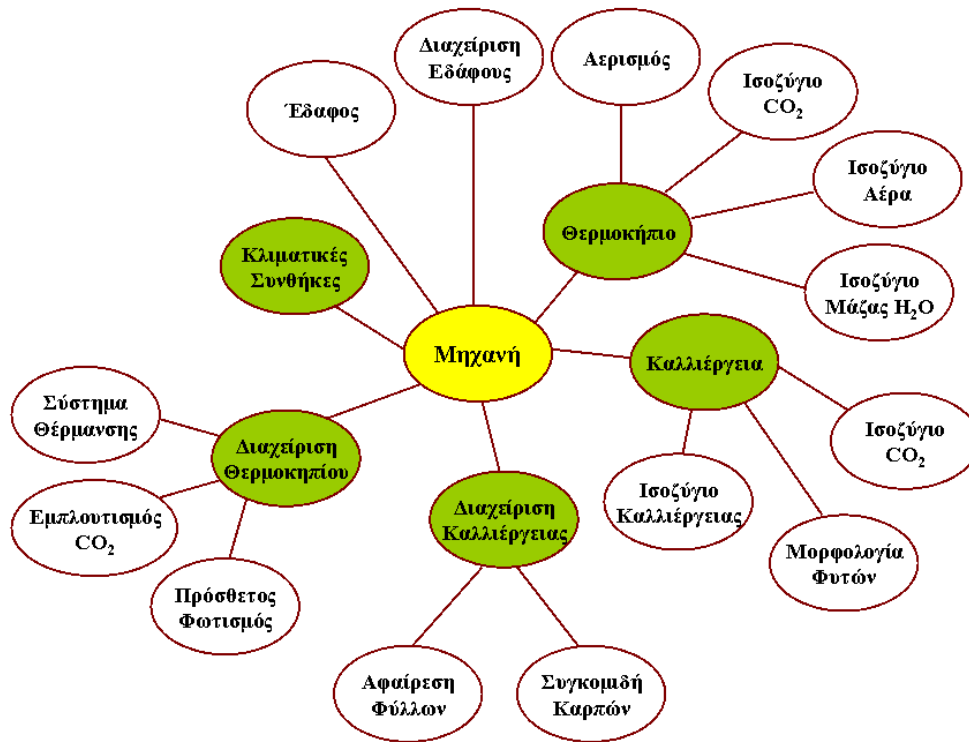
συνέπεια τη μεταβολή της ρώμης της καλλιέργειας (κάτι που θα γίνει αντιληπτό δύο με τρεις βδομάδες αργότερα).

Αυτό το παράδειγμα αποδεικνύει, ότι η λήψη μιας απόφασης για τις κλιματικές συνθήκες μπορεί να παρουσιάσει συνέπειες, σε διαφορετικούς στόχους είτε θετικά, είτε αρνητικά. Οι στόχοι πιθανόν πολλές φορές να είναι αντικρουόμενοι. Για να παρθεί μια σωστή απόφαση για τον ορισμό των κρίσιμων τιμών, ο παραγωγός θα πρέπει πρώτα να ορίσει τους στόχους που προσδιορίζουν την καλλιέργεια, καθώς και την σειρά προτεραιότητας. Θα πρέπει επίσης, να λαμβάνει υπόψη του τις μετεωρολογικές προγνώσεις καθώς είναι γνωστό, ότι οι εξωτερικές κλιματικές συνθήκες έχουν ισχυρή επίδραση στις κλιματικές συνθήκες, που διαμορφώνονται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και να ορίσει τον τρόπο ελέγχου. Τέλος ο παραγωγός θα πρέπει να διαθέτει κάποιες βασικές γνώσεις για τη συμπεριφορά της καλλιέργειας και την αλληλεπίδραση που παρουσιάζεται με τις κλιματικές συνθήκες. Η γνώση αυτή προέρχεται από τη μόρφωση του παραγωγού στο συγκεκριμένο αντικείμενο καθώς και από την πείρα στις περιπτώσεις που ενασχόλησης επί σειρά ετών (Tchamitchian *et al.* 2006).

Συνοψίζοντας για το SERRISTE μπορεί να ειπωθεί ότι προσδιορίζει τις παραμέτρους ρύθμισης (set- points) των συστημάτων κλιματισμού σε 24ώρη βάση, που είναι οι καταλληλότερες για την καλλιέργεια τομάτας και ότι ο προσδιορισμός αυτός γίνεται με τη βοήθεια μιας βάσης δεδομένων που αντιπροσωπεύει τις πρακτικές έμπειρων καλλιεργητών (Tchamitchian *et al.* 2006).

Εκτός από τα δύο παραπάνω προσομοιώματα ένα τρίτο ήδη ανεπτυγμένο βιοφυσικό προσομοίωμα είναι το HORTISIM 1.0 (HORTIcultural SIMulator) ένα δυναμικό και μηχανιστικό μοντέλο, για τον υπολογισμό του κλίματος του θερμοκηπίου και της ανάπτυξης της καλλιέργειας της τομάτας (Gijzen *et al.* 1998). Το προσομοίωμα αποτελείται από 7 υπο-προσομοιώματα καθώς και ενός διαχειριστή διεργασιών (Εικόνα 2.4). Το HORTISIM αποτελεί ένα προσομοίωμα που δεν περιορίζεται στην καλλιέργεια, αλλά ενσωματώνει και προσομοιώματα, για τον καιρό, το έδαφος, το κλίμα του θερμοκηπίου και «διαχειριστές» καλλιέργειας, εδάφους και θερμοκηπίου. Βασικό χαρακτηριστικό του προσομοιωτή είναι η δυνατότητα τροποποίησης της κατασκευής-δομής του. Ανάλογα με τις ανάγκες στον προσομοιωτή μπορούν να γίνουν προσθήκες εξισώσεων, να αφαιρεθούν όσες δεν είναι αναγκαίες ή να αντικατασταθούν. Εισερχόμενες μεταβλητές του συστήματος αποτελούν, η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία του ουρανού, η ταχύτητα και η

σχετική υγρασία του αέρα, η θερμοκρασία του εδάφους στο επίπεδο αναφοράς 1.5m κάτω από την επιφάνεια καθώς το άνοιγμα των παραθύρων. Σύμφωνα με τους Gijzen *et al.* (1998), οι προβλέψεις του HORTISIM προσεγγίζουν σε καλό βαθμό την πραγματικότητα, τόσο στο επίπεδο της ανάπτυξης και της παραγωγής της καλλιέργειας της τομάτας, όσο και στον υπολογισμό των κλιματικών συνθηκών στο εσωτερικό των θερμοκηπίων.



Εικόνα 2.4. Σχηματική απεικόνιση των υπο-προσομοιωμάτων του Hortisim

2.2. Γεννήτριες παραγωγής εξωτερικών κλιματικών δεδομένων

Το κλίμα είναι το αποτέλεσμα των διακυμάνσεων κάποιων σχετικών κλιματικών παραμέτρων όπως της θερμοκρασίας του αέρα, της ηλιακής ακτινοβολίας και των ατμοσφαιρικών απαιτήσεων για εξάτμιση. Ανάλογα με το χρονικό διάστημα οι παράγοντες που καθορίζουν το κλίμα παρουσιάζουν περιοδική συμπεριφορά (ημερήσια, ετήσια, πολυετή) και στοχαστική διακύμανση. Το επίπεδο περιοδικότητας των κλιματικών παραγόντων μπορεί να διαφέρει για παράδειγμα το φαινόμενο των

βροχοπτώσεων μπορεί να θεωρηθεί σαν ελλειπτική στοχαστική διαδικασία, ενώ η διάρκεια της ημέρας (φωτοπερίοδος) μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συστηματικός παράγοντας.

Οι κλιματικοί παράγοντες παρουσιάζουν συσχέτιση και εξάρτηση από τις προηγούμενες τιμές τους καθώς και από άλλες μεταβλητές. Πολλές ανθρώπινες διεργασίες και οικολογικές εξελίξεις ελέγχονται από τις κλιματικές συνθήκες, ενώ αρκετές προσπάθειες έχουν αφιερωθεί για την πρόβλεψη του κλίματος. Φυσικά όρια εμποδίζουν της μεγάλης διάρκειας πρόγνωσης του κλίματος αλλά στατιστικές εκτιμήσεις του κλίματος είναι πιθανές. Η γνώση αυτή επιτρέπει τα κλιματικά στοχαστικά μοντέλα για την ανάπτυξη και την παραγωγή κλιματικών δεδομένων (Jones *et al.* 1970, Richardson 1981, Larsen και Pense 1982, **Wgen**, Richardson και Wright 1984, Shu Geng *et al.* 1985, **Wxgen**, Richardson και Nicks 1990, **USClimate**, Hanson *et al.* 1994, **MTCLIM**, Thorton *et al.* 1997, **ClimGen**, Stockle *et al.* 2001, Parlange και Katz 2000, **GEM**, Johnson *et al.* 1996).

Τα παραγόμενα μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση διαφόρων βιοφυσικών μοντέλων και μοντέλων ανάπτυξης και αποτίμησης του ρίσκου, ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες. Τα κλιματικά μοντέλα επιτρέπουν την ταξινόμηση των διαφόρων κλιμάτων, τη δημιουργία κλιματικών δεδομένων τα οποία δεν προέρχονται από μελέτη των επιδράσεων που προκαλούνται από τις αλλαγές του κλίματος (Wilks 1992).

Τα μοντέλα πρόγνωσης των κλιματικών δεδομένων που έχουν αναπτυχθεί (Danuso και Della Mea 1994) περιγράφουν τις ημερήσιες τιμές των βροχοπτώσεων, (Prec, mm/d) την ελάχιστη (T_{min} , °C) και τη μέγιστη θερμοκρασία του αέρα (T_{max} , °C), την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία (R_{gExt} , $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$) και τις απαιτήσεις εξατμισοδιαπνοής της ατμόσφαιρας (E_{Tr} , $mm\ d^{-1}$) και τέλος την ταχύτητα του ανέμου (u , $m\ sec^{-1}$).

2.3. Αρχές και μέθοδος βελτιστοποίησης

Η βελτιστοποίηση της διαχείρισης του κλίματος των θερμοκηπίων κατά τη χειμερινή περίοδο είναι ένα θέμα που απασχόλησε έντονα τους ερευνητές την τελευταία δεκαετία καθώς συνδέεται άμεσα με την παραγωγή προϊόντων ποιότητας, την εξοικονόμηση ενέργειας καθώς και τη μείωση των χημικών εισροών. Η

υιοθέτηση τεχνικών και τεχνολογιών που περιορίζουν την κατανάλωση ενέργειας μπορεί να συμβάλλει στη μείωση του κόστους παραγωγής αλλά δεν αρκεί για την παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας (Bot 2001).

Σήμερα, η κλασική διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπίων κατά τη χειμερινή περίοδο συνίσταται συνήθως στη διαχείριση της θέρμανσης μέσω του προσδιορισμού δύο επιθυμητών θερμοκρασιών ρύθμισης του θερμοστάτη, μίας για τη νύχτα και μίας για την ημέρα, με βάση κυρίως την εμπειρία του παραγωγού (Tap *et al.* 2000). Οι επιθυμητές αυτές τιμές της θερμοκρασίας ρύθμισης του θερμοστάτη (set- points) εξαρτώνται από το είδος της καλλιέργειας και από την ηλικία της. Παρόλα αυτά, πολλές εργασίες έδειξαν ότι η αύξηση και η ανάπτυξη πολλών λαχανοκομικών και ανθοκομικών ειδών, φαίνεται να αποκρίνονται περισσότερο σε μία μέση ημερήσια θερμοκρασία παρά στην ακριβή πορεία εξέλιξης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας (Cockshull *et al.* 1981, Bakker και van Uffelen 1988, Heuvelink 1989, de Koning 1988, 1990, Myster και Moe 1995, Vogelesang *et al.* 1992, 2000).

Η θέρμανση των θερμοκηπίων με βάση το άθροισμα των θερμοκρασιών (Integrated Temperature Control) κατά τη διάρκεια του εικοσιτετραώρου έχει ήδη εφαρμοστεί σε αρκετά ανθοκομικά (Rijsdijk και Vogelesang 2000, Buwalda *et al.* 1999) και κηπευτικά είδη (De Koning 1988, Bakker και Uffelen 1988), επιτρέποντας μια εξοικονόμηση ενέργειας της τάξεως του 10 – 20% (Bailey και Seginer 1989). Στις εργασίες αυτές, η μέση θερμοκρασία και οι αποκλίσεις που επιτρέπονται γύρω από τον μέσο όρο, καθορίζονται από τον χρήστη και ο αλγόριθμος επιφορτίζεται να κατανείμει τις ανάγκες θέρμανσης. Ορισμένοι Ολλανδοί κατασκευαστές Η/Υ ελέγχου του κλίματος των θερμοκηπίων ανέπτυξαν λογισμικά που στηρίχθηκαν στις εργασίες αυτές (π.χ. Πρόγραμμα ECONAUT της Hoogendoorn Automation BV). Πάντως, στις περισσότερες περιπτώσεις συστημάτων ελέγχου του κλίματος, δεν προσφέρεται η απαραίτητη ευελιξία που είναι απαραίτητη για την πολύ συχνή τροποποίηση των θερμοκρασιών υπό κάλυψη. Μόνον ορισμένα πειραματικά πρωτότυπα παρέχουν τέτοιες δυνατότητες, όπως το σύστημα GX (Gauthier 1992) ή το σύστημα MACQU (Sigrimis *et al.* 1997, 1998)

Η προσπάθεια προσδιορισμού των βέλτιστων επιθυμητών θερμοκρασιών σε σχέση με την ανάπτυξη κάποιας καλλιέργειας ξεκίνησε μόλις την τελευταία δεκαετία με τις περισσότερες από αυτές να περιλαμβάνουν ένα μόνο στάδιο ανάπτυξης του φυτού και όχι ολόκληρο τον κύκλο αύξησης και ανάπτυξής του (Challa και van de Vooren 1980, Challa και Schapendonk 1986). Επίσης κανένα μοντέλο λειτουργίας της καλλιέργειας

δεν έχει χρησιμοποιηθεί με σκοπό να εκτιμηθεί η επίδραση των αποκλίσεων της θερμοκρασίας από τον μέσο όρο στην συμπεριφορά της καλλιέργειας. Οι Seginer *et al.* (1994), ανέπτυξαν ένα μοντέλο ισοζυγίου άνθρακα της καλλιέργειας, από το οποίο γίνονται αισθητές οι σχέσεις μεταξύ του εύρους των αποκλίσεων θερμοκρασίας ημέρας - νύχτας και της αύξησης της καλλιέργειας. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια από τους Tchamitchian και Ioslovich (2000), για να διερευνηθεί η σχέση που υπάρχει ανάμεσα στην αρχή του «αθροίσματος των θερμοκρασιών» και στη φωτοσυνθετική λειτουργία του φυτού.

Πολλές εργασίες αναφέρονται στη βελτιστοποίηση του κλίματος των θερμοκηπίων. Ο βέλτιστος έλεγχος είναι μια από τις μεθόδους που μελετήθηκαν περισσότερο (Gal *et al.* 1984, Seginer και McClendon 1992, Tap *et al.* 1993, Tchamitchian *et al.* 1993, van Henten 1994, Tchamitchian και Tantau 1996, Ioslovich και Tchamitchian 1998). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο λειτουργίας του υπό βελτιστοποίηση συστήματος, που αποτελείται από διαφορικές εξισώσεις 1^{ου} βαθμού και ένα αλγεβρικό κριτήριο που μετράει την ποιότητα του αποτελέσματος αυτής της λειτουργίας. Το πρόβλημα έγκειται, συνεπώς, στην εύρεση της χρονικής εξέλιξης των υπό έλεγχο παραμέτρων κατά τη διάρκεια του προσδιορισμένου ορίζοντα, που μεγιστοποιεί το κριτήριο. Η αρχή του Bellman (Bellman 1957), επιτρέπει την επίλυση του προβλήματος με δυναμικό προγραμματισμό, ενώ η αρχή του Pontryagin (Pontryagin *et al.* 1962) χρησιμοποιεί τους πολλαπλασιαστές Lagrange για να μετατρέψει το μοντέλο λειτουργίας του συστήματος και το αλγεβρικό κριτήριο σε μία και την αυτή συνάρτηση για ελαχιστοποίηση.

Οι εργασίες αυτές δεν έχουν ακόμη πρακτική εφαρμογή και ως επί το πλείστον δεν έχουν καταλήξει σε πειραματικές εργασίες, και ακόμη περισσότερο σε πρωτότυπα ή εμπορικά συστήματα. Ορισμένες σπάνιες προσεγγίσεις χρησιμοποιούν μεθόδους προερχόμενες από τον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης (Harazano 1988, Gauthier 1992, Martin-Clouaire *et al.* 1993).

2.4. Συμπεράσματα ανασκόπησης

Είναι γεγονός ότι τα περισσότερα από τα προσομοιώματα αναπτύχθηκαν σε περιοχές της βόρειας Ευρώπης και της Αμερικής, όπου οι τύποι θερμοκηπίων που χρησιμοποιούνται διαφοροποιούνται αισθητά, από τους αντίστοιχους που επικρατούν στις περιοχές της Μεσογειακής λεκάνης. Παράλληλα διαφορές παρουσιάζονται και στο κλίμα που επικρατεί στις αντίστοιχες περιοχές αλλά και στον τρόπο αντιμετώπισης των κλιματικών συνθηκών, με κυριότερη διαφορά την “απομόνωση” της καλλιέργειας από το εξωτερικό κλίμα στις χώρες της βόρειας Ευρώπης με τον περιορισμό του αερισμού των θερμοκηπίων. Οι διαφορές του κλίματος μεταξύ των χωρών της Μεσογείου και αυτών της βόρεια Ευρώπης καθώς και των στρατηγικών που ακολουθούν οι παραγωγοί, έχουν συνέπεια στη διαμόρφωση του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων και κατ’ επέκταση στην ανάπτυξη, την παραγωγή και τη φυσιολογική λειτουργία των φυτών της τομάτας.

Σήμερα επιβεβαιώνεται ότι τα περισσότερα κλιματικά προσομοιώματα που έχουν αναπτυχθεί έχουν βαθμονομηθεί και επιβεβαιωθεί σε περιοχές της βόρειας Ευρώπης και της Αμερικής αν και τα τελευταία χρόνια αρκετές εργασίες αναφέρονται σε περιοχές της Ασίας. Τα κλιματικά προσομοιώματα που έχουν αναπτυχθεί παρουσιάζουν τις περισσότερες φορές ελείψεις στον τρόπο υπολογισμού των κλιματικών παραμέτρων καθώς δεν λαμβάνουν υπόψη τους φαινόμενα όπως τη συμπύκνωση των υδρατμών στο κάλυμμα, τις απαιτήσεις σε θέρμανση των θερμοκηπιών ή χρησιμοποιούν σταθερές τιμές κατά τον υπολογισμό των συντελεστών συναγωγής. Οι περισσότεροι προσομοιωτές παρουσιάζονται απλοποιημένοι με στόχο την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων και την ορθή εκτίμηση των κλιματικών παραμέτρων. Παρόλα αυτά αναγκαία κρίνεται η δημιουργία ενός κλιματικού προσομοιώματος που να εμπεριέχει το σύνολο των φαινομένων που επικρατούν στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων, ικανού να παρέχει πληροφορίες τόσο για τις τιμές των κλιματικών παραμέτρων. Παράλληλα να πληροφορεί το χρήστη για τον τρόπο υπολογισμού τόσο για τις τιμές συντελεστών όσο και για τα φαινόμενα που επικρατούν σε κάθε πιθανή μεταβολή των κλιματικών συνθηκών.

Η αλήθεια είναι ότι οι περισσότεροι από τους αναπτυγμένους βιολογικούς προσομοιωτές (Hoogenboom 1980, Jones et al 1991, de Koning 1994, Heuvelink

1994) είναι προσαρμοσμένοι στις ανάγκες και τις απαιτήσεις των κλιματικών συνθηκών που επικρατούν στις χώρες της Βόρειας Ευρώπης. Οι περισσότερες θερμοκηπιακές μονάδες στις χώρες αυτές είναι σύγχρονα εξοπλισμένες με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ανάγκη για καλλιέργειες μικρής διάρκειας, όπως στις χώρες που βρίσκονται γύρω από τη λεκάνη της Μεσογείου, όπου οι κλιματικές συνθήκες οδηγούν στην διακοπή της καλλιεργητικής περιόδου. Η ανικανότητα των προσομοιωτών να προσομοιώσουν το κορυφολόγηση και ουσιαστικά το σταμάτημα της ανάπτυξης της καλλιέργειας, κοινή αγρονομική πρακτική για τις χώρες της Μεσογείου, αποτελεί την ανάγκη για τη μετατροπή του προσομοιωτή.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ανέδειξε ότι πληθώρα προσομοιωμάτων να ασχολούνται με τη μελέτη του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπίων ενώ αρκετά είναι και αυτά που ασχολούνται με την ανάπτυξη της καλλιέργειας της τομάτας, παρόλα αυτά λίγα είναι τα προσομοιώματα, που εκτιμούν ταυτόχρονα και το κλίμα και την ανάπτυξη της καλλιέργειας (Rijsdijk και Houter 1993, van Henten 1994, Jones *et al.* 1995, Martin-Clouaire *et al.* 1996, Gary *et al.* 1998, Gijzen 1998). Κυριότερη εξήγηση οι δυσκολίες που παρουσιάζονται στην ανάπτυξη ενός βιοφυσικού προσομοιώματος αλλά και η πληθώρα των δεδομένων που απαιτούνται, για τη βαθμονόμηση και την επιβεβαίωσή του.

Ελάχιστες αναφορές παρουσιάζονται στη χρήση γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων στο χώρο των θερμοκηπίων. Παρόλα αυτά είναι γνωστό ότι η γεννήτρια δύναται να παράγει σειρά κλιματικών δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από βιοφυσικά προσομοιώματα για μελέτη πιθανών κλιματικών σεναρίων και να συμβάλλουν στην ορθή διαχείριση του κλίματος και στη μείωση του ρίσκου πιθανών μελλοντικών ενεργειών. Απαραίτητη κρίνεται η βαθμονόμηση και επιβεβαίωση γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων για την περιοχή πραγματοποίησης των πειραμάτων καθώς θα αποτελέσει σε συνδιασμό με το βιοφυσικό προσομοίωμα εργαλείο χρήσιμο για την παραγωγή διαφόρων στρατηγικών.

Η βελτιστοποίηση της διαχείρισης του κλίματος των θερμοκηπίων κατά τη χειμερινή περίοδο είναι ένα θέμα που απασχόλησε έντονα τους ερευνητές την τελευταία δεκαετία αν και η κλασική διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπίων κατά τη χειμερινή περίοδο συνίσταται συνήθως στη διαχείριση της θέρμανσης μέσω του προσδιορισμού δύο επιθυμητών θερμοκρασιών (Tap *et al.* 2000). Κρίσιμο σημείο για διερεύνηση αποτελεί η προσπάθεια προσδιορισμού των βέλτιστων επιθυμητών

θερμοκρασιών σε σχέση με την ανάπτυξη και την παραγωγή της καλλιέργειας τομάτας. Η ανάλυση της επίδρασης πιθανών κλιματικών σεναρίων στην ανάπτυξη και την παραγωγή αναμένεται να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάπτυξη στρατηγικών που θα συμβάλλουν τόσο στην εξοικονόμηση της ενέργειας όσο και στη παραγωγή προϊόντων ποιότητας.

Κεφάλαιο 3°. Ανάλυση προσομοιωμάτων

3. Ανάλυση προσομοιωμάτων

3.1. Ανάπτυξη κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)

3.1.1. Εισαγωγή

Τα μαθηματικά προσομοιώματα συμβάλλουν στον προσδιορισμό των κυριότερων φυσικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν το κλίμα του θερμοκηπίου, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η σχετική υγρασία του αέρα, η θερμοκρασία του καλύμματος και η θερμοκρασία της καλλιέργειας.

Για να επιτευχθεί η προσομοίωση του “ισοζυγίου ενέργειας και μάζας του θερμοκηπίου” χρειάζεται να αναλυθεί το ισοζύγιο ενέργειας του κάθε επιμέρους συστήματος που αλληλεπιδρά θερμικά. Κάθε ισοζύγιο ενέργειας διέπεται από διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τις εισροές και εκροές ενέργειας, καθώς και το ρυθμό αλλαγής της θερμοκρασίας των επιμέρους στοιχείων του θερμοκηπίου συναρτήσει του χρόνου. Στο ισοζύγιο ενέργειας και μάζας του θερμοκηπίου λαμβάνουν χώρα τα φαινόμενα συναγωγής, ακτινοβολίας και μεταφοράς θερμότητας, η διαπνοή των φυτών, ο αερισμός καθώς και τα φαινόμενα συμπύκνωσης και υγροποίησης στο κάλυμμα και την καλλιέργεια.

Το κλιματικό προσομοίωμα που αναπτύχθηκε (Εικόνα 3.1) περιγράφει ποσοτικά τη μεταβολή της θερμοκρασίας του καλύμματος, της καλλιέργειας, του εδάφους και του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, καθώς και τη μεταβολή της μάζας των υδρατμών στον αντίστοιχο χρόνο. Ο προσομοιωτής αποτελείται από υπο-προσομοιώματα που περιγράφουν:

- ✘ Το ισοζύγιο ενέργειας του αέρα
- ✘ Το ισοζύγιο ενέργειας του καλύμματος
- ✘ Το ισοζύγιο ενέργειας της καλλιέργειας
- ✘ Το ισοζύγιο ενέργειας του εδάφους
- ✘ Το ισοζύγιο μάζας του αέρα



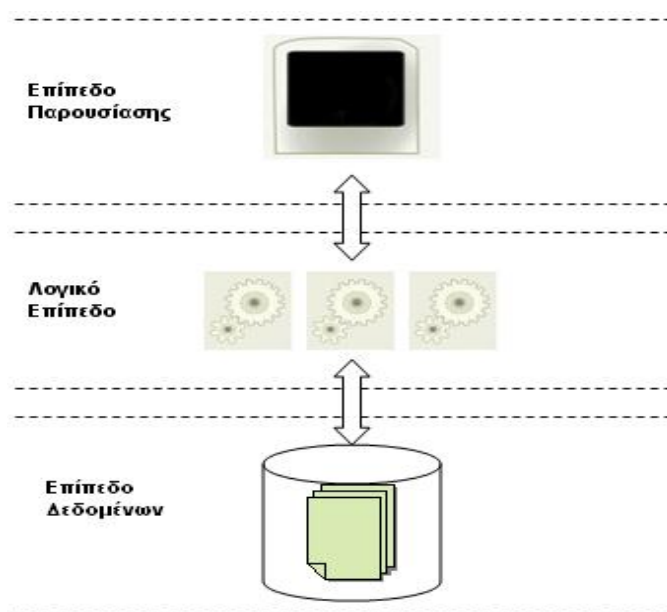
Εικόνα 3.1. Απεικόνιση της σύνδεσης των επιμέρους ισοζυγίων με το κλιματικό προσομοίωμα

Το χρονικό διάστημα της ολοκλήρωσης του προσομοιώματος είναι 10 λεπτά. Η δομή λειτουργίας του επιτρέπει την ένωσή του με το βιολογικό προσομοίωμα και η παράλληλη επίλυση των διαφορετικών εξισώσεων έχει ως συνέπεια την αλληλοτροφοδότηση των προσομοιωμάτων με παραμέτρους απαραίτητες για τη συνέχιση της διαδικασίας μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Οι ολοκληρωμένες τιμές χρησιμοποιούνται για να «ενημερώνουν» τις μεταβλητές του βιολογικού μοντέλου σε ωριαία και ημερήσια βάση.

3.1.1.1. Υλοποίηση του λογισμικού

Ο προσομοιωτής έχει ανοικοδομηθεί γύρω από μια μηχανή επίλυσης εξισώσεων που παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων στα εκάστοτε ισοζύγια ενέργειας που διασυνδέονται γύρω από αυτήν και αλληλεπίδρασης των ισοζυγίων για τον υπολογισμό και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Η υλοποίηση βασίστηκε σε δύο γλώσσες οντοκεντρικού προγραμματισμού υψηλού επιπέδου (4^{ης} γενιάς), οι οποίες είναι η Java και η C++. Οι προαναφερθείσες γλώσσες προγραμματισμού επιλέχθηκαν γιατί προσφέρουν φορητότητα, αξιοπιστία, ασφάλεια, κλιμακοσιμότητα και ταχύτητα στους υπολογισμούς. Η αρχιτεκτονική που επιλέχθηκε κατά την υλοποίηση του

προσομοιωτή είναι μια πολύ-επίπεδη αρχιτεκτονική (multi-tier architecture) και πιο συγκεκριμένα μια αρχιτεκτονική τριών επιπέδων (Εικόνα 3.2). Στο επίπεδο δεδομένων περιλαμβάνονται όλα τα δεδομένα που είτε εισάγονται προς επεξεργασία στο λογικό επίπεδο είτε εξάγονται από το λογικό επίπεδο. Τα δεδομένα οργανώνονται σε αρχεία και ακολουθούν μια δενδρική μορφή αποθήκευσης. Στο δεύτερο επίπεδο (λογικό επίπεδο) περιλαμβάνεται το τμήμα λογισμικού το οποίο είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία των δεδομένων και την υλοποίηση των μοντέλων. Η έξοδος που παράγεται από το λογικό επίπεδο κατευθύνεται τόσο προς το επίπεδο παρουσίασης όσο και προς το επίπεδο δεδομένων. Στο επίπεδο παρουσίασης κατευθύνονται τα αποτελέσματα ώστε να προσφερθεί μια εύχρηστη και φιλική προς το χρήστη παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Επιπρόσθετα, τα δεδομένα κατευθύνονται προς το επίπεδο δεδομένων για να αποθηκευτούν για επακόλουθες χρήσεις .



Εικόνα 3.2. Αρχιτεκτονική υλοποίησης του προσομοιωτή

Ο προσομοιωτής αναπτύχθηκε σε τμήματα λογισμικού (components) τα οποία μπορούν να αλληλεπιδρούν (επικοινωνούν) σε πραγματικό χρόνο ώστε να παράγουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Το πρώτο τμήμα λογισμικού είναι υπεύθυνο για το επίπεδο δεδομένων. Οι εργασίες που επιτελεί είναι οι παρακάτω:

- Ανάγνωση της δενδρικής δομής αποθήκευσης των αρχείων και εύρεση των κατάλληλων αρχείων για επεξεργασία.
- Άνοιγμα προς ανάγνωση και εγγραφή των αρχείων.

- Αποθήκευση στα κατάλληλα αρχεία των δεδομένων που προέρχονται από το λογικό επίπεδο.

Το δεύτερο τμήμα λογισμικού αποτελεί τον πυρήνα του προσομοιωτή, καθώς υλοποιεί τα ισοζύγια και την επικοινωνία μεταξύ τους. Το επίπεδο λογικής αποτελείται από πολλά ξεχωριστά αρθρώματα λογισμικού (modules). Κάθε ένα άρθρωμα υλοποιεί και ένα ισοζύγιο ενέργειας. Η υλοποίηση του λογισμικού σε αρθρώματα προσφέρει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

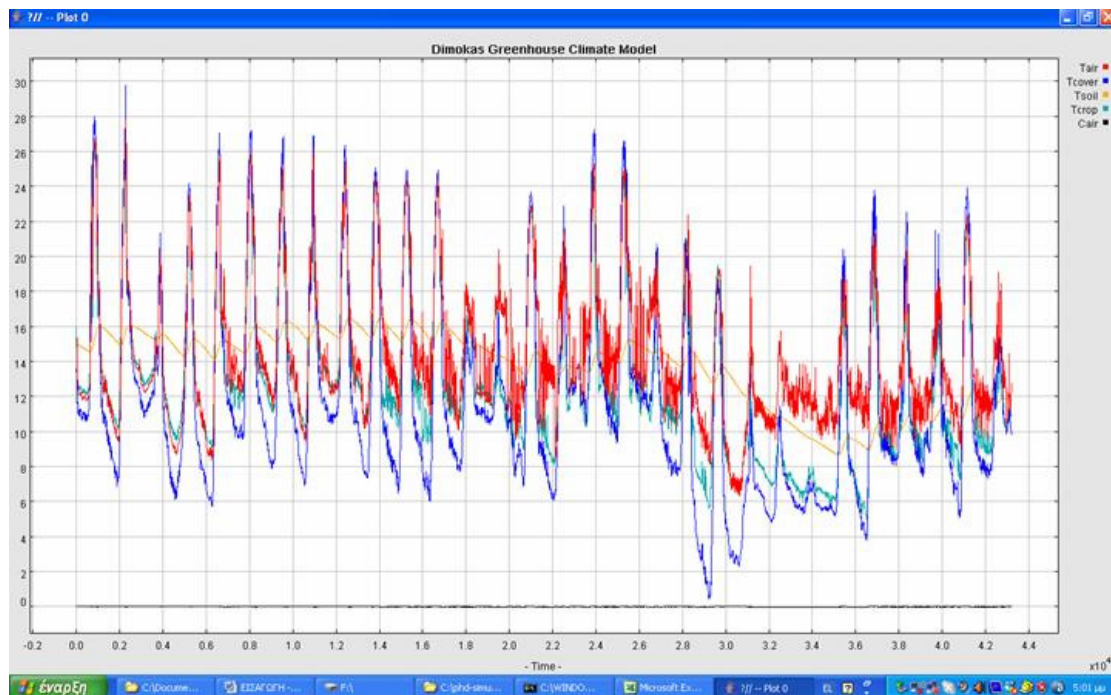
- Καλύτερο έλεγχο του προσομοιωτή.
- Ευελιξία. Είναι εύκολη και γρήγορη η διαδικασία της προσθήκης νέων ισοζυγίων ή η αφαίρεση ενός ή περισσότερων.

Τα αρθρώματα μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους γεγονός που απαιτείται σε όλους τους σύγχρονους προσομοιωτές. Η αλληλεπίδραση έγκειται στην ανταλλαγή δεδομένων ύστερα από επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του προσομοιωτή ένα άρθρωμα μπορεί να διαμοιράζεται τα αποτελέσματα που υπολογίζει ώστε να χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς που επιτελούν τα υπόλοιπα αρθρώματα. Το δεύτερο τμήμα λογισμικού αναλαμβάνει επίσης τη μορφοποίηση των αποτελεσμάτων τα οποία θα αποσταλούν στο επίπεδο παρουσίασης και στο επίπεδο δεδομένων. Το τρίτο τμήμα είναι υπεύθυνο για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Για μεγαλύτερη ευκολία στη χρήση και για να πληρεί την προϋπόθεση της φιλικής προς το χρήστη διεπαφής τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι με τη μορφή αρχείων του προγράμματος Microsoft Excel, ενώ ο δεύτερος τρόπος είναι με τη μορφή γραφικών παραστάσεων μέσω του προγράμματος Gnuplot.

Τα ισοζύγια ενέργειας που συνδέονται με τον προσομοιωτή λαμβάνουν δεδομένα από φακέλους υποδοχής των κλιματικών παραμέτρων. Οι φάκελοι ουσιαστικά περιγράφουν το κλίμα του εξωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου, την ενέργεια που εισάγεται μέσω του συστήματος θέρμανσης και αυτήν που χάνεται με το άνοιγμα των παραθύρων. Το σύστημα θέρμανσης και το ποσοστό ανοίγματος των παραθύρων αποτελούν τους ελεγκτές του συστήματος. Η περιγραφή των στατικών στοιχείων του θερμοκηπίου και της καλλιέργειας (όπως ο όγκος του θερμοκηπίου, η επιφάνεια ανοιγμάτων των παραθύρων, οι αποστάσεις των φυτών στη σειρά και μεταξύ των σειρών, κ.λ.π.), πραγματοποιείται σε ξεχωριστό φάκελο για να περιοριστούν τα σφάλματα κατά την εφαρμογή. Για τη χρήση του προσομοιωτή οι φάκελοι με τα

δεδομένα του κλίματος του εξωτερικού περιβάλλοντος θα πρέπει να ετοιμάζονται μια φορά την ημέρα για να πραγματοποιείται υπολογισμός μέσω του λογισμικού των κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, όταν το λογισμικό χρησιμοποιείται αυτόνομα. Ο φυσικός προσομοιωτής δύναται να χρησιμοποιήσει κλιματικά δεδομένα που παράγονται από γεννήτρια κλιματικών δεδομένων και αποτελούν πρόγνωση βραχείας διάρκειας, για το κλίμα του περιβάλλοντος χώρου του θερμοκηπίου. Η χρήση των κλιματικών δεδομένων δίνει τη δυνατότητα στον προσομοιωτή να προβλέψει το κλίμα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καθώς και τις ανάγκες για θέρμανση και αερισμό.

Για εκπαιδευτικούς και εποπτικούς σκοπούς έχει αναπτυχθεί ένα γραφικό περιβάλλον (Εικόνα 3.3) για τον χρήστη με τη χρήση της Java. Το γραφικό περιβάλλον έχει σχεδιαστεί πάνω και ανεξάρτητα από την εφαρμογή του προσομοιωτή και επιτρέπει χρήση του λογισμικού αλλά και προβολή των εξαγόμενων τιμών των κρίσιμων κλιματικών παραμέτρων σε γραφήματα με σκοπό την καλύτερη προβολή των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3.3. Γραφική απεικόνιση του κλιματικού μοντέλου

Ταυτόχρονα προσφέρει στο χρήστη πλήθος δεδομένων καθώς και τη συμμεταβολή τους κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τέλος, όλα τα δεδομένα εξάγονται σε αρχείο EXCEL (Εικόνα 3.4), που αποθηκεύεται σε συγκεκριμένο φάκελο κάθε φορά

που πραγματοποιείται μια προσομοίωση, κάτι που δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη για περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων. Η χρονική διάρκεια προσομοίωσης του κλίματος του θερμοκηπίου είναι ελάχιστα δευτερόλεπτα κάτι που καθιστά ικανή τη μεγάλη επαναληψιμότητα, σε περιπτώσεις χρήσης του προσομοιωτή σε μεθόδους βελτιστοποίησης.

time	area	Tsoil	Tcrop	Cair	Transp-mb	Qcower	Qcrop	Qw	CropTranspVp0
0	15.32	13.57	15	16	-0.00402	0	59.90744	0	0
10	15.33042	13.2603	15.00272	13.60381	-0.01124	0	69.57357	95.17893	0
20	14.01276	12.15132	14.9981	13.14568	-0.00708	0	58.39954	45.36387	0
30	13.19512	11.80695	14.99195	12.92003	-0.00285	0	41.80988	0	0
40	13.0555	11.63789	14.98511	13.07976	-0.00289	0	42.36832	0	0
50	12.79701	11.68159	14.97874	12.90174	0	0	0	0	0
60	12.6874	11.24042	14.97187	12.87546	-0.00289	0	42.36625	0	0
70	12.5071	11.50506	14.96488	12.64933	0	0	0	0	0
80	12.40293	11.07225	14.95727	12.75592	0	0	0	0	0
90	12.33078	10.97967	14.94994	12.49222	-0.00265	0	38.84403	0	0
100	12.15614	11.21776	14.94184	12.50432	0	0	0	0	0
110	12.15914	10.93074	14.93383	12.52946	-0.00239	1.91E-04	35.01626	0	0.001482
120	12.11634	11.20922	14.92589	12.401	0	0	0	0	0
130	12.10719	10.88509	14.91762	12.53521	-0.00237	1.48E-04	34.73979	0	0.001131
140	12.12472	11.22688	14.90974	12.35769	2.00E-07	7.96E-04	0	0	0.002133
150	12.09049	10.91892	14.9014	12.56092	-0.00227	2.23E-04	33.28376	0	0.003386
160	12.12279	11.26136	14.89365	12.35507	-0.00168	0	24.56136	0	0
170	12.08122	11.18349	14.88536	12.57206	-0.00174	0	25.5334	0	0
180	12.1654	11.28777	14.87774	12.45685	-0.00171	0	25.079	0	0
190	12.15391	11.19338	14.8698	12.55376	-0.00187	8.26E-05	27.41752	0	0.001077
200	12.17913	11.18973	14.86217	12.46796	-0.00193	0	26.27533	0	0
210	12.26247	11.1505	14.8543	12.49815	0	0	0	0	0
220	12.25124	10.82502	14.84654	12.49216	-0.00278	0	40.80683	0	0
230	12.10229	11.11732	14.83875	12.34867	0	0	0	0	0
240	12.04381	10.74193	14.83069	12.45182	0	0	0	0	0
250	12.00571	10.71102	14.82271	12.24111	4.33E-08	2.16E-04	0	0	4.19E-04
260	11.88038	10.63888	14.81423	12.2795	1.38E-08	9.32E-05	0	0	1.09E-04
270	11.89627	10.69955	14.80689	12.19337	0	0	0	0	0
280	11.82018	10.6877	14.79732	12.24754	-0.00216	0	31.71106	0	0
290	11.83609	11.02005	14.78894	12.19668	0	0	0	0	0
300	11.8779	10.79818	14.78048	12.35621	-0.00207	0	30.33896	0	0
310	11.92906	11.08825	14.7725	12.22571	0	0	0	0	0
320	11.93258	10.81027	14.76419	12.40243	-0.00216	0	31.62128	0	0
330	11.96196	11.09762	14.75639	12.22651	-0.00167	0	24.42948	0	0
340	11.9364	11.01271	14.74813	12.40593	-0.00178	0	26.06187	0	0
350	12.01449	11.11932	14.74042	12.30776	0.00123	0	36.07386	0	0

Εικόνα 3.4. Παραγόμενο αρχείο του Excel με αποτελέσματα του κλιματικού μοντέλου

Συνεπώς, η υλοποίηση του προσομοιωτή πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για τον υπολογισμό ενός ισοζυγίου είτε συνολικά ολόκληρου του μοντέλου. Επιπρόσθετα η υλοποίηση με βάση την αρχιτεκτονική τριών επιπέδων προσφέρει τη δυνατότητα εύκολης προσαρμογής σε διαδικτυακή εφαρμογή (π.χ. ως Web Service). Τέλος, ο προσομοιωτής σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι συμβατός με όλους τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές για την μετέπειτα χρήση του σε εμπορικά θερμοκήπια, ενώ η εποπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων προσφέρει μεγάλη ευχρηστία.

3.1.1.2. Μεταβλητές εισόδου – εξόδου

Η διαδικασία λειτουργίας του προσομοιωτή περιλαμβάνει τη δημιουργία μεταβλητών εισόδου από τον χρήστη, που περιγράφουν τις κλιματικές παραμέτρους του περιβάλλοντος χώρου του θερμοκηπίου. Οι μεταβλητές εισόδου που χρησιμοποιεί ο προσομοιωτής διαχωρίζονται σε μεταβλητές που αποδίδουν το κλίμα του περιβάλλοντος χώρου του θερμοκηπίου και στους ελεγκτές του συστήματος και παρουσιάζονται παρακάτω:

- ✿ Η εξωτερική θερμοκρασία του αέρα (*μεταβλητή κλίματος*)
- ✿ Η εξωτερική σχετική υγρασία του αέρα (*μεταβλητή κλίματος*)
- ✿ Η εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία (*μεταβλητή κλίματος*)
- ✿ Η εξωτερική ταχύτητα του ανέμου (*μεταβλητή κλίματος*)
- ✿ Το ποσοστιαίο άνοιγμα των παραθύρων (*ελεγκτής συστήματος*)
- ✿ Η ποσότητα ενέργειας που προσδίδει το σύστημα θέρμανσης στο θερμοκήπιο (*ελεγκτής συστήματος*)

Η εισαγωγή των δεδομένων του κλίματος και η ολοκλήρωση των εξισώσεων του προσομοιωτή οδηγούν στην παραγωγή των μεταβλητών εξόδου, με ταυτόχρονη απεικόνισή τους σε γραφική παράσταση και αποθήκευσή τους σε φάκελο Excel. Αναλυτικά οι μεταβλητές που παράγονται είναι:

- ✿ Η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου
- ✿ Η θερμοκρασία του καλύμματος
- ✿ Η θερμοκρασία της καλλιέργειας
- ✿ Η θερμοκρασία του εδάφους
- ✿ Η σχετική υγρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου
- ✿ Η ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

Παράλληλα ο προσομοιωτής δύναται να εξάγει πιο εξειδικευμένες πληροφορίες για τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο χρονικό διάστημα της προσομοίωσης, καθώς και τις τιμές κρίσιμων μεταβλητών όπως:

- ✿ Τη συμπύκνωση στο κάλυμμα
- ✿ Τη συμπύκνωση στην καλλιέργεια
- ✿ Τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία
- ✿ Τις ποσότητες ενέργειας που μεταφέρονται με συναγωγή
- ✿ Τις ποσότητες ενέργειας που μεταφέρονται με ακτινοβολία
- ✿ Τις τιμές των συντελεστών συναγωγής
- ✿ Τις τιμές των αδιάστατων αριθμών
- ✿ Τον τύπο της συναγωγής και της ροής

3.1.2. Ισοζύγιο Ενέργειας του Αέρα

Ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου είναι το αποτέλεσμα της μεταβολής της θερμότητας μέσω συναγωγής, μεταξύ του αέρα και των στοιχείων του θερμοκηπίου (καλλιέργεια, έδαφος, κάλυμμα), της ποσότητας που εξέρχεται από το θερμοκήπιο μέσω του αερισμού καθώς και της ποσότητας που εισάγεται από το σύστημα θέρμανσης, σύμφωνα με τους Pieters και Deltour (1997), και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\rho \cdot c_i \cdot \frac{V}{A_{gr}} \cdot \frac{dT_i}{dt} = Q_{V(v,i)} + Q_{V(s,i)} - Q_{V(i,ci)} + Q_{rh} - Q_{V(i,o)} \quad (3.1)$$

όπου:

V = ο όγκος του θερμοκηπίου (m^3)

A_{gr} = η επιφάνεια του καλυμμένου εδάφους (m^2)

ρ = η πυκνότητα του αέρα του θερμοκηπίου ($kg\ m^{-3}$)

c_i = η ειδική θερμότητα του αέρα – θερμοχωρητικότητα ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)

dT_i = η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (K)

dt = το χρονικό διάστημα μεταβολής του ισοζυγίου (s)

$Q_{V(v,i)}$ = πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ καλλιέργειας και αέρα ($W\ m^{-2}$)

$Q_{V(s,i)}$ = πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ εδάφους και αέρα ($W\ m^{-2}$)

$Q_{V(i,ci)}$ = πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα και της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος ($W\ m^{-2}$)

Q_{rh} = πυκνότητα ροής θερμότητας από το σύστημα θέρμανσης ($W\ m^{-2}$)

$Q_{V(i,o)}$ = ροή θερμότητας μέσω ανταλλαγής με τον εξωτερικό αέρα ($W\ m^{-2}$)

3.1.2.1. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα με την καλλιέργεια, το έδαφος και το κάλυμμα

Η πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ της καλλιέργειας, του εδάφους, του καλύμματος και του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, σύμφωνα με τους Monteith και Unsworth (1990), υπολογίζεται:

$$Q_{V(x,i)} = h_{V(x,i)} \cdot (T_x - T_i) \quad (3.2)$$

όπου:

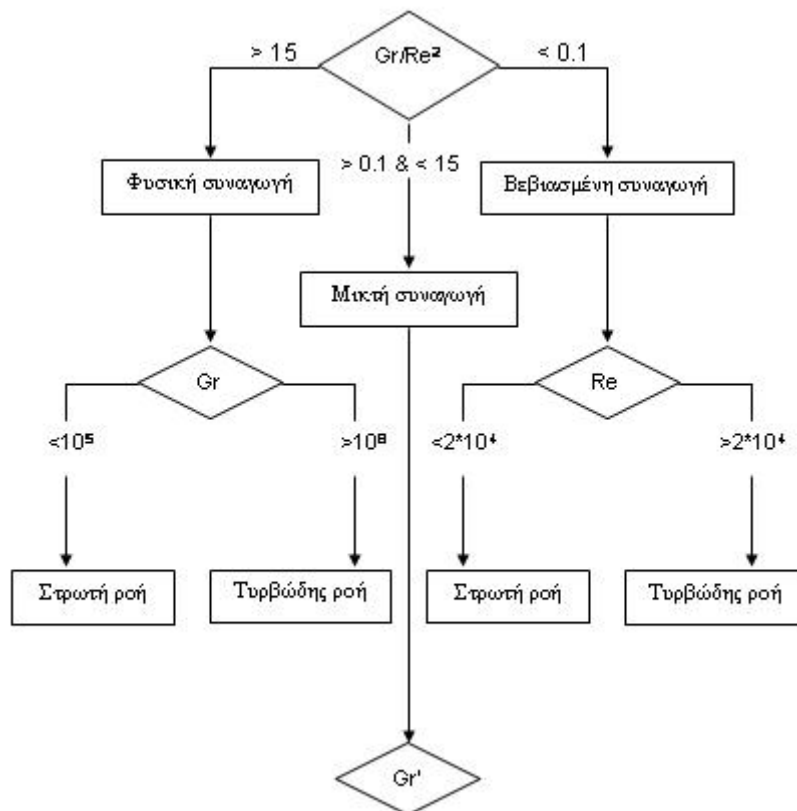
$Q_{V(x,i)}$ = πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή ($W m^{-2}$)

$h_{V(x,i)}$ = συντελεστής μεταβολής με συναγωγή μεταξύ του αέρα και καλλιέργειας, εδάφους, καλύμματος ($W m^{-2} K^{-1}$)

T_x = η θερμοκρασία καλλιέργειας, εδάφους, καλύμματος (K)

T_i = η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (K)

x = η καλλιέργεια, το έδαφος, το κάλυμμα.



Εικόνα 3.5. Υπολογισμός του αριθμού Nusselt σύμφωνα με το είδος ροής

Η τιμή του συντελεστή μεταβολής με συναγωγή μεταξύ καλλιέργειας, εδάφους, καλύμματος και του αέρα εξαρτάται από την τιμή του αδιάστατου αριθμού Nusselt (Εικόνα 3.5) και εκφράζεται:

$$h_{V(x,i)} = \frac{\lambda}{d_x} \cdot Nu_{(x,i)} \quad (3.3)$$

όπου:

λ = η θερμική αγωγιμότητα του αέρα ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

d_x = το χαρακτηριστικό μήκος της καλλιέργειας, του εδάφους, του καλύμματος

$Nu_{(x,i)}$ = ο αδιάστατος αριθμός Nusselt.

Ο υπολογισμός του αδιάστατου αριθμού Grashof δίνεται σύμφωνα με την Stanghellini (1995), από τη σχέση:

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot d_x^3 \cdot (T_i - T)}{\nu^2} \quad (3.4)$$

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας m s^{-2} , ν είναι το κινηματικό ιξώδες του αέρα σε $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, β ο συντελεστής θερμικής διαστολής του αέρα σε K^{-1} , T είναι η εικονική θερμοκρασία τόσο του περιβάλλοντος αέρα όσο και της επιφάνειας του καλύμματος. Η χρήση της εικονικής θερμοκρασίας αντί της πραγματικής γίνεται έτσι, ώστε να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις των διαβαθμίσεων της συγκέντρωσης των υδρατμών στην πυκνότητα του αέρα.

Ο υπολογισμός του αδιάστατου αριθμού Reynolds μπορεί να οριστεί σύμφωνα με τους Roy *et al.* (2002), ως εξής:

$$Re = \frac{u \cdot d_x}{\nu} \quad (3.5)$$

όπου u είναι η ταχύτητα του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Για τον αδιάστατο αριθμό Pr (Prandtl) χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.71 σύμφωνα με τους Roy *et al.* (2002).

3.1.2.2. Αερισμός

Η πυκνότητα ροής θερμότητας που μεταφέρεται μέσω αερισμού από το εσωτερικό του θερμοκηπίου στον περιβάλλον χώρο $Q_{V(i,o)}$, εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας και δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{V(i,o)} = K_s \cdot (T_i - T_o) \quad (3.6)$$

όπου:

K_s = ο συντελεστής μεταφοράς αισθητής θερμότητας ($J K^{-1} sec^{-1} m^{-2}$)

T_o = η θερμοκρασία αέρα του περιβάλλοντος (K)

Ο συντελεστής μεταφοράς αισθητής θερμότητας εξαρτάται από το ρυθμό ανανεώσεων του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και υπολογίζεται:

$$K_s = \frac{\rho \cdot c_i \cdot G_v}{A_{gr}} \quad (3.7)$$

όπου:

G_v = ο ρυθμός ανανεώσεων του αέρα ($m^3 s^{-1}$)

Ο υπολογισμός του ρυθμού ανανέωσης του αέρα σύμφωνα με τους Roy *et al.* (2002), γίνεται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η διαφορά θερμοκρασίας (ΔT) ή το ύψος της καμινάδας (H) θεωρώντας ότι παίρνουν μικρές τιμές στις περιπτώσεις θερμοκηπίων που δεν έχουν ανοίγματα οροφής. Η εκτίμηση του ρυθμού ανανεώσεων του αέρα εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα στον περιβάλλοντα χώρο του θερμοκηπίου καθώς και από το ποσοστό ανοίγματος των πλευρικών παραθύρων.

$$G_v = \left(\frac{w \cdot S_o}{2} + S_f \right) \cdot C_d \cdot \sqrt{C_w} \cdot u + d_o \quad (3.8)$$

όπου:

S_o = η συνολική επιφάνεια των πλευρικών παραθύρων (m^2)

S_f = η επιφάνεια διαφυγών (m^2)

$C_d = 0$ συντελεστής ανεμοπίεσης

$C_w = 0$ συντελεστής ανεμοφόρτισης

$w =$ το ποσοστό ανοίγματος των παραθύρων (%)

$d_o =$ οι απώλειες του θερμοκηπίου ($\text{m}^3 \text{sec}^{-1}$)

3.1.3. Ισοζύγιο Ενέργειας στο Κάλυμμα του θερμοκηπίου

Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας του καλύμματος σύμφωνα με τους Pieters και Deltour (1999), προσδιορίζεται 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 αέρα στον περιβάλλοντα χώρο, την πυκνότητα ροής θερμότητας μέσω της συμπυκνώσεως των υδρατμών στην εσωτερική επιφάνεια, την πυκνότητα ροής θερμότητας με θερμική ακτινοβολία μεταξύ καλύμματος-καλλιέργειας, καλύμματος-εδάφους, καλύμματος-ουρανού καθώς και την πυκνότητα ροής που αποδίδεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας στο κάλυμμα.

$$c'_c \cdot \frac{A_c}{A_{gr}} \cdot \frac{dT_c}{dt} = Q_{V(i, ci)} - Q_{V(o, co)} + Q_{C(c)} + Q_{R(v, c)} + Q_{R(s, c)} - Q_{R(c, sky)} + Q_{S(c)} \quad (3.9)$$

όπου:

$c'_c =$ ειδική θερμότητα του καλύμματος ($\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1}$)

$A_c =$ η επιφάνεια του καλύμματος (m^2)

$dT_c =$ η μεταβολή θερμοκρασίας στο κάλυμμα (K)

$Q_{V(o, co)} =$ πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του περιβάλλοντος αέρα και της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος (W m^{-2})

$Q_{C(c)} =$ πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στο κάλυμμα (W m^{-2})

$Q_{R(v, c)} =$ πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του καλύμματος (W m^{-2})

$Q_{R(s, c)} =$ πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του εδάφους και του καλύμματος (W m^{-2})

$Q_{R(c, sky)}$ = πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του καλύμματος και του ουρανού ($W m^{-2}$)

$Q_{S(c)}$ = ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στο κάλυμμα ($W m^{-2}$)

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

Όπως παράγραφος 3.2.1.

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

Όπως παράγραφος 3.2.1.

3.1.3.3. Πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στο κάλυμμα

Συμπύκνωση είναι το φαινόμενο υγροποίησης των υδρατμών σε μια επιφάνεια που αποκτά θερμοκρασία χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του σημείου δρόσου του περιβάλλοντος αέρα. Η ροή των υδρατμών που συγκεντρώνονται στην εσωτερική επιφάνεια του καλύμματος μπορεί να υπολογιστεί με την ακόλουθη σχέση:

$$Q_{C(x)} = g_r \cdot (abs_i - abs_x) \cdot h_{fg} \quad (3.10)$$

όπου:

g_r = η αγωγιμότητα μεταφοράς των υδρατμών στην επιφάνεια του καλύμματος ($m s^{-1}$)

abs_i = η απόλυτη υγρασία του αέρα ($kg m^{-3}$)

abs_x = η απόλυτη υγρασία της επιφάνειας του καλύμματος ή της καλλιέργειας ($kg m^{-3}$)

h_{fg} = λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης του νερού ($J kg^{-1}$)

Η αγωγιμότητα των υδρατμών στην επιφάνεια του καλύμματος υπολογίζεται σύμφωνα με τους Monteith and Unsworth (1990), από την παρακάτω σχέση:

$$g_r = \frac{D_v}{d_x} \cdot Sh \quad (3.11)$$

όπου:

D_v = συντελεστής μοριακής διάχυσης των υδρατμών ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

Sh = ο αδιάστατος αριθμός Sherwood.

Συμπυκνώσεις μπορούν να δημιουργηθούν μόνο όταν $abs_i > abs_x$. Όταν η σχέση λαμβάνει αρνητικές τιμές σημαίνει πως δεν υπάρχουν συμπυκνώσεις στην επιφάνεια του καλύμματος. Ο έλεγχος για την περίπτωση συμπύκνωσης στην επιφάνεια του καλύμματος γίνεται σύμφωνα με την ανίσωση:

$$T_x < dpa \quad (3.12)$$

Το σημείο δρόσου του αέρα (dpa) υπολογίζεται παρακάτω σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$dpa = \frac{237.7 f_{dew}}{17.27 - f_{dew}} \quad (3.13)$$

$$f_{dew} = \frac{17.27 \cdot T_i}{237.7 + T_i} + \ln\left(\frac{RH_i}{100}\right) \quad (3.14)$$

όπου:

RH_i = σχετική υγρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

Ο αδιάστατος αριθμός Sherwood μπορεί να οριστεί ως συνάρτηση του αριθμού $Nu_{(x,i)}$ σύμφωνα με την Stanghellini (1995), όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$Sh_{(x,i)} = Le^{0.33} \cdot Nu_{(x,i)} \quad (3.15)$$

όπου:

Le = ο αδιάστατος αριθμός Lewis

Ο υπολογισμός του αδιάστατου αριθμού Lewis μπορεί να οριστεί σύμφωνα με τους Roy *et al.* (2002), ως εξής:

$$Le = \frac{a_1}{d_{vap}} \quad (3.16)$$

όπου a_1 είναι η διάχυση της θερμότητας του αέρα και d_{vap} η διάχυση των υδρατμών του νερού.

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

Η πυκνότητα ροής θερμότητας μεταξύ της καλλιέργειας και του καλύμματος εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας που παρουσιάζεται μεταξύ των δύο σωμάτων και προσδιορίζεται σύμφωνα με τους Pieters *et al.* (1994), από την παρακάτω εξίσωση:

$$Q_{R(v,c)} = p_v \cdot \left[(1 - p_{ef}) \cdot \frac{\varepsilon_v \cdot \varepsilon_{ci}}{1 - \rho_v \cdot \rho_{ci}} \cdot \sigma \cdot (T_v^4 - T_c^4) + p_{ef} \cdot \sigma \cdot \frac{T_v^4 - T_c^4}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} \right] \quad (3.17)$$

όπου:

p_v = κλάσμα της επιφάνειας της καλλιέργειας προς τη συνολικά καλυπτόμενη επιφάνεια του εδάφους

p_{cf} = κλάσμα συμπυκνώσεως λεπτού στρώματος

ε_v = εκπεμπικότητα της καλλιέργειας

ε_{ci} = εκπεμπικότητα της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος

ε_w = εκπεμπικότητα του νερού

ρ_v = ανακλαστικότητα της καλλιέργειας στη θερμική ακτινοβολία

ρ_{ci} = ανακλαστικότητα της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος στη θερμική ακτινοβολία

σ = σταθερά του Steffan-Boltzmann ($W m^2 K^{-4}$)

T_c = η θερμοκρασία του καλύμματος (K)

T_v = η θερμοκρασία της καλλιέργειας (K)

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

Η πυκνότητα ροής θερμότητας μεταξύ του καλύμματος και του εδάφους εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας που παρουσιάζεται μεταξύ των δύο σωμάτων και προσδιορίζεται σύμφωνα με τους Pieters *et al.* (1994), από την εξίσωση:

$$Q_{R(s,c)} = (1 - p_v) \cdot \left[(1 - p_{cf}) \cdot \frac{\varepsilon_s \cdot \varepsilon_{ci}}{1 - \rho_s \cdot \rho_{ci}} \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_c^4) + p_{cf} \cdot \sigma \cdot \frac{T_s^4 - T_c^4}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} \right] \quad (3.18)$$

όπου:

ε_s = εκπεμπικότητα του εδάφους

ρ_s = ανακλαστικότητα του εδάφους στη θερμική ακτινοβολία

T_s = η θερμοκρασία του εδάφους (K)

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

Η πυκνότητα ροής θερμότητας μεταξύ του καλύμματος και του ουρανού εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας που παρουσιάζεται μεταξύ των δύο σωμάτων και προσδιορίζεται σύμφωνα με τους Pieters *et al.* (1994), από την εξίσωση:

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

όπου:

ε_{ce} = εκπεμπικότητα της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος

ρ_{ce} = ανακλαστικότητα της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος στη θερμική ακτινοβολία

T_{sky} = η θερμοκρασία του ουρανού (K)

Η θερμοκρασία του ουρανού υπολογίζεται σύμφωνα με τον Swinbank (1963), από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος χώρου του θερμοκηπίου και την κάλυψη της ηλιακής ακτινοβολίας από την επιφάνεια της καλλιέργειας:

$$T_{sky} = p_{cl} \cdot T_o + (1 - p_{cl}) \cdot (0.0552 \cdot T_o^{1.5}) \quad (3.20)$$

όπου:

p_{cl} = μείωση της ηλιακής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια

3.1.3.7. Ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στο κάλυμμα του θερμοκηπίου

Η ροή θερμότητας που αποδίδει η ηλιακή ακτινοβολία στο κάλυμμα σύμφωνα με τους Pieters *et al.* (1994), εξαρτάται από τη διάχυτη και την άμεση πυκνότητα ροής στον περιβάλλοντα χώρο και από την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

$$Q_{S(c)} = \tau_{fr} \cdot \alpha_{Sc, dir} \cdot Rg_{Ext dir} + \tau_{fr} \cdot \alpha_{Sc, dif} \cdot Rg_{Ext dif} + p_v \cdot \rho_{Sv} \cdot \alpha_{Sc, dif} \cdot Rg_{In} + (1 - p_v) \cdot \rho_{Ss} \cdot \alpha_{Sc, dif} Rg_{In} \quad (3.21)$$

όπου:

$\alpha_{Sc, dif}$ = απορροφητικότητα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας

$\alpha_{Sc, dir}$ = απορροφητικότητα της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας

ρ_{Ss} = ανακλαστικότητα του εδάφους στην ηλιακή ακτινοβολία

ρ_{Sv} = ανακλαστικότητα της καλλιέργειας στην ηλιακή ακτινοβολία

Rg_{In} = πυκνότητα ροής της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου ($W m^{-2}$)

$Rg_{Ext dif}$ = πυκνότητα ροής της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας ($W m^{-2}$)

$Rg_{Ext dir}$ = πυκνότητα ροής της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ($W m^{-2}$)

τ_{fr} = περατότητα ηλιακής ακτινοβολίας μέσω των παραθύρων

3.1.4. Ισοζύγιο Ενέργειας της Καλλιέργειας

Η μεταβολή της θερμοκρασίας της καλλιέργειας προσδιορίζεται συναρτήσει της συναγωγής του αέρα με την καλλιέργεια, τη μεταφορά μάζας υδρατμών στον αέρα μέσω της διαπνοής των φυτών, τη συμπύκνωση των υδρατμών στην επιφάνεια των φυτών, τη μεταφορά ενέργειας με θερμική ακτινοβολία μεταξύ καλλιέργειας-καλύμματος, καλλιέργειας-εδάφους, καλλιέργειας-ουρανού, καθώς και τη μεταφορά ενέργειας μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας στην καλλιέργεια.

$$c_v \cdot m_v \cdot \frac{dT_v}{dt} = -Q_{V(v, i)} - Q_{Tr} + Q_{C(v)} + Q_{R(s, v)} - Q_{R(v, c)} - Q_{R(v, sky)} + Q_{S(v)} \quad (3.22)$$

όπου:

c_v = ειδική θερμότητα της καλλιέργειας ($J kg^{-1} K^{-1}$)

m_v = μάζα της καλλιέργειας ανά μονάδα καλυμμένου εδάφους ($kg m^{-2}$)

dT_v = μεταβολή θερμοκρασίας της καλλιέργειας (K)

Q_{Tr} = πυκνότητα ροής θερμότητας μεταξύ του αέρα και της καλλιέργειας μέσω της διαπνοής ($W m^{-2}$)

$Q_{C(v)}$ = πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στην καλλιέργεια ($W m^{-2}$)

$Q_{R(v, sky)}$ = πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του ουρανού ($W m^{-2}$)

$Q_{R(s, v)}$ = πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του εδάφους και της καλλιέργειας ($W m^{-2}$)

$Q_{S(v)}$ = ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στην καλλιέργεια ($W m^{-2}$)

3.1.4.1. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ της καλλιέργειας με τον αέρα

Όπως παράγραφος 3.1.2.1.

3.1.4.2. Διαπνοή της καλλιέργειας

Ο υπολογισμός της πυκνότητας ροής θερμότητας και μάζας μεταξύ της καλλιέργειας και του αέρα, θεωρεί την καλλιέργεια σαν ένα μεγάλο φύλλο (big leaf) και ότι όλα τα εσωτερικά στρώματα της βρίσκονται στις ίδιες κλιματικές συνθήκες (Stanghellini 1995). Η διαπνοή της καλλιέργειας σε θερμοκήπιο Q_{Tr} , οφείλεται στο έλλειμμα κορεσμού του αέρα και των φύλλων και σύμφωνα με τους Boulard *et al.* (1991), υπολογίζεται από την τροποποιημένη σχέση των Penman-Monteith:

$$Q_{Tr} = A \cdot G_{abs} + B \cdot VPD_{int} \quad (3.23)$$

όπου:

G_{abs} = η απορροφούμενη από την καλλιέργεια ηλιακή ακτινοβολία ($W m^{-2}$)

VPD_{int} = το έλλειμμα κορεσμού του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (kPa)

$$A = \frac{\Delta \cdot r_{ae}}{\Delta \cdot r_{ae} + \gamma \cdot r_e} \quad (3.24)$$

$$B = \frac{\rho \cdot c_i \cdot LAI}{\Delta \cdot r_{ae} + \gamma \cdot r_e} \quad (3.25)$$

όπου: LAI = ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (m^2)

Οι συντελεστές A και B μπορούν να θεωρηθούν, με μια πρώτη προσέγγιση, ως συναρτήσεις του δείκτη φυλλικής επιφάνειας.

Η κλίση (Δ) της καμπύλης κορεσμού των υδρατμών υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση, (Murray 1967):

$$\Delta = \left[\left(\frac{2504000}{(T_i - 35.86)^2} \right) \cdot \exp\left(17.27 \cdot \left(\frac{T_i - 273.16}{T_i - 35.86} \right) \right) \right] \quad (3.26)$$

Η συνολική αντίσταση μεταφοράς των υδρατμών υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$r_e = \frac{r_a^2 + A_s \cdot r_s^2 + (1 + A_s) \cdot r_a \cdot r_s}{2 \cdot r_a + (1 + A_s) \cdot r_s} \quad (3.27)$$

όπου:

r_e = η συνολική αντίσταση μεταφοράς των υδρατμών στα φύλλα ($s \cdot m^{-1}$)

r_{ae} = η αεροδυναμική αντίσταση των φύλλων ($s \cdot m^{-1}$)

r_a = η αεροδυναμική αντίσταση της μιας πλευράς των φύλλων: $r_{ae} = \frac{r_a}{2}$ ($s \cdot m^{-1}$)

$A_s = 1$ για μια ώρα

3.1.4.2.1. Υπολογισμός της αεροδυναμικής αντίστασης r_a

Η αεροδυναμική αντίσταση αντιπροσωπεύει την αντίσταση στη μεταφορά των υδρατμών από την επιφάνεια του φύλλου ή της καλλιέργειας στον περιβάλλοντα αέρα και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση, (Boulard et al. 2002):

$$r_a = 305 \cdot \left(\frac{d_v}{V_i}\right)^{0.5} \quad (3.28)$$

όπου:

$$V_i = \frac{G_v}{V^{2/3}} \quad (3.29)$$

3.1.4.2.2. Υπολογισμός της στοματικής αντίστασης r_s

Η στοματική αντίσταση στο επίπεδο του φύλλου ή της καλλιέργειας έχει συσχετιστεί με την ηλιακή ακτινοβολία, το έλλειμμα κορεσμού και τη θερμοκρασία του αέρα (Jarvis 1976, Avissar *et al.* 1985, Stanghellini 1987, Boulard et al. 1991a,b) και υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$r_s = r_{s,\min} \cdot f_1(Rg_{in}) \cdot f_2(VPD_{int}) \cdot f_3(T_i) \quad (3.30)$$

$$f_1(Rg_{in}) = 1 + \frac{1}{\exp((\tau \cdot Rg_{in} - 50) \cdot 0.05)} \quad (3.31)$$

$$f_2(VPD_{int}) = 1 + a_2 \cdot \exp(b_2 \cdot (VPD_{in} - VPD_{max})) \quad (3.32)$$

$$f_3(T_i) = 1 + a_3 \cdot \exp(b_3 \cdot (T_i - T_{max})) \quad (3.33)$$

όπου:

$$r_{smin} = 100 \text{ (s m}^{-1}\text{)}, a_2 = 0.11, b_2 = 0.34, D_{max} = 10 \text{ (mb)}, a_3 = 0.31, b_3 = 0.64, T_{max} = 30^\circ\text{C}$$

3.1.4.2.3. Υπολογισμός της απορροφόμενης ηλιακής ακτινοβολίας

Η απορροφόμενη ηλιακή ακτινοβολία από την καλλιέργεια είναι συνάρτηση τόσο της ακτινοβολίας που εισέρχεται και τελικά απορροφάται από τα φυτά όσο και από την κάλυψη της καλλιέργειας ανάλογα με την πυκνότητα και το στάδιο ανάπτυξης.

$$G_{abs} = f_{wc} \cdot G_{cabs} \quad (3.34)$$

όπου:

f_{wc} = η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της σκίασης της καλλιέργειας (m^2)

G_{cabs} = η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ($W m^{-2}$)

Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται σύμφωνα τους Boulard και Jemaa (1993), με τις παρακάτω σχέσεις:

$$G_{cabs} = Rg_{in} \cdot (1 - Trans - albedo) \quad (3.35)$$

$$Rg_{in} = Tr_{gh} \cdot Rg_{Ext} \quad (3.36)$$

$$Tr_{gh} = Tr_{con} \cdot \frac{(1 - Blanch)}{100} \quad (3.37)$$

όπου:

$Trans$ = περατότητα των κατασκευαστικών στοιχείων του θερμοκηπίου

$albedo$ = ανάκλαση των κατασκευαστικών στοιχείων του θερμοκηπίου

Rg_{Ext} = πυκνότητα ροής της εξωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας ($W m^{-2}$)

$Blanch$ = ποσοστό επικάλυψης της επιφάνειας του καλύμματος με υλικό σκίασης

Tr_{gh} = περατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από το υλικό κάλυψης

Tr_{con} = περατότητα του υλικού κάλυψης

Η Stanghellini (1983) και ο Goudrian (1977), προτείνουν για τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας λόγω της σκίασης της καλλιέργειας, τον υπολογισμό σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$f_{wc} = (1 - 0.70 \cdot e^{-0.24LAI}) \cdot f(w) \quad (3.38)$$

$$f(w) = (w_1 + D_w) / (w_1 + p_1) \quad (3.39)$$

$$D_w = p_1 + h - (p_1^2 + h^2)^{0.5} \quad (3.40)$$

όπου:

w_l = πλάτος διπλής σειράς της καλλιέργειας (m)

p_l = πλάτος μεταξύ των σειρών της καλλιέργειας (m)

h = ύψος της καλλιέργειας (m)

3.1.4.3. Πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στην καλλιέργεια

Όπως παράγραφος 3.1.3.3.

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

Όπως παράγραφος 3.1.3.4.

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

Η πυκνότητα ροής θερμότητας μεταξύ του εδάφους και της καλλιέργειας εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας που παρουσιάζεται μεταξύ των δύο σωμάτων και προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$Q_{R(s,v)} = p_v \cdot \sigma \cdot \frac{T_s^4 - T_v^4}{\frac{1}{\epsilon_v} + \frac{1}{\epsilon_s} - 1} \quad (3.41)$$

3.1.4.6. Πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ της καλλιέργειας και του ουρανού

Η πυκνότητα ροής θερμότητας μεταξύ της καλλιέργειας και του ουρανού εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας που παρουσιάζεται μεταξύ των δύο σωμάτων και προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$Q_{R(v, sky)} = (1 - p_{cf}) \cdot p_v \cdot \sigma \frac{\varepsilon_v \cdot \tau_c}{1 - \rho_v \cdot \rho_{ci}} \cdot (T_v^4 - T_{sky}^4) \quad (3.42)$$

3.1.4.7. Ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στην καλλιέργεια

Η ροή θερμότητας που αποδίδει η ηλιακή ακτινοβολία στην καλλιέργεια εξαρτάται από την πυκνότητα ροής της εισερχόμενης ακτινοβολίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και την απορροφητικότητα της καλλιέργειας.

$$Q_{S(v)} = (1 + \tau_{sv} \cdot \rho_{sv}) \cdot a_{sv} \cdot Rg_{in} \quad (3.43)$$

$$a_{sv} = 1 - \rho_{sv} - \tau_{sv} \quad (3.44)$$

$$\tau_{sv} = (1 - \rho_{sv}) \cdot e^{-k_v \cdot LAI} \quad (3.45)$$

όπου:

k_v = καλλιεργητικός συντελεστής μείωσης της ακτινοβολίας

a_{sv} = απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια

τ_{sv} = περατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια

3.1.5. Ισοζύγιο Ενέργειας του Εδάφους

Η θερμοκρασία του εδάφους υπολογίζεται από την πυκνότητα ροής θερμότητας μέσω της συναγωγής μεταξύ του αέρα και του εδάφους, την πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ εδάφους-καλύμματος, εδάφους-καλλιέργειας, εδάφους-ουρανού, καθώς και τη ροή θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος.

$$\rho'_s \cdot l_s \cdot c_s \frac{dT_s}{dt} = -Q_{V(s,i)} - Q_{R(s,v)} - Q_{R(s,c)} - Q_{R(s,sky)} + Q_{S(s)} \quad (3.46)$$

όπου:

ρ'_s = πυκνότητα εδάφους (kg m^{-3})

c_s = ειδική θερμότητα του εδάφους ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

l_s = λεπτότητα στρώματος εδάφους (m)

dT_s = διαφορά θερμοκρασίας του εδάφους (K)

$Q_{R(s, sky)}$ = πυκνότητα ροής θερμότητας με καθαρή ακτινοβολία μεταξύ του εδάφους και του ουρανού (W m^{-2})

$Q_{S(s)}$ = ροή θερμότητας με ηλιακή ακτινοβολία στο έδαφος (W m^{-2})

3.1.5.1. Πυκνότητα ροής θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του αέρα και του εδάφους

Όπως παράγραφος 3.1.2.1.

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

Όπως παράγραφος 3.1.4.4.

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

Όπως παράγραφος 3.1.3.5.

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

Η πυκνότητας ροής θερμότητας μεταξύ του εδάφους και του ουρανού εξαρτάται από την διαφορά θερμοκρασίας που παρουσιάζεται μεταξύ των δύο σωμάτων και προσδιορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$Q_{R(s, sky)} = (1 - p_v) \cdot (1 - p_{cf}) \cdot \frac{\varepsilon_s \cdot \tau_c}{1 - \rho_s \cdot \rho_{ci}} \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{sky}^4) \quad (3.47)$$

3.1.5.5. 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.

$$Q_{S(s)} = ((1 - p_v) + p_v \cdot \tau_{sv}) \cdot a_s \cdot R_{gIn} \quad (3.48)$$

όπου:

a_{ss} = απορροφητικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από το έδαφος

3.1.6. Ισοζύγιο Μάζας του Αέρα

Ο υπολογισμός της μεταβολής της συγκέντρωσης των υδρατμών προσδιορίζεται από τη μεταφορά μάζας νερού στον αέρα μέσω της διαπνοής των φυτών, τη συμπύκνωση ποσότητας υδρατμών στην επιφάνεια της καλλιέργειας και του καλύμματος, καθώς και της ποσότητας που εξάγεται μέσω του αερισμού.

$$h_{fg} \cdot \frac{V}{A_{gr}} \cdot \frac{dC_i}{dt} = Q_{Tr} - Q_{C(v)} - Q_{C(e)} + Q_{V(ei, eo)} \quad (3.49)$$

όπου:

h_{fg} = λανθάνουσα θερμότητα συμπύκνωσης των υδρατμών ($J \text{ kg}^{-1}$)

dC_i = μεταβολή συγκέντρωσης των υδρατμών (kg m^{-3})

$Q_{V(ei, eo)}$ = μεταβολή της μάζας λόγω ανταλλαγής με τον εξωτερικό αέρα ($W \text{ m}^{-2}$)

3.1.6.1. Πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στο κάλυμμα

Όπως παράγραφος 3.1.3.3.

3.1.6.2. Διαπνοή της καλλιέργειας

Όπως παράγραφος 3.1.4.2.

3.1.6.3. Πυκνότητα ροής θερμότητας λόγω συμπυκνώσεως των υδρατμών του αέρα στην καλλιέργεια

Όπως παράγραφος 3.1.3.3.

3.1.6.4. Μεταβολή της μάζας λόγω αερισμού

Όπως παράγραφος 3.1.2.3.

Η ποσότητα μάζας του αέρα, που μεταφέρεται μέσω αερισμού από το εσωτερικό του θερμοκηπίου στον περιβάλλοντα χώρο, εξαρτάται από τη διαφορά πίεσης και παρουσιάζεται παρακάτω:

$$Q_{V(e_i, e_o)} = K_l \cdot (e_i - e_o) \quad (3.50)$$

όπου:

K_l = ο συντελεστής μεταφοράς λανθάνουσας θερμότητας ($J \text{ kPa}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ m}^{-2}$)

e_i = η πίεση στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (kPa)

e_o = η πίεση στον περιβάλλοντα χώρο του θερμοκηπίου (kPa)

Ο συντελεστής μεταφοράς λανθάνουσας θερμότητας εξαρτάται από το ρυθμό ανανεώσεων του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου και υπολογίζεται:

$$K_l = \frac{\rho \cdot c_i \cdot G_v}{\gamma \cdot A_{gr}} \quad (3.51)$$

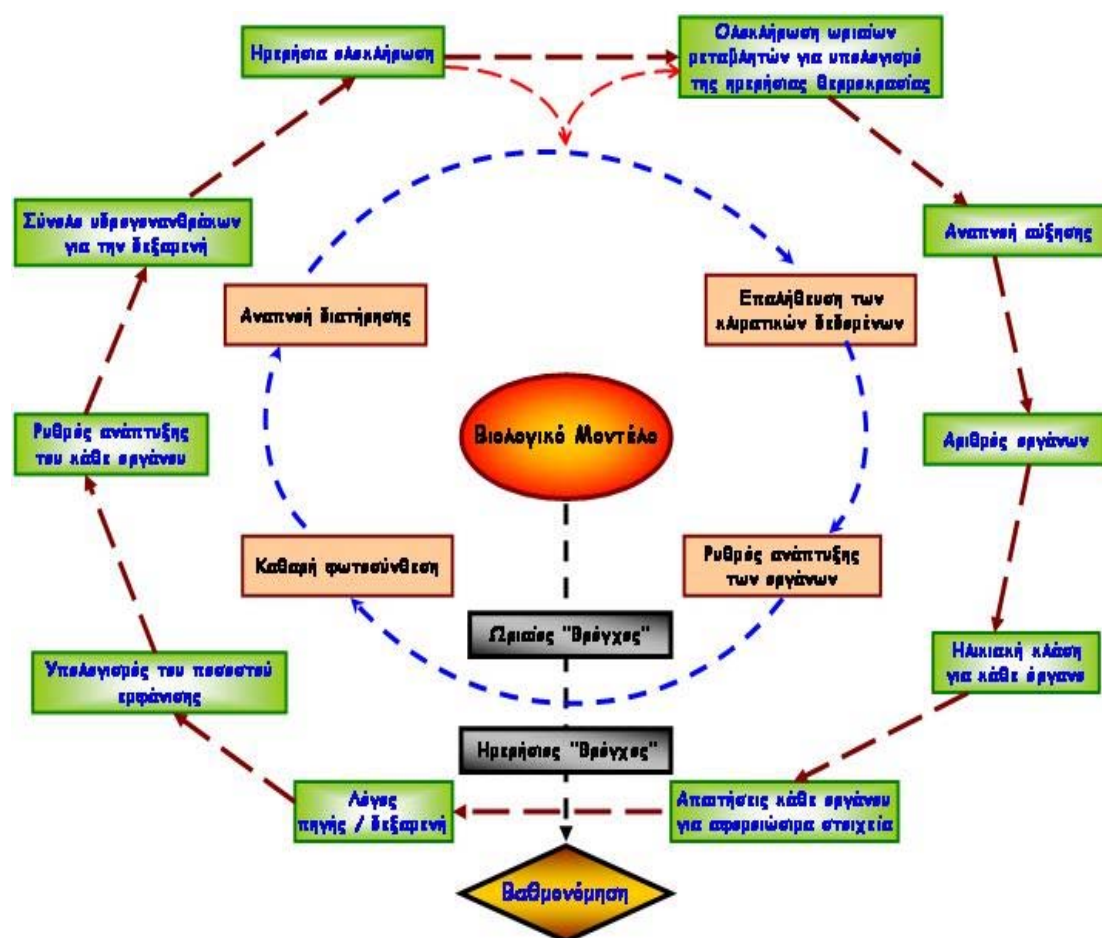
όπου:

γ = η ψυχομετρική σταθερά (k Pa K⁻¹)

3.2. Περιγραφή του βιολογικού προσομοιώματος και της τροποποίησης της λειτουργίας του (SimTom)

3.2.1. Εισαγωγή

Το βιολογικό προσομοίωμα (Εικόνα 3.6) περιγράφει ποσοτικά την αύξηση της καλλιέργειας της τομάτας και πιο αναλυτικά το σχηματισμό νέων οργάνων και τη συσσώρευση του ξηρού βάρους στα κύρια μέρη του φυτού (ρίζα, βλαστού, φύλλων και καρπών). Ο υπολογισμός του αριθμού των οργάνων του φυτού εξαρτάται από το ρυθμό εμφάνισης, την ηλικία και την απώλεια οργάνων. Το παραγόμενο ξηρό βάρος προέρχεται από το ισοζύγιο του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και τον καταμερισμό του βάρους μεταξύ των οργάνων.



Εικόνα 3.6. Διαγραμματική ροή του Βιολογικού Μοντέλου

Το φυτό περιγράφεται στο προσομοίωμα από μια σειρά «συμποδίων». Το πρώτο συμπόδιο έχει 7-15 γόνατα (κόμβοι) με φύλλα και ακολουθείται από μια ταξιανθία, ενώ το επόμενο συμπόδιο από 3 γόνατα (κόμβοι) με φύλλα πριν την εμφάνιση της επόμενης ταξιανθίας. Κάθε ταξιανθία εμφανίζει 5 έως 12 άνθη, από τα οποία γονιμοποιούνται 3 έως 12 (Picken *et al.* 1986, Atherton και Harris 1986).

3.2.2. Το Χρονικό Βήμα του Μοντέλου

Το χρονικό διάστημα της ολοκλήρωσης του μοντέλου είναι μία ημέρα. Παρ'όλα αυτά κάποιες από τις διαδικασίες του μοντέλου, όπως η αφομοίωση και η αναπνοή παρουσιάζουν άμεση αντίδραση στη μεταβολή των κλιματικών συνθηκών, όπως στην ένταση του φωτός και τη συγκέντρωση του CO₂. Άμεση συνέπεια ο υπολογισμός της αφομοίωσης και της αναπνοής να γίνεται σε επονομαζόμενο «γρήγορο βρόγχο» όπου η ολοκλήρωση των τιμών πραγματοποιείται για το χρονικό διάστημα της μίας ώρας. Το μοντέλο τροφοδοτείται με το σύνολο των ωριαίων αυτών τιμών, προσδιορίζοντας τη μεταβολή των αφομοιώσιμων στοιχείων μια φορά την ημέρα.

3.2.3. Σταθερές Μεταβλητές και Ηλικιακές Κλάσεις

Το προσομοίωμα υπολογίζει ταυτόχρονα την αλλαγή του βάρους και του αριθμού των υπέργειων μερών του φυτού (κόμβοι του βλαστού, φύλλα και καρποί). Μόνο το κύριο στέλεχος του βλαστού λαμβάνεται στους υπολογισμούς, καθώς οι πλάγιοι βλαστοί αφαιρούνται (Van de Vooren *et al.* 1986). Κάθε ένα από τα υπέργεια μέρη του φυτού χωρίζεται σε υπο-ομάδες που αποτελούνται από ξεχωριστές μονάδες, έχοντας κάποιο μέσο όρο και την ίδια «φυσιολογική» ηλικία.

Κάποιες από τις ομάδες μπορούν να αναγνωρισθούν με ειδικά μορφολογικά στάδια στη ζωή του φυτού, όπως ανθοφόροι οφθαλμοί, άνθη, ώριμοι καρποί. Κάθε ομάδα χαρακτηρίζεται από δύο σταθερές μεταβλητές, που τις αντιπροσωπεύουν, τον αριθμό και το βάρος. Εξάιρεση αποτελεί η ομάδα των φύλλων που χαρακτηρίζεται και από τη φυλλική τους επιφάνεια.

Η καλλιέργεια αποτελείται από 7 ομάδες:

- ✚ Αριθμός φύλλων
- ✚ Αριθμός κόμβων βλαστού
- ✚ Αριθμός καρπών
- ✚ Ξηρό βάρος φύλλων
- ✚ Ξηρό βάρος βλαστών
- ✚ Ξηρό βάρος καρπών
- ✚ Φυλλική επιφάνεια

3.2.4. Οργανογέννηση

Η οργανογέννηση αποτελεί τη μεταβολή του αριθμού των οργάνων του φυτού και συμβαίνει με το σχηματισμό νέων φύλλων, νέων τμημάτων του βλαστού και νέων καρπών. Ταυτόχρονα τα φυτά μέσω της διαδικασίας αποβολής ή απομάκρυνσης καρπών και φύλλων ανανεώνουν τα φυτικά τους μέρη. Ο ρυθμός σχηματισμού νέων κόμβων (φύλλων ή ταξιανθιών) εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τα επίπεδα συγκέντρωσης του CO₂. Ο ρυθμός σχηματισμού των φύλλων είναι ίσος με το ρυθμό σχηματισμού των κόμβων μέχρι την εμφάνιση της πρώτης ταξιανθίας. Έπειτα για τον υπολογισμό των κόμβων λαμβάνεται υπόψη και ο σχηματισμός των ταξιανθιών.

3.2.4.1. Ρυθμός αλλαγής του αριθμού των οργάνων (rx)

Ο ρυθμός αλλαγής του αριθμού των οργάνων rx (κόμβοι του βλαστού, φύλλα και καρποί) για κάθε ηλικιακή κλάση παρουσιάζεται:

$$rx = R \cdot N \cdot (Q(i-1) - Q(i)) - rd(i) \quad (3.52)$$

όπου:

R = ρυθμός αύξησης των οργάνων (d⁻¹), εξίσωση εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος T_i και τη συγκέντρωση του CO₂ του περιβάλλοντος.

N = συνολικός αριθμός των ηλικιακών κλάσεων.

$Q(i)$ = αριθμός οργάνων (no m⁻²) ανάλογος της ηλικιακής κλάσης I , για $1 < i < N$.

$rd(i)$ = ρυθμός μείωσης-νέκρωσης του αριθμού των οργάνων (no m⁻² d⁻¹).

3.2.4.2. Ρυθμός ανάπτυξης-σχηματισμού νέων βλαστών (Rn)

Ο ρυθμός εμφάνισης των νέων κόμβων των βλαστών, Rn , επηρεάζεται από την ηλικία της καλλιέργειας και χαρακτηρίζεται από τον τρέχοντα αριθμό κόμβων, τη θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του CO_2 του περιβάλλοντος (Klarwijk 1981).

Η ηλικία της καλλιέργειας περιγράφεται από τον τρέχοντα αριθμό των κόμβων. Η περιγραφή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί, καθώς για κάθε συμπόδιο υπάρχει ένας συγκεκριμένος αριθμός από κόμβους κατά μήκος του κύριου βλαστού (Coleman και Greyson 1976).

$$Rn = rm \cdot Fn(T) \cdot F(C) \cdot dp \quad (3.53)$$

όπου:

rm = μέγιστος ρυθμός σχηματισμού των κόμβων των βλαστών ανά φυτό (no φυτό⁻¹ d⁻¹).

$Fn(T)$ = παράγοντας υπολογισμού επίδρασης της (υπο-όπτιμης) θερμοκρασίας στο σχηματισμό των κόμβων των βλαστών

$F(C)$ = παράγοντας υπολογισμού επίδρασης της συγκέντρωσης του CO_2 του περιβάλλοντος στο σχηματισμό των κόμβων των βλαστών.

dp = πυκνότητα των φυτών (φυτά m⁻²).

Η εξίσωση $Fn(T)$ που χρησιμοποιείται για την περιγραφή του ρυθμού παραγωγής των κόμβων διαφοροποιείται στους 28 °C (βέλτιστη, Jones et al. 1991):

$$Fn(T) = 1 + 0.0281 \cdot (T - 28) \quad 12^\circ\text{C} < T < 28^\circ\text{C} \quad (3.54)$$

$$Fn(T) = 1 - 0.0455 \cdot (T - 28) \quad 28^\circ\text{C} < T < 50^\circ\text{C} \quad (3.55)$$

Η εξίσωση $F(C)$ χρησιμοποιείται για την περιγραφή του ρυθμού παραγωγής των νέων κόμβων και τη δυνάμενη αύξηση των οργάνων όταν τα επίπεδα συγκέντρωσης του CO_2 είναι διαφορετικά από τα επίπεδα αναφοράς τα οποία ορίζονται στα 350 ppm, παρουσιάζεται παρακάτω:

$$F(C) = 1 + 0.0003 \cdot (Ca - 350) \quad (3.56)$$

όπου:

Ca = η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στον περιβάλλον χώρο ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)

Πίνακας 3.1. Τιμές για τις εξισώσεις $F_n(T)$ και $PGRED$ για διάφορα επίπεδα θερμοκρασίας

Θερμοκρασία °C	$F_n(T)$	$PGRED$ $\text{g fruit}^{-1} \text{d}^{-1}$
0.0	0.00	0.00
9.0	0.00	0.67
12.0	0.55	1.00
15.0		1.00
21.0		1.00
30.0	1.00	1.00
40.0		0.00
50.0	0.00	0.00

3.2.4.3. Ρυθμός εμφάνισης νέων φύλλων (RI)

Οι κόμβοι θεωρούνται σταθερές μεταβλητές στο σύστημα και παραμένουν μέχρι το τέλος του βιολογικού κύκλου καθώς δεν ορίζεται κάποιος ρυθμός μείωσης του συνολικού τους αριθμού.

Κατά τη διάρκεια της αρχικής περιόδου, ο ρυθμός εμφάνισης των νέων φύλλων RI κατά μήκος του πρώτου συμποδίου είναι ίσος με το ρυθμό εμφάνισης των νέων κόμβων. Μετά το πέρας των 7-15 κόμβων ανά φυτό εμφανίζεται η πρώτη ταξιανθία. Από εκεί και πέρα ο λόγος σχηματισμού της ταξιανθίας προς τα φύλλα είναι συνήθως 3 φύλλα προς 1 ταξιανθία και υπολογίζεται (Calvert 1965):

$$RI = \frac{Rn}{1+a} \quad (3.57)$$

όπου:

a = ο λόγος των νέων ταξιανθιών προς τα νέα φύλλα.

$a = 0$, $N_n < N_t$.

$a = \text{tpl}$, $N_n > N_t$.

όπου:

N_n = στιγμιαίος αριθμός των κόμβων του βλαστού.

N_t = αριθμός των κόμβων του βλαστού στον οποίο σχηματίζεται η πρώτη ταξιανθία.

tr_1 = ο λόγος σχηματισμού των ταξιανθιών προς τα φύλλα.

3.2.4.4. Ρυθμός μείωσης των φύλλων ($rdI(i)$)

Σε όλες τις ηλικιακές κλάσεις ο αριθμός των φύλλων μπορεί να μειωθεί. Ο ρυθμός μείωσης καθορίζεται από τη φυσιολογική ηλικία του φύλλου, το βαθμό σκίασης (Tucker 1981) και την αποφύλλωση σύμφωνα με την τοπική πρακτική των παραγωγών (van de Vooren *et al.* 1986). Τα φύλλα δεν αφαιρούνται πρόωρα και θεωρούνται ώριμα όταν φθάνουν στην τελευταία ηλικιακή κλάση (Peat 1970, Ludwig και Withers 1984) και ο υπολογισμός τους παρουσιάζεται παρακάτω:

$$rdI(i) = rdr(i) \cdot Q(i) \quad 1 < i < N \quad (3.58)$$

όπου:

$rdI(i)$ = ρυθμός μείωσης των φύλλων ανάλογα με την ηλικιακή κλάση I ($\text{no m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

$rdr(i)$ = ρυθμός νέκρωσης των φύλλων ανάλογα με την ηλικιακή κλάση I ($\text{no m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Για ώριμα φύλλα, ρυθμός μείωσης-νέκρωσης λόγω σκίασης:

$$rdI(i) = rdr(i) \cdot Q(i) + rdrs \cdot (Al - Lax) \quad Al > Lax \quad (3.59)$$

όπου:

$rdrs$ = μέγιστος ρυθμός νέκρωσης λόγω σκίασης των φύλλων (d^{-1}).

Al = φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας (m^2).

Lax = κρίσιμο σημείο της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας, πάνω από το οποίο τα φύλλα πεθαίνουν λόγω σκίασης.

3.2.4.5. Ρυθμός σχηματισμού νέων καρπών (Rf)

Κάθε ταξιανθία αποτελείται από μη ορισμένο αριθμό ανθέων (5 έως 12) από τα οποία θα σχηματιστούν και θα αναπτυχθούν αντίστοιχα 3 έως 12 καρποί. Ο αριθμός

των ανθέων που σχηματίζεται ανά ταξιανθία είναι χαρακτηριστικό της ποικιλίας και μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με τη φυσιολογική ηλικία του φυτού (Vriesenga και Homna 1974) και τις κλιματικές συνθήκες π.χ. χαμηλές θερμοκρασίες που επιδρούν στο διαχωρισμό της ταξιανθίας και σχηματισμό περισσοτέρων καρπών ανά φύλλο (Hurd και Cooper 1967, Calvert 1965). Ο βαθμός διαχωρισμού του αριθμού των καρπών ανά ταξιανθία υποτίθεται ότι είναι θετικά συσχετιζόμενος με το χρόνο έκθεσης σε θερμοκρασίες χαμηλότερες των κρίσιμων τιμών. Ο υπολογισμός του ρυθμού εμφάνισης των καρπών (Rf) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Rf = rm \cdot Fn(T) \cdot F(C) \cdot fl \quad (3.60)$$

όπου:

fl = παράγοντας υπολογισμού της επίδρασης του *plastochron index* στον αριθμό των καρπών ανά ταξιανθία.

3.2.4.6. Ρυθμός αποβολής καρπών (Ra)

Το υψηλό εύρος διακύμανσης των ημερήσιων μεταβολών της ημερήσιας τιμής της θερμοκρασίας του αέρα οδηγεί στη μείωση του ρυθμού σχηματισμού νέων καρπών (Levy *et al.* 1978, Rylski 1979, Sawhney 1983, Picken 1986). Στο μοντέλο ο ρυθμός σχηματισμού των καρπών είναι αρνητικά συσχετισμένος με τη διάρκεια της περιόδου έκθεσης σε υπερκείμενες ή υποκείμενες τιμές των κρίσιμων τιμών των θερμοκρασιών. Μετά το σχηματισμό, οι νεαροί καρποί παραμένουν ευαίσθητοι στις υπο-όπτιμες συνθήκες και μερικοί μπορεί να αποβληθούν (Atherton και Othman 1983, Russel και Morris 1982). Ο αριθμός των αποβαλλόμενων νέων καρπών υπολογίζεται από το λόγο της απαιτούμενης προς τη δυνάμενη ποσότητα (Calvert και Slack 1975). Ο ρυθμός υπολογισμού της αποβολής των καρπών υπολογίζεται:

$$Ra = rra \cdot F \quad (3.61)$$

όπου:

Ra = ρυθμός αποβολής καρπών (no καρπών d^{-1}).

rra = σχετικός ρυθμός αποβολής (no καρπών d^{-1}).

F = αριθμός νέων καρπών (no καρπών).

Όλοι οι ώριμοι καρποί αφαιρούνται και συλλέγονται από τα φυτά σύμφωνα με την καλλιεργητική τεχνική, χρησιμοποιώντας ως όριο την τιμή των 5 καρπών ανά ταξιανθία.

3.2.4.7. Μεταβολής της Ηλικίας των Φύλλων ($RDVLV$)

Η ηλικία των φύλλων προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας ως βάση την ηλικία της προηγούμενης ημέρας και προσθέτοντας την επίδραση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα κατά το τελευταίο 24ώρο στην καλλιέργεια.

$$RDVLV_{(i+1)} = RDVLV_{(i)} + RDVLVF \cdot DTFAST \quad (3.62)$$

όπου:

$RDVLV$ = ηλικία των φύλλων της προηγούμενης μέρας

$RDVLVF$ = ηλικία των φύλλων της τελευταίας ημέρας

$DTFAST$ = διάρκεια ημέρας

3.2.4.8. Μεταβολή της Ηλικίας των Καρπών ($RDVFR$)

Με παρόμοιο με την ηλικία των φύλλων τρόπο πραγματοποιείται και ο προσδιορισμός της ηλικίας των καρπών. Κρίσιμη θεωρείται η επίδραση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα κατά το τελευταίο 24ώρο στην καλλιέργεια.

$$RDVFR_{(i+1)} = RDVFR_{(i)} + RDVFRF \cdot DTFAST \quad (3.63)$$

όπου:

$RDVFR$ = ηλικία των καρπών της προηγούμενης μέρας

$RDVFRF$ = ηλικία των καρπών της ημέρας αναφοράς

3.2.5. Παραγωγή Ξηρού Βάρους

Ο υπολογισμός της συσσώρευσης της βιομάζας της καλλιέργειας βασίζεται σε μια ποσοτική περιγραφή του ισοζυγίου του άνθρακα, που εμπεριέχει το ρυθμό αφομοίωσης των στοιχείων, την αναπνοή αύξησης και την αναπνοή διατήρησης. Ο ρυθμός αφομοίωσης των στοιχείων καθώς και η αναπνοή αύξησης και διατήρησης επηρεάζεται από τις κλιματικές συνθήκες (θερμοκρασία, ηλιακή ακτινοβολία, συγκέντρωση του CO₂) και την ηλικιακή κλάση για κάθε ένα από τα μέρη του φυτού (Hurd και Thornley 1974). Οι κλιματικές συνθήκες εντός του θερμοκηπίου διαφέρουν για μικρές χρονικές περιόδους με συνέπεια ο ρυθμός αφομοίωσης και η αναπνοή να υπολογίζονται με ωριαία χρονικά βήματα «γρήγορος βρόγχος».

$$SUPPLY = Cf \cdot (Pgd + Cpool - rmr) \quad (3.64)$$

όπου:

$SUPPLY$ = παραγόμενη βιομάζα της καλλιέργειας ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

Cf = συντελεστής μετατροπής των αφομοιώσιμων στοιχείων σε ξηρό βάρος (0.75).

Pgd = ρυθμός φωτοσύνθεσης ($\text{g CH}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

rmr = ρυθμός αναπνοής διατήρησης ($\text{g CH}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

$Cpool$ = δεξαμενή αποθήκευσης αφομοιώσιμων στοιχείων ($\text{g CH}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

3.2.5.1. Υπολογισμός ρυθμού της Φωτοσύνθεσης (Pgd)

Οι υπολογισμοί των ημερήσιων τιμών του ρυθμού φωτοσύνθεσης Pgd βασίζεται στην εξίσωση των Acock *et al.* (1978):

$$Pgd = \left(D \cdot \frac{Pm}{K} \right) \cdot \ln \left(\frac{((1-m) \cdot Pm + Qe \cdot K \cdot Rm)}{((1-m) \cdot Pm + Qe \cdot K \cdot Rm \cdot \exp(-K \cdot La)) \cdot Ta} \right) \quad (3.65)$$

όπου:

D = παράγοντας μετατροπής από $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ σε $\text{gr CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

K = συντελεστής μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε PAR (φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία).

m = συντελεστής περατότητας της ηλιακής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια.

Pm = ρυθμός αφομοίωσης της συγκέντρωσης του CO₂ από τα φύλλα σε περιβάλλον κορεσμένου φωτός ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Qe = συντελεστής απορροφητικότητας του CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \mu\text{mol}^{-1}$ photons)

Rm = πυκνότητα ροής φωτονίων ($\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

La = ενεργή φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας.

Ta = παράγοντας υπολογισμού της επίδρασης της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στον ρυθμό αφομοίωσης.

Ο υπολογισμός του συντελεστή απορροφητικότητας Qe του CO₂ υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Qe = e_o \cdot \frac{Ca - \Gamma}{Ca} \quad (3.66)$$

$$\Gamma = 50 \cdot e^{0.0295} \cdot (T - 23) \quad (3.67)$$

όπου:

Γ = η συγκέντρωση του CO₂ στο αντισταθμιστικό σημείο ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)

e_o = φωτοχημική δραστηριότητα σε συνθήκες απουσίας οξυγόνου ($\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ photons $\mu\text{mol mol}^{-1}$)

3.2.5.2. Υπολογισμός ρυθμού αφομοίωσης CO₂ (Pm)

Ο υπολογισμός του ρυθμού αφομοίωσης καθορίζεται από την ηλικία της καλλιέργειας, τη θερμοκρασία, και τη συγκέντρωση του CO₂ στο περιβάλλον (Thornley *et al.* 1981):

$$Pm = Pmc \cdot PGRED \quad (3.68)$$

όπου:

Pmc = εξίσωση της συγκέντρωσης του CO₂ σε συνθήκες κορεσμένου φωτός, ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

$PGRED$ = παράγοντας επίδρασης της ηλικίας των φύλλων σε συνθήκες κορεσμένου φωτός στο ρυθμό αφομοίωσης της συγκέντρωσης του CO_2 ($PGRED$)

Η τιμή του Pmc υπολογίζεται από τη συγκέντρωση του CO_2 στο περιβάλλον:

$$Pmc = t_1 \cdot Ca + \max(t_2 \cdot (Ca - 350)) \quad (3.69)$$

όπου:

t_1, t_2 = εμπειρικές σταθερές.

\max = μέγιστη τιμή του γινομένου που βρίσκεται εντός παρενθέσεων

3.2.5.3. Υπολογισμός της αναπνοής διατήρησης (rmr)

Η ημερήσια τιμή της αναπνοής διατήρησης υπολογίζεται από την ολοκλήρωση των στιγμιαίων τιμών σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (Penning de Vries 1975):

$$rmr = ((MAINT_l \cdot (W_l + W_{st}) + MAINT_{fr} \cdot W_{fr}) \cdot Q_{10,c}^{(0.1 \cdot (T-20))}) \quad (3.70)$$

όπου:

$MAINT_l$ = συντελεστής για την αναπνοή διατήρησης των φύλλων στους $20^\circ C$ ($g CH_2O g^{-1} DM d^{-1}$)

$MAINT_{fr}$ = συντελεστής για την αναπνοή διατήρησης των καρπών στους $20^\circ C$ ($g CH_2O g^{-1} DM d^{-1}$).

W_l = συνολικό ξηρό βάρος των φύλλων της καλλιέργειας ($g m^{-2}$).

W_{st} = συνολικό ξηρό βάρος των βλαστών της καλλιέργειας ($g m^{-2}$).

W_{fr} = συνολικό ξηρό βάρος των καρπών της καλλιέργειας ($g m^{-2}$)

$Q_{10,c}$ = επίδραση της θερμοκρασίας στην αναπνοή διατήρησης.

3.2.5.4. Υπολογισμός της αναπνοής αύξησης (rg)

Η αναπνοή αύξησης παρουσιάζει την ενέργεια που απαιτείται για τη μετατροπή των προϊόντων της φωτοσύνθεσης σε ξηρό βάρος (Penning de Vries et al. 1983).

$$rg = cp \cdot (Pg - rmr) \quad (3.71)$$

όπου:

rg = ρυθμός αύξησης της αναπνοής ($\text{g CH}_2\text{O m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

cp = τιμή παραγωγής του άνθρακα ($\text{g DM g}^{-1} (\text{CH}_2\text{O})$)

3.2.5.5. Συνολική αφομοίωση των ελεύθερων υλικών για ανάπτυξη (Pn) των φυτών

Η συνολική αφομοιώσιμη ποσότητα διαθέσιμη για την αύξηση του βάρους του φυτού, Pn υπολογίζεται:

$$Pn = Pgd - rmr - rg \quad (3.72)$$

3.2.5.6. Αποθήκευση αφομοιώσιμων στοιχείων στην «Δεξαμενή» ($CPOOL$)

Ο υπολογισμός της ποσότητας των αφομοιώσιμων στοιχείων που αποθηκεύονται στην δεξαμενή αποθήκευσης προκύπτει από την ποσότητα που παράγεται από την φωτοσύνθεση και τις ποσότητες που καταναλώνονται από την αναπνοή διατήρησης και την αναπνοή αύξησης. Η ποσότητα που αποθηκεύεται στη δεξαμενή $CPOOL_{(i+1)}$ υπολογίζεται:

$$CPOOL_{(i+1)} = CPOOL_{(i)} + \frac{(Pgd - SUPPLY)}{Cf - rmr} \quad (3.73)$$

3.2.6. Κατανομή της παραγόμενης βιομάζας

Ο διαχωρισμός του ξηρού βάρους μεταξύ των οργάνων του φυτού μπορεί να περιγραφεί από τη δυνάμενη αύξηση (Hurd και Thornley 1974, Tanaka *et al.* 1974a, Hurd *et al.* 1979, Thornley *et al.* 1981, Starck 1983).

Στο μοντέλο η κατανομή των αφομοιώσιμων στοιχείων καθορίζεται από το λόγο της δυνάμενης προς την αιτούμενη ποσότητα και εξαρτάται από την ηλικία του φυτού και τη θερμοκρασία (Nourai 1980, Russell και Morris 1983).

3.2.6.1. Δυνάμενος ρυθμός αύξησης της φυλλικής επιφάνειας $AI(i)$

Για τα φύλλα ο δυνάμενος ρυθμός αύξησης του αθροιζόμενου ξηρού βάρους υπολογίζεται από τον εν δυνάμει ρυθμό αύξησης της φυλλικής επιφάνειας για κάθε ομάδα ηλικιακή κλάσης $AI(i)$, (Hussey 1963a, 1963b, 1965, Cooper 1966, 1967, Klawijk 1981)

$$AI(i) = NI(i) \cdot POL(i) \cdot Fn(T) \cdot F(C) \quad (3.74)$$

όπου:

$NI(i)$ = αριθμός αυξανόμενων φύλλων της ηλικιακής κλάσης (i) (no m^{-2})

$POL(i)$ = μέγιστος ρυθμός αύξησης της φυλλικής επιφάνειας για κάθε μεμονωμένο φύλλο, σε βέλτιστη θερμοκρασία και σε συγκέντρωση του CO_2 $350 \mu\text{mol (m}^2 \text{ φύλλο}^{-1} \text{ d}^{-1})$

Η πρώτη παράγωγος μιας εξίσωσης Gompertz συσχετίζει τη φυλλική επιφάνεια με το χρόνο εμφάνισης (Bertin, 1993):

$$POL(i) = a_1 \cdot b_1 \cdot e^{(-b_1 \cdot (t_1 - c_1))} \cdot e^{-e^{(-b_1 \cdot (t_1 - c_1))}} \quad (3.75)$$

όπου:

a_1 = παράμετρος της εξίσωσης Gompertz (0.104)

b_1 = παράμετρος της εξίσωσης Gompertz (0.136)

c_1 = παράμετρος της εξίσωσης Gompertz (13.6)

t_1 = ο αριθμός των ημερών για την εμφάνιση του φύλλου μήκους 2 cm.

Το χρονικό διάστημα από την εμφάνιση του φύλλου μέχρι την πλήρη ανάπτυξή του σύμφωνα με το μοντέλο είναι 50 ημέρες. Αυτή η περίοδος χωρίστηκε σε 10 ηλικιακές κλάσεις σύμφωνα με το αποτέλεσμα της εξίσωσης (3.62). Οι τιμές του δυνάμενου ρυθμού αύξησης ($POL, \text{M}^2 \text{ d}^{-1}$) παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2. Τιμές του δυνάμενου ρυθμού αύξησης της φυλλικής επιφάνειας (POL, cm² φύλλο⁻¹ d⁻¹) και του δυνάμενου ρυθμού αύξησης του βάρους των καρπών (POF, g καρπό⁻¹ d⁻¹)

Ποσοστό Ανάπτυξης %	POL cm ² φύλλο ⁻¹ d ⁻¹	POF g καρπό ⁻¹ d ⁻¹
0	0	0
5	0.00035	0.09
15	0.00165	0.25
25	0.00255	0.45
35	0.00230	0.57
45	0.00155	0.58
55	0.00090	0.51
65	0.00050	0.41
75	0.00025	0.31
85	0.00015	0.22
95	0.00005	0.11
100	0	0

3.2.6.2. Δυνάμενος ρυθμός αύξησης του ξηρού βάρους των φύλλων $rDp(i)$

Οι απαιτήσεις του ξηρού βάρους για κάθε φύλλο $rDp(i)$ ηλικιακής κλάσης παράγεται από το δυνάμενο ρυθμό αύξησης της φυλλικής επιφάνειας, λαμβάνοντας υπόψη την Ειδική Φυλλική Επιφάνεια:

$$rDp_{(i)} = \frac{AI_{(i)}}{SLA} \quad (3.76)$$

όπου:

$rDp_{(i)}$ = δυνάμενος ρυθμός αύξησης του ξηρού βάρους των φύλλων ηλικιακής κλάσης I (g m⁻²d⁻¹).

SLA = ειδική φυλλική επιφάνεια των φύλλων της ηλικιακής κλάσης (i) (m⁻²g⁻¹).

Η Ειδική Φυλλική Επιφάνεια για κάθε ομάδα φύλλων καθορίζεται από την θερμοκρασία και τη συγκέντρωση του CO₂ του περιβάλλοντος καθώς και την επικρατούσα πυκνότητα ροής των φωτονίων (Hurd και Thornley 1974, Charles-Edwards και Ludwig 1975):

$$SLA = \frac{Sp}{Fc \cdot Ft} \quad (3.77)$$

όπου:

S_p = παράγοντας επίδρασης της πυκνότητας ροής των φωτονίων στην ειδική φυλλική επιφάνεια.

F_c = παράγοντας επίδρασης της συγκέντρωσης του CO_2 του περιβάλλοντος στην ειδική φυλλική επιφάνεια.

F_t = παράγοντας επίδρασης της θερμοκρασίας στην ειδική φυλλική επιφάνεια.

Η επίδραση της συγκέντρωσης του CO_2 του περιβάλλοντος στην ειδική φυλλική επιφάνεια ορίζεται ως γραμμική αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 του περιβάλλοντος σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$F_c = \frac{1}{1 + B_c \cdot (C_a - 350)} \quad (3.78)$$

όπου:

B_c = μεταβολή της ειδικής φυλλικής επιφάνειας σε $\mu\text{mol mol}^{-1}$ εξαιτίας της συγκέντρωσης του CO_2 του περιβάλλοντος, $B_c = 0.00085 (\mu\text{mol mol}^{-1})^{-1}$

Η θερμοκρασία έχει διαφορετική επίδραση στην ανάπτυξη της φυλλικής επιφάνειας και στην παραγωγή του ξηρού βάρους π.χ. το πάχος των φύλλων μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Friend 1966, Hurd και Thornley 1974):

$$F_t = \frac{1}{1 + B_T \cdot (24 - T)} \quad (3.79)$$

όπου:

B_T = μεταβολή της ειδικής φυλλικής επιφάνειας ανά $^{\circ}\text{C}$ (Hurd και Thornley, 1974).

$B_T = 0.085 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Η θερμοκρασία αναφοράς ορίστηκε στους $24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ βασισμένη σε αποτελέσματα που προέκυψαν από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες ελεγχόμενου περιβάλλοντος (Jones *et al.* 1989b).

Εξαιτίας της σχετικά ανεξάρτητης ανάπτυξης της φυλλικής επιφάνειας ως προς την αύξηση του ξηρού βάρους των φύλλων υπολογίζονται υψηλότερες τιμές για τους

ρυθμούς αφομοίωσης των στοιχείων από τη φυλλική επιφάνεια λόγω της αυξημένης τιμής της πυκνότητας ροής των φωτονίων σε συνδυασμό με το μικρό πάχος των φύλλων (Cooper 1966, 1967, Thornley και Hurd 1974, Klarpwijk 1981). Στο μοντέλο χρησιμοποιείται μια προσαρμοσμένη εμπειρική εξίσωση και υπολογίζει:

$$Sp = SLA_{min} + (SLA_{max} - SLA_{min}) \cdot \exp(-0.417 \cdot PAR) \quad (3.80)$$

όπου:

SLA_{min} , SLA_{max} = ελάχιστη και μέγιστη τιμή της ειδικής φυλλικής επιφάνειας ($g\ m^{-2}$)

$SLA_{max} = 0.075\ m^2\ g^{-1}$, $SLA_{min} = 0.024\ m^2\ g^{-1}$

PAR = φωτοσυνθετική ενεργή ακτινοβολία πυκνότητα ροής φωτονίων ($\mu mol\ photons\ m^{-2}\ s^{-1}$)

3.2.6.3. Συνολική απαίτηση ξηρού βάρους για την αύξηση των φύλλων (DI)

Το συνολικό απαιτούμενο ξηρό βάρος για την αύξηση των φύλλων υπολογίζεται με το άθροισμα των απαιτήσεων σε αφομοιώσιμα στοιχεία για το σύνολο των ηλικιακών κλάσεων, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις των μίσχων που προστίθενται στο συνολικό βάρος των φύλλων:

$$DI = (1 + pf) \cdot \sum_{i=1}^N (rDp(i)) \quad (3.81)$$

όπου:

pf = βάρος των μίσχων στο συνολικό βάρος των φύλλων

3.2.6.4. Συνολική απαίτηση ξηρού βάρους για την αύξηση των καρπών Df

Η συνολική απαίτηση του ξηρού βάρους για την αύξηση των καρπών Df υπολογίζεται από το άθροισμα των απαιτούμενων αφομοιώσιμων στοιχείων για όλες τις ομάδες (φύλλα, καρποί, βλαστοί, ρίζα) και εξαρτάται από τον αριθμό των καρπών ανά ταξιανθία καθώς και το δυνάμενο ρυθμό αύξησης του κάθε καρπού (Walker και

Ho 1977, Ho *et al.* 1983). Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ποσότητας του ξηρού βάρους γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (Fisher 1977, Ho 1980):

$$Df = \sum_{i=1}^N (Nf_{(i)} \cdot POF_{(i)} \cdot Fn(T) \cdot F(C)) \quad (3.82)$$

όπου:

$Nf(i)$ = αριθμός καρπών της ηλικιακής κλάσης (i)

$POF(i)$ = δυνάμενος ρυθμός αύξησης ανά καρπό ηλικιακής κλάσης I σε όπτιμη θερμοκρασία και συγκέντρωση CO₂ (g fruit⁻¹ d⁻¹)

3.2.6.5. Συνολική απαίτηση ξηρού βάρους για την αύξηση των κόμβων των βλαστών Ds

Το συνολικό απαιτούμενο ξηρό βάρος για την αύξηση των κόμβων των βλαστών υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (Heuvelink και Marcelis, 1989):

$$Ds = \sum_{i=1}^N (rDs(i)) \quad (3.83)$$

$$rDs(i) = \frac{rDp(i) \cdot Ns(i)}{fs \cdot Ns(i)} \quad (3.84)$$

όπου:

Ds = συνολικό απαιτούμενο ξηρό βάρος για την αύξηση των βλαστών (g m⁻² d⁻¹).

$rDs(i)$ = απαιτούμενο ξηρό βάρος για την αύξηση των βλαστών στην ηλικιακή κλάση (i) (kg plant⁻¹ d⁻¹).

$Ns(i)$ = αριθμός των αυξανόμενων κόμβων του βλαστού στην ηλικιακή κλάση (i)

fs = λόγος απαίτησης ξηρού βάρους των φύλλων και των βλαστών

3.2.6.6. Συνολική απαίτηση ξηρού βάρους για τα υπέργεια μέρη του φυτού (DEMAND)

Το συνολικό απαιτούμενο ξηρό βάρος για την αύξηση των υπέργειων μερών των φυτών αποτελεί το άθροισμα των επιμέρους απαιτούμενων ποσοτήτων για όλα τα συστατικά των φυτών:

$$DEMAND = D_l + D_s + D_f \quad (3.85)$$

3.2.7. Αύξηση των οργάνων του φυτού

Ο ρυθμός αύξησης των οργάνων του φυτού αποτελεί εξάρτηση του λόγου της παραγόμενης ποσότητας που προκύπτει από τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης και της αναπνοής προς την απαιτούμενη ποσότητα από τα διάφορα φυτικά μέρη.

$$R_c = \frac{SUPPLY}{DEMAND} \quad (3.86)$$

Στην περίπτωση που ο λόγος $R_c > 1$, η παραγόμενη ποσότητα είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη και οι ρυθμοί αύξησης είναι $rD_s(i)$, $rD_p(i)$, $rD_f(i)$, για όλες τις ηλικιακές κλάσεις i . Όταν λοιπόν η καθαρή αφομοιώσιμη ποσότητα υπερβαίνει την συνολική απαίτηση της καλλιέργειας για αφομοιώσιμα στοιχεία, η αφομοίωση στιγμιαία ρυθμίζεται έτσι ώστε τα επιπρόσθετα αφομοιώσιμα στοιχεία να αποθηκεύονται στην δεξαμενή αποθήκευσης για τη μετέπειτα χρησιμοποίησή τους (Walker και Ho 1977, Walker *et al.* 1978, Gosiewski *et al.* 1981).

Εάν ο λόγος $R_c < 1$ η παραγόμενη ποσότητα υδρογονανθράκων είναι περιορισμένη και ο υπολογισμός των ρυθμών αύξησης του βάρους και της φυλλικής επιφάνειας για κάθε ηλικιακή κλάση υπολογίζεται με το γινόμενο του λόγου R_c και των απαιτούμενων ποσοτήτων. Για τα φυτικά όργανα ηλικιακής κλάσης I ο υπολογισμός του πραγματικού ρυθμού αύξησης του ξηρού βάρους ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$) υπολογίζεται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$g_{F(i)} = rD_f(i) \cdot R_c \quad (3.87)$$

$$g_{L(i)} = rD_p(i) \cdot R_c \quad (3.88)$$

$$g_{S(i)} = rD_{S(i)} \cdot Rc \quad (3.89)$$

όπου:

$g_{F(i)}$ = ο πραγματικός ρυθμός αύξησης του ξηρού βάρους των καρπών ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

$g_{L(i)}$ = πραγματικός ρυθμός αύξησης του ξηρού βάρους των φύλλων ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

$g_{S(i)}$ = πραγματικός ρυθμός αύξησης του ξηρού βάρους των κόμβων των βλαστών ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και ο πραγματικός ρυθμός αύξησης της φυλλικής επιφάνειας:

$$g_{Al(i)} = Al(i) \cdot Rc \quad (3.90)$$

όπου:

$g_{Al(i)}$ = πραγματικός ρυθμός αύξησης της φυλλικής επιφάνειας ($\text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

3.2.8. Τροποποιήσεις στον τρόπο λειτουργίας του βιολογικού προσομοιώματος

Οι περισσότεροι προσομοιωτές καλλιέργειας τομάτας που έχουν αναπτυχθεί (Hoogenboom 1980, Jones *et al.* 1991, de Koning 1994, Heuvelink 1994) είναι σύμφωνοι με τις καλλιεργητικές συνθήκες και πρακτικές των χωρών της Βορείου Ευρώπης σύμφωνα με τις οποίες η διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου είναι ένα ολόκληρο έτος. Παρόλα αυτά στις χώρες της Μεσογειακής λεκάνης οι μικρότερης οικονομικής κλίμακας επενδύσεις κατά την κατασκευή των θερμοκηπιακών μονάδων, οδηγούν στην μείωση του απαραίτητου εξοπλισμού για τον έλεγχο του κλίματος στα βέλτιστα επίπεδα για την καλλιέργεια, ενώ ταυτόχρονα οι υψηλές θερμοκρασίες κατά τη θερινή περίοδο οδηγούν τους παραγωγούς στην καλλιέργεια κηπευτικών για ορισμένο χρονικό διάστημα. Η κλασική τακτική που βρίσκει εφαρμογή στις χώρες της Μεσογειακής λεκάνης είναι καλλιέργεια για διάστημα από τέσσερις έως έξι μήνες. Για την επίτευξη του στόχου τους, στην περιορισμένη χρονικά καλλιεργητική περίοδο, οι παραγωγοί κορυφολογούν τα φυτά σύμφωνα με την εμπειρία τους με στόχο να οδηγήσουν τους καρπούς ταχύτερα στην ωρίμανσή τους.

3.2.8.1. Κορυφολόγημα της καλλιέργειας

Το κορυφολόγημα του κορυφαίου οφθαλμού του φυτού οδηγεί στο σταμάτημα της ανάπτυξης και του σχηματισμού νέων φύλλων, κόμβων και βλαστών. Μετά το κορυφολόγημα ο αριθμός των οργάνων του φυτού σταματά να αναπτύσσεται ενώ σταδιακά μειώνεται λόγω της διαδικασίας της αποφύλλωσης και συλλογής των καρπών. Το TOMGRO τροποποιήθηκε σύμφωνα με τη διεργασία του κορυφολογήματος, με σκοπό τη σωστή καταγραφή της κατάστασης του φυτού, παρά το σταμάτημα παραγωγής νέων οργάνων από το φυτό. Απαραίτητη προϋπόθεση να ελεγχθεί η αρχική υπόθεση σύμφωνα με την οποία το κορυφολόγημα δεν τροποποιεί το μηχανισμό κατανομής του παραγόμενου ξηρού βάρους. Μετά το κορυφολόγημα το ξηρό βάρος επιμερίζεται μεταξύ των σχηματισμένων οργάνων του φυτού σύμφωνα με τη δύναμη τους, η οποία εμπεριέχει την ηλικιακή κλάση του κάθε οργάνου.

3.2.8.2. Ηλικία των καρπών

Όπως προαναφέρθηκε σύμφωνα με τις παρατηρήσεις των παραγωγών το κορυφολόγημα των φυτών “οδηγεί” σε ταχύτερη ωρίμανση των καρπών. Το TOMGRO τροποποιήθηκε με την εισαγωγή ενός μοναδιαίου συντελεστή (FRAGCOEF) στην εξίσωση υπολογισμού της ηλικίας των καρπών. Απώτερος στόχος είναι το τροποποιημένο TOMGRO να υπολογίζει σωστά το χρονικό διάστημα από τη γονιμοποίηση των καρπών μέχρι το τελικό στάδιο ωρίμανσής τους.

3.2.8.3. Συντελεστής μετατροπής των αφομοιώσιμων στοιχείων (C_f)

Παρά το γεγονός ότι τα διαφορετικά όργανα του φυτού δεν έχουν την ίδια χημική σύσταση και το ίδιο κόστος κατασκευής η τελευταία έκδοση του TOMGRO, χρησιμοποιεί μια σταθερή τιμή για όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου για να χαρακτηρίσει την τιμή του συντελεστή μετατροπής των αφομοιώσιμων στοιχείων (C_f). Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει τη μετατροπή των διαθέσιμων αφομοιώσιμων στοιχείων σε ξηρό βάρος του φυτού, αφού πρώτα αφαιρεθεί η ποσότητα που απαραίτητα καταναλώνεται για την αναπνοή του φυτού. Στην τελευταία έκδοση του TOMGRO, η ημερήσια συσσώρευση του ξηρού βάρους (ΔDM), υπολογίζεται από την καθαρή φωτοσύνθεση (P_g), την ποσότητα που καταναλώνει η αναπνοή διατήρησης (R_m), καθώς και την πιθανή συνεισφορά των αποθηκευμένων υδρογονανθράκων (Seginer *et al.* 1994).

Ο ολικός συντελεστής μετατροπής των αφομοιώσιμων στοιχείων σε ξηρό βάρος, προκύπτει από τα βάρη των μερών του φυτού (βλαστού, ρίζας, φύλλων, καρπών), προς τις συνολικές απαιτήσεις για υδρογονάνθρακες του φυτού. Ο υπολογισμός του συντελεστή μετατροπής παρουσιάζεται παρακάτω:

$$C_f = \frac{1}{ASR_l \cdot F_l + ASR_{st} \cdot F_{st} + ASR_{rt} \cdot F_{rt} + ASR_{fr} \cdot F_{fr}} \quad (3.91)$$

όπου:

F_l = λόγος των αφομοιώσιμων στοιχείων που μεταφέρονται στα φύλλα, προς το συνολικό βάρος του φυτού.

F_{st} = λόγος των αφομοιώσιμων στοιχείων που μεταφέρονται στο βλαστό, προς το συνολικό βάρος του φυτού.

F_{rt} = λόγος των αφομοιώσιμων στοιχείων που μεταφέρονται στη ρίζα, προς το συνολικό βάρος του φυτού.

F_{fr} = λόγος των αφομοιώσιμων στοιχείων που μεταφέρονται στους καρπούς, προς το συνολικό βάρος του φυτού.

ASR_l = αφομοιώσιμα στοιχεία που απαιτούνται για το σχηματισμό του φύλλου (g CH₂O g⁻¹ DM)

ASR_{st} = αφομοιώσιμα στοιχεία που απαιτούνται για το σχηματισμό του βλαστού (g CH₂O g⁻¹ DM)

ASR_r = αφομοιώσιμα στοιχεία που απαιτούνται για το σχηματισμό της ρίζας (g CH₂O g⁻¹ DM)

ASR_{fr} = αφομοιώσιμα στοιχεία που απαιτούνται για το σχηματισμό του καρπού (g CH₂O g⁻¹ DM)

Το κορυφολόγημα του κορυφαίου βλαστοφόρου οφθαλμού και η αλλαγή στην εξέλιξη του ενεργού αριθμού των οργάνων σύμφωνα με τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, διαφοροποιεί επίσης τις τιμές των λόγων των αφομοιώσιμων στοιχείων που μεταφέρονται στα διάφορα φυτικά μέρη, προς το συνολικό βάρος του φυτού. Επομένως ο συντελεστής μετατροπής (Cf), επαναπροσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τις τιμές του (Πίνακας 3.3), σύμφωνα με τους Spitters *et al.* (1989), και τις μετρημένες τιμές των λόγων των αφομοιώσιμων στοιχείων.

Πίνακας 3.3. Όνομα παραμέτρων και αριθμητικές τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό το συντελεστή μετατροπής (C_f)

Όνομα	Περιγραφή	Τιμή	Μονάδα
ASR_l	αφομοιώσιμα στοιχεία που απαιτούνται για το σχηματισμό του ξηρού βάρους των φύλλων	1.39	g CH ₂ O.g ⁻¹ DM
ASR_{st}	αφομοιώσιμα στοιχεία που απαιτούνται για το σχηματισμό του ξηρού βάρους του βλαστού	1.45	g CH ₂ O.g ⁻¹ DM
ASR_r	αφομοιώσιμα στοιχεία που απαιτούνται για το σχηματισμό του ξηρού βάρους της ρίζας	1.37	g CH ₂ O.g ⁻¹ DM
ASR_{fr}	αφομοιώσιμα στοιχεία που απαιτούνται για το σχηματισμό του ξηρού βάρους των καρπών	1.39	g CH ₂ O.g ⁻¹ DM

3.3. Ανάπτυξη βιοφυσικού προσομοιώματος (BioSiGreT)

Το βιοφυσικό προσομοίωμα αποτελεί την ολοκλήρωση του κλιματικού και φυσικού μοντέλου. Η ολοκλήρωση των δύο μοντέλων πραγματοποιήθηκε με τη δημιουργία μιας πολυνηματικής εφαρμογής (multithreaded application), η οποία υλοποιεί τα δύο μοντέλα και αναλαμβάνει τη διασύνδεση και συνεργασία μεταξύ των δύο μοντέλων. Συνεπώς, η ολοκλήρωση συνεπάγεται την παράλληλη εκτέλεση και συνεργασία των δύο μοντέλων ώστε να παραχθεί το βιοφυσικό προσομοίωμα.

Οι πολυνηματικές εφαρμογές αποτελούνται από πολλαπλά threads, τα οποία εκτελούνται σε διαμοιραζόμενο χώρο διευθύνσεων της μνήμης. Τα threads, είναι ελαφρές υπο-διαδικασίες, οι οποίες εκτελούνται μέσα στη διαδικασία. Επιπρόσθετα, διαμοιράζονται κώδικα και τμήματα δεδομένων, αλλά έχουν τους δικούς τους μετρητές προγράμματος, καταχωρητές μηχανής και στοίβα. Οι συνολικές και οι στατικές μεταβλητές, είναι κοινές για όλα τα threads και ένας κοινός μηχανισμός αποκλειστικότητας απαιτείται συχνά για να διαχειριστεί την πρόσβαση σε αυτές τις μεταβλητές, από τα πολλαπλά threads μέσα σε μια εφαρμογή. Η τεχνική του multithreading επιτρέπει σε δύο μέρη του ίδιου προγράμματος να εκτελούνται παράλληλα. Για παράδειγμα, ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου (MS Office Word), μπορεί να ελέγχει την ορθογραφία των λέξεων ενός κειμένου, ενώ ο χρήστης γράφει το κείμενο.

Η υλοποίηση του βιοφυσικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του Java run-time περιβάλλον. Στο περιβάλλον της γλώσσας προγραμματισμού Java, τα threads αντιμετωπίζονται ασύγχρονα. Αυτό σημαίνει, ότι ένα thread μπορεί να βρίσκεται σε παύση, ενώ τα υπόλοιπα threads συνεχίζουν να διεκπεραιώνονται. Ένα thread μπορεί να βρίσκεται σε μια από τις παρακάτω τέσσερις καταστάσεις:

- Running: Το thread εκτελείται.
- Suspended: Η εκτέλεση έχει διακοπεί και μπορεί να συνεχιστεί αργότερα.
- Blocked: Μια πηγή όπως είναι ένα σύνολο δεδομένων δεν μπορεί να προσπελαστεί από το thread επειδή χρησιμοποιείται από κάποιο άλλο.
- Terminated: Η εκτέλεση έχει σταματήσει, ολοκληρωθεί.

Παρ' όλα αυτά, αρκετές φορές η εκτέλεση ενός thread εξαρτάται από την εκτέλεση κάποιου άλλου. Συνεπώς, τα threads θα πρέπει να εκτελεστούν σύγχρονα και όχι ασύγχρονα. Η Java μας προσφέρει αυτή τη δυνατότητα με τον ορισμό μίας ή

περισσότερων σύγχρονων μεθόδων. Σε αυτή την περίπτωση, ένα thread διακόπτει την εκτέλεση του και περιμένει τα αποτελέσματα που παράγονται από κάποιο άλλο, ώστε να συνεχίσει την εκτέλεσή του.

Το βιοφυσικό προσομοίωμα, υλοποιήθηκε σε δύο threads. Το ένα υλοποιεί το βιολογικό προσομοίωμα, ενώ το δεύτερο υλοποιεί το φυσικό προσομοίωμα. Οι δύο υλοποιήσεις των προσομοιωμάτων απαιτούν την ανταλλαγή δεδομένων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης τους, έτσι ώστε να επιτευχθεί η ολοκλήρωσή τους και ο στόχος της δημιουργίας του βιοφυσικού προσομοιώματος. Η διασύνδεση των δύο υλοποιήσεων και η ταυτόχρονη εκτέλεση τους πραγματοποιήθηκε με την τεχνική του threading. Τα δεδομένα που ανταλλάσσονται αποτελούν ένα πολύ κρίσιμο σημείο του βιοφυσικού προσομοιώματος, καθώς η βέλτιστη εκτέλεση του ενός μοντέλου εξαρτάται από τα δεδομένα που παράγονται κατά τη διάρκεια εκτέλεσης, του άλλου προσομοιώματος. Τα δεδομένα αυτά δεν είναι κατ' ανάγκη τα τελικά παραγόμενα αποτελέσματα ενός προσομοιώματος, αλλά ενδιάμεσα αποτελέσματα τα οποία όμως είναι απαραίτητα για να συνεχίσει την εκτέλεση του το δεύτερο προσομοίωμα. Συνεπώς, στην περίπτωση που ένα μοντέλο χρειάζεται δεδομένα που παράγονται από το άλλο, σταματάει την εκτέλεση και περιμένει μέχρι τα δεδομένα να παραχθούν. Τα προσωρινά δεδομένα που παράγονται γράφονται σε κάποια αρχεία τα οποία τηρούνται προσωρινά μέχρι την ολοκλήρωση της εκτέλεσης του βιοφυσικού προσομοιώματος. Ένα προσομοίωμα το οποίο είναι σε κατάσταση αναμονής (περιμένει δεδομένα από το άλλο προσομοίωμα) προσπαθεί σε περιοδικά διαστήματα να «διαβάσει» τα προσωρινά αρχεία ώστε να λάβει τα δεδομένα. Μόλις τα δεδομένα καταχωρηθούν στα προσωρινά αρχεία το προσομοίωμα που είναι σε κατάσταση αναμονής, καταφέρνει να τα αναγνώσει επιτυχώς και να συνεχίσει την εκτέλεση του. Τα κρίσιμα δεδομένα είναι τα ακόλουθα:

- Θερμοκρασία αέρα
- Θερμοκρασία καλλιέργειας
- Θερμοκρασία καλύμματος
- Θερμοκρασία εδάφους
- Σχετική υγρασία αέρα

Το βιοφυσικό προσομοίωμα ολοκληρώνει την εκτέλεσή του με την εγγραφή των αποτελεσμάτων στα αρχεία τήρησης αποτελεσμάτων και την ταυτόχρονη εποπτική παρουσίασή τους μέσω των δυο μεθόδων που παρουσιάστηκαν στην Παράγραφο 3.1.1.1.

3.4. Περιγραφή γεννήτριας κλιματικών δεδομένων

3.4.1. Περιγραφή τρόπου λειτουργίας

Η γεννήτρια κλιματικών δεδομένων περιγράφει ποσοτικά την διακύμανση των τιμών των κλιματικών παραμέτρων (θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία αέρα, ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα αέρα). Η παραγωγή των κλιματικών δεδομένων απαιτεί τη χρησιμοποίηση πρόβλεψης τιμών των κλιματικών παραμέτρων από web-site και αναφέρεται σε κλιματικές προβλέψεις για την συγκεκριμένη περιοχή αναφοράς. Το web-site που χρησιμοποιείται κάνει πρόγνωση για τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές με χρονικό ορίζοντα ορισμένων ημερών. Άμεση συνέπεια ο χρονικός περιορισμός της πρόβλεψης της κλιματικής συμπεριφοράς στο ορισμένο διάστημα που η πρόγνωση θεωρείται ακριβής.

Η γεννήτρια κλιματικών δεδομένων μπορεί να συμβάλλει καθοριστικά κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης ενός βιοφυσικού προσομοιώματος. Η γεννήτρια δύναται να παράγει τα απαραίτητα εξωτερικά κλιματικά δεδομένα απαραίτητα για ένα βιοφυσικό προσομοίωμα για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τόσο του κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου όσο και της ανάπτυξης και παραγωγής της καλλιέργειας τομάτας.

Η παραγωγή των κλιματικών δεδομένων προϋποθέτει τη γνώση των ημερήσιων τιμών για:

- ✘ Την ελάχιστη και μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα
- ✘ Την ελάχιστη και μέγιστη τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα
- ✘ Τη μέση τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας
- ✘ Τη μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα

Για την εξαγωγή της διακύμανσης των προβλεπόμενων ωριαίων τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα καθώς και της ταχύτητας του αέρα ο χρήστης εισάγει τις προβλεπόμενες μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές σε κατάλληλο φάκελο. Η πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας στηρίζεται στις γεωγραφικές συντεταγμένες του τόπου (μήκος και πλάτος), στην ημέρα του έτους και στη ροή της ακτινοβολίας που μεταβάλλεται ωριαία και είναι ανάλογη της κλίσης του από το έδαφος αναφοράς.

3.4.2. Θερμοκρασία του αέρα

Η θερμοκρασία του αέρα στον περιβάλλον χώρο ($T_a(h)$), υπολογίζεται σε ωριαία βάση και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (Choisnel 1986):

$$T_a(h) = T_{a\min} + Kt(h) \cdot (T_{a\max} - T_{a\min}) \quad (3.92)$$

όπου:

$Kt(h)$ = ο συντελεστής υπεύθυνος για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας, μεταβάλλεται ανάλογα με την ώρα και την εποχή (K).

$T_{a\max}$ = η μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας (K).

$T_{a\min}$ = η ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας (K).

3.4.3. Σχετική υγρασία του αέρα

Η σχετική υγρασία του αέρα στον περιβάλλον χώρο ($R(h)$), υπολογίζεται σε ωριαία βάση και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$R(h) = Rh_{\min} + Kr(h) \cdot (Rh_{\max} - Rh_{\min}) \quad (3.93)$$

όπου:

$Kr(h)$ = ο συντελεστής υπεύθυνος για τον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας, μεταβάλλεται ανάλογα με την ώρα και την εποχή.

Rh_{\max} = η μέγιστη τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Rh_{\min} = η ελάχιστη τιμή της σχετικής υγρασίας του αέρα στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας.

3.4.4. Ταχύτητα αέρα

Η ταχύτητα $V(h)$ του αέρα, ανάλογα με το ωριαίο χρονικό βήμα μπορεί να υπολογιστεί με τον ίδιο τρόπο που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του αέρα:

$$V(h) = V_{\min} + Kt(h) \cdot (V_{\max} - V_{\min}) \quad (3.94)$$

όπου:

V_{\max} και V_{\min} είναι αντίστοιχα η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ταχύτητας του αέρα που υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα σύμφωνα με την εξίσωση:

$$V_{\max} = 2V_{ave} \times \left(\frac{T_{\max}}{T_{\max} + T_{\min}} \right) \quad (3.95)$$

$$V_{\min} = 2V_{ave} \times \left(\frac{T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \right) \quad (3.96)$$

όπου:

V_{ave} είναι η μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα κατά τη διάρκεια της ημέρας ($m s^{-1}$)

3.4.5. Ηλιακή ακτινοβολία

Η ολική ακτινοβολία ανάλογα με το ωριαίο χρονικό βήμα μπορεί να υπολογιστεί από τη μέγιστη τιμή της ακτινοβολίας σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$Rg(h) = Rg_{\max} \times \sin\left(\frac{h_s \pi}{D_d}\right) \quad (3.97)$$

όπου:

Rg_{\max} = η μέγιστη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας στον περιβάλλον χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας $W m^{-2}$

h_s = υπολογίζεται από την έναρξη της ημέρας.

D_d = η διάρκεια της ημέρας, δίνεται από:

$$D_d = t_c - t_l \quad (3.98)$$

όπου:

t_c και t_l είναι αντίστοιχα η ώρα ανατολής και δύσης του ηλίου

$$t_l = (w_l + \pi) \cdot \frac{86400}{2\pi} \quad (3.99)$$

$$t_c = (w_c + \pi) \cdot \frac{86400}{2\pi} \quad (3.100)$$

Οι γωνίες πρόσπτωσης της ακτινοβολίας w_l , w_c υπολογίζονται από:

$$w_l = -|ar \cos \cdot (-\tan \Phi \cdot \tan \delta)| \quad (3.101)$$

$$w_c = |ar \cos \cdot (-\tan \Phi \cdot \tan \delta)| \quad (3.102)$$

όπου:

Φ = το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής.

δ = η γωνία διακύμανσης του ήλιου, διαφοροποιείται κατά τη διάρκεια του έτους σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.06758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma \quad (3.103)$$

όπου: Γ_d είναι η γωνία της ημέρας και υπολογίζεται:

$$\Gamma_d = \frac{2\pi}{n} \cdot (d_n - 1) \quad (3.104)$$

όπου: n είναι ο αριθμός των ημερών του έτους και d_n ο αριθμός της ημέρας του έτους.

3.5. Περιγραφή μεθόδου βελτιστοποίησης

3.5.1. Εισαγωγή

Τα περισσότερα από τα προβλήματα σχεδιασμού της πραγματικότητας παρουσιάζουν μεγάλο αριθμό πιθανών λύσεων, με συνέπεια να εμφανίζεται η ανάγκη για την εύρεση της καλύτερης «διαδρομής» ή της βέλτιστης λύσης. Τα κύρια χαρακτηριστικά που συνθέτουν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι τρία: i). ένα σύνολο αγνώστων ή μεταβλητών ii). ο τύπος της συνάρτησης που χρειάζεται να βελτιστοποιηθεί και iii). οι περιορισμοί που πρέπει να πληρεί η επιστρεφόμενη λύση. Με βάση τα παραπάνω βελτιστοποίηση ορίζεται η διαδικασία εύρεσης τιμών που ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν τη συνάρτηση. Υπάρχουν διάφοροι τύποι προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι μεταβλητές μπορούν να λαμβάνουν συνεχείς ή διακριτές τιμές. Η συνάρτηση βελτιστοποίησης μπορεί να είναι συνεχής ή διακριτή. Οι περιορισμοί στα διάφορα προβλήματα έχουν διαφορετική μορφή (γραμμική ή μη) ή ακόμη μπορούν να απουσιάζουν. Όλες αυτές οι παράμετροι συνθέτουν μια ποικιλία στα προβλήματα βελτιστοποίησης, γεγονός που καθιστά το πεδίο μελέτης τους ευρύ. Η χρήση ενός εργαλείου ικανού να ανταποκριθεί στην ανάγκη επίλυσης τέτοιων προβλημάτων μπορεί να καλυφθεί με τη μέθοδο διακλάδωσης και φραγμού (*branch & bound*).

3.5.2. Γενική περιγραφή της μεθόδου διακλάδωσης και φραγμού (*Branch & Bound*)

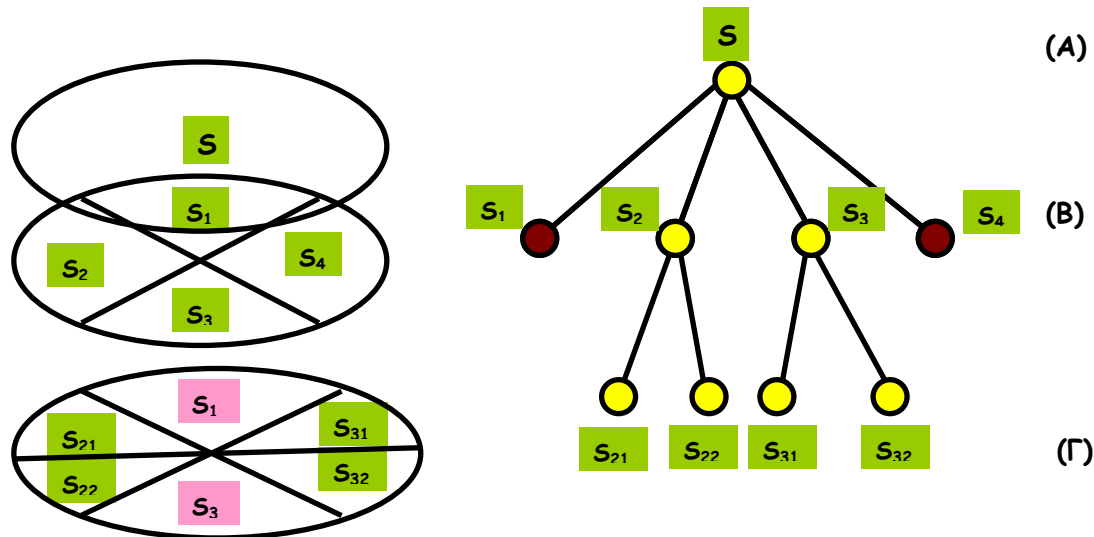
Η μέθοδος διακλάδωσης και φραγμού (*Branch & Bound*) έχει βρεί εφαρμογή στην επίλυση ποικίλων και σημαντικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως π.χ., στον ακέραιο προγραμματισμό (Balas 1966, Dakin 1965, Driebeek 1966, Geofrion 1967, Land και Doig 1960, Rado 1963), σε μη γραμμικά προβλήματα (Favett και Plyter 1966, Gilmore 1962, Lawler 1963), προβλήματα προγραμματισμού (Brooks και White 1965, Ignall και Scharge 1965, Lomnicki 1965), προβλήματα δικτύων (Price 1967), το πρόβλημα knapsack (Kolesar 1967), το πρόβλημα της διαδρομής του

πωλητή (Little *et al.* 1963), τα προβλήματα χωροθέτησης των φυτών (Efroymson και Ray 1966), κ.λ.π. Πολλές βιβλιογραφικές αναφορές (Agin 1966, Bertier και Roy 1964) έχουν αφιερωθεί στην εξερεύνηση μερικών από των βασικών χαρακτηριστικών της μεθόδου διακλάδωσης και φραγμού (Branch & Bound).

Η μέθοδος διακλάδωσης και φραγμού, όπως και στο δυναμικό προγραμματισμό πραγματοποιεί μια έξυπνη έρευνα όλων των πιθανών λύσεων. Κύρια πρακτική της μεθόδου, ο διαχωρισμός του χώρου των πιθανών λύσεων σε όλο και μικρότερα υπο-σύνολα, ενώ ταυτόχρονα το κατώτερο όριο (στην περίπτωση της ελαχιστοποίησης) υπολογίζει το κόστος των πιθανών λύσεων στο εσωτερικό του κάθε υπο-συνόλου. Μετά τον επιμέρους διαχωρισμό τα υπο-σύνολα που το προκαθορισμένο όριο τους υπερβαίνει το κόστος της γνωστής πιθανής λύσης αποκλείονται από περαιτέρω διαχωρισμό. Ο διαχωρισμός συνεχίζεται μέχρι να βρεθεί μια πιθανή λύση, όπου το κόστος της δεν είναι μεγαλύτερο από το κάθε υπο-σύνολο.

Όπως φανερώνει και το όνομά της, η μέθοδος διακλάδωσης και φραγμού (Branch & Bound) αποτελείται από δύο θεμελιώδεις διαδικασίες, τη διακλάδωση (branching) και την οριοθέτηση (bounding). Η διακλάδωση είναι η διαδικασία με την οποία χωρίζονται μεγάλα προβλήματα σε δύο ή περισσότερα υπό-προβλήματα τα οποία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα κάτω και ένα άνω όριο, κατά τη διαδικασία αποκλεισμού (elimination procedure). Το κάτω όριο ενός δοσμένου κόμβου, είναι μία εκτίμηση της ποιότητας της καλύτερης τελικής λύσης, που μπορεί να κατασκευαστεί από αυτή τη μερική λύση (δηλαδή τη λύση μέχρι αυτόν τον κόμβο). Το άνω όριο είναι η ποιότητα της καλύτερης λύσης, που έχει βρεθεί μέχρι τώρα. Όταν το κάτω όριο του δεδομένου κόμβου δεν είναι μικρότερο από το τρέχον άνω όριο, τότε ο κόμβος δε χρειάζεται να αναπτυχθεί περαιτέρω και μπορεί να «κοπεί».

Τα υπο-προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με ανάλογο τρόπο. Η οριοθέτηση υπολογίζει ένα κάτω όριο της βέλτιστης λύσης για κάθε υπο-πρόβλημα που παράγεται από τη διαδικασία της διακλάδωσης (branching). Ας σημειωθεί ότι η διαδικασία διακλάδωσης μπορεί να αντιπροσωπευθεί ως δένδρο αναζήτησης. Στο επίπεδο μηδέν, αυτό το δένδρο αποτελείται από ένα μοναδικό κόμβο που αντιπροσωπεύει το αρχικό πρόβλημα και στα επόμενα επίπεδα αποτελείται από κόμβους που αντιπροσωπεύουν τα υπο-προβλήματα του προβλήματος του προηγούμενου επιπέδου. Το επόμενο διάγραμμα δείχνει ένα τέτοιο δένδρο.



Σχήμα 3.1. Απεικόνιση με τη μορφή δένδρου της μεθόδου διακλάδωσης και φραγμού (Branch & Bound)

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επίλυσης, η κατάσταση της λύσης σύμφωνα πάντα με την έρευνα που πραγματοποιείται στην περιοχή των πιθανών λύσεων, περιγράφεται με μια «πισίνα» από ανεξερεύνητα υποσύνολα, τα οποία συμβολίζονται με τη μορφή κόμβων σε ένα δυναμικό δένδρο. Η σειρά επιλογής της διακλάδωσης και συνεπώς του επόμενου υποσυνόλου πιθανών λύσεων επιλέγεται με βάση τη στρατηγική που έχει αρχικά οριστεί.

Υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί αλγόριθμοι branch and bound. Διαφέρουν ως προς το σχήμα απαρίθμησης (*enumeration schema*), τους κανόνες αποβολής (*elimination rules*) και τη στρατηγική διακλάδωσης (*branching strategy*). Η αποτελεσματικότητα αυτών των αλγορίθμων εξαρτάται έντονα από τις μεθόδους καθορισμού του άνω και κάτω ορίου.

Η αναζήτηση για καλύτερα όρια δεν έχει οδηγήσει σε ένα όριο με το οποίο να γίνεται εφικτή η αποκοπή ικανοποιητικά μεγάλων κομματιών από το δένδρο διακλάδωσης. Επομένως, οι αλγόριθμοι branch and bound εφαρμόζονται επιτυχώς σε σχετικά μικρά προβλήματα και όχι σε συνδυαστικά πολύπλοκα προβλήματα.

3.5.2.1. Περιορισμοί χρήσης της μεθόδου διακλάδωσης και φραγμού (*Branch & Bound*)

Παρακάτω παρατείνεται ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης, ενώ αντίστοιχα επιλύονται οι περιπτώσεις μεγιστοποίησης. Το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί είναι να ελαχιστοποιηθεί μια συνάρτηση $f(x)$ μεταβλητών (x_1, \dots, x_n) σε μια περιοχή πιθανών λύσεων, S :

$$\min_{x \in S} f(x)$$

Η συνάρτηση $f(x)$ καλείται ως αντικειμενική συνάρτηση και μπορεί να είναι οποιουδήποτε τύπου. Η ομάδα πιθανών λύσεων συνήθως καθορίζεται από γενικές συνθήκες των μεταβλητών π.χ. ότι αυτές πρέπει να είναι θετικοί ακέραιοι αριθμοί ή δυαδικοί καθώς και επιπρόσθετα εμπόδια όπως ο καθορισμός της δομής της ομάδας. Σε πολλές περιπτώσεις η ομάδα των πιθανών λύσεων P , περιέχεται στο σύνολο S , για το οποίο είναι ορισμένη η συνάρτηση f , ενώ συχνά ορίζεται και η συνάρτηση $g(x)$ που ανήκει στο σύνολο S (ή στο P), με την αναγκαία συνθήκη: $g(x) \leq f(x)$ για κάθε x στο σύνολο S .

Ο αλγόριθμος διακλάδωσης και φραγμού (Branch & Bound), που εφαρμόζεται στα προβλήματα ελαχιστοποίησης πρέπει να περιέχει τρία κύρια χαρακτηριστικά:

- ✘ Τη *συνάρτηση περιορισμού* η οποία ορίζει, για ένα συγκεκριμένο υπο-σύνολο από το συνολικό χώρο πιθανών λύσεων, το κατώτερο όριο, για την βέλτιστη λύση που επιτυγχάνεται στο συγκεκριμένο υπο-σύνολο.
- ✘ Τη *στρατηγική επιλογής* του χώρου που πρόκειται να παραμείνει για να ερευνηθεί η πιθανή βέλτιστη λύση
- ✘ Τον κανόνα *διακλάδωσης* που θα χρησιμοποιηθεί εάν ένα υπο-σύνολο μετά την έρευνα δεν μπορεί να απαλειφθεί.

3.5.2.2. Συνάρτηση περιορισμού

Η *συνάρτηση περιορισμού* αποτελεί το κλειδί για κάθε αλγόριθμο διακλάδωσης και φραγμού (Branch & Bound) καθώς είναι γνωστό ότι μια χαμηλής ποιότητας *συνάρτηση περιορισμού* δεν μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις καλύτερες επιλογές που πρέπει να πραγματοποιηθούν για την επιλογή τόσο της διακλάδωσης όσο και της στρατηγικής που πρέπει να ακολουθηθεί. Σε ιδανικές συνθήκες η τιμή της *συνάρτησης περιορισμού* για κάποιο δεδομένο υπο-πρόβλημα θα πρέπει να ισούτε με την τιμή της βέλτιστης λύσης του προβλήματος, αλλά επειδή κάτι τέτοιο πολλές

φορές δεν είναι εφικτό, στόχο αποτελεί το να πλησιαστεί η βέλτιστη λύση με την λιγότερη προσπάθεια (υπολογιστική ισχύ). Η *συνάρτηση περιορισμού* καλείται ισχυρή όταν γενικά δίνει τιμές κοντά στη βέλτιστη λύση για τη *συνάρτηση περιορισμού*, ενώ καλείται αδύνατη όταν οι τιμές απομακρύνονται αρκετά από τη βέλτιστη λύση. Συχνά στα προβλήματα βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούν *συνάρτηση περιορισμού*, πραγματοποιείται ανταλλαγή μεταξύ της ποιότητας και του χρόνου: Όσο περισσότερος χρόνος καταναλώνεται στον υπολογισμό του περιορισμού τόσο καλύτερη είναι η τιμή του περιορισμού. Συνήθως θεωρείται προνόμιο το να χρησιμοποιείται μια ισχυρή *συνάρτηση περιορισμού*, η οποία ταυτόχρονα διατηρεί το δένδρο σχηματισμού νέων κόμβων όσο το δυνατόν πιο περιορισμένο.

3.5.2.3. Στρατηγική επιλογής του επόμενου προβλήματος

Η στρατηγική επιλογής του επόμενου υπαρκτού υπο-προβλήματος που πρόκειται να διερευνηθεί συνήθως αποτελεί ανταλλαγή στην αναγκαία συνθήκη του να κρατηθεί ο αριθμός των κόμβων που θα εξερευνηθούν στο δένδρο χαμηλός και να μπορεί η υπολογιστική ισχύς – μνήμη του υπολογιστή να ανταποκριθεί στις ανάγκες της έρευνας.

3.5.2.4. Κανόνες δημιουργίας δενδρικών διακλαδώσεων

Όλοι οι κανόνες δημιουργίας δενδρικών διακλαδώσεων στη μέθοδο διακλάδωσης και φραγμού (Branch & Bound) χαρακτηρίζονται από το διαχωρισμό του χώρου (συνόλου) των πιθανών λύσεων, σύμφωνα με τις συνθήκες περιορισμού και με τα πρόσθετα εμπόδια. Στις περιπτώσεις που ο χώρος των πιθανών λύσεων χωρίζεται σε δύο μέρη τότε η διακλάδωση που χρησιμοποιείται ονομάζεται *διχοτομική*, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις *πολυτομική*.

3.5.3. Βελτιστοποίηση Βιο-φυσικού Προσομοιώματος

Η βελτιστοποίηση του βιο-φυσικού προσομοιώματος με τη χρήση της μεθόδου διακλάδωσης και φραγμού (Branch & Bound) χρησιμοποιεί ως στρατηγική επιλογής του χώρου και πρόκειται να διερευνηθεί σύμφωνα με τους σιγμοειδής αλγορίθμους

(3.105), (3.106) που ακολουθούν. Ο αλγόριθμος (3.105), είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό του αερισμού (ελεγκτή του συστήματος) στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

$$V_h = 0.1 \cdot \left(1 + \left(\frac{RH - pRT}{(Abs \cdot (RH - pRT)) + 0.5}\right)\right) + \frac{1}{e^{\left(\frac{pb_1 - T_i}{pc_1}\right)}} \quad (3.105)$$

Όπου pb_1 , pc_1 , pRT , οι τιμές των μεταβλητών που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν για να προκύψει η βέλτιστη λύση. Ταυτόχρονα ο αλγόριθμος (3.105), χρησιμοποιεί το βιοφυσικό προσομοίωμα και πιο συγκεκριμένα τα παραγόμενα αποτελέσματα για τη σχετική υγρασία (RH) και για τη θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (T_i), κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Ο αλγόριθμος (3.106), που ακολουθεί είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό της λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης (ελεγκτή του συστήματος) στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

$$V_t = 0.1 \cdot \left(1 + \left(\frac{RH - pRT}{(Abs \cdot (RH - pRT)) + 0.5}\right)\right) + \frac{1}{e^{\left(\frac{pb_2 - DT_i}{pc_2}\right)}} \quad (3.106)$$

Όπου pb_2 , pc_2 , pRT , οι τιμές των μεταβλητών που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν για να προκύψει η βέλτιστη λύση. Ταυτόχρονα ο αλγόριθμος (3.106), χρησιμοποιεί το βιοφυσικό προσομοίωμα και πιο συγκεκριμένα τα παραγόμενα αποτελέσματα για τη σχετική υγρασία (RH) και για τη διαφορά θερμοκρασίας του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με αυτό στον περιβάλλοντα χώρο (DT_i), κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί είναι να ελαχιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση J σε μια περιοχή πιθανών λύσεων, S :

$$\min J = \sum (Fcon) - \sum (D.W.F) \quad (3.107)$$

Όπου $\sum (Fcon)$ είναι το σύνολο της ενέργειας που αποδίδει το σύστημα θέρμανσης στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, ενώ αντίστοιχα $\sum (D.W.F)$ το παραγόμενο ξηρό βάρος των ώριμων καρπών.

Η συνάρτηση περιορισμού που χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση του βιοφυσικού προσομοιώματος με τη χρήση της μεθόδου διακλάδωσης και φραγμού (Branch & Bound) παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\min J(one) > \max J(other) \quad (3.108)$$

Η συνάρτηση (3.108) απορίπτει κάποιο υποσύνολο πιθανών λύσεων από την περαιτέρω διερεύνηση στο εσωτερικό του, για την εύρεση της πιθανής λύσης όταν ισχύει η παραπάνω συνθήκη, δηλαδή η βέλτιστη ελάχιστη λύση που προσφέρει το συγκεκριμένο υποσύνολο είναι μεγαλύτερη από τη μεγαλύτερη τιμή ενός άλλου υποσυνόλου.

Κεφάλαιο 4°. Υλικά & μέθοδοι

4. Υλικά και μέθοδοι

4.1. Υλικά και μέθοδοι ερωτηματολογίων

4.1.1. Σχεδιασμός του ερωτηματολογίου

Σύμφωνα με τους στόχους της έρευνας, συντάχθηκε ερωτηματολόγιο με μια σειρά ερωτήσεων, έτσι ώστε οι απαντήσεις των παραγωγών να δώσουν τις απαιτούμενες πληροφορίες για τη διαμόρφωση των κριτηρίων. Οι ερωτήσεις τοποθετήθηκαν σε μια λογική σειρά ώστε να διατηρούν όσο το δυνατόν, το ενδιαφέρον των παραγωγών κατά τη διάρκεια της συνέντευξης και η δομή του ερωτηματολογίου να επιτρέπει την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Το ερωτηματολόγιο που σχεδιάστηκε για τους στόχους της έρευνας, περιελάμβανε τις παρακάτω θεματικές ενότητες:

1. Στοιχεία του φορέα της εκμετάλλευσης
2. Κατασκευαστικά στοιχεία των θερμοκηπιακών μονάδων
3. Εξοπλισμός των θερμοκηπίων
4. Συστήματα ελέγχου του κλίματος
5. Είδη καυσίμων και κατανάλωση κατά τη χειμερινή περίοδο
6. Πρακτική των παραγωγών για τον έλεγχο του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπίων
7. Καλλιεργητικές πρακτικές κατά την παραγωγική διαδικασία
8. Ακαθάριστη πρόσοδος των παραγωγών
9. Μέθοδοι φυτοπροστασίας και οικονομικές συνέπειες από τη μη ορθή εφαρμογή κατά την καλλιεργητική περίοδο

Ο σχεδιασμός των ερωτηματολογίων έγινε με στόχευση τη διατήρηση του ενδιαφέροντος των παραγωγών μέχρι το τέλος της συνέντευξης, την ύπαρξη αλληλουχίας στη σειρά των ερωτήσεων, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην χρονική διάρκεια που απαιτείται για να την συμπλήρωση του και στην μη ύπαρξη δυσνόητων εννοιών.

4.1.2. Η εκλογή και ο καθορισμός του δείγματος

Στόχος ήταν το δείγμα των παραγωγών να είναι αντιπροσωπευτικό, ώστε να είναι δυνατή η γενίκευση των αποτελεσμάτων σε εθνικό επίπεδο. Προϋπόθεση για την εξασφάλιση αντιπροσωπευτικού δείγματος είναι ως γνωστόν, η απλή τυχαία δειγματοληψία ή κάποια από τις παραλλαγές της (συστηματική δειγματοληψία, δειγματοληψία κατά στρώματα κτλ.), ενώ προϋπόθεση για την εφαρμογή τυχαίας δειγματοληψίας είναι η ύπαρξη πλαισίου δειγματοληψίας. Δυστυχώς για τον πληθυσμό των παραγωγών που εστιάζεται το ενδιαφέρον της έρευνας δεν υπήρχε πλαίσιο δειγματοληψίας, δεν υπήρχε δηλαδή, αριθμημένος κατάλογος του πληθυσμού (με τις απαραίτητες πληροφορίες –διεύθυνση / τηλέφωνο– για τον εντοπισμό των ατόμων), ώστε να καταστεί δυνατή η κλήρωση των μονάδων του δείγματος.

Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε στρωματοποιημένη δειγματοληψία, με την επιλογή των μελών του δείγματος να μην εμπερικλείει το στοιχείο του «τυχαίου», καθώς έγινε με βάση ορισμένα κριτήρια που τέθηκαν αρχικά καθώς θεωρήθηκαν απαραίτητα για την έρευνα.



Σχήμα 4.1. Περιοχές δειγματοληψίας

Η εκλογή του δείγματος εφαρμόζοντας στρωματοποιημένη δειγματοληψία, έγινε με αρχικό κριτήριο τις περιοχές που εδρεύουν σε μεγαλύτερο ποσοστό οι θερμοκηπιακές μονάδες. Επιλέχθηκαν παραγωγοί με καλλιέργεια τομάτας από περιοχές της Μακεδονίας, Θεσσαλίας, Αττικής, Πελοποννήσου και Κρήτης. Οι περιοχές που επιλέχθηκαν για την πραγματοποίηση των συνεντεύξεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1. Βασικό κριτήριο στην επιλογή αποτέλεσε και η φήμη των θερμοκηπιακών μονάδων στην αγορά, καθώς σκοπός της έρευνας ήταν η επίσκεψη σε μονάδες εξοπλισμένες πέραν των ελάχιστων κριτηρίων. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιούνταν συλλογή πληροφοριών τόσο από τους Γεωπόνους υπαλλήλους των Διευθύνσεων Αγροτικής Αναπτυξης όσο και από Γεωπόνους ελεύθερους επαγγελματίες της εκάστοτε περιοχής και στη συνέχεια γίνονταν η επίσκεψη.

Το πλήθος του δείγματος θεωρείται αντιπροσωπευτικό για τις 5 περιοχές της χώρας, καθώς επιλέχθηκαν 40 παραγωγοί με συνολικά καλλιεργούμενη έκταση τομάτας τα 380 περίπου στρεμμάτων. Το σύνολο των κηπευτικών καλλιεργειών σε μονάδες, υπό κάλυψη ανέρχεται στα 20000 περίπου στρέμματα και η επιλογή των παραγωγών πραγματοποιήθηκε με βάση το ποσοστό συμμετοχής της κάθε περιοχής, στο σύνολο της χώρας.

4.1.3. Συλλογή των πληροφοριών

Η συλλογή των πληροφοριών έγινε μέσω συνέντευξης των παραγωγών ή μέσω τηλεφωνικής επικοινωνίας, στις περιπτώσεις δυσκολίας πρόσβασης στην έδρα της εκμετάλλευσης. Η διάρκεια της συνέντευξης είχε άμεση σχέση με την απασχόληση του παραγωγού την περίοδο που πραγματοποιήθηκε η επίσκεψη και κυμάνθηκε από 60 έως 90 λεπτά της ώρας. Η δυνατότητα για λεπτομερή καταγραφή του συνόλου των ερωτήσεων δεν κατέστη εφικτή. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη καθημερινής καταγραφής από τους παραγωγούς των δράσεων που σχετίζονται με τον έλεγχο του κλίματος και τις καλλιεργητικές πρακτικές που ακολουθούνται κατά τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου.

Στις απαντήσεις των παραγωγών εξασφαλίστηκε εμπιστευτικότητα, καθώς οι περισσότεροι παρουσίασαν τα πλήρη στοιχεία της εκμετάλλευσής τους, αλλά διαφοροποιήθηκαν στο ενδεχόμενο μιας πιθανής παρουσίας των προσωπικών τους δεδομένων σε τοπικό επίπεδο. Τέλος συμφωνήθηκε η δημοσιοποίηση των

αποτελεσμάτων έπειτα από την επεξεργασία και τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων καθώς κρίθηκε από τους παραγωγούς ότι θα αποτελούσε μια ενδιαφέρουσα αναφορά στα προβλήματα και στις προοπτικές των θερμοκηπιακών κηπευτικών καλλιεργειών.

4.1.4. Ανάλυση των δεδομένων

Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα EXCEL®. Έγινε διαχωρισμός των δεδομένων ανά θεματική ενότητα και ανά γεωγραφική περιοχή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο με μορφή ραβδο-γραφημάτων και με τρισδιάστατες πίτες. Η στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων έγινε με τη χρήση του προγράμματος SPSS® 12.0. Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν με τη μέθοδο ανάλυσης παραλλακτικότητας (One Way ANOVA). Σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων όρων των μεταχειρίσεων καθορίστηκαν με το κριτήριο της ελάχιστης σημαντικής διαφοράς (LSD) σε επίπεδο σημαντικότητας $p < 0,05$.

4.2. Πειραματικός εξοπλισμός

4.2.1. Το θερμοκήπιο

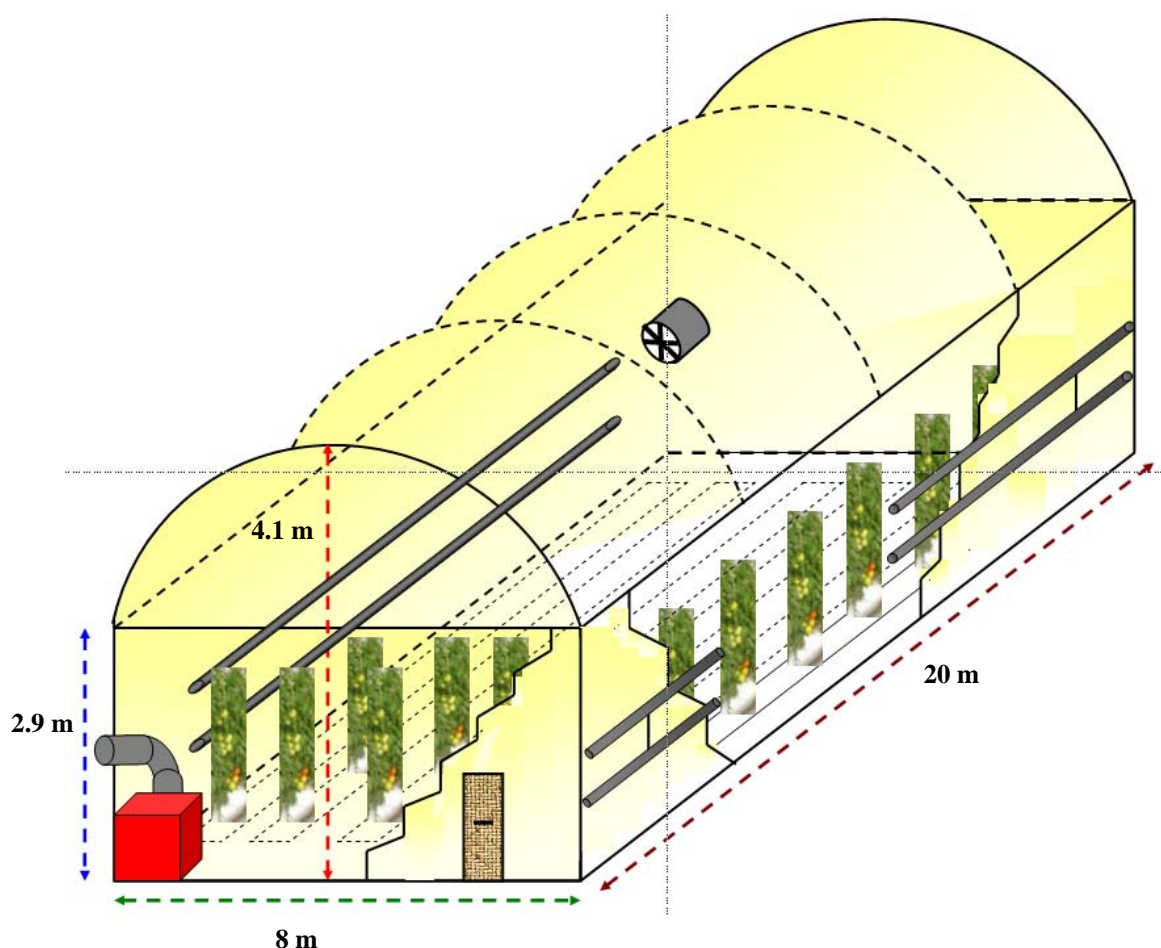
Τα πειράματα έγιναν στο αγρόκτημα του Βελεστίνου στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το αγρόκτημα βρίσκεται σε γεωγραφικό πλάτος $39^{\circ} 44'$ και γεωγραφικό μήκος $22^{\circ} 79'$, το υψόμετρο της περιοχής είναι 85 m, και απέχει 17 km από τον Βόλο. Η περιοχή χαρακτηρίζεται από ζεστά και ξηρά καλοκαίρια, με μέση μέγιστη θερμοκρασία κατά το θερμότερο μήνα περίπου 37°C και από ήπιους χειμώνες με μέση ελάχιστη θερμοκρασία κατά τον ψυχρότερο μήνα 4°C . Οι επικρατούντες άνεμοι της περιοχής έχουν κατεύθυνση είτε από Νοτιοανατολικά προς Βορειοδυτικά (συνήθως τις πρωινές ώρες), είτε από Βορειοδυτικά προς Νοτιοανατολικά (συνήθως τις απογευματινές ώρες).

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε θερμοκήπιο, τροποποιημένο τοξωτό, επιφανείας 160 m^2 (20 μέτρα μήκος και 8 μέτρα πλάτος) και μέγιστου ύψους 4.1 m στον κορφιά, ενώ το ύψος του ορθοστάτη έφτανε τα 2.9 m. Ταυτόχρονα χρησιμοποιήθηκε και δεύτερο θερμοκήπιο ίδιου τύπου για το μέγιστο φυτό που χρησιμοποιήθηκαν για τη συμπλήρωση των κενών που δημιουργήθηκαν κατά τις καταστροφικές μετρήσεις προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η πυκνότητα στο εσωτερικό του πειραματικού θερμοκηπίου. Το έδαφος των θερμοκηπίων ήταν πλήρως καλυμμένο με αδιαφανές, διπλής όψεως ασπρόμαυρο πλαστικό.

4.2.2. Αερισμός

Στο θερμοκήπιο (Σχήμα 4.2) υπήρχαν ανοίγματα πλαϊνά, κατά μήκος των δύο μεγάλων πλευρών, διαστάσεων $0.9\text{m} \times 15\text{m}$ έκαστο. Το πειραματικό θερμοκήπιο είχε πλάτος 8 μέτρα, όπως προαναφέρθηκε. Ο αερισμός ελέγχονταν με μικροελεγκτή του συστήματος ελέγχου του μικροκλίματος του θερμοκηπίου. Η ενεργοποίηση των ανοιγμάτων αερισμού γίνονταν με βάση τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Δίνονταν στο μικροελεγκτή τα αποδεκτά όρια (23°C - 30°C) και εκείνος ρύθμιζε το άνοιγμα προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες. 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, σε περίπτωση που η ταχύτητα του αέρα στο περιβάλλοντα χώρο του θερμοκηπίου δεν ήταν μεγαλύτερη των 4 m sec^{-1} .



Σχήμα 4.2. Απεικόνιση πειραματικού θερμοκηπίου

Πέρα από τη λειτουργία των ανοιγμάτων αερισμού και με βάση την επιθυμητή θερμοκρασία, τα παράθυρα άνοιγαν, ανεξάρτητα από την εσωτερική θερμοκρασία του αέρα, για λόγους αφύγρανσης του θερμοκηπίου. Αυτό μπορούσε να γίνει είτε δίνοντας στον ελεγκτή υπεύθυνο για το ποσοστό ανοίγματος των παραθύρων τη δυνατότητα να εξετάζει και τις τιμές άλλων παραμέτρων (π.χ σχετική υγρασία, έλλειμμα κορεσμού του αέρα κ.λ.π) για να ενεργοποιήσει τα ανοίγματα αερισμού, είτε σε καθορισμένες ώρες ανεξαρτήτως κλιματικών συνθηκών. Στην περίπτωση αυτή θα έπρεπε να οριστεί όχι μόνο το χρονικό διάστημα ανοίγματος των παραθύρων αλλά και το ποσοστό του ανοίγματος. Καθ'όλη τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου από τις 9:00 π.μ. έως τις 10:00 π.μ. το άνοιγμα των παραθύρων του

θερμοκηπίου ορίστηκε στο 40%, ενώ κατά τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου, τα παράθυρα άνοιγαν μόνο με βάση τη θερμοκρασία.

4.2.3. Θέρμανση

Η θέρμανση του θερμοκηπίου γινόταν από ένα δίκτυο σωληνώσεων ζεστού νερού ενώ συμπληρωματικά υπήρχε και αξονικό αερόθερμο, τοποθετημένο σε απόσταση 2.5m από το έδαφος του θερμοκηπίου. Το δίκτυο των σωληνώσεων ήταν τοποθετημένο σε απόσταση 10cm από την επιφάνεια του εδάφους και αποτελούνταν από μια γραμμή προσαγωγής ζεστού νερού και μια γραμμή επιστροφής για κάθε σειρά της καλλιέργειας. Τόσο το αερόθερμο όσο και το σύστημα των επιδαπέδιων σωληνώσεων τροφοδοτούνταν με ζεστό νερό από τον ίδιο λεβητοκαυστήρα που ήταν τοποθετημένος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Ο λεβητοκαυστήρας, παραγωγής ζεστού νερού ήταν ισχύος 175W και χρησιμοποιούσε ως καύσιμο το πετρέλαιο.

Στο εσωτερικό του καυστήρα υπήρχε κυκλοφορητής που έλεγχε τη ροή του ζεστού νερού στο σύστημα θέρμανσης. Στην αρχή του συστήματος των επιδαπέδιων σωληνώσεων υπήρχε και δεύτερος κυκλοφορητής ο οποίος επιτάχυνε τη ροή του ζεστού νερού στις επιδαπέδιες σωληνώσεις, έτσι ώστε από το σύστημα μέσω της αύξησης της παροχής να αυξηθεί η αποδιδόμενη ενέργεια στο περιβάλλον του θερμοκηπίου. Οι δύο κυκλοφορητές ήταν συνδεδεμένοι σε σειρά, ενώ υπήρχε και η δυνατότητα απενεργοποίησης του δεύτερου κυκλοφορητή μέσω του διακόπτη που παρεμβάλλονταν ανάμεσά τους. Τόσο η λειτουργία των δύο κυκλοφορητών όσο και το αερόθερμο ελέγχονταν μέσω του κεντρικού ελεγκτή κλίματος με βάση ένα αισθητήριο θερμοκρασίας-υγρασίας το οποίο ήταν τοποθετημένο στο μέσο του θερμοκηπίου και σε απόσταση 1.5m από την επιφάνεια του εδάφους. Η επιθυμητή θερμοκρασία του αέρα ήταν 20°C κατά τη διάρκεια της ημέρας και 15°C κατά τη διάρκεια της νύχτας.

4.2.4. Καλλιέργεια

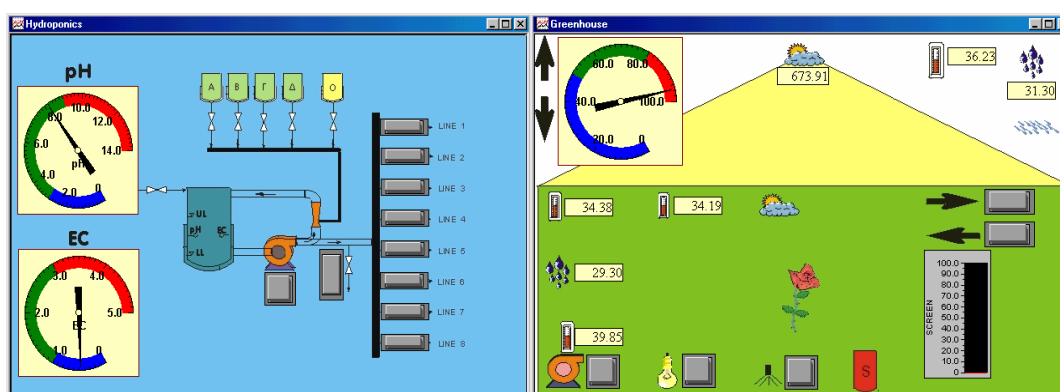
4.2.4.1. Υπόστρωμα

Για τη θρέψη των φυτών χρησιμοποιήθηκε ανοιχτό υδροπονικό σύστημα έτσι ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος μόλυνσεων από ασθένειες του εδάφους και να

διασφαλιστεί η βέλτιστη θρέψη των φυτών. Το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν Περλίτης και Πετροβάμβακας κατά την 1^η και 2^η πειραματική περίοδο αντίστοιχα, σε σάκους μήκους 1 μέτρου. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 136 σάκοι σε κάθε θερμοκήπιο και τοποθετήθηκαν σε πάγκους, σε ύψος 0,5m πάνω από το έδαφος. Οι πάγκοι είχαν κλίση 1-2% για την υποβοήθηση της στράγγισης.

4.2.4.2. Άρδευση - Λίπανση

Η δόση άρδευσης, ο χρόνος και η ποιότητα του θρεπτικού διαλύματος, ελέγχονταν αυτόματα με το πρόγραμμα MACQU (Management and Control for Quality in Greenhouse), (Εικόνα 4.1.). Από την υδροπονική κεφαλή ξεκινούν οι κύριες γραμμές του συστήματος άρδευσης-λίπανσης, διαμέτρου 32 mm, οι οποίες στη συνέχεια διακλαδίζονται στα θερμοκήπια, αποτελώντας τις δευτερεύουσες γραμμές του συστήματος, διαμέτρου 16 mm. Οι δευτερεύουσες γραμμές βρίσκονταν κατά μήκος των φυτών και έφεραν τους σταλλάκτες. Το υλικό των σωληνώσεων ήταν PVC. Για τις απαραίτητες διακλαδώσεις και συνδέσεις, υπήρχαν ειδικά εξαρτήματα κατασκευασμένα από το ίδιο υλικό.



Εικόνα 4.1. Γραφική απεικόνιση του προγράμματος ελέγχου κλίματος και άρδευσης του πειραματικού θερμοκηπίου

Οι σταλλάκτες ήταν τύπου στενής οπής και είχαν παροχή 1lt/h. Στην κεντρική εγκατάσταση άρδευσης, στην αρχή κάθε κύριας γραμμής υπήρχε ηλεκτροβάννα, η οποία τροφοδοτούνταν με τάση 24 V, εφοδιασμένη με ηθμό για τη συγκράτηση των ανεπιθύμητων υλικών και προστασία του συστήματος από αποφράξεις των σωληνώσεων. Η ηλεκτροβάννα ενεργοποιούνταν αυτόματα από το MACQU.

Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του θρεπτικού διαλύματος για τη συγκεκριμένη καλλιέργεια, 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. Η τροφοδοσία νερού και λιπασμάτων πραγματοποιούνταν μέσω συστήματος στάγδην άρδευσης, το οποίο ελέγχονταν αυτόματα μέσω Η/Υ. Η άρδευση βασιζόταν στην ηλιακή ακτινοβολία και εκτελούνταν όταν το άθροισμα της εξωτερικής ηλιακής ακτινοβολίας (Rg_{Ext}) έφθανε τα 1.94 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:

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

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

$$Q_{Tr} = \frac{Kc \cdot \tau \cdot \alpha_e}{\lambda_l} \cdot Rg_{Ext} \quad (4.2)$$

όπου Kc είναι ο καλλιεργητικός συντελεστής, τ είναι η διαπερατότητα του θερμοκηπίου στην εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία, α_e είναι ο συντελεστής εξάτμισης και λ_l είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού (kJ kg^{-1}).

4.2.4.3. Εγκατάσταση της καλλιέργειας και καλλιεργητικές επεμβάσεις

Χρησιμοποιήθηκαν φυτά τομάτας (*cv. Belladonna, Lycopersicon esculentum Mill.*, η οποία είναι ποικιλία αυτογονιμοποιούμενη, με χαρακτηριστικό τη μεγάλη διάρκεια ζωής στον καρπό. Η μεταφύτευση των φυτών για την 1^η πειραματική περίοδο, πραγματοποιήθηκε στις 30 Σεπτεμβρίου 2005, στο στάδιο των έξι πραγματικών φύλλων (μόλις που διακρίνονταν η 1^η ταξιανθία). Η διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου ήταν 180 ημέρες από τη μεταφύτευση μέχρι 1^η Απριλίου 2006. Αντίστοιχα η μεταφύτευση των φυτών για την 2^η πειραματική περίοδο, 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.

Η καλλιέργεια ήταν εγκαταστημένη σε τέσσερις διπλές σειρές (Εικόνα 4.2.), με αποστάσεις φύτευσης επί της γραμμής 0.37m, ενώ η απόσταση μεταξύ των γραμμών της διπλής σειράς ήταν 0.75m. Ανάμεσα στις διπλές γραμμές υπήρχε διάδρομος πλάτους 1m. Η πυκνότητα φύτευσης ήταν ίση με 2.4 φυτά/m² για την 1^η πειραματική περίοδο και 2.3 φυτά/m² για την 2^η πειραματική περίοδο.



Εικόνα 4.2. Καλλιέργεια στο εσωτερικό του θερμοκηπίου

Η ανάπτυξη της καλλιέργειας έγινε με τις συνηθισμένες καλλιεργητικές πρακτικές που εφαρμόζουν οι παραγωγοί στα εμπορικά θερμοκήπια, δηλαδή την ανάπτυξη ενός κύριου βλαστού και τη διατήρηση 5 καρπών σε κάθε ταξικαρπία (Εικόνα 4.3). Τα φυτά υποστηρίχθηκαν με πλαστικό σπάγκο, ο οποίος ήταν δεμένος στα οριζόντια σύρματα του θερμοκηπίου με ειδικό εξάρτημα. Οι πλάγιοι βλαστοί αφαιρούνταν χειρωνακτικά σε τακτά χρονικά διαστήματα (μία φορά την εβδομάδα). Μετά τη συγκομιδή των καρπών κάθε ταξικαρπίας αφαιρούνταν τα υποκείμενα φύλλα, για τη

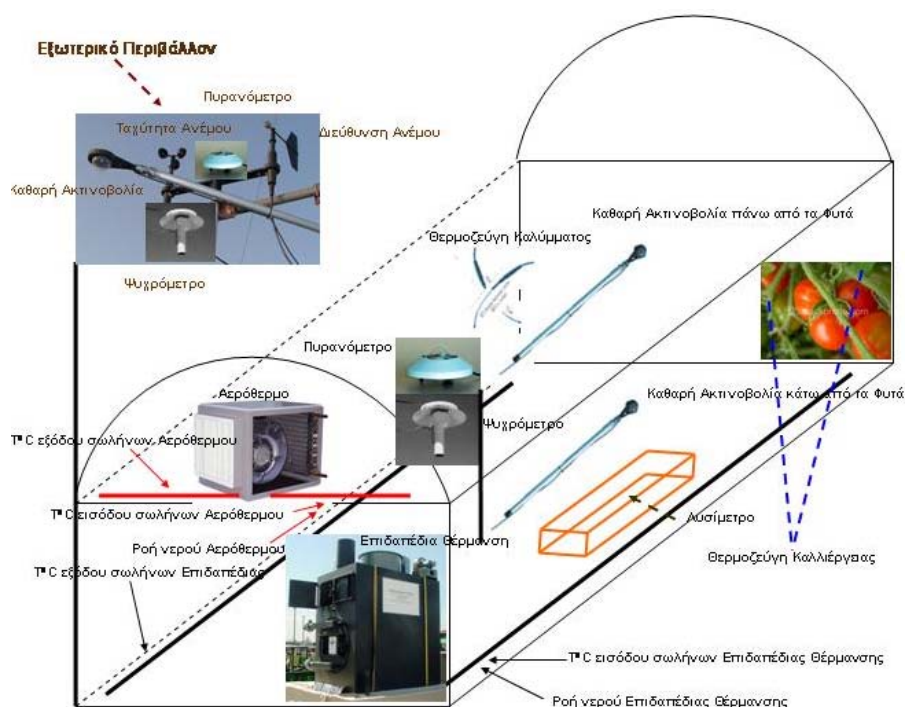
μείωση της σχετικής υγρασίας στα κατώτερα μέρη του φυτού (αερισμός), για την αύξηση της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας και τη συμβολή στην ταχύτερη ωρίμανση των καρπών. Οι κορυφές των φυτών αποκόπτονταν πριν την όγδοη ταξικαρπία. Για την υποβοήθηση της επικονίασης και της γονιμοποίησης χρησιμοποιήθηκαν 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, ενώ ταυτόχρονα γίνονταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα προληπτικές εφαρμογές μυκητοκτόνων στην προσπάθεια μείωσης των πιθανοτήτων επιμολύνσεων της καλλιέργειας.



Εικόνα 4.3. Φυτά τομάτας σε διάφορα στάδια ανάπτυξης

4.3. Μετρήσεις για βαθμονόμηση & επιβεβαίωση κλιματικού προσομοιώματος

Οι μετρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και αφορούσαν τους κλιματικούς παράγοντες μέσα και έξω από το θερμοκήπιο παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω. Η διάταξη των αισθητήρων που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των κλιματικών παραμέτρων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3. Σχηματική απεικόνιση των αισθητήρων καταγραφής του κλίματος

4.3.1. Μετρήσεις στο εξωτερικό περιβάλλον

Στο εξωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου καταγράφονται:

✚ Η θερμοκρασία ($T_o, ^\circ\text{C}$) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (D_o, kPa) με αεριζόμενο ψυχρόμετρο τύπου Assman (τύπος VPI, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Το ψυχρόμετρο μετρούσε τις θερμοκρασίες ξηρού και υγρού θερμομέτρου από τις οποίες υπολογίζεται το έλλειμμα κορεσμού του αέρα. Ταυτόχρονα γίνονταν καταγραφή της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα και με Hobo Pro Data Logger (τύπος HO8-032-08).

- ✚ Η ηλιακή ακτινοβολία ($R_{g,Ext}$, $W m^{-2}$) 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 ($R_{nc,up}$, $W m^{-2}$) εξωτερικά του θερμοκηπίου με ραδιόμετρο (τύπος Q-7, REBS, Seattle, Washington).

4.3.2. Μετρήσεις στο εσωτερικό περιβάλλον

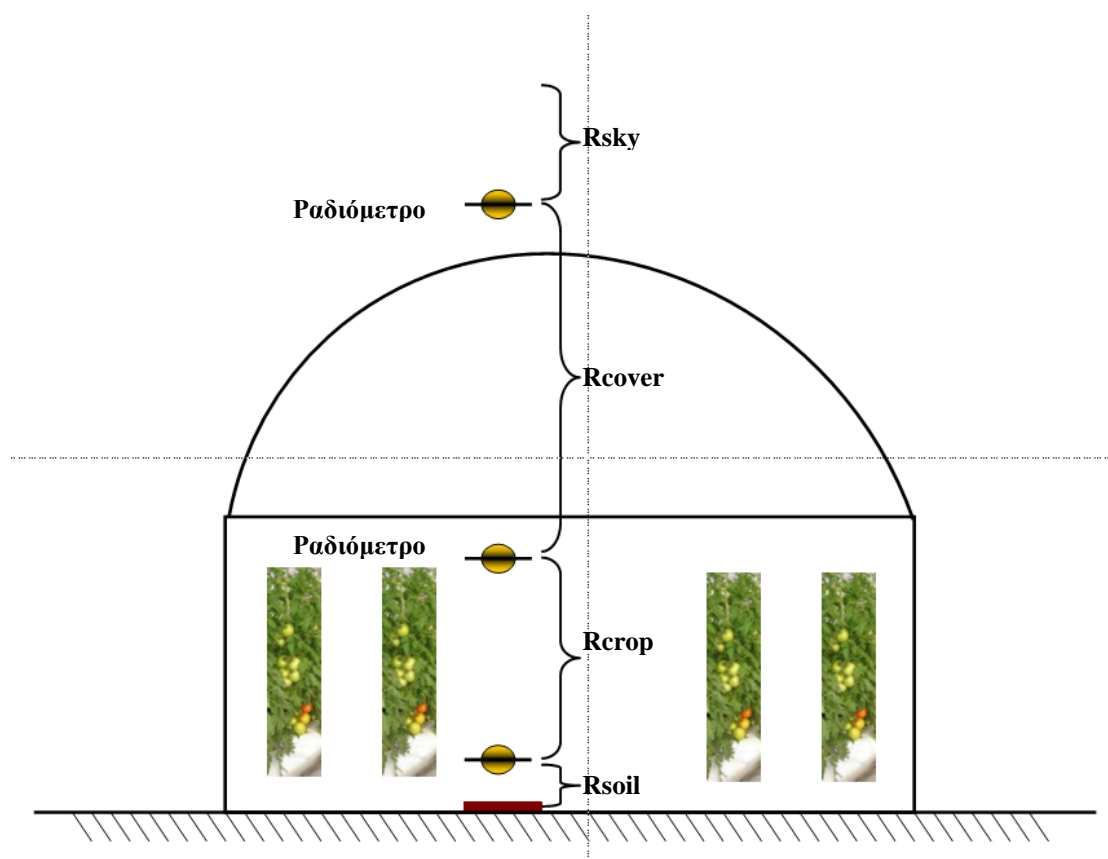
Στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου καταγράφονταν:

- ✚ Η θερμοκρασία (T_i , °C) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (Do , kPa) με αεριζόμενο ψυχρόμετρο τύπου Assman (τύπος VPI, Delta-T Devices, Cambridge, UK). Ταυτόχρονα γίνονταν καταγραφή της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα και με Hobo Pro Data Logger (τύπος HO8-032-08).
- ✚ Η θερμοκρασία (10) φύλλων (T_l , °C) με θερμοζεύγη χαλκού – κωνσταντάνης (τύπος T, Omega, UK), διαμέτρου 0.5 mm, τα οποία προσαρμόζονταν στην κεντρική νεύρωση των φύλλων σε φυτά στο κέντρο του θερμοκηπίου. Η μέση τιμή της θερμοκρασίας της καλλιέργειας (T_i , °C) υπολογίζονταν από τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας των φύλλων.
- ✚ Η θερμοκρασία της εσωτερικής επιφάνειας του καλύμματος οροφής (T_c , °C) με θερμοζεύγη χαλκού – κωνσταντάνης (τύπος T, Omega, UK), διαμέτρου 0.1 mm. Η θερμοκρασία του καλύμματος καταγράφονταν σε δύο σημεία στο κέντρο του θερμοκηπίου από τα οποία εξάγονταν ο μέσος όρος.
- ✚ Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ($R_{g,In}$, $W m^{-2}$) στο κέντρο του θερμοκηπίου, με πυρανόμετρο (CM-6B, Kipp and Zonen, Delft, The Netherlands), 2 μέτρα πάνω από το έδαφος.
- ✚ Η καθαρή ακτινοβολία πάνω ($R_{n,up}$, $W m^{-2}$) και κάτω ($R_{n,d}$, $W m^{-2}$) από την καλλιέργεια με πυραδιόμετρα (τύπος Q-7, REBS, Seattle, Washington). Από τη διαφορά των δύο πυραδιομέτρων, πάνω και κάτω από την καλλιέργεια ($R_{n,up} - R_{n,d}$) υπολογίζεται η απορροφώμενη καθαρή ενέργεια από την καλλιέργεια $R_{nv,int}$ ($W m^{-2}$).

✚ Η καθαρή ακτινοβολία του εδάφους ($W\ m^{-2}$), με μετρητή (EKO Heat Flow Meter CN-140, EKO Instruments Co., Ltd.) τοποθετημένο 0.01 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

✚ Η διαπνοή της καλλιέργειας με διάταξη λυσιμέτρου, τοποθετημένου στο κέντρο του θερμοκηπίου. Η συσκευή αποτελείται από μια ηλεκτρονική ζυγαριά, με δίσκο και περιλάμβανε 3 φυτά. Παράλληλα υπήρχε ανεξάρτητο σύστημα τροφοδοσίας και στράγγισης του θρεπτικού διαλύματος. Έτσι, καθώς η εξάτμιση από το υπόστρωμα ήταμ μηδενική, η απώλεια βάρους που καταγράφονταν στη ζυγαριά ισοδυναμούσε με τη διαπνοή των φυτών.

✚ Η Φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR, σε $\mu\text{mol}\ m^{-2}\ s^{-1}$) από μέσες τιμές αισθητήρων (model LI-190SA; Lincoln, Nebraska)



Σχήμα 4.4. Σχηματική απεικόνιση της ανταλλαγής θερμικής ακτινοβολίας στο θερμοκήπιο

✚ Η παροχή ενέργειας από τα αερόθερμα και από τους 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 (PT 100) τοποθετημένο στην είσοδο και στην έξοδο του νερού επιστροφής. Η παροχή ενέργειας E_{th} σε W από κάθε σύστημα χωριστά, υπολογίζονταν σύμφωνα με τη σχέση:

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

όπου p η πυκνότητα του νερού, q_w είναι η ειδική θερμότητα του νερού σε $J \text{ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 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 $^\circ\text{C}$ και Δt είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο το νερό κυκλοφορεί στο σύστημα σε δευτερόλεπτα (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 λαμβάνονταν κάθε 30 δευτερόλεπτα (30s) και καταγράφονταν η μέση τιμή τους κάθε 10 λεπτά (10m).

4.3.3. Πειραματικοί περίοδοι

Τα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του κλιματικού προσομοιώματος, καθώς και η μεταχείριση των ελεγκτών (άνοιγμα του συστήματος θέρμανσης και των παραθύρων) παρουσιάζονται παρακάτω:

- ❖ 1^η από 28/9/07 έως 2/10/07 όπου το θερμοκήπιο ήταν κενό χωρίς την παρουσία καλλιέργειας και παρέμεινε για όλη τη περίοδο τελείως κλειστό. Δεν υπήρχε ανάγκη για θέρμανση του χώρου.
- ❖ 2^η από 3/10/07 έως 8/10/07 όπου τα παράθυρα του θερμοκηπίου ήταν τελείως ανοικτά και τα φυτά είχαν μεταφυτευθεί. Δεν υπήρχε ανάγκη για θέρμανση του χώρου.
- ❖ 3^η από 9/10/07 έως 14/10/07 όπου το άνοιγμα των παραθύρων του θερμοκηπίου ελέγχονταν αυτόματα από το MACQU. Δεν υπήρχε ανάγκη για θέρμανση του χώρου.
- ❖ 4^η από 19/2/08 έως 25/2/08 όπου το θερμοκήπιο ήταν τελείως κλειστό για όλη την πειραματική περίοδο και το σύστημα θέρμανσης ήταν ανοικτό.

Τα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την επιβεβαίωση του κλιματικού προσομοιώματος:

- ❖ Από 1/10/2005 έως 6/10/2005 όπου τα παράθυρα του θερμοκηπίου ήταν τελείως ανοικτά και τα φυτά είχαν μεταφυτευθεί. Δεν υπήρχε ανάγκη για θέρμανση του χώρου.

4.3.4. Μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανανέωσης του αέρα

Για τον προσδιορισμό του ρυθμού ανανέωσης του αέρα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της φθίνουσας συγκέντρωσης ενός αερίου δείκτη. Ο αέριος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις είναι το N_2O (πρωτοξείδιο του αζώτου), το οποίο είναι εύχρηστο ανιχνεύσιμο αέριο, καθώς έχει το πλεονέκτημα να μην επιδρά στα φυτά και να μην είναι παρόν στον εξωτερικό αέρα σε μετρήσιμες συγκεντρώσεις.

Αρχικά έγινε έκχυση μια συγκεκριμένης ποσότητας N_2O στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, κατά τέτοιο τρόπο ώστε η αρχική συγκέντρωση στο εσωτερικό του θερμοκηπίου να αντιστοιχεί στο μέγιστο της κλίμακας του αναλυτή αερίων. Κατόπιν έγινε ομοιόμορφη ανάμειξη του αερίου χρησιμοποιώντας τον ανεμιστήρα του συστήματος θέρμανσης (αερόθερμο) του θερμοκηπίου. Μετά την έκχυση του αερίου δείκτη στο θερμοκήπιο ακολουθούσε άνοιγμα των παραθύρων σε διάφορα ύψη και εν συνεχεία ακολουθούσε άνοιγμα των παραθύρων σε διάφορα ύψη και εν συνεχεία ξεκινούσε η καταγραφή της πτώσης της συγκέντρωσης του N_2O . Κατά τη διάρκεια της περιόδου μείωσης της συγκέντρωσης του N_2O γινόταν αναρρόφηση του αέρα του θερμοκηπίου από (6) επιλεγμένες θέσεις ισομετρικά κατανεμημένες μέσα στο θερμοκήπιο. Ο αέρας από τις θέσεις που διοχετεύονταν στον υπέρυθρο αναλυτή αερίου προκειμένου να γίνει η μέτρηση της συγκέντρωσης του N_2O . Η συγκέντρωση του αερίου δείκτη στον αέρα του θερμοκηπίου καταγράφονταν σε σύστημα καταγραφής δεδομένων με συχνότητα καταγραφής 1 Hz.

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

$$V \cdot \frac{dC_{ip}}{\Delta t} = -G(t) \cdot [C_i(t) - C_o(t)] + F_a(t) \quad (4.4)$$

Όπου $C_i(t)$ η συγκέντρωση του τροχοδεικτικού αερίου τη στιγμή t εντός του θερμοκηπίου σε ppm, $C_o(t)$ η συγκέντρωση του τροχοδεικτικού αερίου τη στιγμή t στο εξωτερικό περιβάλλον σε ppm, $F_a(t)$ η ροή του αερίου δείκτη που εισήχθη εντός του θερμοκηπίου σε $\text{mg}^3 \text{s}^{-1}$, V ο όγκος του θερμοκηπίου σε m^3 , $G(t)$ η ροή του αέρα που ανανεώθηκε σε $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ και t ο χρόνος σε s.

Ο όρος $F_a(t)$ της εξίσωσης είναι μηδενικός στην προκειμένη περίπτωση, διότι είναι η έκχυση του αερίου δείκτη γίνεται στην αρχή της μέτρησης για μια μόνο φορά και όχι συνεχώς κατά τη διάρκειά της, ενώ ο όρος $C_o(t)$ είναι και αυτός μηδέν, διότι ο εξωτερικός αέρας δεν περιέχει N_2O σε ανιχνεύσιμη ποσότητα. Έτσι η εξίσωση γίνεται:

$$C_i(t) = C_i(t_0) \cdot e^{-\left(\frac{G}{V}(t-t_0)\right)} \quad (4.5)$$

όπου $C_i(t_0)$ η αρχική συγκέντρωση του N_2O και t ο χρόνος.

Αρχικά γίνεται έκχυση του αερίου από ένα σημείο στο κέντρο του θερμοκηπίου για τα Τοξωτά και σε 12 διαφορετικά σημεία σε ύψος 2m, ομοιόμορφα καταναμημένα για Τροποποιημένα Τοξωτά θερμοκήπια. Για όλες τις περιπτώσεις και μετά την έκχυση του αερίου δείκτη και την σταθεροποίηση της τιμής του στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, καταγράφεται ο ρυθμός εξασθένησης της συγκέντρωσης της τιμής του αερίου δείκτη (Boulard *et al.* 1997).

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

4.4. Μετρήσεις για βαθμονόμηση & επιβεβαίωση βιολογικού προσομοιώματος

Για την βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του βιολογικού προσομοιώματος χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις κλίματος στο εσωτερικό το θερμοκηπίου ενώ πραγματοποιήθηκαν και σειρά μετρήσεων που αφορούσαν το ρυθμό ανάπτυξης φυτών τομάτας, καθώς και την παραγόμενη βιομάζα κατά τη διάρκεια των πειραματικών περιόδων και παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω:

- ✘ Κλιματικές μετρήσεις για το βιολογικό προσομοίωμα
- ✘ Καταστροφικές μετρήσεις καρπών
- ✘ Καταστροφικές μετρήσεις ολόκληρου του φυτού
- ✘ Μείωσης - νέκρωσης των φύλλων
- ✘ Μετρήσεις ανάπτυξης των μορφολογικών χαρακτηριστικών
 - i. Ολόκληρου του φυτού
 - ii. Φύλλων

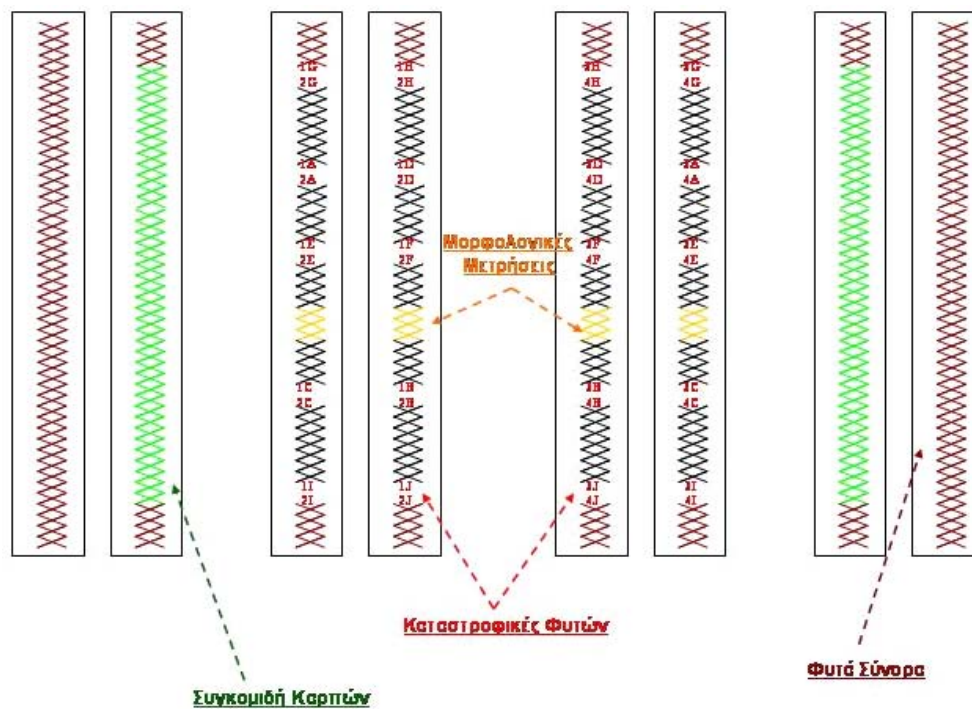
4.4.1. Κλιματικές μετρήσεις για το βιολογικό προσομοίωμα

Οι κλιματικές μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση και επιβεβαίωση του βιολογικού προσομοιώματος αφορούσαν τη θερμοκρασία του αέρα (T_i), τη σχετική υγρασία (RH_i), την ηλιακή ακτινοβολία (Rg_{in}), την ταχύτητα του αέρα (u_i) καθώς και τη συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Τα κλιματικά δεδομένα καταγράφηκαν σύμφωνα με την παράγραφο (4.3.2.), ενώ η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα (C_{CO_2} ppm) στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με μέσες τιμές υπέρυθρου αναλυτή αερίων (IRGA).

4.4.2. Καταστροφικές μετρήσεις καρπών

Οι τιμές του χλωρού και ξηρού βάρους των καρπών καταγράφονταν με συχνότητα 2 φορές την εβδομάδα καθόλη την περίοδο ωρίμανσης των καρπών. Η συγκομιδή πραγματοποιήθηκε από 40 πειραματικά φυτά (Σχήμα 4.5), ενώ το ξηρό βάρος υπολογίζονταν με ξήρανση σε κλίβανο για 48 ώρες σε 105 °C (Heuvelink, 1995) ISI 01. Η ζύγιση γίνονταν με ζυγό ακριβείας εκατοστού του γραμμαρίου. Μετρήθηκαν:

- ✚ Ο αριθμός των καρπών
- ✚ Το χλωρό βάρος των καρπών
- ✚ Το χλωρό βάρος των καρπών ανά ταξικαρπία
- ✚ Το ξηρό βάρος των καρπών
- ✚ Το ξηρό βάρος των καρπών ανά ταξικαρπία



Σχήμα 4.5. Πειραματικό σχέδιο βιολογικών μετρήσεων

4.4.3. Καταστροφικές μετρήσεις ολόκληρου του φυτού

Καθόλη την 1^η και 2^η πειραματική περίοδο πραγματοποιήθηκαν 10 και 9 καταστροφικές μετρήσεις ολόκληρου του φυτού, αντίστοιχα. Οι καταστροφικές μετρήσεις πραγματοποιούνταν κάθε 2 εβδομάδες σε διαφορετικά φυτά (Σχήμα 4.5) σύμφωνα με το πειραματικό σχέδιο και την τυχαιοποίηση τους, ενώ τα κενά τους συμπληρώνονταν με επιπρόσθετα φυτά που βρίσκονταν στο ίδιο στάδιο ανάπτυξης. Για κάθε μέτρηση καταστρέφονταν 4 φυτά, και διαχωρίζονταν σύμφωνα με τα μορφολογικά τους χαρακτηριστικά σε βλαστούς, άνθη, φύλλα, καρπούς (Εικόνα 4.4) και ρίζα. Η κοπή των φυτών πραγματοποιούνταν νωρίς το πρωί ώστε να αποφευχθεί

η απώλεια νερού των φυτών λόγω διαπνοής και πριν την πρώτη άρδευση για να μην έχει γίνει πρόσληψη επιπλέον νερού.



Εικόνα 4.4. Καρποί σε διάφορα στάδια ωρίμανσης

Μετρήθηκαν το χλωρό βάρος των ιστών και το ξηρό βάρος με εισαγωγή τους σε φούρνο, στους 105 °C για 24 ώρες (Heuvelink 1995), ISI 01, ενώ για τους καρπούς, η θερμοκρασία ήταν στους 75 °C και η διάρκεια παραμονής στο φούρνο 48 ώρες. Τέλος έγινε καταμέτρηση του αριθμού των παραγόμενων φύλλων, ανθέων καρπών και ταξιανθιών των πειραματικών φυτών. Η ζύγιση γίνονταν με ζυγό ακριβείας εκατοστού του γραμμαρίου. Αναλυτικότερα μετρήθηκαν:

- ✚ Χλωρό Βάρος των φύλλων (συμπεριλαμβάνεται ο μίσχος)
- ✚ Χλωρό Βάρος των βλαστών
- ✚ Χλωρό Βάρος των ταξιανθιών (συμπεριλαμβάνεται ο μίσχος του άνθους)
- ✚ Χλωρό Βάρος των καρπών
- ✚ Χλωρό Βάρος των ριζικών συστημάτων
- ✚ Ξηρό Βάρος των φύλλων (συμπεριλαμβάνεται ο μίσχος)
- ✚ Ξηρό Βάρος των βλαστών
- ✚ Ξηρό Βάρος των ταξιανθιών (συμπεριλαμβάνεται ο μίσχος του άνθους)

- ✚ Ξηρό Βάρος των καρπών
- ✚ Ξηρό Βάρος των ριζικών συστημάτων
- ✚ Αριθμός των φύλλων (>0.5cm)
- ✚ Αριθμός των ανθέων (>0.5cm)
- ✚ Αριθμός των καρπών
- ✚ Αριθμός των κόμβων
- ✚ Αριθμός των συμποδίων
- ✚ Αριθμός των καρπών ανά ταξικαρπία
- ✚ Αριθμός των φύλλων (>0.5cm) ανά συμπόδιο
- ✚ Αριθμός των ανθέων (>0.5cm) ανά συμπόδιο
- ✚ Αριθμός των καρπών (>0.5cm) ανά συμπόδιο

4.4.4. Απομάκρυνση των φύλλων

Κατά τη διάρκεια των δύο πειραματικών περιόδων γίνονταν συστηματική αφαίρεση φύλλων με άμεση συνέπεια τη μείωση του αριθμού και της συνολικής φυλλικής επιφάνειας. Μετρήθηκαν:

- ✚ Χλωρό Βάρος των αφαιρούμενων φύλλων (*συμπεριλαμβάνεται ο μίσχος*)
- ✚ Ξηρό Βάρος των αφαιρούμενων φύλλων (*συμπεριλαμβάνεται ο μίσχος*)

4.4.5. Μετρήσεις Ανάπτυξης των Μορφολογικών χαρακτηριστικών

4.4.5.1. Ολόκληρου του φυτού

Για τη μελέτη της αύξησης και ανάπτυξης των φυτών επιλέχθηκαν τυχαία 8 φυτά εκατέρωθεν του κέντρου του θερμοκηπίου, στις δύο μεσαίες διπλές σειρές. Στα φυτά αυτά έγινε ειδική σήμανση για την αναγνώρισή τους. Σε όλες τις μετρήσεις δίνονταν ιδιαίτερη προσοχή στην όσο το δυνατό μικρότερη επαφή με την κόμη, γιατί επηρεάζεται η ανάπτυξή της. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν με τη βοήθεια εύκαμπτης πλαστικής μετροταινίας με ακρίβεια της μέτρησης 0,5 cm.

Ως ύψος του φυτού είχε οριστεί το μήκος του κεντρικού βλαστού από το λαιμό του φυτού μέχρι το σημείο εμφάνισης του φύλλου στην κορυφή με μήκος μικρότερο από 10 cm.

Οι μετρήσεις ανάπτυξης των μορφολογικών χαρακτηριστικών των φυτών πραγματοποιούνταν με συχνότητα 3 φορές για κάθε εβδομάδα καθ'όλη την πειραματική περίοδο. Αναλυτικότερα μετρήθηκαν:

- ✚ Μήκος του φυτού
- ✚ Συνολικός αριθμός φύλλων
- ✚ Αριθμός των νεκρών και αφαιρούμενων φύλλων
- ✚ Αριθμός των κόμβων
- ✚ Συνολικός αριθμός των ταξιανθιών
- ✚ Αριθμός των ανθέων ανά ταξιανθία
- ✚ Αριθμός των καρπών ανά ταξιανθία
- ✚ Ημερομηνία άνθησης
- ✚ Ημερομηνία σχηματισμού των καρπών
- ✚ Ημερομηνία συγκομιδής των ώριμων καρπών
- ✚ Ημερομηνία κορφολογήματος του κυρίου στελέχους των φυτών

4.4.5.2. Φύλλων

Η μέτρηση των φύλλων έγινε επίσης με τη μετροταινία που περιγράφηκενωρίτερα 3 φορές την εβδομάδα. Ως μήκος (L) του φύλλου είχε οριστεί η απόσταση από τη βάση του μίσχου έως την άκρη του ελάσματος και ως πλάτος (W) του φύλλου η μεγαλύτερη απόσταση ανάμεσα στις άκρες του ελάσματος, η κάθετη στο μήκος του φύλλου. Μετρούνταν όλα τα φύλλα των 8 φυτών που επιλέχθηκαν για την καταγραφή της ανάπτυξης τους.

Για τον υπολογισμό της φυλλικής επιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν όλα τα φύλλα που αφαιρούνταν κατά τις καταστροφικές μετρήσεις ολόκληρου του φυτού, καθώς και τα φύλλα που απομακρύνονταν σύμφωνα με το καλλιεργητικό πρόγραμμα. Σε αυτά τα φύλλα μετρήθηκε το μήκος, το πλάτος καθώς και το χλωρό και το ξηρό βάρος τους και συσχετίστηκε με το εμβαδόν που καταγράφηκε με τη χρήση scanner και ειδικού προγράμματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Η φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας υπολογίστηκε από τις μετρήσεις του ξηρού βάρους και αντίστοιχο εμβαδόν που καταγράφηκε με τη χρήση του scanner. Η σχέση που βαθμονομήθηκε για την εκτίμηση της φυλλικής επιφάνειας (m^2) από το ξηρό βάρος (g) παρουσιάζεται παρακάτω:

$$S = 0.0312 \cdot D.W.$$

(4.6)

όπου ο συντελεστής προσδιορισμού $R^2 = 0.95$.

Ο ρυθμός εμφάνισης των φύλλων της καλλιέργειας υπολογίστηκε με μετρήσεις που πραγματοποιούνταν κάθε 2 ή 3 ημέρες από 8 επιλεγμένα φυτά. Αναλυτικότερα μετρήθηκαν:

- ✚ Αριθμός των φύλλων
- ✚ Μήκος των φύλλων
- ✚ Πλάτος των φύλλων
- ✚ Φυλλική επιφάνεια

Οι μετρήσεις βάρους πραγματοποιήθηκαν με ηλεκτρονικό ζυγό, (Model Presica 60000 G SCS), μεγίστου βάρους 5000g. Η συνολική ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξεως του $\pm 0,01g$.

4.5. Μετρήσεις για βαθμονόμηση γεννήτριας κλιματικών δεδομένων

4.5.1. Πειραματικές μετρήσεις

Στην προσπάθεια για την πρόγνωση του κλίματος σε βάθος διαστήματος ανάλογο με τη διάρκεια πρόγνωσης, χρησιμοποιήθηκε γεννήτρια παραγωγής κλιματικών δεδομένων προερχόμενη από τη Γαλλική ερευνητική ομάδα του INRA. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την βαθμονόμηση και πειραματική επιβεβαίωση της γεννήτριας εξωτερικών κλιματικών δεδομένων περιελάμβανε μετρήσεις των κλιματικών παραμέτρων του εξωτερικού κλίματος που καταγράφονταν στον πειραματικό τόπο εφαρμογής της γεννήτριας στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Τα κλιματικά δεδομένα που καταγράφηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την βαθμονόμηση και πειραματική επιβεβαίωση της γεννήτριας εξωτερικών κλιματικών δεδομένων είναι: i). η θερμοκρασία ($T_o, ^\circ\text{C}$) και το έλλειμμα κορεσμού του αέρα (D_o, kPa), ii). η ηλιακή ακτινοβολία (RG_o, Wm^{-2}), iii). η ταχύτητα του αέρα ($u, \text{m s}^{-1}$). Ταυτόχρονα καταγράφονταν οι προβλέψεις (μεγίστων και ελαχίστων) από το website, που χρησιμοποιήθηκε ως πηγή αναφοράς.

Το χρονικό διάστημα καταγραφής των κλιματικών δεδομένων αφορούσε την περίοδο από την 1^η Οκτώβρη του 2005, έως την 1^η Απρίλη του 2006 για τη βαθμονόμηση της γεννήτριας και από την 1^η Οκτώβρη του 2007, έως την 20^η Μαρτίου του 2008 για την επιβεβαίωση αντίστοιχα. Για την συλλογή, την αρχική επεξεργασία και την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε σύστημα συλλογής και καταγραφής δεδομένων (DL 3000, Delta-T Devices, Cambridge, UK).

4.6. Τιμές για μελέτη περιπτώσεων του βιολογικού προσομοιώματος (SimTom)

Η ανάλυση ευαισθησίας του προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε για να εξεταστεί η συμπεριφορά του προσομοιώματος κάτω από συνδυασμό διαφορετικών κλιματικών συνθηκών. Η μελέτη περιπτώσεων εστιάστηκε στην διαφοροποίηση κυρίως της θερμοκρασίας και την επίδραση που παρουσιάζει στην ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών τομάτας. Η συγκέντρωση του CO_2 διατηρήθηκε σταθερή στα 380 ppm, ενώ οι τιμές της σχετικής υγρασίας που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι πραγματικές τιμές

που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων. Τα σενάρια που μελετήθηκαν, παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Η διαφοροποίηση της μέσης ημερήσιας τιμής της θερμοκρασίας, όταν η θερμοκρασία νύχτας διατηρήθηκε στους 15°C . Τα σενάρια που προσομοιώθηκαν για θερμοκρασίες ημέρας/νύχτας, ήταν τα: $20/15^{\circ}\text{C}$, $24/15^{\circ}\text{C}$ και $30/15^{\circ}\text{C}$, με μάρτυρα την προσομοίωση $20/15^{\circ}\text{C}$.
2. Η μεταβολή της μέσης νυχτερινής τιμής της θερμοκρασίας, όταν η ημερήσια θερμοκρασία διατηρήθηκε στους 20°C . Τα σενάρια που προσομοιώθηκαν για θερμοκρασίες ημέρας/νύχτας, ήταν τα: $20/15^{\circ}\text{C}$, $20/13^{\circ}\text{C}$ και $20/11^{\circ}\text{C}$, με μάρτυρα την προσομοίωση $20/15^{\circ}\text{C}$.
3. Η επίπτωση μείωσης και μείωσης-αύξησης της θερμοκρασίας κατά 2°C , για χρονικό διάστημα 10 ημερών. Τα σενάρια που προσομοιώθηκαν ήταν τα παρακάτω:
 - ✘ $20/15^{\circ}\text{C}$ για όλη την περίοδο προσομοίωσης,
 - ✘ $20/15^{\circ}\text{C}$ για όλη την περίοδο προσομοίωσης εκτός του χρονικού διαστήματος από την 21^η ημέρα μέχρι και την 30^η, όπου οι τιμές για τις θερμοκρασίες ημέρας/νύχτας ήταν $18/13^{\circ}\text{C}$
 - ✘ $20/15^{\circ}\text{C}$ για όλη την περίοδο προσομοίωσης, με διαφοροποίηση των θερμοκρασιών ημέρας/νύχτας στους $18/13^{\circ}\text{C}$ για το χρονικό διάστημα από την 21^η ημέρα μέχρι την 30^η της προσομοίωσης και αντίστοιχη διαφοροποίηση των θερμοκρασιών ημέρας/νύχτας στους $22/17^{\circ}\text{C}$ για το διάστημα από την 41^η ημέρα μέχρι την 50^η. Μάρτυρας των προσομοιώσεων ήταν οι θερμοκρασίες $20/15^{\circ}\text{C}$.
4. Η επίπτωση της διαφοροποίησης των θερμοκρασιών αναφοράς για ημέρα/νύχτα, $20/15^{\circ}\text{C}$, με μείωση και μετέπειτα προσθήκη 2°C , για χρονικό διάστημα 10 ημερών. Τα χρονικά διαστήματα που μελετήθηκαν ήταν από την 21^η ημέρα μέχρι την 30^η και από την 41^η ημέρα μέχρι την 50^η της προσομοίωσης
5. Η μελέτη της επίδρασης της αύξησης-μείωσης της θερμοκρασίας σε σχέση με την αντίστοιχη μείωση-αύξηση για το ίδιο χρονικό διάστημα, την ίδια περίοδο προσομοίωσης.
6. Η μελέτη της διαφοροποίησης του θερμοκρασιακού εύρους όταν η μέση τιμή της θερμοκρασίας είναι η ίδια και για τις δύο περιπτώσεις.

4.7. Μετρήσεις για βελτιστοποίηση του προσομοιώματος

Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτιστοποίηση του προσομοιώματος ήταν οι μετρήσεις ανάπτυξης και παραγωγής των φυτών τομάτας καθώς και τα αντίστοιχα κλιματικά δεδομένα της 2^{ης} πειραματικής περιόδου (28^η Σεπτεμβρίου 2007 μέχρι 25^η Φεβρουαρίου 2008). Η αναλυτική περιγραφή των μετρήσεων αναφέρθηκε στις παραπάνω παραγράφους. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στις περιόδους με συγκεκριμένες μεταχειρίσεις του κλίματος του θερμοκηπίου, που παρουσιάζονται παρακάτω:

- ❖ 1^η από 9/10/07 έως 14/10/07 όπου το άνοιγμα των παραθύρων του θερμοκηπίου ελέγχονταν αυτόματα από το MACQU. Δεν υπήρχε ανάγκη για θέρμανση του χώρου.
- ❖ 2^η από 28/11/07 έως 4/12/07 όπου το άνοιγμα των παραθύρων του θερμοκηπίου ελέγχονταν αυτόματα από το MACQU και το σύστημα θέρμανσης ήταν ανοικτό.
- ❖ 3^η από 19/2/08 έως 25/2/08 όπου το άνοιγμα των παραθύρων του θερμοκηπίου ελέγχονταν αυτόματα από το MACQU

Για τις παραπάνω περιόδους χρησιμοποιήθηκαν και υπολογισμένες τιμές για: i) την ανάπτυξη και τον αριθμό (φύλλων, καρπών, ταξιανθιών) των φυτών, ii) την παραγόμενη βιομάζα και iii) την παραγωγή καρπών. Δεν χρησιμοποιήθηκαν μετρημένες τιμές καθώς το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης ήταν μικρό και δεν υπήρχαν πειραματικές τιμές που να καλύπτουν το συγκεκριμένο εύρος. Οι μετρημένες και οι υπολογισμένες τιμές χρησιμοποιήθηκαν, με σκοπό τον προσδιορισμό των διαφοροποιήσεων που προκαλούνται από τη διαχείριση του κλίματος σύμφωνα με τη μέθοδο βελτιστοποίησης, σε σχέση με τη διαχείριση που πραγματοποιήθηκε κατά την πειραματική περίοδο.

Κεφάλαιο 5°. Ανάλυση των απαντήσεων των παραγωγών

5. Ανάλυση των απαντήσεων των παραγωγών

5.1. Αποτελέσματα

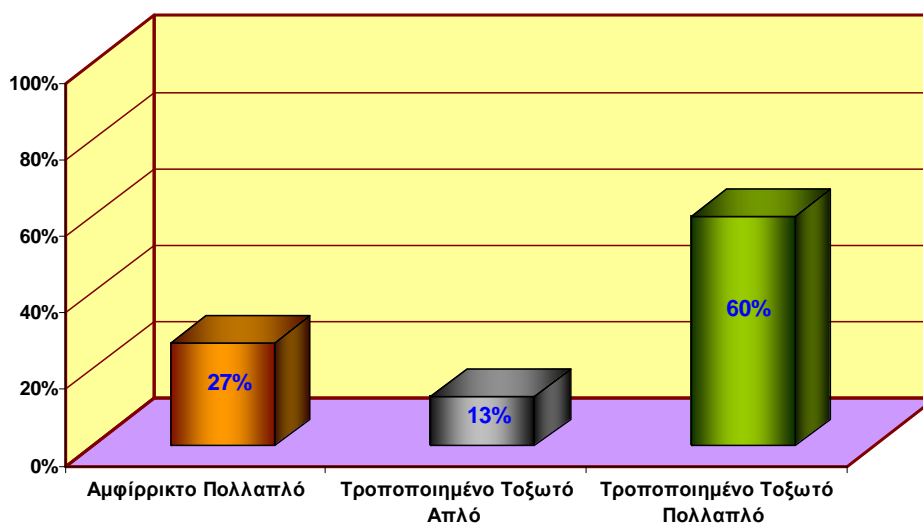
5.1.1. Κατασκευαστικά στοιχεία των θερμοκηπιακών μονάδων

Η κατασκευαστική ιδιαιτερότητα των θερμοκηπιακών μονάδων, η μεταβολή των απαιτήσεων σε θέρμανση και αερισμό ανάλογα με την περιοχή που εδρεύει η εκμετάλλευση και τη διαφοροποίηση των εξωτερικών κλιματικών συνθηκών σε ημερήσια βάση και η επιλογή της καλλιέργειας που χρησιμοποιείται αποτελούν ένα συνδυασμό προβληματισμών που πρέπει να επιλύουν οι παραγωγοί. Για την κατανόηση των ενεργειών των παραγωγών αρχικά καταγράφηκε ο τύπος, οι διαστάσεις των θερμοκηπιακών μονάδων καθώς και η περιοχή στην οποία εδρεύουν. Τα κατασκευαστικά στοιχεία με την προσθήκη δεδομένων για τα χρησιμοποιούμενα υλικά κάλυψης και τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής αποτελούν κριτήρια για τον υπολογισμό των αναγκών των θερμοκηπιακών μονάδων σε θέρμανση. Για το σκοπό αυτό από τους παραγωγούς ζητήθηκαν τα κατασκευαστικά στοιχεία των θερμοκηπιακών μονάδων, καθώς είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό του όγκου και των ανοιγμάτων αερισμού των θερμοκηπίων, απαραίτητα κριτήρια για τον έλεγχο του κλίματος.

Σύμφωνα με την βασική αρχή της έρευνας για επιλογή θερμοκηπιακών μονάδων που πληρούν τις προδιαγραφές αναφοράς, η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε σε πολλαπλά αμφίρρικτα, απλά τροποποιημένα τοξωτά και πολλαπλά τροποποιημένα τοξωτά. Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζονται η ποσοστιαία κατανομή των τύπων των θερμοκηπιακών μονάδων και παρατηρείται ότι ο τύπος θερμοκηπίου που χρησιμοποιείται από τους παραγωγούς στους οποίους απευθύνθηκε η έρευνα, είναι το πολλαπλό τροποποιημένο τοξωτό.

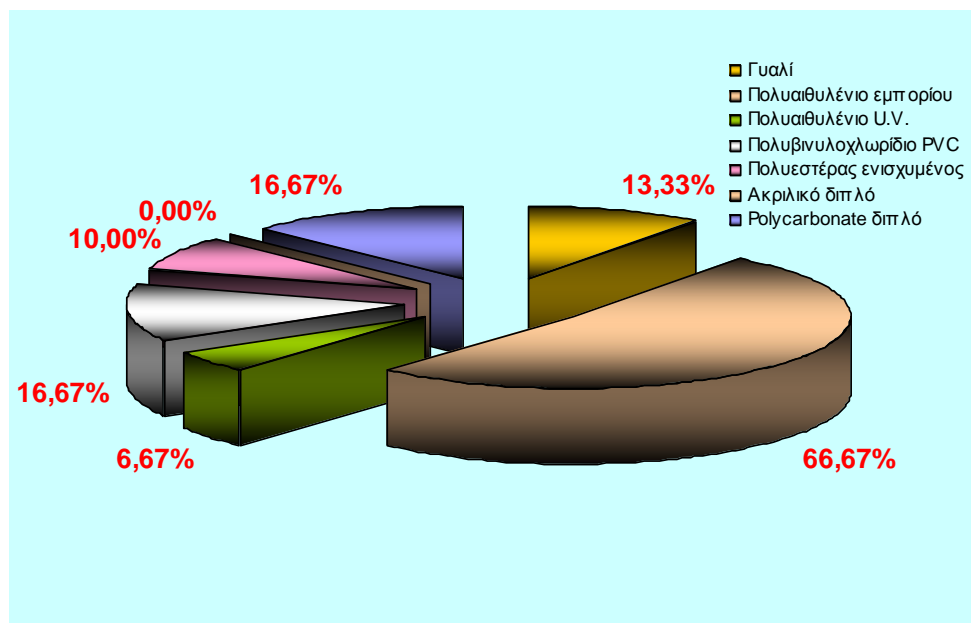
Ανάλογα με τις διαστάσεις της κάθε θερμοκηπιακής μονάδας πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των απαιτήσεων σε θέρμανση, κάτι που αποτελεί κρίσιμο σημείο για τη στρατηγική διαχείρισης που πρόκειται να εφαρμόσουν οι παραγωγοί κατά τη χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Η γνώση των απαιτήσεων σε θέρμανση των

θερμοκηπιακών μονάδων δύναται να συμβάλει στην ορθολογιστική χρήση και τον υπολογισμό της ποσότητας των καυσίμων.



Σχήμα 5.1. Απεικόνιση της ποσοστιαίας κατανομής των τύπων των θερμοκηπιακών μονάδων

Οι παραγωγοί στη συνέχεια ερωτήθηκαν για το υλικό κάλυψης που χρησιμοποιούν καθώς η επιλογή κάλυψης των θερμοκηπίων σχετίζεται με τη στρατηγική διαχείρισης και συμβάλλει στην τροποποίηση των κλιματικών συνθηκών. Η επιλογή των παραγωγών για την κάλυψη των θερμοκηπιακών μονάδων παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2. Το μεγαλύτερος μέρος των θερμοκηπίων καλύφθηκε από πολυαιθυλένιο εμπορίου, σύμφωνα με τις απαντήσεις των παραγωγών. Σύμφωνα με το αποτέλεσμα που καταγράφηκε για χρήση του πολυαιθυλένιο εμπορίου μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί ότι οι παραγωγοί δεν έχουν καταγράψει την ακριβή προέλευση του υλικού με άμεση συνέπεια την ελλιπή γνώση των ιδιοτήτων του πλαστικού.



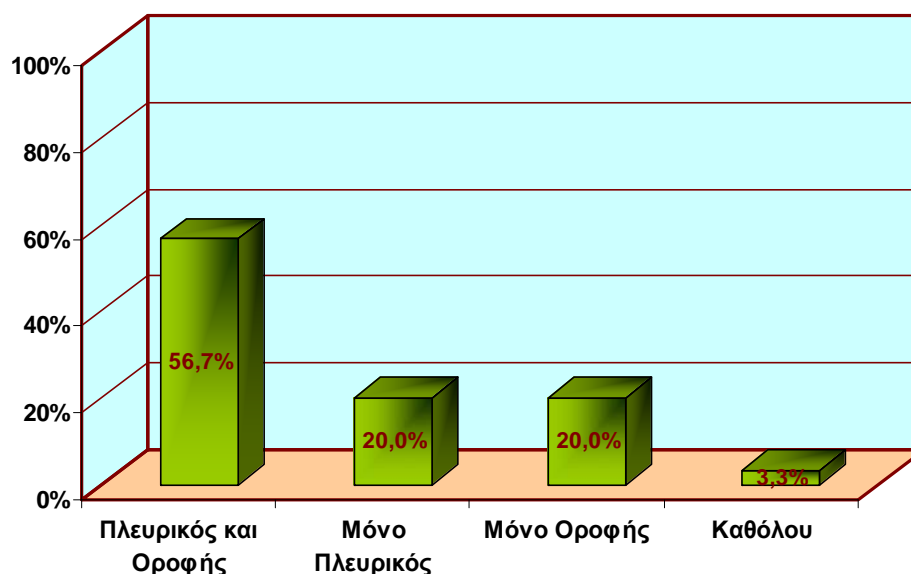
Σχήμα 5.2. Απεικόνιση της ποσοστιαίας κατανομής των υλικών κάλυψης στα θερμοκήπια της έρευνας

5.1.2. Εξοπλισμός των θερμοκηπίων

Η ερώτηση που επακολούθησε αφορούσε τις δυνατότητες αερισμού των θερμοκηπιακών μονάδων. Ο αερισμός του θερμοκηπίου διακρίνεται σε φυσικό όταν προκαλείται από διαφορά πιέσεων που αναπτύσσεται από φυσικά αίτια και δυναμικό όταν οι διαφορές πιέσεων μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού χώρου του θερμοκηπίου δημιουργείται με μηχανικά μέσα. Ο δυναμικός αερισμός πραγματοποιείται κυρίως τους θερινούς μήνες όταν και οι ανάγκες για αερισμό των θερμοκηπιακών μονάδων είναι μεγαλύτερες και δεν επαρκή ο φυσικός. Για το λόγο αυτό οι παραγωγοί δεν ερωτήθηκαν τόσο για την ύπαρξη όσο και για τον τρόπο χρήσης του δυναμικού αερισμού καθώς η έρευνα εστιάστηκε στη χειμερινή περίοδο. Οι κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες των θερμοκηπιακών μονάδων καταγράφηκαν και παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3.

Οι περισσότερες θερμοκηπιακές μονάδες ήταν εξοπλισμένες τόσο με πλευρικά ανοίγματα αερισμού όσο και οροφής. Η επιλογή των παραγωγών διασφαλίζει τη δυνατότητα τροποποίησης των κλιματικών συνθηκών, κάτι που προσφέρει η συνδυασμένη χρήση των πλευρικών ανοιγμάτων και των παραθύρων οροφής. Ο συνδυασμός της γνώσης των κλιματικών απαιτήσεων της καλλιέργειας και των

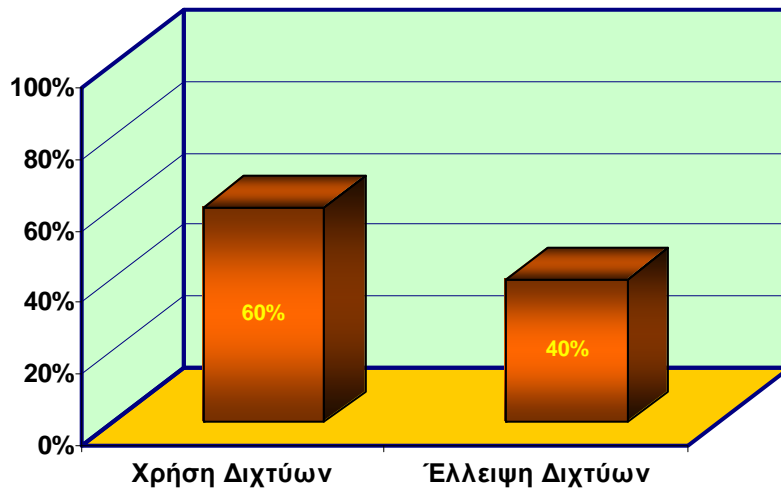
δυνατοτήτων των θερμοκηπιακών μονάδων να τροποποιήσουν τις κλιματικές συνθήκες στο εσωτερικό δύναται να συμβάλλουν στην αύξηση της παραγωγής και στην αποφυγή των φυτοϋγειονομικών προβλημάτων. Οι υπόλοιπες θερμοκηπιακές μονάδες που διαθέτουν μόνο ανοίγματα οροφής ή πλαϊνά περιορίζουν τις δυνατότητες αερισμού και τροποποίησης της θερμοκρασίας.



Σχήμα 5.3. Ποσοστιαία κατανομή των ανοιγμάτων αερισμού

Μείωση του φυσικού αερισμού προκαλείται και με τη χρήση δικτύων εντομοστεγανότητας, καθώς μειώνεται η επιφάνεια εισόδου του αέρα στο εσωτερικό το θερμοκηπίου. Η ανάγκη των παραγωγών για μείωση των προσβολών αλλά και η παράλληλη μείωση που προκαλείται στον αερισμό του θερμοκηπίου αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα που απασχολεί τους παραγωγούς. Η επιλογή τους για χρήση ή μη δικτύων εντομοστεγανότητας εμφανίζεται στο Σχήμα 5.4.

Η επιλογή των παραγωγών για χρήση περιοδικά δικτύων εντομοστεγανότητας σε ποσοστό 60%, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι προκαλείται μια μείωση του φυσικού αερισμού αλλά ταυτόχρονα διασφαλίζεται η καλλιέργεια από τις εντομολογικές προσβολές και τη μεταφορά ιών.



Σχήμα 5.4. Ποσοστιαία κατανομή χρήσης διχτύων εντομοστεγανότητας

Βασικό ζητούμενο της έρευνας αποτέλεσε ο εξοπλισμός των θερμοκηπιακών μονάδων με ανοίγματα αερισμού και σύμφωνα με τη καταγραφή που πραγματοποιήθηκε το αρχικό αυτό ζητούμενο καλύφθηκε ικανοποιητικά καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό των μονάδων διέθεταν ανοίγματα αερισμού με το 60% αυτών να καλύπτουν τα ανοίγματα με δίχτυα εντομοστεγανότητας.

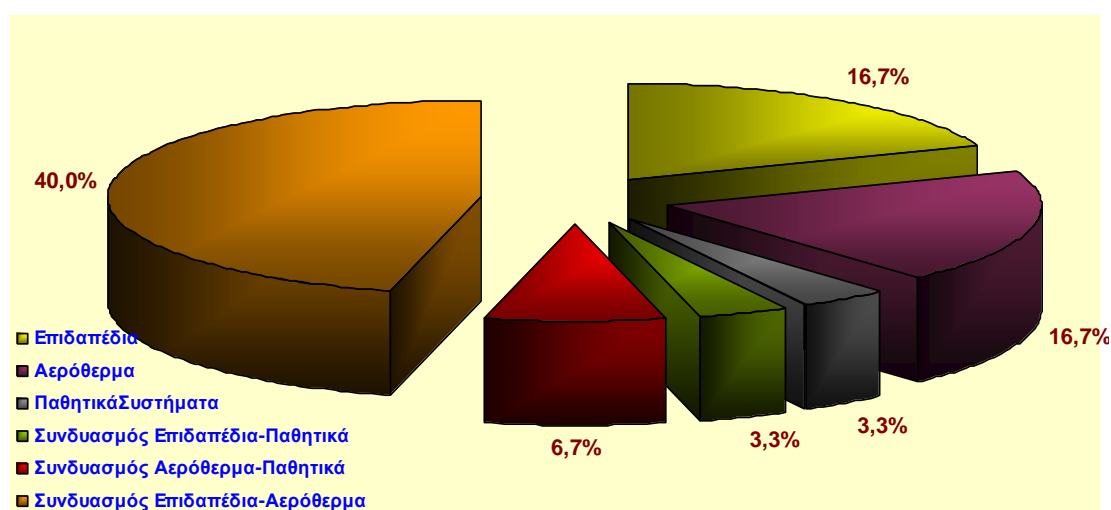
5.1.3. Συστήματα ελέγχου του κλίματος του Θερμοκηπίου

Τα θερμοκήπια διακρίνονται σε πλήρως, ελαφρώς και μη θερμαινόμενα. Με γνώμονα τον τρόπο κατανομής, τα διάφορα συστήματα θέρμανσης του θερμοκηπίου ταξινομούνται στις παρακάτω ομάδες:

1. Συστήματα που αποδίδουν στο χώρο του θερμοκηπίου το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας με συναγωγή, π.χ. αερόθερμα.
2. Συστήματα που αποδίδουν θερμοκηπίου το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας με συνδυασμό ακτινοβολίας και φυσικής συναγωγής και περιλαμβάνει συστήματα στα οποία η κατανομή θερμότητας στο χώρο γίνεται με σωλήνες ζεστού νερού ή ατμού π.χ. Επιδαπέδια θέρμανση.
3. Συστήματα τα οποία αποδίδουν θερμότητα με συνδυασμό αγωγιμότητας ακτινοβολίας και συναγωγής π.χ. Παθητικά ηλιακά συστήματα.

Η εκλογή των θερμοκηπίων μονάδων για το σκοπό της έρευνας έγινε με κριτήριο την ύπαρξη συστημάτων θέρμανσης και η ποσοστιαία κατανομή τους απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5. Η βελτιστοποίηση της διαχείρισης του κλίματος σχετίζεται με την ύπαρξη συστημάτων θέρμανσης καθώς και με το κριτήριο που χρησιμοποιούν οι παραγωγοί για επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας.

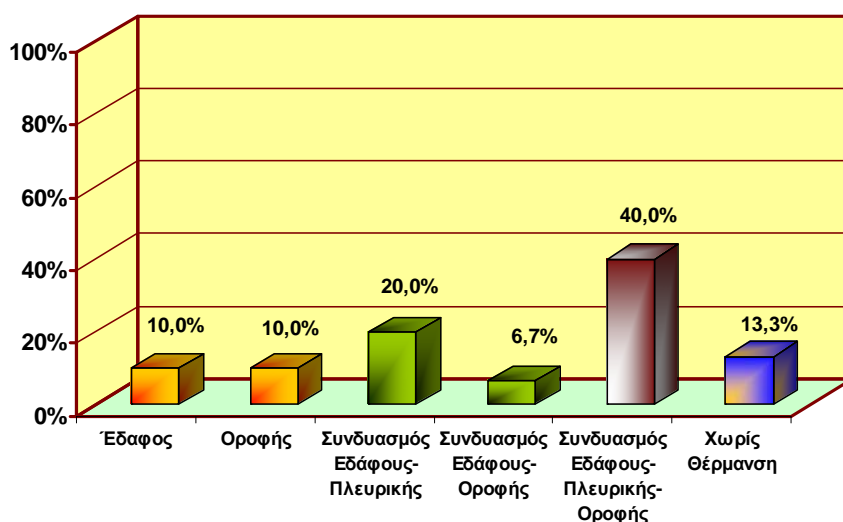
Η παρατήρηση της ποσοστιαίας κατανομής των συστημάτων θέρμανσης στο Σχήμα 5.5 επιβεβαιώνει την επιλογή των παραγωγών σε ποσοστό 16,7% για εξοπλισμό των θερμοκηπιακών μονάδων με επιδαπέδια θέρμανση και σε ποσοστό 16,7% με αερόθερμα καθώς και εξοπλισμό σε ποσοστό 40% με συνδυασμό των παραπάνω συστημάτων θέρμανσης. Η συγκεκριμένη κατανομή, επηρεάστηκε σε ποσοστό 25% από την επιλογή παραγωγών της Νοτίου Ελλάδας, για χρησιμοποίηση ενός συστήματος θέρμανσης λόγω των ειδικών κλιματικών συνθηκών και τις μειωμένες ανάγκες για θέρμανση των θερμοκηπιακών μονάδων.



Σχήμα 5.5. Ποσοστιαία κατανομή των συστημάτων θέρμανσης

Ο εξοπλισμός των θερμοκηπιακών μονάδων με συστήματα θέρμανσης παρέχει στους παραγωγούς τη δυνατότητα τροποποίησης της θερμοκρασίας και της υγρασίας του αέρα στο εσωτερικό των μονάδων τις κρίσιμες περιόδους. Η γνώση των κλιματικών συνθηκών που απαιτούνται για τη βέλτιστη ανάπτυξη και παραγωγή των καλλιεργειών και η βέλτιστη χρήση των συστημάτων θέρμανσης δύναται να αυξήσουν την τελική ακαθάριστη πρόσοδο των παραγωγών.

Ταυτόχρονα κατά τις επισκέψεις στις διάφορες θερμοκηπιακές μονάδες καταγράφηκαν οι ιδιαιτερότητες που παρουσιάζονται στην κατανομή των σωληνώσεων θέρμανσης και παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.6. Η κατανομή των σωληνών θέρμανσης στα επίπεδο του εδάφους, οροφής και στις πλευρές των θερμοκηπιακών μονάδων καταγράφηκε ως ο επικρατέστερος τρόπος κατανομής της παραγόμενης ποσότητας θέρμανσης και συμβάλει στην εξασφάλιση ομογενοποίησης του κλίματος στο εσωτερικό των μονάδων.

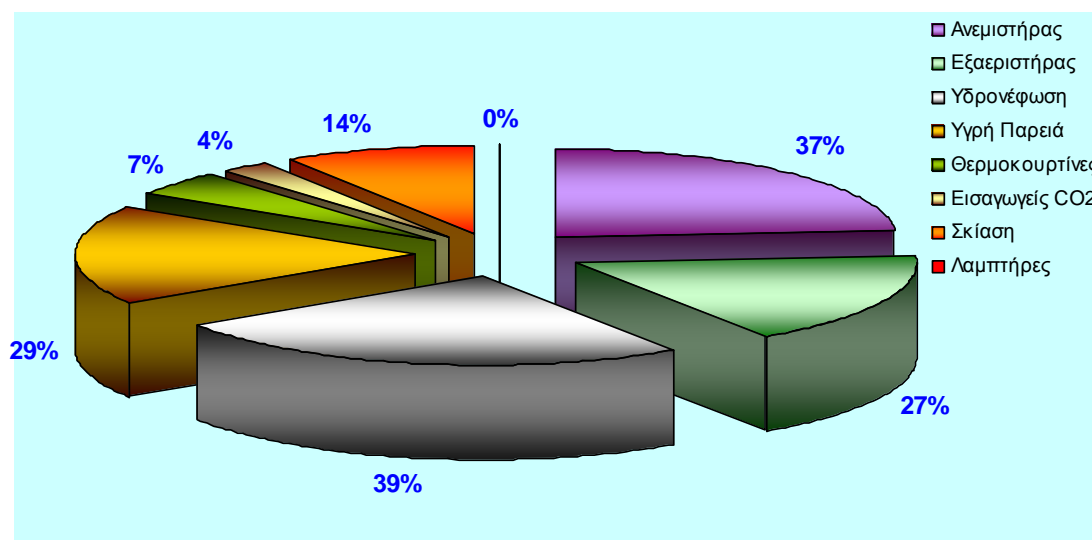


Σχήμα 5.6. Ποσοστιαία κατανομή της θέσης εφαρμογής των συστημάτων θέρμανσης

Η ορθή κατασκευή του θερμοκηπίου είναι η αρχική συνθήκη για την επίτευξη μιας επιτυχημένης παραγωγικής επιχείρησης, αλλά εξίσου αναγκαίο παράγοντα αποτελεί και ο κατάλληλος εξοπλισμός που επιτρέπει την ακριβή ρύθμιση των παραγόντων που διαμορφώνουν το περιβάλλον ανάπτυξης των καλλιεργειών. Ο συνήθης εξοπλισμός των θερμοκηπίων αποτελείται από τον εξοπλισμό για εξαερισμό, θέρμανση, φωτισμό, σκίαση, εμπλουτισμό με διοξείδιο του άνθρακα, άρδευση και αυτοματισμούς.

Η προμήθεια του πρόσθετου εξοπλισμού πραγματοποιείται με γνώμονα την αύξηση της παραγόμενης ποσότητας, τη βελτίωση της ποιότητας, τον καλύτερο προγραμματισμό της παραγωγής, την μείωση του κόστους των παραγόμενων προϊόντων. Στα πλαίσια της έρευνας διαπιστώθηκε η διαφορετική αντιμετώπιση του προβλήματος ελέγχου του κλίματος από τους παραγωγούς, καθώς η προμήθεια

πρόσθετος εξοπλισμός αποτελεί μια σύνθετη συνάρτηση με κύριο παράγοντα την οικονομική δυσχέρεια των παραγωγών λόγω της μειωμένης τιμής των παραγόμενων προϊόντων. Ο πρόσθετος εξοπλισμός αποτέλεσε μέρος της έρευνας καθώς συμβάλλει στη διαμόρφωση του κλίματος και οι επιλογές των παραγωγών στις μονάδες τους καταγράφηκε και εμφανίζεται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7. Ποσοστιαία κατανομή του εξοπλισμού των θερμοκηπιακών μονάδων

5.1.4. Είδη καυσίμων και κατανάλωση κατά τη χειμερινή περίοδο

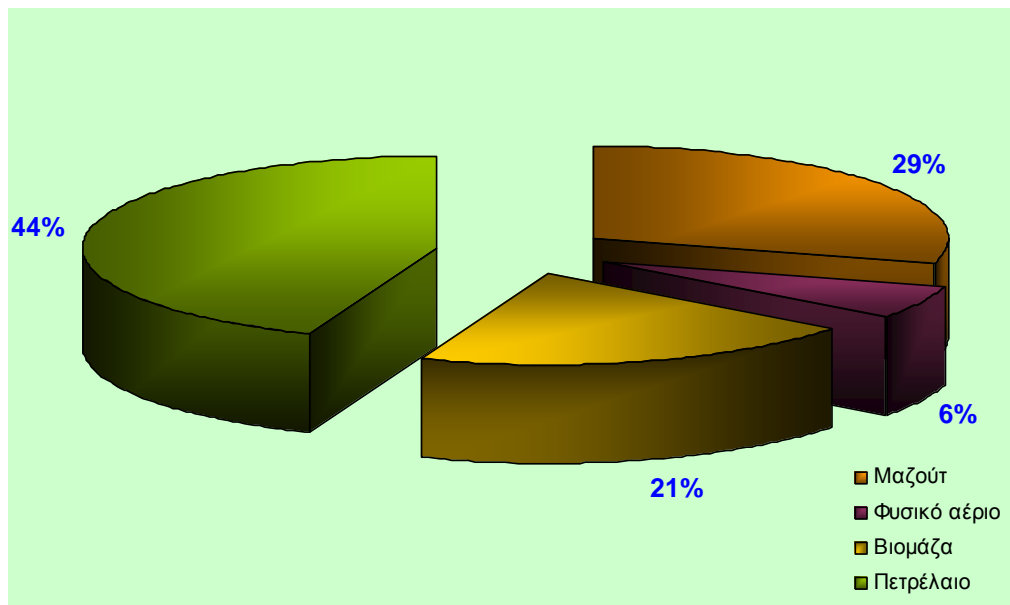
Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται διακρίνονται σε στερεά (π.χ. γαιάνθρακες), υγρά (π.χ. μαζούτ) και αέρια (π.χ. υγραέριο). Τα πλεονεκτήματα τους εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητά τους σε μια περιοχή, την τιμή κτήσεως τους, την αποδοτικότητα και από την μόλυνση που προκαλείται στο περιβάλλον.

Τα τελευταία 15 χρόνια η παραγωγή θερμότητας με καύση βιομάζας για θέρμανση θερμοκηπίων εξαπλώνεται με γρήγορους ρυθμούς στη χώρα μας. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στους εθνικούς και ευρωπαϊκούς πόρους που διατέθηκαν για την κατασκευή θερμοκηπίων με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με έμφαση στη θέρμανση από βιομάζα. Τα υποπροϊόντα φυτικής προέλευσης που χρησιμοποιούνται για παραγωγή θερμότητας ως βιομάζα διακρίνονται:

- ✚ Κλαδοδέματα
- ✚ Ξύλο
- ✚ Άχυρο

- ✚ Στελέχη βαμβακιού
- ✚ Κότσαλα καλαμποκιού
- ✚ Πυρηνόξυλο
- ✚ Τσόφλι αμυγδάλων

Η επιλογή των παραγωγών για θέρμανση των θερμοκηπίων τους συσχετίζεται άμεσα με την διαθεσιμότητα στην περιοχή όπου εδρεύει η εκμετάλλευση δικτύου παροχής φυσικού αερίου ή προμήθειας αντιπροσωπευτικής ποσότητας βιομάζας για τις ανάγκες της εκμετάλλευσης. Η απεικόνιση της ποσοστιαίας κατανομής παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.8. Η βιομάζα προέρχεται από ποσότητες πυρηνόξυλου και τσόφλια αμυγδάλων χωρίς όμως σύμφωνα με τους παραγωγούς η προμήθεια τους να παραμένει σταθερή καθόλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου καθώς παρατηρείται έλλειψη στην αγορά.



Σχήμα 5.8. Ποσοστιαία κατανομή τους είδους καυσίμων

Η εξάρτηση των παραγωγών από το πετρέλαιο και το μαζούτ σε συνολικό ποσοστό 73% προκαλεί προβληματισμό καθώς η άνοδος της τιμής του πετρελαίου προκαλεί αύξηση των εξόδων των παραγωγικών μονάδων, με άμεση συνέπεια την αύξηση στην τιμή των προϊόντων και τη μείωση της ζήτησης.

Η ερώτηση σχετικά με την κατανάλωση καυσίμων και την τιμή προμήθειας των καυσίμων δεν απαντήθηκε από τους παραγωγούς, καθώς δεν καταγράφονταν αναλυτικά η ημερομηνία προμήθειας, η ποσότητα και η τιμή των καυσίμων κατά την

χειμερινή καλλιεργητική περίοδο. Ενδεικτικά παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.1, οι τιμές των καυσίμων για την χειμερινή περίοδο 2004-2005, περίοδο καταγραφής της έρευνας.

Πίνακας 5.1. Μέσες τιμές καυσίμων τη χειμερινή περίοδο 2004-2005

Είδος Καυσίμου	Τιμή €	Μονάδα Μέτρησης	Ενέργεια	Μονάδα Μέτρησης
<i>Πετρέλαιο</i>	0.600	lt	36.00	MJ / lt
<i>Μαζούτ</i>	0.250	kg	41.00	MJ / kg
<i>Φυσικό Αέριο</i>	0.325	m ³	32.00	MJ / m ³
<i>Πυρηνόζυλο</i>	0.065	kg	16.32	MJ / kg
<i>Τσόφλι Αμυγδάλου</i>	0.040	kg	16.32	MJ / kg

5.1.5. Πρακτική των παραγωγών για τη διαμόρφωση του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπίων

5.1.5.1. Θέρμανση

Στα μεσογειακά θερμοκήπια, η θέρμανση κατά τη διάρκεια του χειμώνα αποτελεί έναν από τους κύριους παράγοντες κατανάλωσης ενέργειας στο θερμοκήπιο και αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσοστό του συνολικού κόστους λειτουργίας του. Μέχρι σήμερα η διαχείριση του κλίματος στην καθημερινή πρακτική περιορίζεται στη διαχείριση της θέρμανσης, μέσω του προσδιορισμού δύο επιθυμητών θερμοκρασιών ρύθμισης του θερμοστάτη. Η επιλογή των θερμοκρασιών αυτών γίνεται με βάση την εμπειρία του παραγωγού και αποσκοπεί κυρίως στην εξασφάλιση επιθυμητών συνθηκών για την ανάπτυξη των καλλιεργειών.

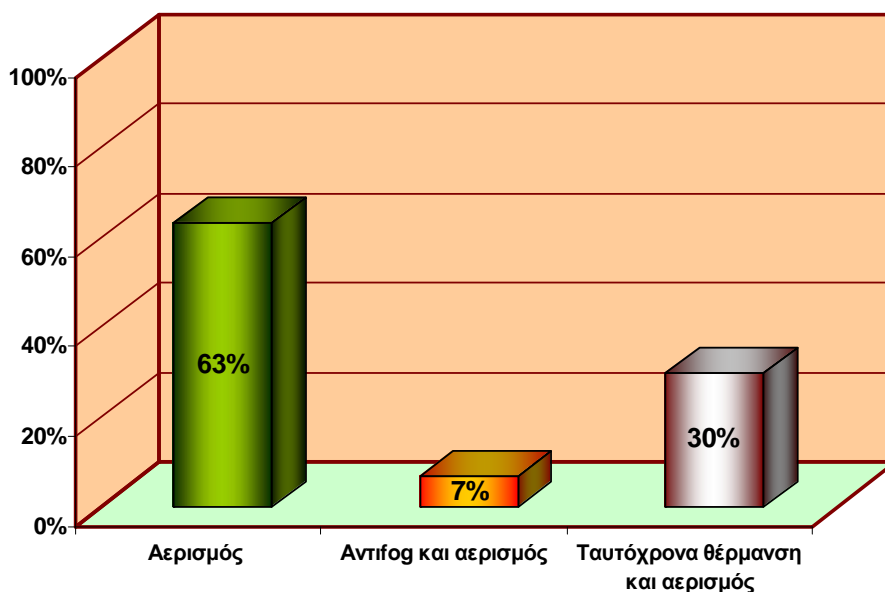
Η θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου συμβάλλει αποφασιστικά στη συμπεριφορά του φυτού, καθώς επηρεάζει το ρυθμό της φωτοσύνθεσης και επομένως την ανάπτυξη, το μήκος των μεσογονατίων διαστημάτων τον αριθμό των ανθέων, την καρπόδεση και ανάπτυξη του καρπού, την ποιότητα του καρπού. Η λήψη της απόφασης για τα βέλτιστα επίπεδα θερμοκρασίας που θα χρησιμοποιηθούν λαμβάνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις των φυτών αλλά και το κόστος της θέρμανσης. Οι θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της νύχτας δεν πρέπει να κατέρχονται κάτω από τους 15 °C, ενώ αντίστοιχα την ημέρα δεν θα πρέπει να ξεπερνούν τους 27 °C καθώς προκαλούνται προβλήματα στη βιολογία και φυσιολογία των φυτών.

Η απάντηση των παραγωγών στην ερώτηση αν στοχεύουν σε κάποια ελάχιστη θερμοκρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου κατά τη διάρκεια της νύχτας ήταν 12.2°C με απόκλιση ± 3.4 °C, ενώ το 40% των παραγωγών συμφώνησε ότι γίνεται συνδυασμένη χρήση των στατικών με τα θερμοδυναμικά συστήματα θέρμανσης. Τέλος το 63% επιβεβαίωσε ότι επιτυγχάνεται η επιθυμητή θερμοκρασία ενώ στις περιπτώσεις ακραίων συνθηκών υπάρχει μείωση της βέλτιστης τιμής στην προσπάθεια μείωσης του κόστους.

5.1.5.2. Φυσικός αερισμός

Ο φυσικός αερισμός είναι από τους σημαντικότερους παράγοντες ρύθμισης του εσωτερικού περιβάλλοντος του θερμοκηπίου. Η ροή του αέρα, όπως δημιουργείται από τη διαφορά πιέσεων στα ανοίγματα αερισμού ή από τα φαινόμενα άνωσης, ρυθμίζει τα επίπεδα θερμοκρασίας, υγρασίας και συγκέντρωσης του CO₂ στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Ο ρόλος του φυσικού αερισμού είναι ιδιαίτερα κρίσιμος σε θερμοκήπια που δε διαθέτουν εναλλακτικούς τρόπους εξαερισμού. Στις Ελληνικές κλιματικές συνθήκες οι ανάγκες για εξαερισμό είναι μεγάλες από νωρίς την άνοιξη έως αργά το φθινόπωρο. Καθοριστικός είναι ο ρόλος του αερισμού και κατά τη ψυχρή περίοδο του έτους, αφού χρησιμοποιείται για την αφύγρανση των θερμοκηπίων. Η θέση και το σχήμα των ανοιγμάτων αερισμού καθορίζουν ποιοτικά και ποσοτικά τη ροή αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, καθώς και τις ανταλλαγές ενέργειας και μάζας μεταξύ του εσωτερικού περιβάλλοντος και του εξωτερικού αέρα.

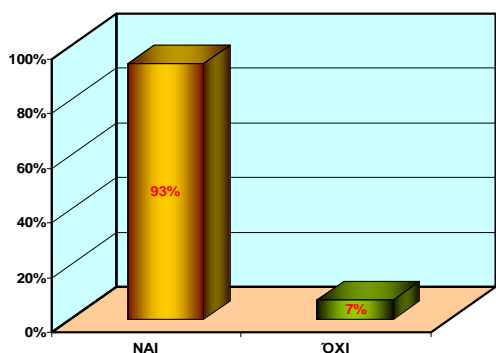
Οι παραγωγοί ερωτήθηκαν για την κυριότερη πρακτική που εφαρμόζουν για τη διαχείριση των υδρατμών κατά τη διάρκεια του χειμώνα και οι απαντήσεις τους καταγράφηκαν και παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.9. Η κυριότερη πρακτική για την αποφυγή ή μείωση των υγροποιήσεων αποτελεί το άνοιγμα των παραθύρων, ενώ σε ικανοποιητικό βαθμό 30% των παραγωγών απάντησαν ότι πραγματοποιούν ταυτόχρονη θέρμανση και αερισμό. Η χρονική διάρκεια ανοίγματος των παραθύρων διαφέρει ανάλογα με τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες και την όξυνση των φυτοπαθολογικών προβλημάτων, χωρίς όμως να καταγράφεται κάποια πάγια τακτική που να ακολουθείται από τους παραγωγούς.



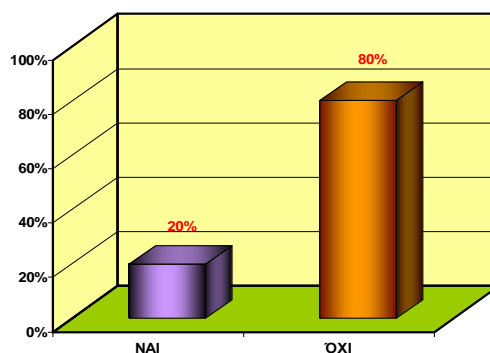
Σχήμα 5.9. Ποσοστιαία κατανομή ενεργειών για την αποφυγή των υγραποιήσεων

Η ροή του αέρα, που δημιουργείται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, επιδρά άμεσα τόσο στο μικροκλίμα του θερμοκηπίου, μεταβάλλοντας τη θερμοκρασία, το έλλειμμα κορεσμού και τη συγκέντρωση του CO₂ του αέρα, όσο και στην καλλιέργεια όσον αφορά την επίδραση στην αεροδυναμική αγωγιμότητα, αλλά και έμμεσα στις υπόλοιπες μεταβλητές και στις φυσιολογικές λειτουργίες της καλλιέργειας (θερμοκρασία, έλλειμμα κορεσμού καλλιέργειας-αέρα, στοματική αγωγιμότητα, διαπνοή).

Η μέθοδος αφύγρανσης των θερμοκηπίων με τη συνδυασμένη χρήση των συστημάτων θέρμανσης και αερισμού αποτελεί την πιο κλασική μέθοδο αφύγρανσης των θερμοκηπίων. Η μέθοδος συνίσταται στην αντικατάσταση του θερμού και υγρού αέρα με τον εξωτερικό που είναι πιο ψυχρός και θα έχει συνεπώς μικρότερη περιεκτικότητα υδρατμών. Οι απαντήσεις των παραγωγών που σχετίζονται με το πρόβλημα της υγραποίησης στο κάλυμμα και στην καλλιέργεια παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.10 α) και β). Παρατηρείται ότι το 93% απάντησαν καταφατικά για την περίπτωση υγραποίησης στο κάλυμμα, ενώ μόλις το 20% παρατήρησε υγραποιήσεις στην καλλιέργεια. Οι περισσότεροι ανέφεραν περιοδικά προβλήματα μυκητολογικών ασθενειών, που σχετίζονται με τον ελλιπή αερισμό, την εμφάνιση υγραποιήσεων καθώς και με την υψηλή σχετική υγρασία στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.



(α)



(β)

Σχήμα 5.10. Υγροποίηση στο κάλυμμα (α) και στην καλλιέργεια (β)

5.1.6. Καλλιεργητικές πρακτικές κατά την παραγωγική διαδικασία

Κορυφολόγημα: Το κορυφολόγημα εφαρμόζεται για να σταματήσει το φυτό να παράγει νέα φύλλα και ταξικαρπίες που δεν θα προλάβουν να ωριμάσουν και παράλληλα να αναγκαστεί να επιταχύνει την ωρίμανση των καρπών. Σύμφωνα με τις απαντήσεις η κορυφή του φυτού συνίσταται να αφαιρείται από τους παραγωγούς 2-3 μήνες πριν το τέλος της συγκομιδής (το χρονικό διάστημα είναι μικρότερο όταν οι θερμοκρασίες είναι υψηλές).

Αποφύλλωση: Καθώς τα φυτά μεγαλώνουν και όταν αρχίζει να ωριμάζει η πρώτη ταξιανθία, αρχίζει η διαδικασία της αποφύλλωσης, δηλ. της αφαίρεσης φύλλων που βρίσκονται κάτω από αυτή. Η αποφύλλωση γίνεται για να επιτραπεί ο καλύτερος φωτισμός των καρπών που βρίσκονται στο στάδιο ωρίμανσης, καθώς το άμεσο φως βελτιώνει την ποιότητα των καρπών. Ταυτόχρονα συμβάλλει στην διευκόλυνση της κυκλοφορίας του αέρα δια μέσου της φυλλικής επιφάνειας του φυτού και στον εξαερισμό του θερμοκηπίου καθώς συμβάλλει στη μείωση της υγρασίας της ατμόσφαιρας του θερμοκηπίου, η οποία είναι ιδιαίτερα υψηλή κατά τους χειμερινούς μήνες.

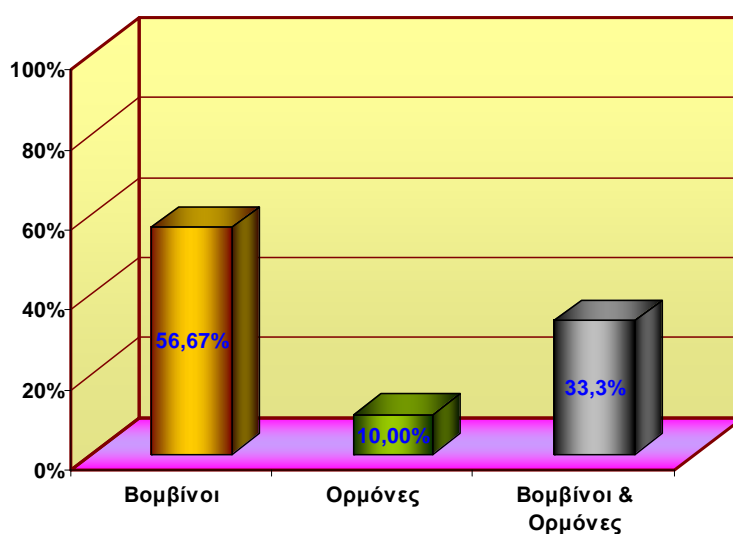
Τα φύλλα που αφαιρούνται δεν συνεισφέρουν στην παραγωγική διαδικασία καθώς δεν δέχονται αρκετή ηλιακή ακτινοβολία για φωτοσύνθεση. Η αποφύλλωση συνεχίζεται μετά τη συγκομιδή των καρπών της κατώτερης ταξικαρπίας και όταν αρχίζει να ωριμάζει η αμέσως επόμενη ταξικαρπία. Η αφαίρεση φύλλων όταν ακόμη είναι φωτοσυνθετικά ενεργά και χρήσιμα στην παραγωγική διαδικασία των φυτών

έχει σαν συνέπεια την οψίμιση και τη μείωση της παραγωγής καθώς μειώνεται η φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών.

Οι παραγωγοί στους οποίους απευθύνθηκε η έρευνα αφαιρούν τα φύλλα μετά την συγκομιδή της κάθε ταξικαρπίας και το χρονικό διάστημα είναι περίπου μία φορά κάθε δύο βδομάδες. Η απομάκρυνση των μασχαλιαίων γίνεται με συχνότητα μία φορά κάθε βδομάδα.

Επικονίαση: Υψηλές αποδόσεις από καλλιέργειες τομάτας στο θερμοκήπιο εξασφαλίζονται μόνον όταν τα άνθη καρποδέσουν ικανοποιητικά, που προϋποθέτει μια ολοκληρωμένη επικονίαση. Για την βέλτιστη επικονίαση των φυτών χρησιμοποιούνται καρποδετικές ορμόνες ή έντομα. Οι πιο συνηθισμένες καρποδετικές ορμόνες που χρησιμοποιούνται είναι: i). το β-ναφθοξυοξικό οξύ (β-NAA), ii). 4-παραχλωροφαινοξυοξικό οξύ (4-CPA, iii). το 2,4-διχλωροφαινοξυοξικό οξύ (2,4D). Η επικονίαση των φυτών μπορεί να επιτευχθεί και από το έντομο *Bombus terrestris* γνωστό ως βομβύνος. Οι βομβύνοι επισκέπτονται τα ανοικτά άνθη της τομάτας για τη συλλογή της γύρης και στην προσπάθεια για ικανοποίηση των δικών τους διατροφικών αναγκών «ανακατώνουν» το άνθος και γυρεόκοκκοι φεύγουν από τους ανθήρες και επικάθονται επί τους στίγματα και έτσι συμβάλλουν στη φυσική επικονίαση.

Οι απαντήσεις που δόθηκαν από τους παραγωγούς χαρακτηρίζουν την τάση που επικρατεί στην επικονίαση της καλλιέργειας της τομάτας και παρατηρείται στο Σχήμα 5.11.

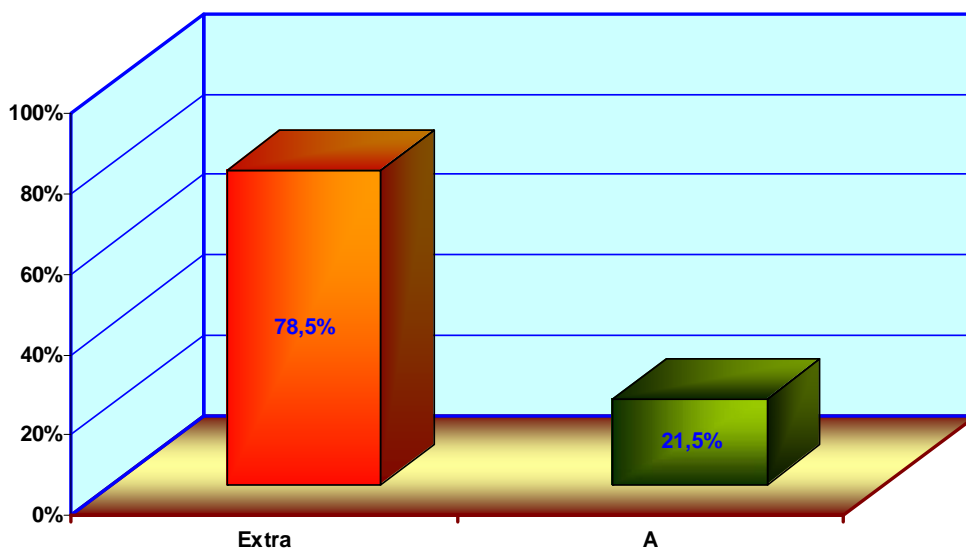


Σχήμα 5.11. Ποσοστιαία κατανομή της μεθόδου επικονίασης των φυτών

Η χρήση των βομβίνων για την επικονίαση των ανθέων θεωρείται ως φυσικός τρόπος επικονίασης και είναι η τάση που ακολουθείται από ολοένα και μεγαλύτερη μερίδα παραγωγών (56.67%) σύμφωνα με την έρευνα που πραγματοποιήθηκε, καθώς αναρμονίζεται με τα πρότυπα της ολοκληρωμένης διαχείρισης των καλλιεργειών και την παραγωγή ποιοτικών προϊόντων. Η ολοκληρωμένη διαχείριση της παραγωγικής διαδικασίας αναμένεται να αυξήσει την τελική πρόσοδο των παραγωγών.

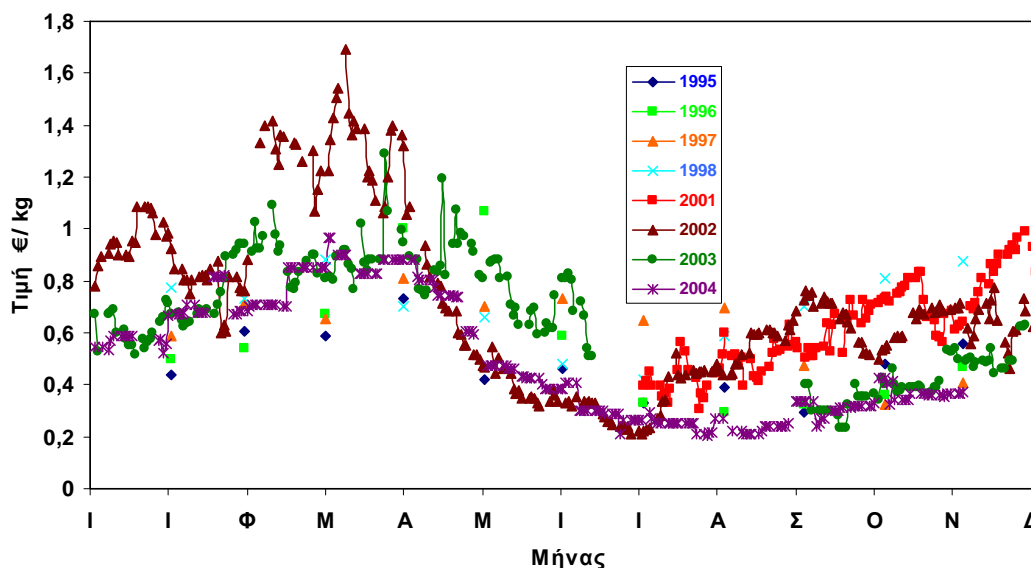
5.1.7. Ακαθάριστη πρόσοδος των παραγωγών

Στην ελληνική αγορά για τα περισσότερα κηπευτικά θερμοκηπίου δεν υπάρχει διαφοροποίηση τιμών στις ποιότητες Extra και A με συνέπεια το συγκριτικό πλεονέκτημα της παραγωγής καλύτερης ποιότητας προϊόντων όταν θερμαίνεται το θερμοκήπιο δεν οδηγεί πάντα σε οικονομικό όφελος για τον παραγωγό. Στην Β. Ευρώπη υπάρχει υποχρεωτικός διαχωρισμός ποιότητων και διαφοροποίηση τιμών στις διάφορες ποιότητες. Η κατανομή των παραγόμενων ποσοτήτων τομάτας σε ποιότητες Extra και A, σύμφωνα με τους παραγωγούς παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.12. Κριτήριο των παραγωγών για την θέρμανση των θερμοκηπίων στη βέλτιστη θερμοκρασία αποτελεί κυρίως η πρωίμηση της παραγωγής και επίτευξη της ημερομηνίας στόχου για μεγιστοποίηση των κερδών τους, παρά η παραγόμενη ποιότητα των προϊόντων.



Σχήμα 5.12. Ποσοστιαίος διαχωρισμός των ποιοτήτων τομάτας σε Extra και A

Ολόκληρη σχεδόν η παραγόμενη ποσότητα τομάτας στα θερμοκήπια προορίζεται για εσωτερική κατανάλωση. Οι τιμές χονδρικής πώλησης της νωπής τομάτας στις Κεντρικές Λαχαναγορές Αθηνών και Θεσσαλονίκης για τη δεκαετία 1995 - 2004 εμφανίζονται στο Σχήμα 5.13. Παρατηρείται ότι οι πιο υψηλές τιμές κάθε χρόνο εξασφαλίζονται τους μήνες Μάρτιο, Απρίλιο, Μάιο και Δεκέμβριο, αποτέλεσμα της αυξημένης ζήτησης λόγω του Πάσχα και των Χριστουγέννων και μειωμένης προσφοράς του προϊόντος την συγκεκριμένη περίοδο. Η στόχευση των παραγωγών θα πρέπει να είναι ανάλογη με την περίοδο αυξημένης ζήτησης κάτι που προϋποθέτει προγραμματισμό τόσο για την περίοδο μεταφύτευσης των φυτών όσο και στον έλεγχο του κλίματος στις θερμοκηπιακές μονάδες.

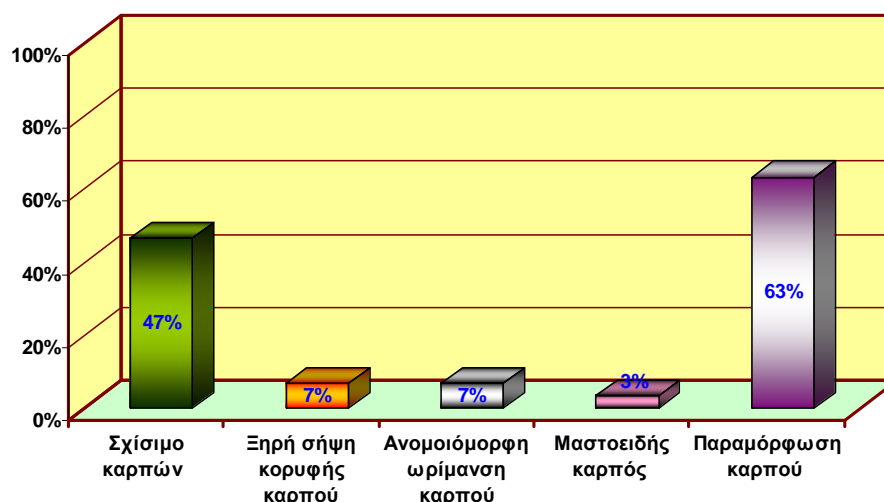


Σχήμα 5.13. Διακύμανση τιμής (€/ kg) χονδρικής πώλησης νωπής τομάτας στις Κεντρικές Λαχαναγορές Αθηνών-Θεσσαλονίκης, κατά την περίοδο 1995-2004

5.1.8. Μέθοδοι φυτοπροστασίας και οικονομικές συνέπειες από τη μη ορθή εφαρμογή κατά την καλλιεργητική περίοδο

5.1.8.1. Ανωμαλίες στον καρπό

Η παρατήρηση του Σχήμα 5.14 εξηγεί τα προβλήματα που παρουσιάζονται κατά την καλλιεργητική περίοδο στους συγκομιζόμενους καρπούς, με κύρια προβλήματα σύμφωνα με τους παραγωγούς την παραμόρφωση των καρπών και το σχίσσιμο.



Σχήμα 5.14. Ποσοστιαία κατανομή ανωμαλιών του καρπού

Σχίσσιμο ή σχάσιμο του καρπού. Το φαινόμενο εμφανίζεται κυρίως με την άνοδο της θερμοκρασίας κυρίως την άνοιξη και το καλοκαίρι και είναι πιο έντονο σε πλαστικά θερμοκήπια με προβληματικό εξαερισμό. Επιτείνεται όταν υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις θερμοκρασίας και υγρασίας στο θερμοκήπιο και όσο πλησιάζει ο καρπός στην ωρίμανσή του.

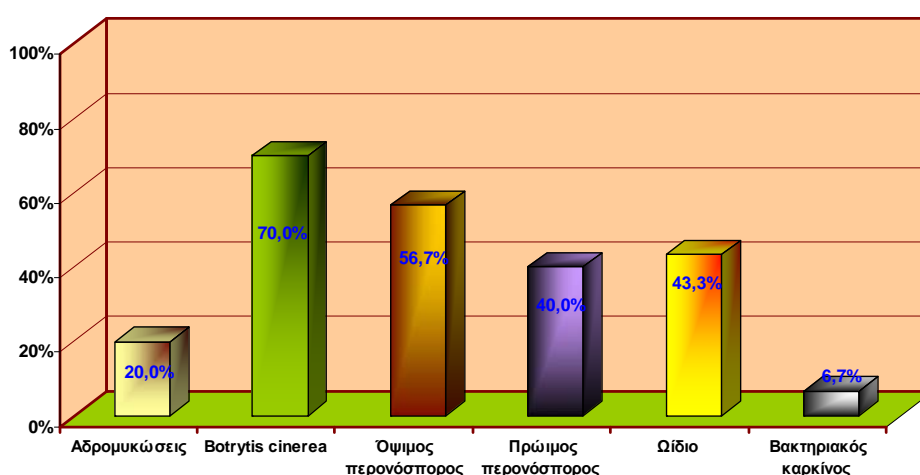
Παραμόρφωση καρπού. Ο καρπός παραμορφώνεται γιατί σχηματίζονται υπερπλασίες και σχισμές στην αντίθετη του ποδίσκου περιοχή. Η ανωμαλία παρατηρείται κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο, καθώς η γενετική προδιάθεση εκδηλώνεται όταν οι συνθήκες κατά την άνθηση δεν είναι οι πιο κατάλληλες. Πιθανόν και να οφείλεται και σε άλλα αίτια όπως η αντίδραση ορμονικά παρασκευάσματα.

5.1.8.2. Μυκητολογικές Ασθένειες

Η αυξημένη περιεκτικότητα του αέρα του θερμοκηπίου σε υγρασία είναι από τους ευνοϊκότερους παράγοντες για την εξάπλωση των μυκητολογικών ασθενειών. Οι περισσότεροι μύκητες απαιτούν μια υγρή επιφάνεια να περιβάλλει τα σπόρια τους,

έτσι ώστε αυτά να αναπτυχθούν. Η ύπαρξη αυξημένης υγρασίας οδηγεί στη δημιουργία συμπυκνώσεων στην επιφάνεια των φύλλων και στο εσωτερικό του καλύμματος του θερμοκηπίου με αποτέλεσμα οι μύκητες να βρίσκουν πρόσφορο έδαφος και να αναπτύσσονται ταχύτατα.

Οι κυριότερες μυκητολογικές ασθένειες που καταγράφηκαν από τις απαντήσεις των παραγωγών για την εμφάνισή τους στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων είναι η φαιά σήψη (*Botrytis cinerea*), ο όψιμος και ο πρώιμος περονόσπορος (*Phytophthora infestans*), το ωίδιο (*Leveillula taurica*), οι αδρομυκώσεις (*Verticillium dahliae* και *Fusarium oxysporum*) και το βακτηριακό έλκος (*Clavibacter michiganensis*) και παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.15.



Σχήμα 5.15. Ποσοστιαία κατανομή μυκητολογικών ασθενειών

Η παρατήρηση των απαντήσεων των παραγωγών στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζει ως πρώτιστο πρόβλημα κατά την καλλιεργητική περίοδο την ασθένεια του Βοτρώτη, καθώς η εξάπλωση του οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις καλλιεργητικές πρακτικές που ακολουθούν οι παραγωγοί. Το πρόβλημα του Βοτρώτη καθώς και των υπολοίπων μυκητολογικών ασθενειών οδηγεί σε μείωση της ποσότητας και ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Βασικός παράγοντας στην ανάπτυξη και στην εξάπλωση των περισσότερων ασθενειών αποτελεί η υψηλή σχετική υγρασία του αέρα που αναπτύσσεται στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου.

Φαιά Σήψη (*Botrytis cinerea*). Η ασθένεια είναι κυρίως γνωστή και σαν Βοτρώτης. Αναπτύσσεται σε υγιείς, εξασθενημένους ή νεκρούς φυτικούς ιστούς.

Προσβάλλει φυτά όλων των ηλικιών και όλα σχεδόν τα μέρη τους (φύλλα, άνθη, καρπούς, στελέχη, ρίζες) και προκαλεί συμπτώματα διαφόρων τύπων. Στους υδαρείς καρπούς και τρυφερούς βλαστούς για φυτά τομάτας, η προσβεβλημένη περιοχή αρχικά έχει ανοικτό πράσινο χρώμα και αργότερα ανοικτό καστανό. Απαραίτητες συνθήκες για την ανάπτυξη της ασθένειας είναι η υψηλή σχετική υγρασία του περιβάλλοντος.

Στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες δημιουργεί νεκρωτικές αλλοιώσεις στα φύλλα. Σε περιπτώσεις σοβαρής προσβολής μπορεί να καταστραφεί ολόκληρο το φύλλωμα του φυτού. Οι μίσχοι των φυτών μπορεί να προβληθούν απευθείας από το μύκητα, είτε μέσω του μίσχου είτε μέσω τραυμάτων, που προκλήθηκαν από το κλάδεμα ή τη συγκομιδή. Τέτοιες προσβολές μπορούν καταστρέψουν ολόκληρο το φυτό και να προκαλέσουν σημαντική μείωση της ποιότητας (Jarvis 1989). Τα προσβεβλημένα από το μύκητα άνθη μπορεί να μην εξελιχθούν καν σε καρπούς ή εάν εξελιχθούν να δώσουν καρπούς κατώτερης ποιότητας.

Τα κονίδια του μύκητα αναπτύσσονται κυρίως σε περιβάλλον με αυξημένη υγρασία (> 85%), εξαπλώνονται ταχύτατα και περιορίζουν σημαντικά την ποιότητα και την ποσότητα παραγωγής. Ο μύκητας δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητος στη διακύμανση της θερμοκρασίας γιατί μπορεί να αναπτυχθεί σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται μεταξύ 1 και 30 °C. Βέλτιστες θερμοκρασίες για την προσβολή είναι από 10 έως 20 °C (Elad 1989, Yunis *et al.* 1990, Jarvis 1980, Salinas *et al.* 1989). Συμπερασματικά κυριότερος παράγοντας για την ανάπτυξη του μύκητα είναι η υγρασία του αέρα, αφού ο μύκητας αναπτύσσεται ταχύτατα όταν το έλλειμμα κορεσμού του αέρα παίρνει τιμές μικρότερες από 0.5 kPa.

Η σωστή διαχείριση του κλίματος κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου δύναται να συμβάλλει στη μείωση των προσβολών από τις μυκητολογικές ασθένειες και να οδηγήσει σε αύξηση της παραγωγής και βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων.

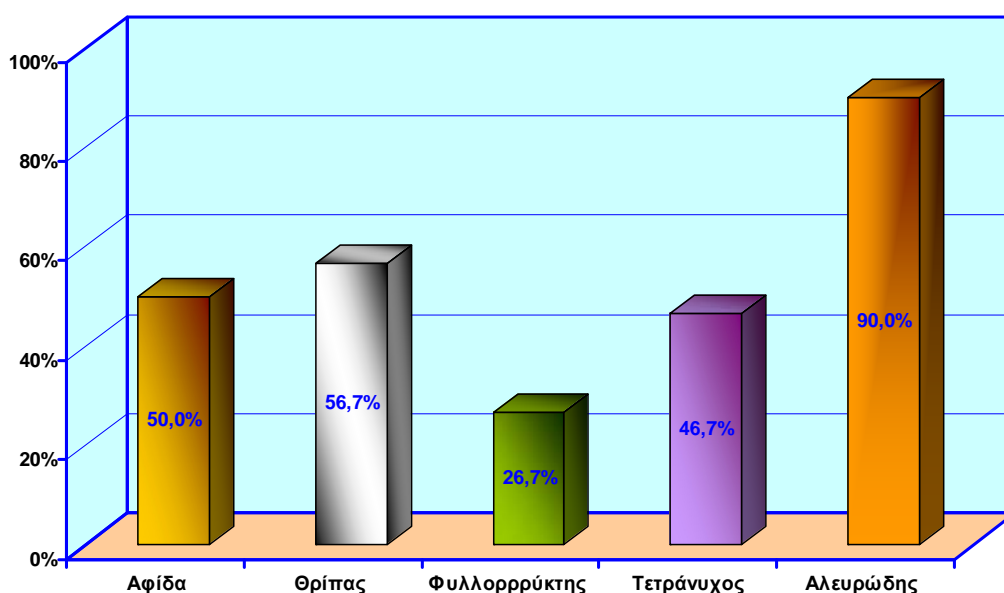
5.1.8.3. Προσβολές από έντομα

Τα ανοίγματα αερισμού και η μη χρήση διχτύων εντομοστεγανότητας αποτελούν τους βασικότερους παράγοντες για την είσοδο στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων εντόμων που προσβάλλουν την καλλιέργεια. Η γειτνίαση των θερμοκηπίων

με καλλιεργούμενες εκτάσεις και η μεταναστευτική διάθεση των εντόμων αποτελούν το πρωταρχικό αίτιο για την είσοδο και αύξηση του πληθυσμού στις υπό κάλυψη καλλιέργειες.

Τα κυριότερα έντομα που καταγράφηκαν από τις απαντήσεις των παραγωγών για την εμφάνιση τους στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων είναι ο αλευρώδης (*Trialeurodes vaporariorum*), ο θρίπας (*Thrips tabaci*), η αφίδα (διάφορα είδη), τετράνυχος (*Tetranychus urticae*), ο φυλλορρόκτης (*Liriomyza solani*).

Η ανάλυση των απαντήσεων των παραγωγών στο Σχήμα 5.16 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κύριο πρόβλημα αποτελεί η παρουσία του αλευρώδη. Σημαντικά όμως μεγέθη αποτελούν και τα ποσοστά εμφανίσεως του θρίπα, της αφίδας και του τετράνυχου.



Σχήμα 5.16. Ποσοστιαία κατανομή προσβολών από έντομα

Αλευρώδης (*Trialeurodes vaporariorum*). Ζει και ωτοκεί στην κάτω επιφάνεια των φύλλων. Ο διαχειμάζων πληθυσμός αποτελείται κυρίως από αυγά και προνύμφες πρώτου σταδίου. Τη θερμή περίοδο του έτους οι γενεές αλληλοκαλύπτονται. Εκτός από την αφαίρεση θρεπτικών ουσιών από τα φύλλα, τα άφθονα μελιτώδη αποχωρήματα προνυμφών και ενηλίκων ευνοούν την εγκατάσταση μυκήτων της καπνιάς που περιορίζουν τη φωτοσυνθετική ικανότητα του φυλλώματος και μειώνουν την εμπορική αξία των καρπών. Πυκνό φύλλωμα και υψηλή σχετική υγρασία ευνοούν τη δημιουργία πυκνών πληθυσμών.

Η χρήση των κατάλληλων δικτύων εντομοστεγανότητας και η κατάλληλη διαχείριση του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων θα μπορούσε να συμβάλει στην μείωση και τον καλύτερο έλεγχο του πληθυσμού στο εσωτερικό των μονάδων. Ασφαλώς η συνεχής παρατήρηση και η σωστή καταπολέμηση πριν τη πληθυσμιακή έξαρση θα συμβάλλουν στην αύξηση της παραγωγής και στη συγκομιδή ποιοτικών προϊόντων.

5.2. Συζήτηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις απαντήσεις των παραγωγών

Οι απαντήσεις των παραγωγών που παρουσιάστηκαν στις πρώτες τέσσερις ενότητες του κεφαλαίου μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως κατασκευαστικά οι παραγωγοί επιλέγουν τα τροποποιημένα τοξωτά θερμοκήπια, τα καλύπτουν με πολυαιθυλένιο, ενώ ταυτόχρονα τα εξοπλίζουν και με ανοίγματα αερισμού τόσο πλευρικά όσο και οροφής. Επιπλέον στο ηπειρωτικό κομμάτι της χώρας επιλέγουν να εξοπλίσουν τα θερμοκήπια με συστήματα θέρμανσης (αερόθερμα και επιδαπέδια συστήματα) ενώ ταυτόχρονα προσπαθούν να επιτύχουν ισοκατανομή της παραγόμενης ποσότητας της θέρμανσης και τοποθετούν τα συστήματα στο έδαφος, πλευρικά και στην οροφή, με στόχο την καλύτερη διαχείριση του κλίματος. Τέλος κύρια καύσιμη ύλη αποτελούν πετρέλαιο και μαζούτ με συνολικό ποσοστό 73%, αν και υπάρχουν περιπτώσεις παραγωγών που επιλέγουν τη χρήση βιομάζας όταν υπάρχει επάρκεια στην ευρύτερη περιοχή και διαθεσιμότητα για όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Προχωρώντας στην πρακτική που ακολουθούν για τη διαμόρφωση του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων θα εστιάσουμε αρχικά στο γεγονός ότι οι περισσότεροι από τους παραγωγούς απάντησαν καταφατικά στην ερώτηση αν παρατηρούν υγραποιήσεις στην επιφάνεια το καλύμματος κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έχουν εντοπίσει το πρόβλημα της υγρασίας στο εσωτερικό των θερμοκηπίων ενώ προσπαθούν να αφυγράνουν κατά κύριο λόγο με αερισμό και δευτερεύοντα με ταυτόχρονη θέρμανση και αερισμό. Παρ'όλα αυτά δεν γνωρίζουν σε ημερήσια βάση το πότε και το πόσο πρέπει να ανοίξουν τα ανοίγματα αερισμού κατά τη χειμερινή περίοδο προκειμένου να επιτύχουν ικανοποιητική αφύγρανση και αποφυγή μυκητολογικών ασθενειών.

Παράλληλα για τη θέρμανση της καλλιέργειας της τομάτας παρατηρήθηκε ότι η μέση τιμή χρήση από τους παραγωγούς ήταν οι 12.2 °C θερμοκρασία κατώτερη από τα βέλτιστα επίπεδα για την ανάπτυξη των φυτών, ενώ σε περιπτώσεις εξαιρετικά χαμηλών θερμοκρασιών η τιμή στόχος κατέρχεται και άλλο. Αυτό σε συνδιασμό τη διακύμανση των τιμών των καυσίμων που παρατηρήθηκε τα τελευταία χρόνια και τη μεγάλη εξάρτηση των μονάδων από το πετρέλαιο και τα παράγωγά του οδηγεί τους παραγωγούς στην αλλαγή στρατηγικής κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής

περιόδου. Τέλος οι περισσότεροι από τους παραγωγούς δεν χρησιμοποιούν τα συστήματα θέρμανση για να αυξήσουν τη θερμοκρασία παρά μόνο κατά τις κρίσιμες περιόδους με εξαιρετικά χαμηλές εξωτερικές θερμοκρασίες. Άμεση συνέπεια ο σχεδιασμός της περιόδου πώλησης να εξαρτάται από τις κλιματικές συνθήκες χωρίς οι παραγωγοί να επεμβαίνουν, είτε για να διαφοροποιήσουν την ημερομηνία συγκομιδής, είτε την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Σε αυτό συμβάλλει και το γεγονός ότι ο ποιοτικός διαχωρισμός των παραγόμενων ποσοτήτων τομάτας έχει μόνο δύο κατηγορίες την Extra και την A, κάτι που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5.12, με συνέπεια τη έλλειψη κινήτρου στους παραγωγούς για παραγωγή προϊόντων εξαιρετικής ποιότητας.

Η στόχευση των παραγωγών θα έπρεπε να είναι ανάλογη με τις περιόδους αυξημένης ζήτησης κάτι που στην χώρα μας συνεχίζει να είναι ιδιαίτερα εμφανής όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 5.13, σε αντίθεση με τις περισσότερες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης όπου η τιμή του προϊόντος παραμένει σταθερή καθόλη τη διάρκεια του έτους. Η στόχευση όμως προϋποθέτει προγραμματισμό τόσο για την περίοδο μεταφύτευσης των φυτών όσο και στον έλεγχο του κλίματος στις θερμοκηπιακές μονάδες.

Στα φυτοϋγειονομικά προβλήματα ως πρώτιστο παρουσιάστηκε το πρόβλημα της ασθένειας του Βοτρύτη καθώς η εξάπλωση της ασθένειας οδηγεί σε μείωση της ποσότητας και ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Οι παραγωγοί έδειξαν να γνωρίζουν ότι ο βασικός παράγοντας στην ανάπτυξη και στην εξάπλωση των περισσότερων ασθενειών αποτελεί η υψηλή σχετική υγρασία του αέρα που αναπτύσσεται στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου.

Σύμφωνα με την εισαγωγή σκοπός της έρευνας, ήταν η διαμόρφωση των κριτηρίων, που λαμβάνουν υπόψη τους οι παραγωγοί για τη διαχείριση του κλίματος, κατά τη χειμερινή περίοδο σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις στο Μεσογειακό χώρο. Οι απαντήσεις που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στις παραπάνω ενότητες οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι τα κριτήρια που χρησιμοποιούν οι παραγωγοί για κάθε δική τους ενέργεια έχουν σχέση τόσο με την μεταχείριση της καλλιέργειας, όσο και την διαμόρφωση του κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

Πρώτιστος στόχος των παραγωγών αποτελεί η μείωση του κόστους παραγωγής και πιο συγκεκριμένα η κατανάλωση καυσίμων που επιβαρύνει σημαντικά τον προϋπολογισμό των θερμοκηπιακών μονάδων. Για τη μείωση της κατανάλωσης καταφεύγουν στη μείωση της θερμοκρασίας στόχου τις κρίσιμες ημέρες με χαμηλές

θερμοκρασίες. Μείωση όμως των θερμοκρασιών στο εσωτερικό των θερμοκηπίων οδηγεί σε υστέρηση την παραγωγή και καθυστέρηση στην ημερομηνία συγκομιδής, με συνέπεια τη διαφοροποίηση της στρατηγικής που αρχικά διαμορφώνεται από τους παραγωγούς. Αυτό συνεπάγεται σε πολλές περιπτώσεις μείωση της τιμής πώλησης του παραγόμενου προϊόντος με άμεση συνέπεια τη μείωση της κερδοφορίας της επιχείρησης.

Σημαντικό στόχο για τους παραγωγούς αποτελεί και η αποφυγή φυτοϋγειονομικών προβλημάτων κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν ο προβληματισμός τους εστιάζεται στον Βοτρύτη αν και γνωρίζουν ότι τα αυξημένα επίπεδα υγρασίας στο εσωτερικό των μονάδων συμβάλλουν στην εμφάνιση και την εξάπλωση του μύκητα. Παρόλα αυτά συνεχίζουν να παρατηρούν κατά τη χειμερινή περίοδο υγροποίησης στην επιφάνεια του καλύμματος κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν επιτυγχάνεται βέλτιστη δυνατή αφύγρανση του θερμοκηπίου παρά τις προσπάθειες τους. Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι γνωρίζουν το πρόβλημα χωρίς όμως να γνωρίζουν το πώς θα επιτύχουν τη βέλτιστη δυνατή λύση του.

Τέλος η αύξηση της παραγωγής και η βελτίωση της ποιότητας είναι κάτι που επιθυμούν να επιτύχουν εστιάζοντας τις έως τώρα προσπάθειές τους, στη χρήση βομβινών και καρποδετικών ορμονών, για την επικονίαση των φυτών. Ταυτόχρονα δίνουν ιδιαίτερη βαρύτητα στη θρέψη των φυτών μη δίνοντας ανάλογη βαρύτητα στον έλεγχο των κλιματικών συνθηκών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Παράλληλα η αύξηση της παραγωγής και η βελτίωση της ποιότητας για τους παραγωγούς, είναι συνάρτηση της τιμής που διαμορφώνεται στην αγορά για την τομάτα, τιμή που παρουσιάζει ιδιαίτερες διακυμάνσεις ανάλογα με το έτος, την περιοχή και την καλλιεργητική περίοδο. Σε περιπτώσεις όπου η ζήτηση παρουσιάζεται μειωμένη οι παραγωγοί προτιμούν να διακόψουν την παραγωγή τομάτας και να πραγματοποιήσουν εναλλαγή της καλλιέργειας.

Η επίτευξη ταυτόχρονα των παραπάνω στόχων δεν είναι πάντα εφικτή και για αυτό το λόγω είναι απαραίτητη η βέλτιστη λύση συνδυασμού επιμέρους στόχων. Η μείωση του κόστους παραγωγής και η αύξηση της παραγωγής είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αλληλοκρουόμενων στόχων. Η δημιουργία και χρήση λογισμικού που θα διαμορφώνει τη στρατηγική που θα πρέπει να ακολουθηθεί ανάλογα με τις ανάγκες και το σχεδιασμό των παραγωγών αποτελεί μια λύση του

προβλήματος. Οι επιμέρους στόχοι που θα δύναται να επιτευχθούν με τη χρήση του λογισμικού, θα είναι:

- i. Η αύξηση της παραγωγής
- ii. Η βελτίωση της ποιότητας
- iii. Η μείωση του κόστους
- iv. Η αποφυγή φυτοϋγειονομικών προβλημάτων

Η υλοποίηση του λογισμικού θα πρέπει καλύπτει την ανάγκη να παρουσιάζονται οι συνέπειες μιας προσχεδιασμένης στρατηγικής διαχείρισης ώστε να συμβάλει στη μείωση του ρίσκου των παραγωγών κατά την καλλιεργητική περίοδο και στη αύξηση της κερδοφορίας της επιχείρισης.

Κεφάλαιο 6°. Βαθμονόμηση & επιβεβαίωση κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)

6. Βαθμονόμηση & επιβεβαίωση κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)

6.1. Αποτελέσματα κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)

6.1.1. Βαθμονόμηση κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή αφορούν μετρημένες και υπολογισμένες τιμές κατά τη βαθμονόμηση του κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC) από την 28^η Σεπτεμβρίου 2007 έως την 25^η Φεβρουαρίου 2008 και αναφέρονται στην:

- ✘ Θερμοκρασία αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας, εδάφους
- ✘ Σχετική υγρασία του αέρα και τη διαπνοή της καλλιέργειας
- ✘ Καθαρή θερμική ακτινοβολία καλύμματος, καλλιέργειας, εδάφους
- ✘ Ηλιακή ακτινοβολία και τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία (PAR)

Για την βαθμονόμηση του κλιματικού προσομοιώματος απαιτήθηκε ο στατιστικός προσδιορισμός των παραμέτρων των μαθηματικών εξισώσεων. Τα στοιχεία για τις τιμές των σταθερών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από αναζήτηση της βιβλιογραφίας και από τις τιμές των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του κλιματικού προσομοιώματος.

Πίνακας 6.1. Τιμές παραμέτρων προσδιορισμού του κλιματικού προσομοιώματος

Σύμβολο	Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
A_c	επιφάνεια καλύμματος	303	m^2
A_{gr}	επιφάνεια εδάφους	160	m^2
$albedo$	ανάκλαση των κατασκευαστικών υλικών του θερμοκηπίου	5	-
$Blanch$	ποσοστό επικάλυψης της επιφάνειας του καλύμματος με υλικό σκίασης	0	-
c'_c	ειδική θερμότητα του καλύμματος	725	$J m^{-2} K^{-1}$
C_d	συντελεστής ανεμοπίεσης	0.60	-
c_i	θερμοχωρητικότητα του αέρα	1000	$J kg^{-1} K^{-1}$
c_s	θερμοχωρητικότητα του εδάφους	700	$J kg^{-1} K^{-1}$
c_v	θερμοχωρητικότητα της καλλιέργειας	4180	$J kg^{-1} K^{-1}$
C_w	συντελεστής ανεμοφόρτησης	0.11	-

d_c	χαρακτηριστικό μήκος του καλύμματος	1.7	m
d_s	χαρακτηριστικό μήκος του εδάφους	10	m
d_v	χαρακτηριστικό μήκος της καλλιέργειας	0.2	m
Dv	συντελεστής μοριακής διάχυσης των υδρατμών	$2.49 \cdot 10^{-5}$	$m^2 s^{-1}$
g	επιτάχυνση βαρύτητας	9.81	$m s^{-2}$
h_{fg}	λανθάνουσα θερμότητα συμπίκνωσης του νερού	$2.46 \cdot 10^6$	$J kg^{-1}$
k_v	καλλιεργητικός συντελεστής μείωσης της ακτινοβολίας	0.61	-
l_s	λεπτότητα στρώματος εδάφους	0.10	m
p_l	πλάτος διπλής σειράς της καλλιέργειας	1.0	m
Pr	αδιάστατος αριθμός Prandtl	0.71	-
S_f	επιφάνεια διαφυγών	0.50	m^2
S_o	επιφάνεια ανοίγματος παραθύρων	27	m^2
Tr_{con}	περατότητα του υλικού κάλυψης	0.75	-
Tr_{gh}	περατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από το θερμοκήπιο	0.65	-
V	όγκος θερμοκηπίου	572	m^3
w_l	πλάτος διπλών σειρών	0.75	m
$\alpha_{Sc,dif}$	απορροφητικότητα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας	0.13	-
$\alpha_{Sc,dir}$	απορροφητικότητα της απευθείας ηλιακής ακτινοβολίας	0.04	-
β	συντελεστής θερμικής διαστολής του αέρα	0.00342	K^{-1}
γ	ψυχομετρική σταθερά	0.066	$kPa K^{-1}$
ε_{ce}	εκπεμπικότητα της εξωτερικής επιφάνειας του καλύμματος	0.23	-
ε_{ci}	εκπεμπικότητα της εσωτερικής 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	0.05	-
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_{fr}	περατότητα ηλιακής ακτινοβολίας μέσω των παραθύρων	0.85	-
τ_{sv}	περατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας από την καλλιέργεια	0.30	-

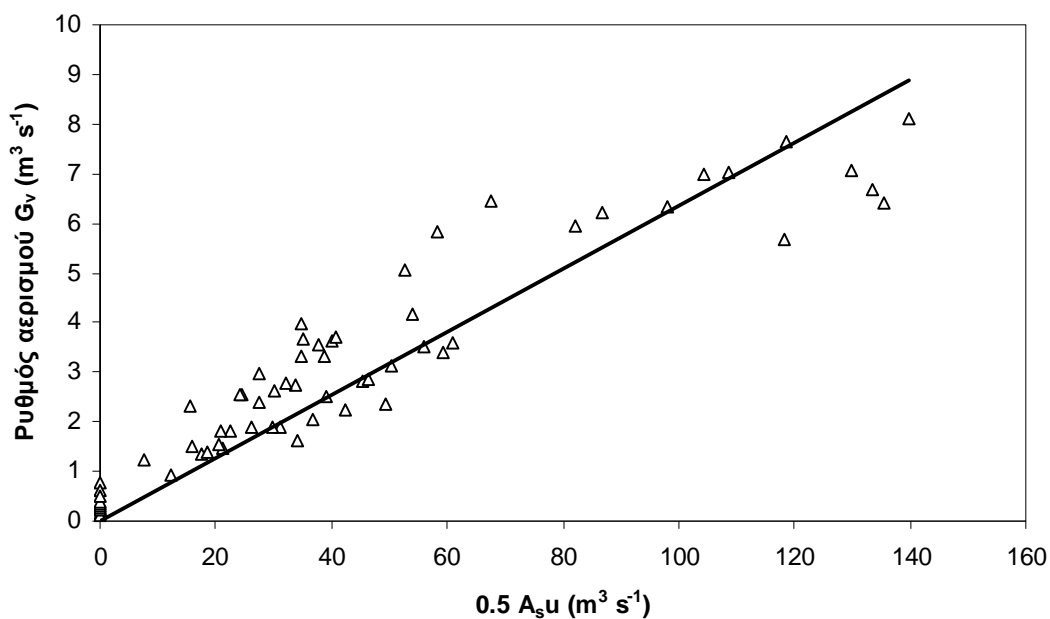
6.1.1.1. Βαθμονόμηση συντελεστών ανεμοφόρτησης και ανεμοπίεσης για τον υπολογισμό αερισμού του πειραματικού θερμοκηπίου

Ο υπολογισμός της τιμής του γινομένου των συντελεστών ανεμοφόρτησης και ανεμοπίεσης $C_d \cdot \sqrt{C_w}$, υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση 3.8. Στα Σχήματα 6.1 και 6.2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του ρυθμού αερισμού του θερμοκηπίου, χωρίς την παρουσία καλλιέργειας και με καλλιέργεια, σε σχέση με τη μισή επιφάνεια ανοίγματος των παραθύρων και την ταχύτητα του αέρα (A_{su}). Στα Σχήματα 6.1 και 6.2 παρουσιάζεται η 1:1 ευθεία γραμμή που προέκυψε από τη συσχέτιση των τιμών.

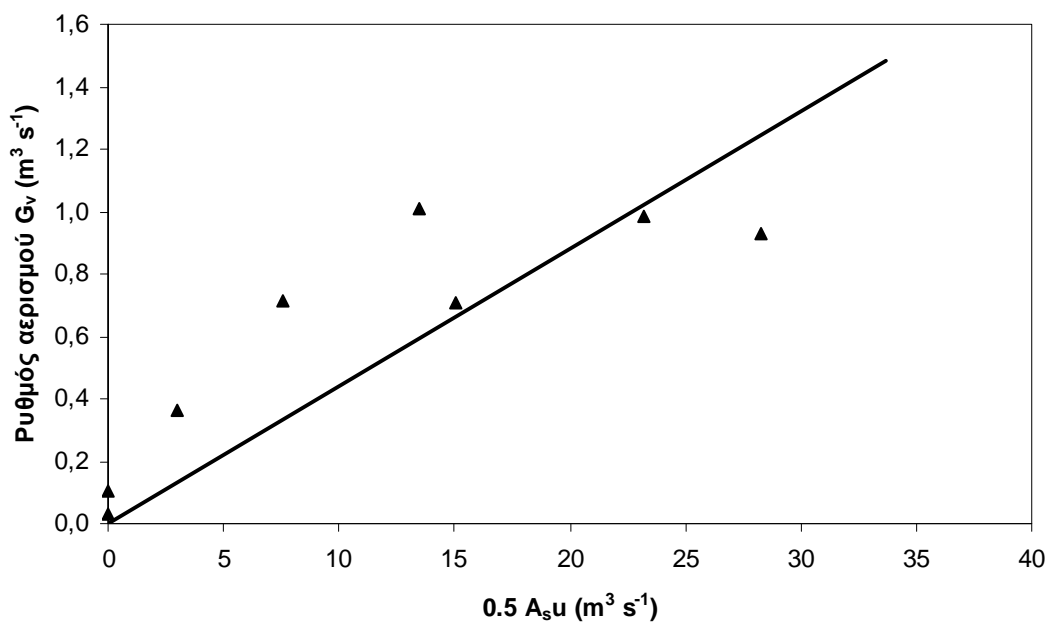
Οι τιμές που υπολογίστηκαν για το γινόμενο $C_d \cdot \sqrt{C_w}$ είναι ιδιαίτερα χαμηλές (0.0635 πλαϊνά ανοίγματα χωρίς την παρουσία καλλιέργειας και 0.0540 χρήση πλαϊνών ανοιγμάτων με καλλιέργεια) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Η παρουσία της καλλιέργειας προκάλεσε μείωση του ρυθμού αερισμού και ειδικότερα του γινομένου, κατά 15%. Αντίστοιχα χαμηλές τιμές για το γινόμενο $C_d \cdot \sqrt{C_w}$ έχουν αναφερθεί από τους Boulard *et al.* (1997), Fatnassi *et al.* (2003) και Perez Parra *et al.* (2004). Οι χαμηλές τιμές για το γινόμενο $C_d \cdot \sqrt{C_w}$ ιδιαίτερα στην περίπτωση ύπαρξης καλλιέργειας μπορούν να εξηγηθούν από το γεγονός ότι τα φυτά είχαν ύψος 1.6m και δημιουργούσαν ένα τοίχος μεταξύ των πλευρικών ανοιγμάτων. Μείωση του ρυθμού αερισμού από την παρουσία καλλιέργειας έχει επίσης αναφερθεί από τους Boulard *et al.* (1997).

Πίνακας 6.2. Υπολογισμένες τιμές και τυπικό σφάλμα του του γινομένου των συντελεστών ανεμοφόρτησης και ανεμοπίεσης $C_d \cdot \sqrt{C_w}$.

Ημερομηνία	Ανοίγματα	Καλλιέργεια	Αριθμός Μετρήσεων	$C_d \cdot \sqrt{C_w}$	R^2
4/5/2006	Πλαϊνά	Όχι	64	0.0635±0.0042	0.83
5/4/2006	Πλαϊνά	Ναι	8	0.0540±0.0067	0.74



Σχήμα 6.1. Μετρημένος ρυθμός αερισμού (G_v) σε σχέση με τη μισή επιφάνεια ανοίγματος των παραθύρων και την ταχύτητα του αέρα ($A_s u$), σε θερμοκήπιο με πλευρικά ανοίγματα χωρίς καλλιέργεια, η ευθεία γραμμή υπολογίστηκε από γραμμική συσχέτιση.



Σχήμα 6.2. Μετρημένος ρυθμός αερισμού (G_v) σε σχέση με τη μισή επιφάνεια ανοίγματος των παραθύρων και την ταχύτητα του αέρα ($A_s u$), σε θερμοκήπιο με πλευρικά ανοίγματα με καλλιέργεια, η ευθεία γραμμή υπολογίστηκε από γραμμική συσχέτιση.

6.1.1.2. Υπολογισμός της θερμοκρασίας αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας, εδάφους (κατά τη βαθμονόμηση του SimGreC)

Η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας και του εδάφους, για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.3(a-d), 6.5(a-d), 6.7(a-d) και 6.9(a-d). Η τάση της καμπύλης για τις υπολογισμένες τιμές είναι παρόμοια με αυτή των μετρημένων τιμών για τις θερμοκρασίες του αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας και του εδάφους. Για όλες τις πειραματικές περιπτώσεις παρατηρείται ότι η κλίση της καμπύλης για τις περιόδους αύξησης και μείωσης της θερμοκρασίας για τις μετρημένες και υπολογισμένες τιμές είναι οι ίδιες. Τα Σχήματα 6.4(a-d), 6.6(a-d), 6.8(a-d) παρουσιάζουν την 1:1 καμπύλη, μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών.

Τα Σχήματα 6.4 (a), (b), (c), (d) και ο Πίνακας 6.3, αποδεικνύουν ότι το Κλιματικό προσομοίωμα (SimGreC), έκανε ακριβή εκτίμηση για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας του αέρα. Η στατιστική ανάλυση επιβεβαιώνει την 1:1 καμπύλη καθώς ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών προσδιορίστηκε μεταξύ 79 και 95% ενώ η μέση τιμή της διαφοράς των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών υπολογίστηκε από 0.1 έως 2.1 °C. Τέλος η ποσοστιαία διαφορά τους ήταν μικρότερη του 6.1% και για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους και αυτό μπορεί να χαρακτηρίσει ικανοποιητική τη συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του προσομοιωτή (SimGreC) και των πραγματικών πειραματικών δεδομένων. Στις μισές πειραματικές περιόδους ο προσομοιωτής (SimGreC) υπέρ-εκτιμά την θερμοκρασία του αέρα.

Η εκτίμηση της θερμοκρασίας του καλύμματος παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.6 (a), (b), (c), (d) και στον Πίνακα 6.3. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι υπολογισμένες τιμές του προσομοιώματος ταίριαζαν πολύ καλά με τις μετρημένες τιμές. Ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών προσδιορίστηκε μεταξύ 93 και 98%, ενώ η μέση τιμή της διαφοράς των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών υπολογίστηκε από 0.1 έως 1.5 °C. Τέλος η ποσοστιαία διαφορά τους ήταν μικρότερη του 12.7% και για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους και αυτό μπορεί να χαρακτηρίσει ικανοποιητική τη συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του

προσομοιωτή (SimGreC) και των πραγματικών πειραματικών δεδομένων. Κύρια ο προσομοιωτής (SimGreC) υπό-εκτιμά την θερμοκρασία του καλύμματος.

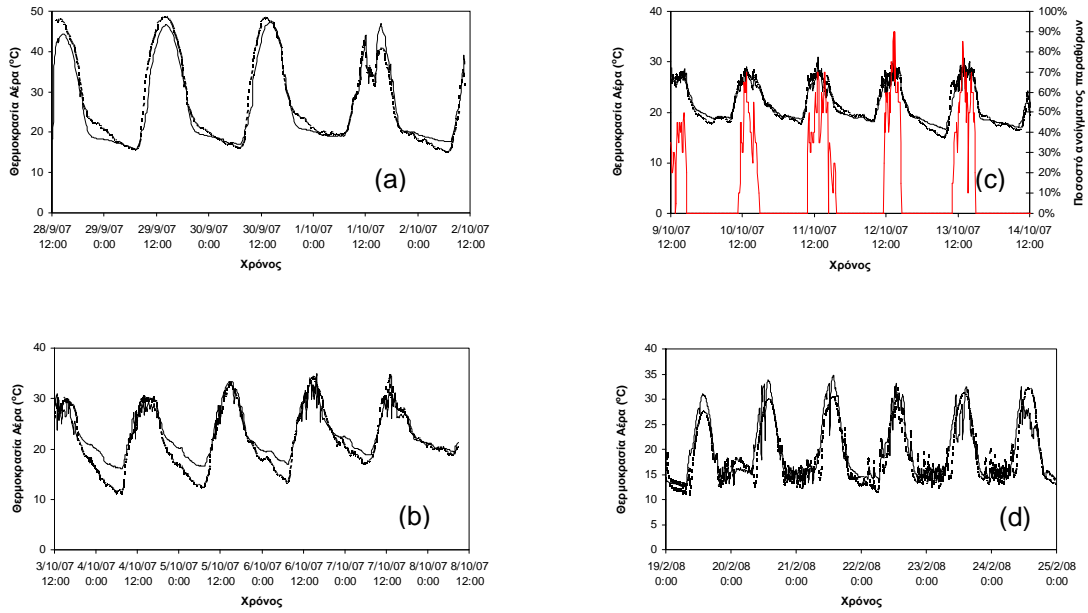
Τα Σχήματα 6.8 (b), (c), (d) και ο Πίνακας 6.3 απέδειξαν ότι ο προσομοιωτής (SimGreC) έκανε εκτίμηση με ακρίβεια και για την θερμοκρασία της καλλιέργειας. Ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών προσδιορίστηκε μεταξύ 79 και 87% ενώ η μέση τιμή της διαφοράς των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών υπολογίστηκε από 0.2 έως 0.7 °C. Τέλος η ποσοστιαία διαφορά τους ήταν μικρότερη του 3.9% και για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους και αυτό μπορεί να χαρακτηρίσει ικανοποιητική τη συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του προσομοιωτή (SimGreC) και των πραγματικών πειραματικών δεδομένων.

Πίνακας 6.3. 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.

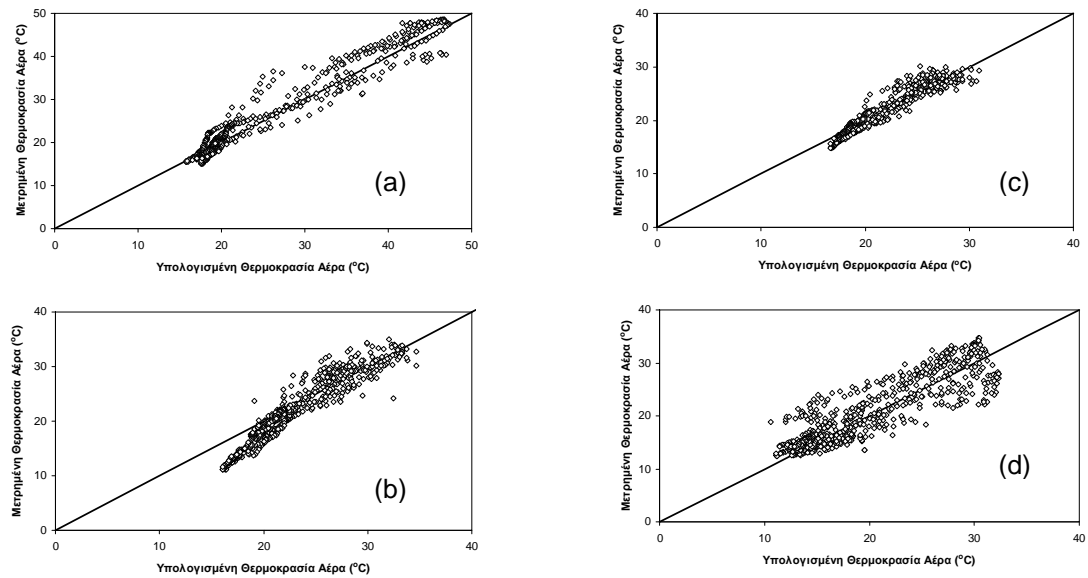
Πειραματική περίοδος	Θερμοκρασία Αέρα				
	r^2	dif	std	%	
1 ^η	0.95	2.1	3.5	5.1	o.e
2 ^η	0.86	1.1	1.4	6.1	u.e
3 ^η	0.91	0.1	0.8	0.2	u.e
4 ^η	0.79	0.7	1.8	4.8	o.e
	Θερμοκρασία Καλύμματος				
	r^2	dif	std	%	
1 ^η	0.98	0.1	1.4	2.1	u.e
2 ^η	0.97	1.5	1.1	8.0	u.e
3 ^η	0.93	0.3	1.1	2.2	o.e
4 ^η	0.94	1.0	1.3	12.7	u.e
	Θερμοκρασία Καλλιέργειας				
	r^2	dif	std	%	
1 ^η	-	-	-	-	-
2 ^η	0.87	0.7	1.4	3.4	u.e
3 ^η	0.86	0.6	0.8	3.9	o.e
4 ^η	0.79	0.2	2.1	0.4	o.e
	Θερμοκρασία Εδάφους				
	r^2	dif	std	%	
1 ^η	0.43	0.1	0.8	0.3	u.e
2 ^η	0.58	0.9	0.6	3.5	u.e
3 ^η	0.49	0.6	0.5	2.5	o.e
4 ^η	0.45	0.6	0.9	2.8	u.e

* o.e: υπέρ-εκτίμηση

** u.e: υπό-εκτίμηση

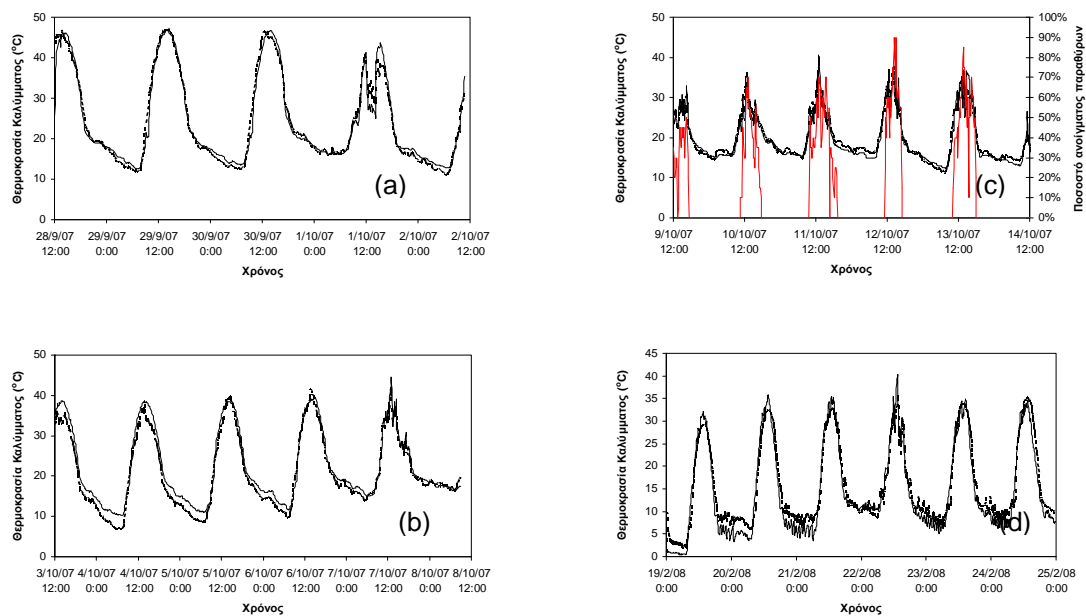


Σχήμα 6.3 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (— —) τιμών της θερμοκρασίας του αέρα, για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους.

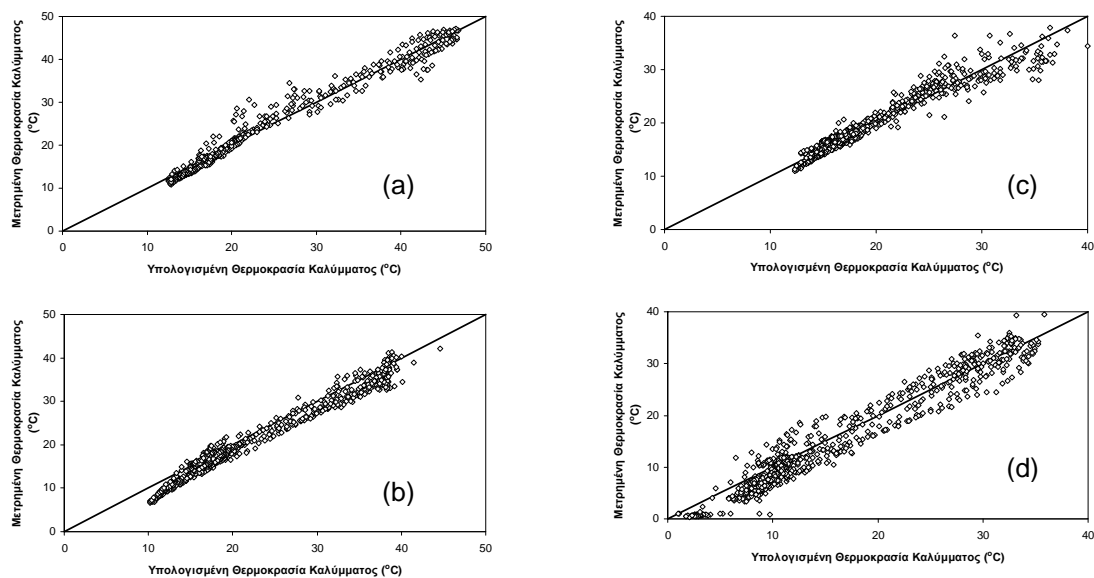


Σχήμα 6.4. (a), (b), (c), (d). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του αέρα σε (1:1) απεικόνιση, για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους.

* Με (-) διακρίνεται το ποσοστιαίο άνοιγμα των παραθύρων

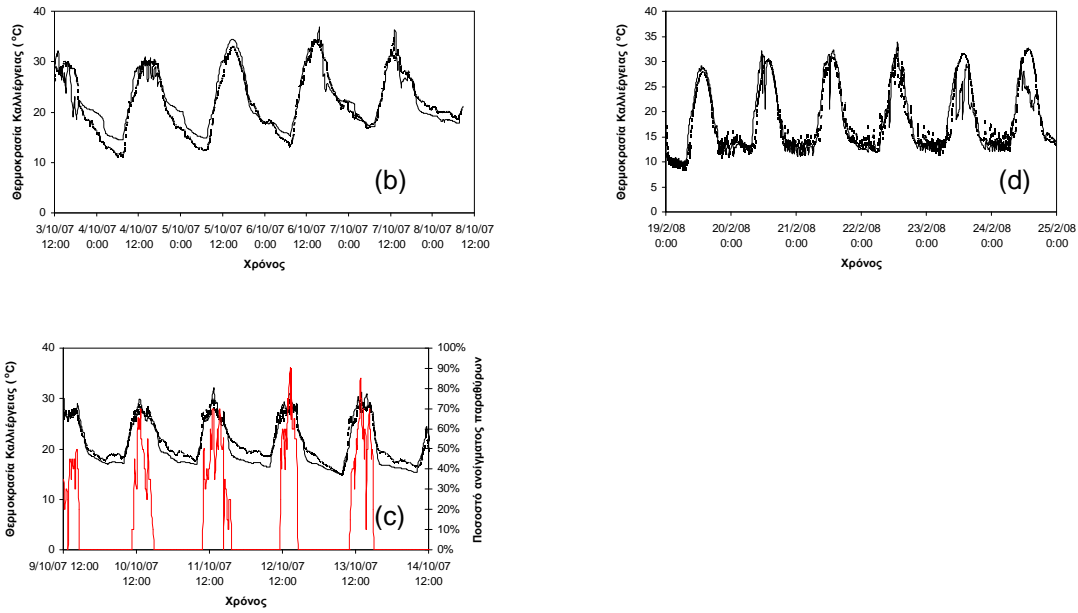


Σχήμα 6.5 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος, για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους.

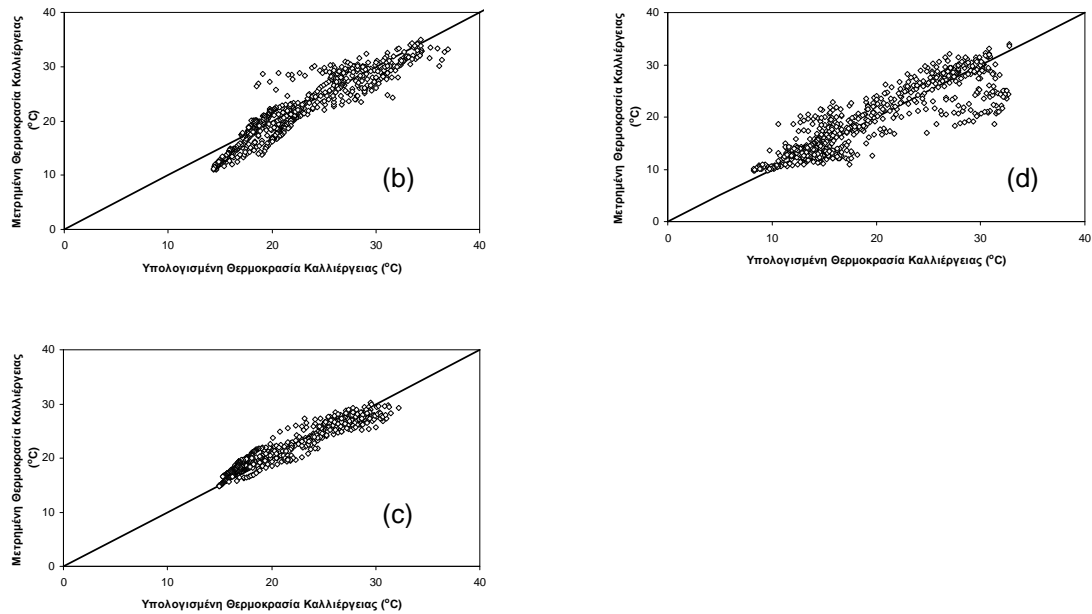


Σχήμα 6.6 (a), (b), (c), (d). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας του καλύμματος σε (1:1) απεικόνιση, για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους.

* Με (-) διακρίνεται το ποσοστιαίο άνοιγμα των παραθύρων

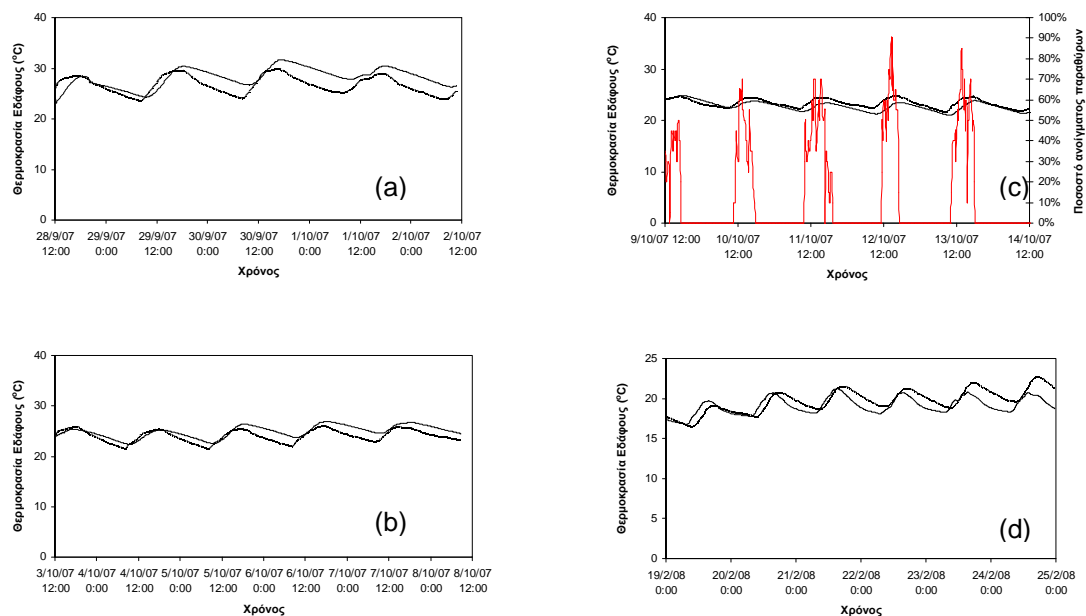


Σχήμα 6.7 (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της θερμοκρασίας της καλλιέργειας, για τις τρεις πειραματικές περιόδους.



Σχήμα 6.8 (a), (b), (c), (d). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της θερμοκρασίας της καλλιέργειας σε (1:1) απεικόνιση, για τις τρεις πειραματικές περιόδους.

* Με (-) διακρίνεται το ποσοστιαίο άνοιγμα των παραθύρων



Σχήμα 6.9 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της θερμοκρασίας του εδάφους, για τις τέσσερις πειραματικές περιόδους.

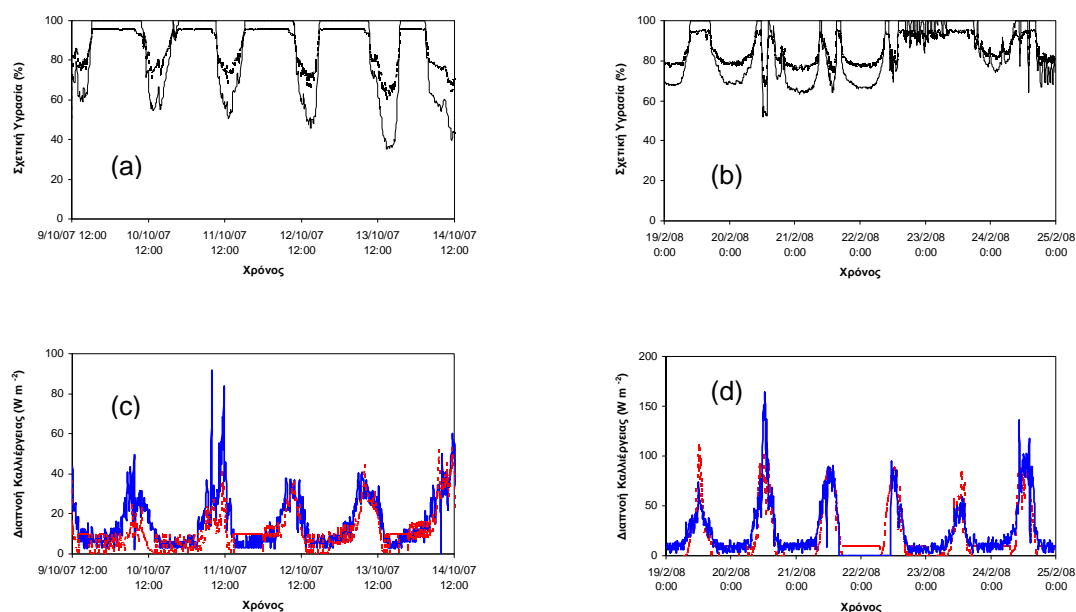
* Με (-) διακρίνεται το ποσοστιαίο άνοιγμα των παραθύρων

Η εκτίμηση της θερμοκρασίας του εδάφους παρουσιάζεται στα Σχήματα 6.9 (a), (b), (c), (d) και στον Πίνακα 6.3. Η τάση που διατυπώνεται από την καμπύλη δεν είναι τόσο ικανοποιητική όσο παρουσιάστηκε στα αντίστοιχα αποτελέσματα της θερμοκρασίας του αέρα, του καλύμματος και της καλλιέργειας. Η παρατήρηση των αποτελεσμάτων της θερμοκρασίας του εδάφους απέδειξε ότι παρουσιάζει κάποιες διαφορές στα σημεία εναλλαγής της κλίσης της καμπύλης, δηλαδή στα υψηλά και χαμηλά σημεία προσδιορισμού.

Άμεση συνέπεια σύμφωνα με τα Σχήματα 6.9 (a), (b), (c), (d) η υπό-εκτίμηση της θερμοκρασίας του εδάφους για όλες τις πειραματικές περιόδους. Ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών κυμάνθηκε από 43 έως 58% ενώ η μέση τιμή της διαφοράς των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών υπολογίστηκε από 0.1 έως 0.9 °C. Τέλος η ποσοστιαία διαφορά τους ήταν μικρότερη του 3.5%. Κύρια ο προσομοιωτής (SimGreC) υπό-εκτιμά την θερμοκρασία του εδάφους.

6.1.1.3. Υπολογισμός της σχετικής υγρασίας του αέρα και της διαπνοής της καλλιέργειας (κατά τη βαθμονόμηση του SimGreC)

Τα Σχήματα 6.10 (a), (b), (c), (d), παρουσιάζουν τις διαφορές μεταξύ των υπολογισμένων τιμών του προσομοιωτή (SimGreC) και των μετρημένων τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα και της διαπνοής της καλλιέργειας κατά την 3^η (9/10/07 - 14/10/07) and 4^η (19/2/08 - 25/2/08) πειραματική περίοδο αντίστοιχα. Το ισοζύγιο μάζας του αέρα βαθμονομήθηκε με σεβασμό σε δύο τύπους κλιματικών συνθηκών που επικρατούν στο περιβάλλον χώρο του θερμοκηπίου, i). φθινοπωρινές κλιματικές συνθήκες, όπου το άνοιγμα των παραθύρων ελέγχονταν αυτόματα από το MACQU και ii). χειμερινών κλιματικών συνθηκών, όπου το θερμοκήπιο ήταν τελείως κλειστό και δεν υπήρξε άνοιγμα των παραθύρων, με συνέπεια την μη ανανέωση της εσωκλειστης ποσότητας του αέρα. Η κλίση της καμπύλης των υπολογισμένων τιμών από τον προσομοιωτή (SimGreC), είναι κοινή με τις πειραματικές τιμές τόσο για τη σχετική υγρασία του αέρα, όσο και για τη διαπνοή της καλλιέργειας.



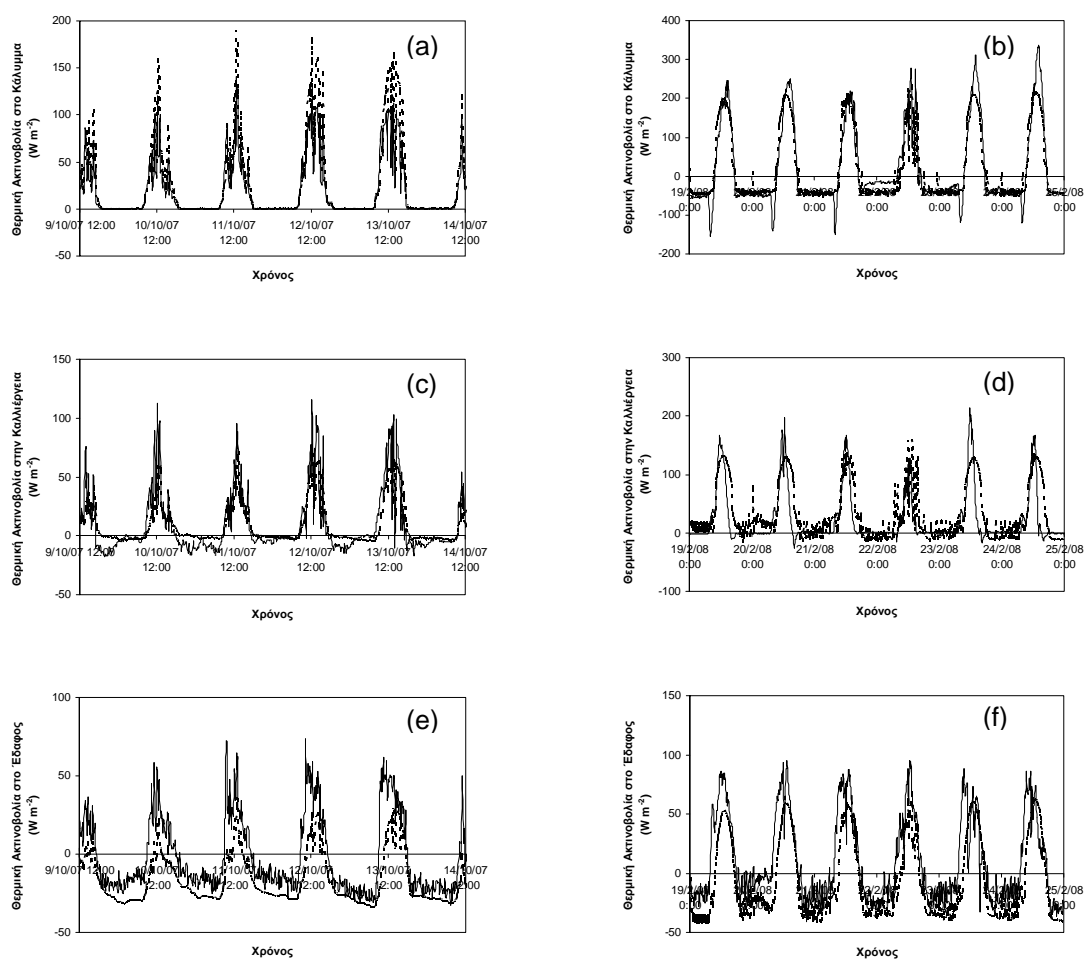
Σχήμα 6.10 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της σχετικής υγρασίας και των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της διαπνοής της καλλιέργειας, για δύο από τις τέσσερις πειραματικές περιόδους.

Στα παραπάνω Σχήμα 6.10 (a), (b), (c), (d) παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του προσομοιωτή (SimGreC) παρουσιάζουν κάποιες διαφορές με τις μετρημένες τιμές. Η πλειοψηφία των ασυμφωνιών που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα, μπορεί να εξηγηθούν από τους παρακάτω παράγοντες: i). τα φαινόμενα συμπύκνωσης στην επιφάνεια του καλύμματος του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα σημαντικά στις περιπτώσεις που το θερμοκήπιο είναι τελείως κλειστό, όπου ο μη ακριβής υπολογισμός τους οδηγεί σε υπό-εκτίμηση του ισοζυγίου μάζας του αέρα ii). την επίδραση του αερισμού όταν το άνοιγμα των παραθύρων ελέγχονταν αυτόματα από το MACQU με συνέπεια την έλλειψη ακρίβειας υπολογισμού των ανανεώσεων της μάζας του αέρα.

Ο προσομοιωτής (SimGreC) υπέρ-εκτιμά τη σχετικής υγρασία του αέρα του θερμοκηπίου, κατά τη διάρκεια των δύο πειραματικών περιόδων ενώ ταυτόχρονα υπό-εκτιμά τη διαπνοή της καλλιέργειας. Τέλος παρατηρήθηκαν κάποιες ασυμφωνίες και κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν το θερμοκήπιο ήταν τελείως κλειστό και το σύστημα θέρμανσης λειτουργούσε κανονικά.

6.1.1.4. Υπολογισμός της καθαρής θερμικής ακτινοβολίας καλύμματος, καλλιέργειας, εδάφους (κατά τη βαθμονόμηση του SimGreC)

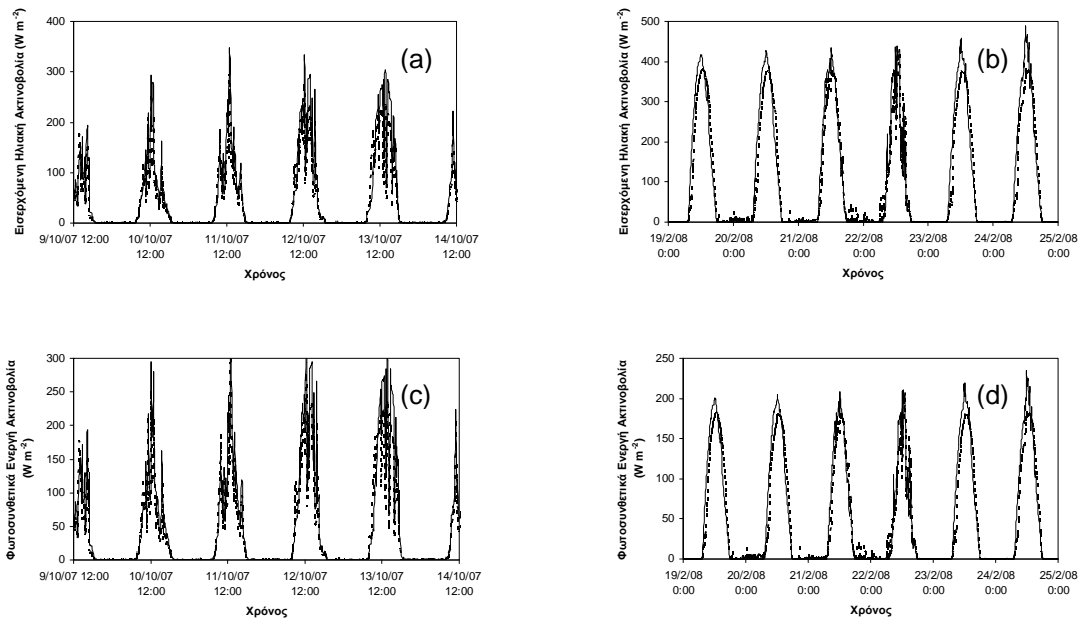
Η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών για την καθαρή ακτινοβολία στο κάλυμμα, στην καλλιέργεια και το έδαφος για δύο πειραματικές περιόδους παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.11(a-f). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η θερμική ακτινοβολία είναι ο κύριος παράγοντας για την απώλεια ή κέρδους ποσοτήτων θερμότητας για το κάλυμμα, την καλλιέργεια και το έδαφος. Τα παρακάτω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τον Baille (1999), που αναφέρει 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. 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 συνεισφέροντας στη θέρμανση του θερμοκηπίου.



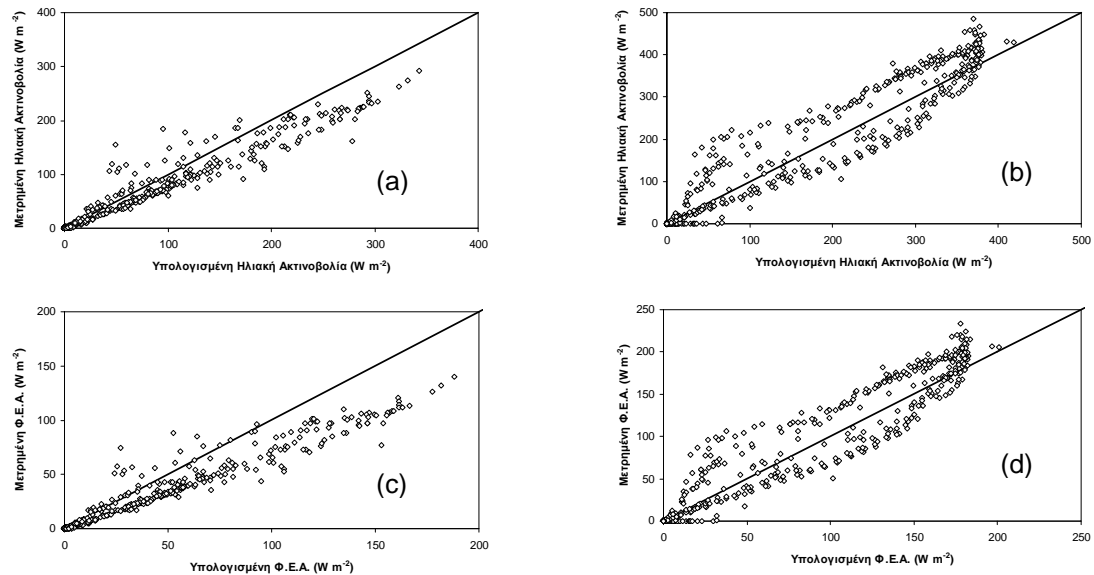
Σχήμα 6.11 (a), (b), (c), (d), (e), (f). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της καθαρής θερμικής ακτινοβολίας στο κάλυμμα, στην καλλιέργειας και στο έδαφος κατά τη διάρκεια δύο πειραματικών περιόδων.

6.1.1.5. Υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας και της (PAR) φωτοσυνθετικά ενεργούς ακτινοβολίας (κατά τη βαθμονόμηση του SimGreC)

Η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών για την ηλιακή και τη φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία, κατά την 3^η (9/10/07 - 14/10/07) και 4^η (19/2/08 - 25/2/08) πειραματική περίοδο αντίστοιχα, παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.12 (a), (b), (c), (d).



Σχήμα 6.12 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) για δύο πειραματικές περιόδους.



Σχήμα 6.13. (a), (b), (c), (d). Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας (PAR) σε (1:1) απεικόνιση, για δύο πειραματικές περιόδους.

Η κλίση της καμπύλης για τις υπολογισμένες αλλά και τις μετρημένες τιμές της ηλιακής και φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας είναι παρόμοια. Σε όλες τις πειραματικές περιπτώσεις μπορεί να παρατηρηθεί ότι η καμπύλη συµμεταβάλεται για τις περιόδους αύξησης ή µείωσης των τιμών. Στα Σχήµατα 6.13 (a), (b), (c), (d) παρουσιάζεται η απεικόνιση της 1:1 καμπύλης, µεταξύ των µετρηµένων και υπολογισµένων τιμών.

Πίνακας 6.4. 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 την εισερχόµενη και φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία αντίστοιχα.

Πειραµατική περίοδος	Ηλιακή Ακτινοβολία			
	r^2	dif	std	%
3 ^η	0.95	11.0	18.1	u.e
4 ^η	0.94	7.1	30.1	o.e
Πειραµατική περίοδος	r^2	dif	std	%
3 ^η	0.95	8.0	13.2	u.e
4 ^η	0.94	3.4	14.4	o.e

* o.e: υπέρ-εκτίµηση

** u.e: υπό-εκτίµηση

Στα Σχήµατα 6.13 (a), (b) και στον Πίνακας 6.4, παρουσιάζεται ο βαθµός πιστότητας των αποτελεσµάτων του προσοµιωτή (SimGreC) για την ηλιακή ακτινοβολία. Ο βαθµός συσχέτισης µεταξύ των µετρηµένων και υπολογισµένων τιμών υπολογίστηκε από 94 έως 95% και η µέση τιµή της διαφοράς από 7.1 έως 11 W m⁻².

Η φωτοσυνθετικά ενεργή ακτινοβολία παρουσιάζεται στα Σχήµατα 6.13 (c), (d) και στον Πίνακας 6.4. Τα αποτελέσµατα έδειξαν ότι οι υπολογισµένες τιμές της φωτοσυνθετικά ενεργής ακτινοβολίας ταιριάζουν µε τις µετρηµένες τιμές. Ο βαθµός συσχέτισης µεταξύ των µετρηµένων και υπολογισµένων τιμών υπολογίστηκε από 94 έως 95%, ενώ η µέση τιµή της διαφοράς από 3.4 έως 8 W m⁻².

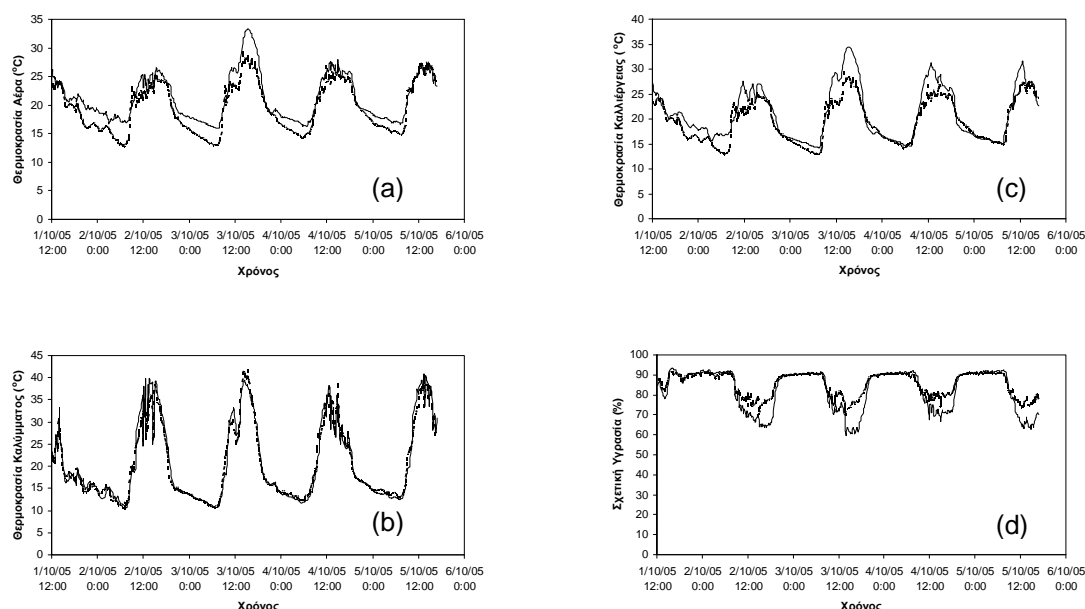
6.1.2. Επιβεβαίωση του κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)

Η επιβεβαίωση του κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC) πραγματοποιήθηκε από την 1^η Οκτωβρίου 2005 έως την 1^η Απριλίου 2006, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις των κλιματικών συνθηκών στο εσωτερικό του πειραματικού θερμοκηπίου που περιγράφηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 4.3.3. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν μετρημένες και υπολογισμένες τιμές για τη:

- ✘ Θερμοκρασία αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας, εδάφους
- ✘ Σχετική υγρασία του αέρα

6.1.3. Υπολογισμός των κλιματικών παραμέτρων (κατά την επιβεβαίωση του SimGreC)

Η επιβεβαίωση του κλιματικού προσομοιώματος πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις κλιματικές μετρήσεις από 1/10/2005 έως 6/10/2005. Στα Σχήματα 6.14 (a), (b), (c), (d) παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ των υπολογισμένων τιμών του προσομοιωτή (SimGreC) και των μετρημένων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα, του καλύμματος, της καλλιέργειας και η σχετική υγρασία του αέρα κατά την πειραματική περίοδο αντίστοιχα. Η κλίση της καμπύλης για τις υπολογισμένες τιμές είναι παρόμοια με αυτή των μετρημένων τιμών για όλες τις κλιματικές παραμέτρους.



Σχήμα 6.14. (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) τιμών της θερμοκρασίας του αέρα, του καλύμματος της καλλιέργειας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, για την πειραματική περίοδο 2005-2006.

Ο Πίνακας 6.5, απεικονίζει την πιστότητα των αποτελεσμάτων του κλιματικού προσομοιωτή (SimGreC) για τη θερμοκρασία του αέρα, του καλύμματος και της καλλιέργειας. Ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών υπολογίστηκε από 84 έως 95%, ενώ η μέση τιμή της διαφοράς εκτιμήθηκε από 0.1 έως 1.4 °C. Ο προσομοιωτής έδωσε καλές τιμές και για τη σχετική υγρασία του αέρα, όπου η μέση τιμή της διαφοράς ήταν 1.7 % και ο βαθμός συσχέτισης υπολογίστηκε στο 95%. Ο προσομοιωτής σύμφωνα με τα αποτελέσματα, υπό-εκτιμά τη θερμοκρασία και υπέρ-εκτιμά τη σχετική υγρασία.

Πίνακας 6.5. 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 σχετική υγρασία του αέρα αντίστοιχα.

<i>Περίοδος Βαθμονόμησης</i>	r^2	<i>dif</i>	<i>std</i>	%	
<i>Θερμοκρασία Αέρα</i>	0.89	1.4	2.1	6.7	u.e
<i>Θερμοκρασία Καλύμματος</i>	0.95	0.1	1.7	0.4	u.e
<i>Θερμοκρασία Καλλιέργειας</i>	0.84	1.2	2.0	5.2	u.e
<i>Σχετική Υγρασία Αέρα</i>	0.95	1.7	4.0	4.1	o.e

* o.e: υπέρ- εκτίμηση

** u.e: υπό- εκτίμηση

6.2. Συζήτηση βαθμονόμησης και επιβεβαίωσης του κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC)

Σημαντική αρχή λειτουργίας των προσομοιωτών θεωρείται η ικανότητα προσαρμογής τους στις ανάγκες των παραγωγών. Η καινοτομία του συγκεκριμένου έργου ήταν η δημιουργία ενός κλιματικού προσομοιωτή, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.1, με άμεσο στόχο τη χρησιμοποίηση του σε ένα μεγάλο εύρος κλιματικών σεναρίων, σύμφωνα πάντα με τις ανάγκες των παραγωγών της Μεσογείου. Για τις ανάγκες βαθμονόμησης του προσομοιωτή πραγματοποιήθηκε πείραμα αερισμού για τον προσδιορισμό του συντελεστή $C_d \cdot \sqrt{C_w}$ απαραίτητου για τον υπολογισμό του ρυθμού ανανέωσης του αέρα στο θερμοκήπιο. Οι τιμές του συντελεστή $C_d \cdot \sqrt{C_w}$ ήταν ιδιαίτερα χαμηλές τόσο στην περίπτωση ύπαρξης καλλιέργειας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου όσο και όταν το θερμοκήπιο ήταν τελείως κενό. Αντίστοιχα χαμηλές τιμές σύμφωνα με τους Boulard *et al.* (1997), Fatnassi *et al.* (2003) και Perez Parra *et al.* (2004).

Η βαθμονόμηση και πειραματική επιβεβαίωση του κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC) πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Κεντρικής Ελλάδας, η οποία δεν παρουσιάζει σημαντικές κλιματικές διαφορές με τις περισσότερες από τις περιοχές της Μεσογειακής λεκάνης, ενώ ο τύπος του θερμοκηπίου που χρησιμοποιήθηκε θεωρείται ο πιο διαδεδομένος για χρήση από τους παραγωγούς, για τις συγκεκριμένες περιοχές. Για να διαπιστωθεί το πόσο αξιόπιστη είναι η λειτουργία του προσομοιωτή κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης επιλέχθηκαν διάφορα σενάρια όπως αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.3.3.

Οι συγκρίσεις των βαθμονομημένων και επιβεβαιωμένων αποτελεσμάτων του προσομοιωτή (SimGreC), με τα μετρημένα κλιματικά δεδομένα έδειξαν μεγάλη αξιοπιστία. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ικανοποιητική συμφωνία όπως αυτά που παρουσίασαν οι Pieters και Deltour (1997), Singhs *et al.* (2006), Ghosal *et al.* (2004), (2006), Jolliet (1994), Gijzen *et al.* (1998), για την βαθμονόμηση και επιβεβαίωση της θερμοκρασίας του αέρα, του καλύμματος, της καλλιέργειας και του εδάφους. Ο προσομοιωτής δεν υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια όπως στις περιπτώσεις των θερμοκρασιών, την σχετική υγρασία του αέρα. Οι λόγοι που εξηγούν τις διαφοροποιήσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των υπολογισμένων και των μετρημένων τιμών είναι η υπό-εκτίμηση των φαινομένων συμπύκνωσης στην

επιφάνεια του καλύμματος όταν το θερμοκήπιο είναι τελείως κλειστό ή η υπό-εκτίμηση κατά τη διάρκεια του αερισμού της μεταφερόμενης μάζας και ενέργειας από τον περιβάλλον χώρο του θερμοκηπίου, όταν τα παράθυρα του θερμοκηπίου ελέγχονταν αυτόματα από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Ικανοποιητική συμφωνία παρουσιάστηκε και στον υπολογισμό της ηλιακής και φωτοσυνθετικά ενεργούς ακτινοβολίας, όπως επίσης και της θερμικής ακτινοβολίας στο κάλυμμα, την καλλιέργεια και το έδαφος. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τον Baille (1999), που αναφέρει 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.

Κεφάλαιο 7°. Βαθμονόμηση & επιβεβαίωση βιολογικού προσομοιώματος (SimTom)

7. Βαθμονόμηση & επιβεβαίωση βιολογικού προσομοιώματος (SimTom)

7.1. Αποτελέσματα βιολογικού προσομοιώματος (SimTom)

7.1.1. Βαθμονόμηση του βιολογικού προσομοιώματος (SimTom)

Tα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή αφορούν μετρημένες και υπολογισμένες τιμές για την 1^η πειραματική περίοδο, δηλαδή από την 1^η Οκτωβρίου 2005 έως την 1^η Απριλίου 2006 και αφορούν:

- ✘ Την βαθμονόμηση του συντελεστή μετατροπής (C_f)
- ✘ Αποτελέσματα του προσομοιώματος (TOMGRO[®]) πριν την τροποποίηση (χωρίς κορυφολόγημα της καλλιέργειας)
- ✘ Αποτελέσματα βαθμονόμησης της ανάπτυξης των φυτών τομάτας για:
 - i. Τον αριθμό των κόμβων
 - ii. Τον αριθμό των σχηματισμένων φύλλων
 - iii. Τον αριθμό των πραγματικών φύλλων
 - iv. Τον αριθμό των αφαιρούμενων φύλλων
 - v. Την φυλλική επιφάνεια του φυτού
 - vi. Τον αριθμό των συγκομιζόμενων-ώριμων καρπών
 - vii. Τον αριθμό των σχηματισμένων-πράσινων καρπών
- ✘ Αποτελέσματα βαθμονόμησης της παραγόμενης βιομάζας για:
 - i. Το συνολικό ξηρό βάρος των φυτών
 - ii. Το ξηρό βάρος των φύλλων
 - iii. Το συνολικό ξηρό βάρος των καρπών
 - iv. Το ξηρό βάρος των βλαστών
- ✘ Αποτελέσματα βαθμονόμησης της παραγωγής καρπών για:
 - i. Το ξηρό βάρος των συγκομιζόμενων-ώριμων καρπών
 - ii. Το ξηρό βάρος των σχηματισμένων-πράσινων καρπών
 - iii. Το ξηρό βάρος των πράσινων & ώριμων καρπών
 - iv. Το ξηρό βάρος ανά αριθμό ώριμων καρπών

Για την βαθμονόμηση του βιολογικού προσομοιώματος απαιτήθηκε ο στατιστικός προσδιορισμός των παραμέτρων των μαθηματικών εξισώσεων και αρχικές τιμές απόδοσης του σταδίου ανάπτυξης της καλλιέργειας καθώς και χρήση των απαραίτητων κλιματικών δεδομένων για όλη την πειραματική περίοδο. Τα στοιχεία για τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από την αναζήτηση της βιβλιογραφίας, ενώ μέρος αυτών συμπληρώθηκε με προσδιορισμό από τις πειραματικές μετρήσεις. Οι τιμές που αποδίδουν το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας προήλθαν από πειραματικές μετρήσεις βάρους και αριθμού διαφόρων χαρακτηριστικών των φυτών. Τέλος οι τιμές των κλιματικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν μετρήθηκαν κατά την ίδια πειραματική περίοδο στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Στον Πίνακα 7.1, παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του βιολογικού προσομοιώματος.

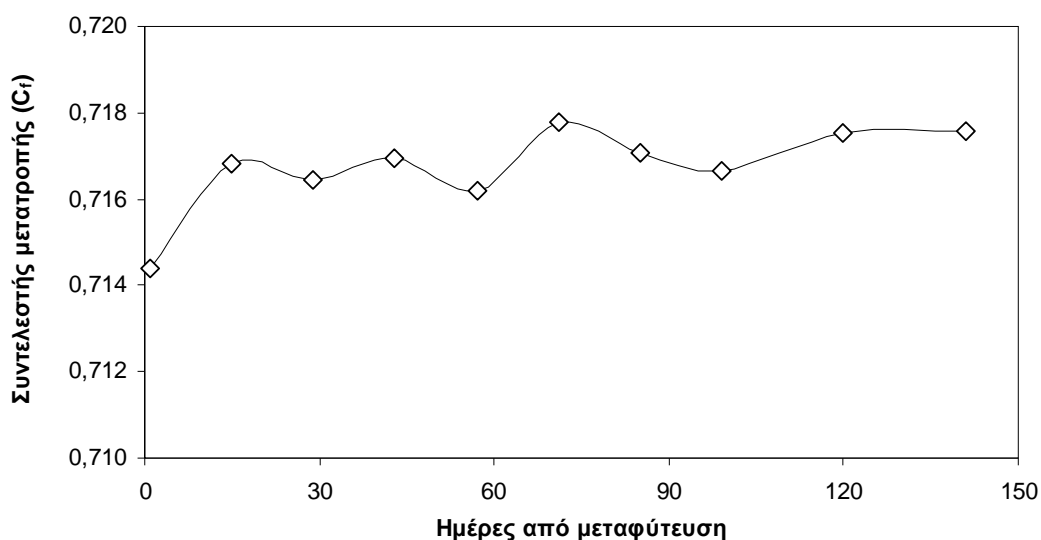
Πίνακας 7.1. Παράμετροι που απαιτούνται για την προσομοίωση της αύξησης της καλλιέργειας από το Tomgro.

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Φωτοχημική ικανότητα	Q_e	0.0645	mol [CO ₂] mol ⁻¹ photon
Συντελεστής διαπνοής διατήρησης των καρπών	MAINT _{fr}	0.015	g CH ₂ O g ⁻¹ DM d ⁻¹
Συντελεστής διαπνοής διατήρησης των φύλλων	MAINT _l	0.010	g CH ₂ O g ⁻¹ DM d ⁻¹
Συντελεστής μετατροπής	C_f	0.717	g DM g ⁻¹ CH ₂ O
Αριθμός ταξιανθιών ανά φύλλο	TPL	0.333	-
Επίδραση της θερμοκρασίας στην αναπνοή διατήρησης	Q_{10}	1.4	-
Συντελεστής περατότητας του φωτός	X_m	0.1	-
Αριθμός κόμβων του φυτού όταν εμφανίζεται η 1 ^η ταξιανθία	FTRUSN	7	-
Plastochron Index	PLSTN	7	-
Επιφάνεια θερμοκηπίου	S	160	m ²
Όγκος θερμοκηπίου	V	572	m ³
Πυκνότητα φυτών	PLM	2.4	plants m ⁻²
Αρχική τιμή για το Ξ.Β. των φύλλων	WLVS1	0.25	g
Αρχική τιμή για το Ξ.Β. του βλαστού	WSTMI	0.13	g
Αριθμός καρπών ανά ταξιανθία	NBFPT	5	-
Αριθμός τελευταίας ταξιανθίας	LASTTRNB	7	-
Συντελεστής ηλικίας καρπών	FRAGCOEF	1.25	-

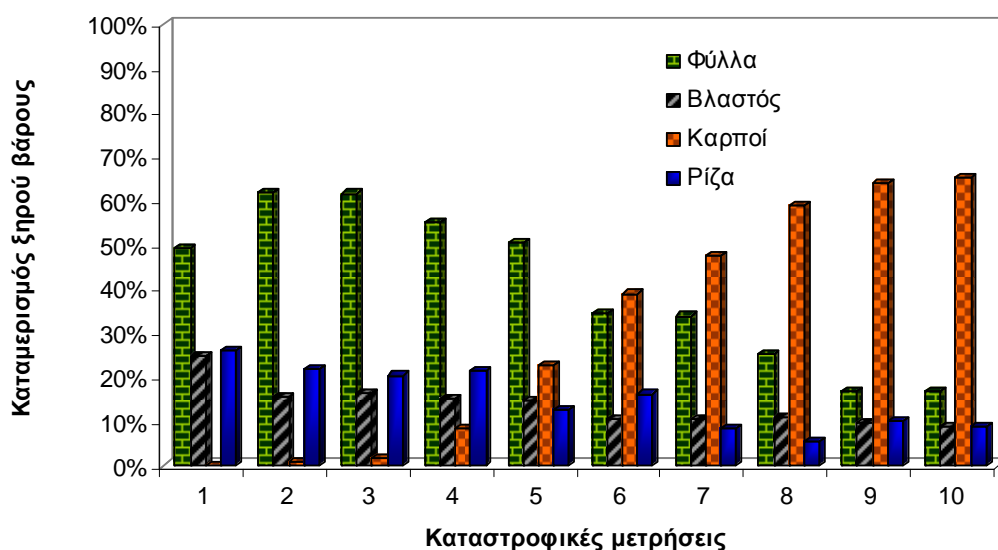
7.1.1.1. Βαθμονόμηση του συντελεστή μετατροπής (C_f)

Ο συντελεστής (C_f) που αντιπροσωπεύει τη μετατροπή των διαθέσιμων αφομοιώσιμων στοιχείων σε ξηρό βάρος του φυτού, υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση (3.91) με τη χρήση πειραματικών δεδομένων από τις καταστροφικές μετρήσεις ολόκληρου του φυτού κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου. Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη των μέσων τιμών του συντελεστή

μετατροπής κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου. Η μέση τιμή του συντελεστή μετατροπής (C_f) υπολογίστηκε 0.717, και παρουσιάζει 4.4% διαφοροποίηση από τη σταθερή τιμή (0.75) που προτάθηκε από τους Jones *et al.* (1991). Ο υπολογισμός της τιμής του συντελεστή μετατροπής (C_f) προήλθε από τον επιμερισμό του ξηρού βάρους στα διάφορα όργανα του φυτού. Η ποσοστιαία κατανομή του ξηρού βάρους των οργάνων σε σχέση με το συνολικό βάρος του φυτού κατά την πειραματική περίοδο παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2.



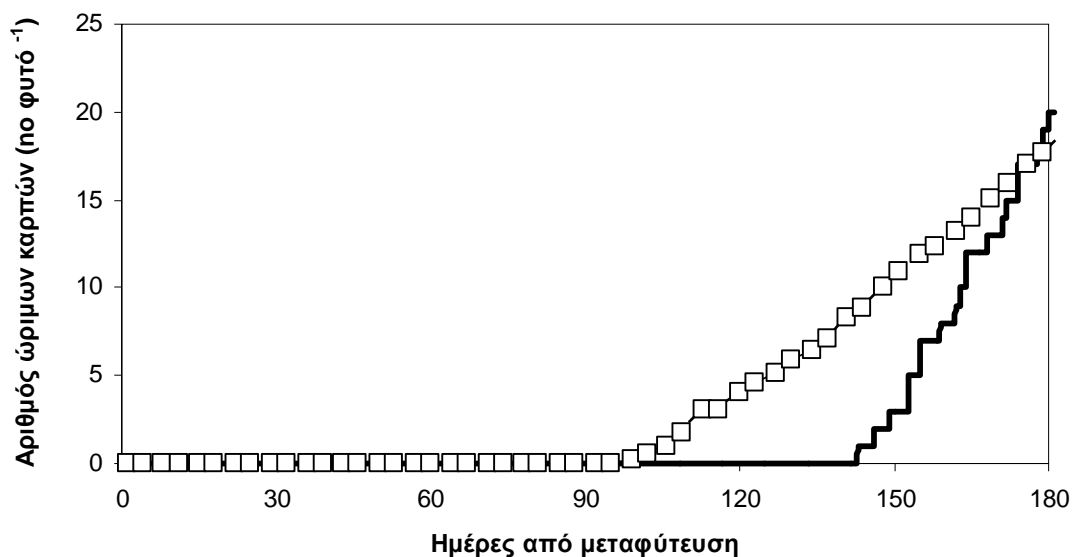
Σχήμα 7.1. Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του συντελεστή μετατροπής (C_f), κατά τη διάρκεια των καταστροφικών μετρήσεων της 1^{ης} πειραματικής περιόδου.



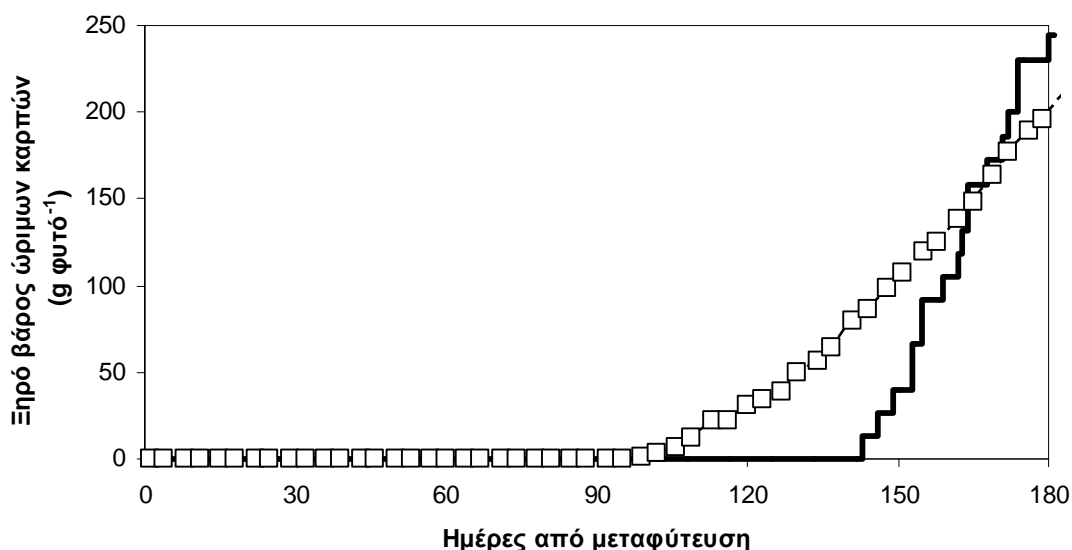
Σχήμα 7.2. Ποσοστιαία κατανομή του ξηρού βάρους των φύλλων, βλαστού, καρπών και ρίζας σε σχέση με το συνολικό ξηρό βάρος του φυτού κατά τη διάρκεια των καταστροφικών μετρήσεων της 1^{ης} πειραματικής περιόδου.

7.1.1.2. Αποτελέσματα του προσομοιώματος (TOMGRO®) πριν την χρήση του συντελεστή (FRAGCOEF)

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.3 και 7.4 αναφέρονται στην εξέλιξη του αριθμού των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών και του παραγόμενου ξηρού βάρους πριν τη χρήση του συντελεστή (FRAGCOEF).

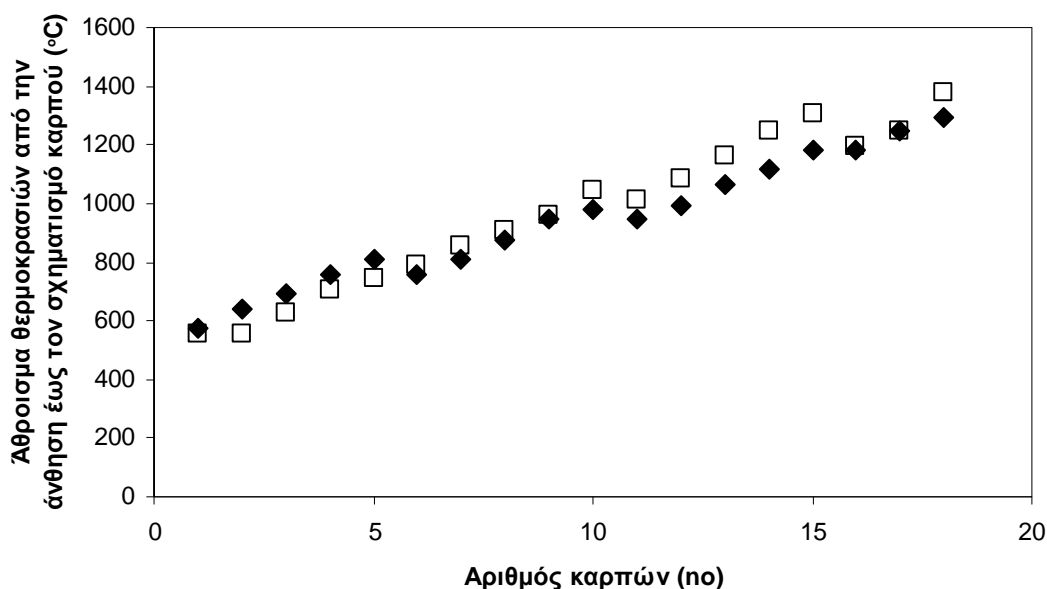


Σχήμα 7.3. Σύγκριση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (-) μέσων τιμών πριν από τη βαθμονόμηση, του αριθμού των ώριμων καρπών

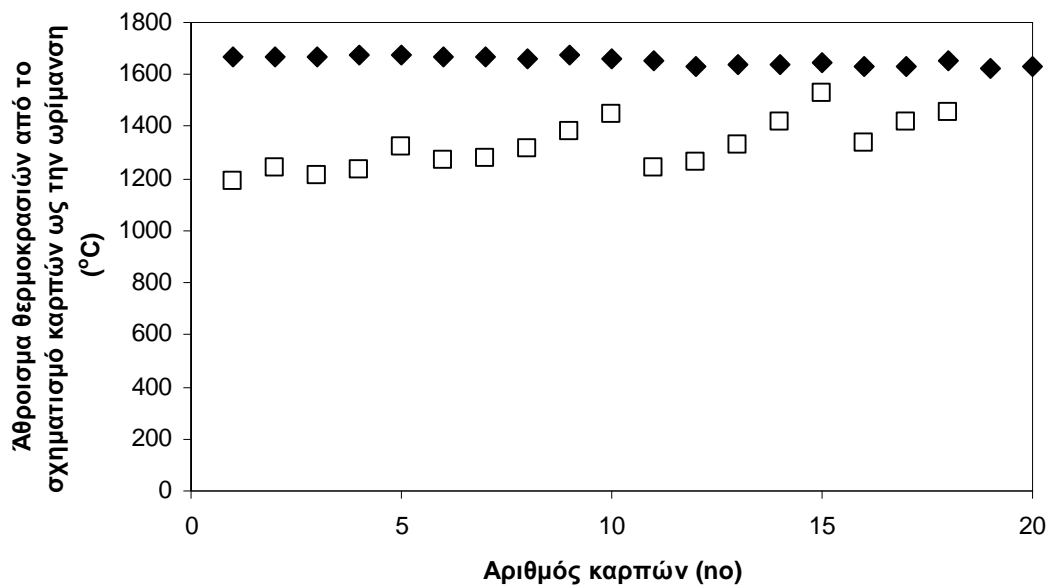


Σχήμα 7.4. Σύγκριση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (-) μέσων τιμών πριν από τη βαθμονόμηση, του ξηρού βάρους των ώριμων καρπών

Διαφοροποίηση παρατηρείται μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών τόσο στον υπολογισμό του αριθμού των συγκομιζόμενων καρπών όσο και στο παραγόμενο ξηρό βάρος των συγκομιζόμενων-ώριμων καρπών. Διαφοροποίηση εμφανίζεται τόσο κατά την ημερομηνία έναρξης της συγκομιδής όσο και στην κλίση της καμπύλης. Ο προσομοιωτής εμφανίζει ταχύτερο ρυθμό ωρίμανσης των καρπών σε σχέση με τις μετρημένες τιμές κάτι που εξηγείται στα Σχήματα 7.5 και 7.6. Στο Σχήμα 7.5 παρουσιάζεται το άθροισμα θερμοκρασιών που απαιτείται από την άνθηση έως τον σχηματισμό των καρπών τόσο για τις μετρημένες όσο και για τις υπολογισμένες τιμές. Ο βαθμός συμφωνίας κρίνεται ικανοποιητικός καθώς μικρές είναι οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται για το σύνολο των συγκομιζόμενων καρπών. Αντίθετα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.6 εμφανίζουν απόκλιση μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών. Το άθροισμα της μέσης τιμής της θερμοκρασίας ανά ημέρα, που απαιτείται από το σχηματισμό των καρπών έως και την πλήρη ωρίμανση αυτών παραμένει σταθερό και μεγαλύτερο κατά 300 °C, περίπου για τον προσομοιωτή ενώ διαφοροποιείται στην πραγματικότητα. Η διαφορά στις απαιτήσεις του προσομοιωτή για το χρονικό διάστημα από το σχηματισμό των καρπών έως και την πλήρη ωρίμανση αποτελεί το αίτιο για την διαφοροποίηση που παρατηρείται στα Σχήματα 7.3 και 7.4.



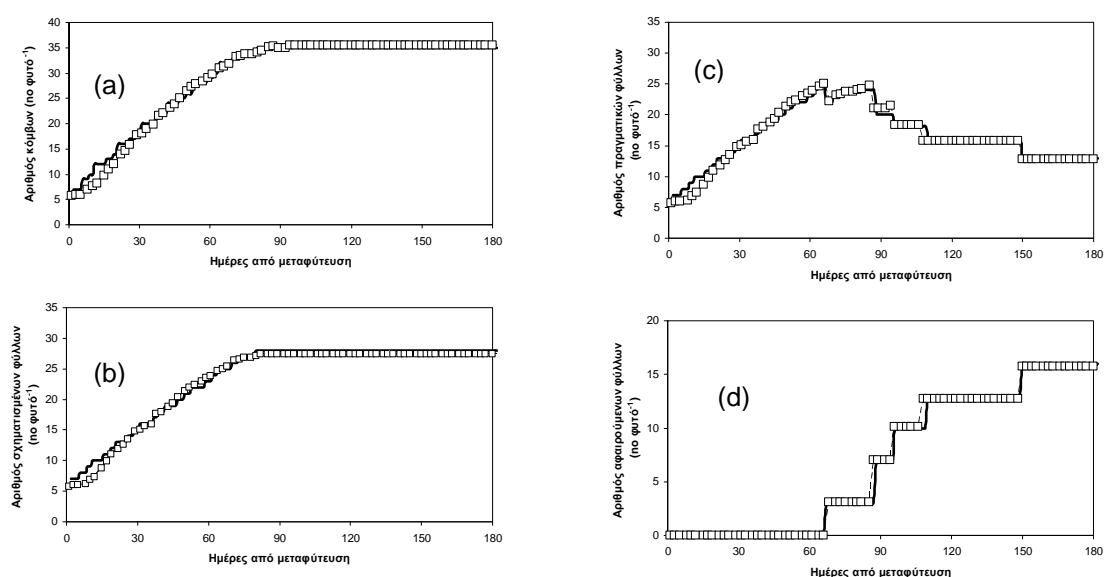
Σχήμα 7.5. Σύγκριση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (♦) μέσων τιμών πριν από τη βαθμονόμηση, του αθροίσματος θερμοκρασιών (ανά καρπό) από την άνθηση έως τον σχηματισμό του καρπού



Σχήμα 7.6. Σύγκριση των μετρημένων (□) και υπολογισμένων (◆) μέσω τιμών πριν από τη βαθμονόμηση, του αθροίσματος θερμοκρασιών (ανά καρπό) από τον σχηματισμό των καρπών έως την ωρίμανση και συγκομιδή

7.1.1.3. Αποτελέσματα ανάπτυξης (κατά τη βαθμονόμηση)

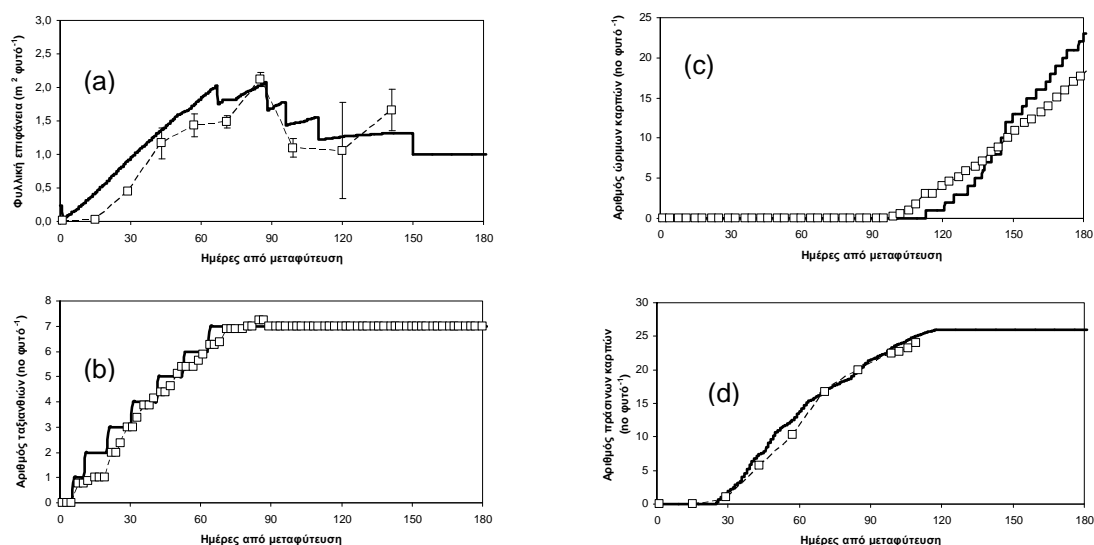
Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού των κόμβων, σχηματισμένων, πραγματικών και αφαιρούμενων φύλλων κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου απεικονίζονται στο Σχήμα 7.7 (a), (b), (c), (d). Ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών είναι παρόμοιος για τα διάφορα χαρακτηριστικά ανάπτυξης των φυτών. Παρατηρήθηκε ότι η πορεία αύξησης του αριθμού των κόμβων, σχηματισμένων, πραγματικών και αφαιρούμενων φύλλων, τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές, ακολουθεί παρόμοια κλίση. Η ανάπτυξη των φυτών σταματά τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές όταν πραγματοποιείται το κορυφολόγημα των φυτών και ο αριθμός παραμένει σταθερός μέχρι το τέλος της περιόδου. Ο αριθμός των πραγματικών φύλλων μειώνεται ανάλογα με το πρόγραμμα αποφύλλωσης που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου. Η εξέλιξη της μείωσης των πραγματικών φύλλων παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.7 (c).



Σχήμα 7.7 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (\square) και υπολογισμένων ($-$) μέσω των τιμών του αριθμού των κόμβων, σχηματισμένων, πραγματικών και αφαιρούμενων φύλλων κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου.

Τα Σχήματα 7.7 (b), (c), (d) παρέχουν πληροφορίες για την κατάσταση του αριθμού των φύλλων των φυτών, σύμφωνα με τις καλλιεργητικές φροντίδες των παραγωγών και παρουσιάζουν την εικόνα της καλλιέργειας τόσο για τα φύλλα που

σχηματίστηκαν όσο και για αυτά που έχουν απομείνει και συμβάλλουν με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης στην περαιτέρω ανάπτυξη και παραγωγή του φυτού.



Σχήμα 7.8 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (\square) και υπολογισμένων ($-$) μέσω τιμών της φυλλικής επιφάνειας, του αριθμού των ταξιανθιών, του αριθμού των ώριμων-συγκομιζόμενων και πράσινων-σχηματιζόμενων καρπών, κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου.

Ικανοποιητική συμφωνία παρατηρείται μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της φυλλικής επιφάνειας των φυτών στο Σχήμα 7.8 (a), κάτι που αποτελούσε αδύνατο σημείο του προσομοιωτή. Η αδυναμία του προσομοιωτή στην μη ικανοποιητική προσέγγιση των τιμών της φυλλικής επιφάνειας οφειλόταν σε δύο κύριους παράγοντες i). στην δυσκολία καταγραφής της φυλλικής επιφάνειας και ii) στην αστάθεια του προσομοιωτή. Παρόλα αυτά παραμένει μια μικρή απόκλιση μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών της φυλλικής επιφάνειας των φυτών στα αρχικά στάδια της προσομοίωσης.

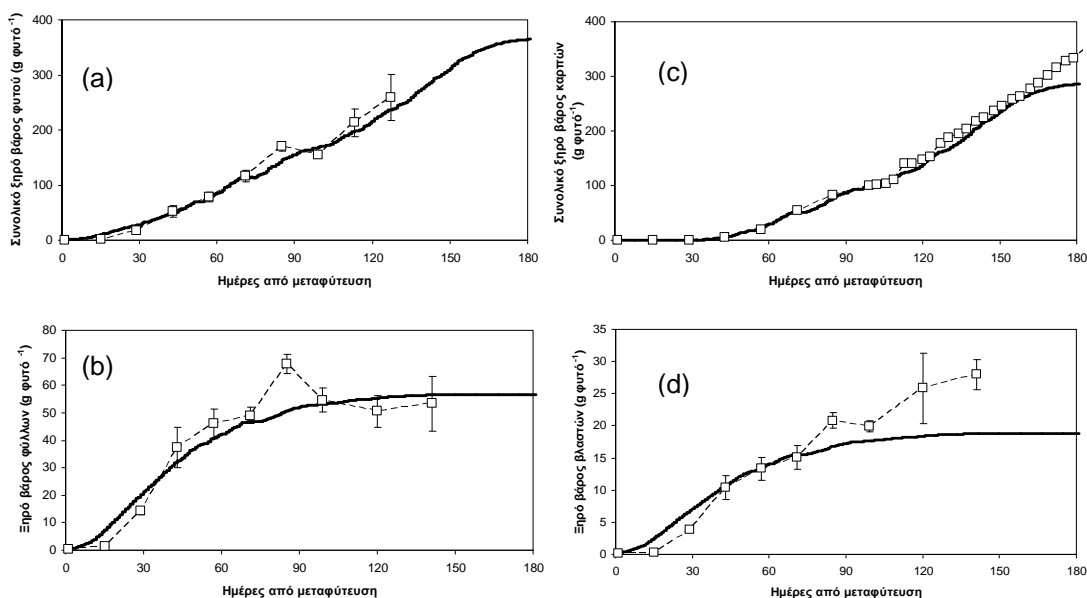
Στο Σχήμα 7.8 (b), παρουσιάζεται η εξέλιξη του αριθμού των ταξιανθιών. Ο προσομοιωτής (SimTom) στο αρχικό διάστημα και μέχρι τη 30^η ημέρα υπερεκτιμά σύμφωνα με τις τιμές που παρουσιάζονται τον αριθμό των σχηματιζόμενων φύλλων και των ταξιανθιών που εμφανίζονται στο φυτό. Αυτό μπορεί να χαρακτηρίσει τη διαφορά που παρουσιάζεται μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών στο Σχήμα 7.7 (b) και στο Σχήμα 7.8 (b). Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρείται συμφωνία τιμών μετά την 30^η ημέρα και μέχρι το τέλος της πειραματικής περιόδου.

Στα Σχήματα 7.8 (c), (d) παρουσιάζεται η εξέλιξη του αριθμού των ώριμων-συγκομιζόμενων και των πράσινων-σχηματιζόμενων καρπών. Η επίδραση του συντελεστή (FRAGCOEF) που επιδρά στην ηλικία των καρπών παρουσιάζεται και στα δύο σχήματα. Η χρήση του συντελεστή, οδηγεί τα αποτελέσματα του προσομοιωτή (SimTom) σε καλύτερη συμφωνία με τις πραγματικές τιμές ειδικά για τον αριθμό των πράσινων-σχηματιζόμενων καρπών. Μια μικρή διαφοροποίηση παρουσιάζεται στον αριθμό των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών και οφείλεται στη διαφορά που παρουσιάζεται μεταξύ των ταξιανθιών του φυτού, για το χρονικό διάστημα που απαιτείται από το σχηματισμό του καρπού μέχρι την πλήρη ωρίμανσή του. Η κλίση της καμπύλης στο Σχήμα 7.8 (c) δεν είναι η ίδια μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών, ενώ παρατηρείται ότι ο προσομοιωτής καθυστερεί στον υπολογισμό της έναρξης της περιόδου συγκομιδής. Παρ'όλα αυτά τα αποτελέσματα δίνουν καλύτερη προσομοίωση της πραγματικής κατάστασης των φυτών, σε σχέση με τις αρχικές υπολογισμένες τιμές, πριν τη χρήση του συντελεστή.

7.1.1.4. Αποτελέσματα παραγόμενης βιομάζας (κατά τη βαθμονόμηση)

Τα αποτελέσματα της διακύμανσης των μετρημένων και υπολογισμένων μέσω των τιμών του συνολικού ξηρού βάρους του φυτού, του ξηρού βάρους των φύλλων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών και του ξηρού βάρους του βλαστού, κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου απεικονίζονται στα Σχήματα 7.9 (a), (b), (c), (d). Παρατηρήθηκε ότι η πορεία αύξησης της παραγόμενης βιομάζας, τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές, ακολουθεί παρόμοια κλίση.

Η συμφωνία για το συνολικό ξηρό βάρος του φυτού (Σχήμα 7.9 (a)) και για το συνολικό ξηρό βάρος των καρπών (Σχήμα 7.9 (b)) κρίνεται ικανοποιητική για όλη την πειραματική περίοδο. Επιπρόσθετα το ξηρό βάρος των φύλλων και των βλαστών στα Σχήματα 7.9 (c), (d), παρουσιάζει επίσης ικανοποιητική συμφωνία μέχρι την 70^η ημέρα από τη μεταφύτευση των φυτών. Μετά την 70^η ημέρα ο προσομοιωτής υπό-εκτιμά το ξηρό βάρος των βλαστών, ενώ παρουσιάζεται μια μικρή περίοδος (80^η έως 100^η ημέρα), όπου ο προσομοιωτής υπό-εκτιμά το ξηρό βάρος των φύλλων. Το ξηρό βάρος του βλαστού παρατηρείται ότι συνεχίζει να αυξάνεται, ενώ ο προσομοιωτής σύμφωνα με το κορυφολόγημα που έχει πραγματοποιηθεί στα φυτά σταματάει την αύξηση του ξηρού βάρους του βλαστού. Ο προσομοιωτής σταματά την αύξηση του βάρους μετά την 85^η ημέρα από τη μεταφύτευση των φυτών.

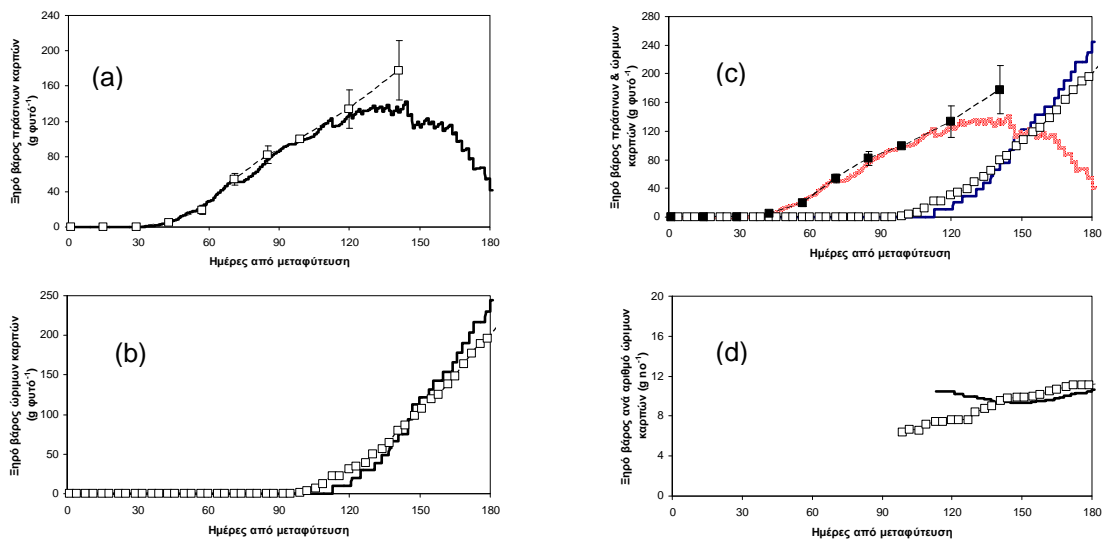


Σχήμα 7.9 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (\square) και υπολογισμένων (—) μέσων τιμών του συνολικού ξηρού βάρους του φυτού, του ξηρού βάρους των φύλλων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών και του ξηρού βάρους του βλαστού, κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου.

7.1.1.5. Αποτελέσματα παραγωγής καρπών (κατά τη βαθμονόμηση)

Τα Σχήματα 7.10 (a), (b), (c), (d) παρουσιάζουν την διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων μέσων τιμών του ξηρού βάρους των πράσινων καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών, του ξηρού βάρους των πράσινων και ώριμων καρπών και του ξηρού βάρους ανά αριθμό ώριμων καρπών, κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου. Στα Σχήματα 7.10 (a), (b), παρατηρείται η ίδια κλίση κατά την περίοδο αύξησης για τις μετρημένες και υπολογισμένες τιμές. Η συμφωνία του προσομοιωτή με τις πραγματικές τιμές κρίνεται ικανοποιητική μέχρι την 120^η ημέρα της πειραματικής περιόδου, όπου παρατηρείται ότι ο προσομοιωτής υπό-εκτιμά το ξηρό βάρος των πράσινων σχηματιζόμενων καρπών. Η διαφορά οφείλεται στο συντελεστή υπεύθυνο για την ηλικία των καρπών.

Το Σχήμα 7.10 (c), παρουσιάζει ταυτόχρονα την εξέλιξη του ξηρού βάρους των πράσινων σχηματιζόμενων καρπών και των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών. Η καλή συμφωνία που παρουσιάζεται στις μετρημένες και υπολογισμένες τιμές οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο προσομοιωτής (SimTom) μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους



Σχήμα 7.10 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (\square) και υπολογισμένων ($-$) μέσω τιμών του ξηρού βάρους των πράσινων καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών, του ξηρού βάρους των πράσινων και ώριμων καρπών και του ξηρού βάρους ανά αριθμό ώριμων καρπών, κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου.

παραγωγούς για τον καθορισμό της στρατηγικής που θα επιλέξουν. Η ικανότητα του προσομοιωτή να παρουσιάζει την επίδραση του κλίματος κατά τη διάρκεια μιας καλλιεργητικής περιόδου, τόσο στην ποσότητα των παραγόμενων προϊόντων όσο και στο βάρος των καρπών που παραμένουν στο φυτό ικανοποιεί τις ανάγκες των παραγωγών. Πιθανές διαφοροποιήσεις στις κλιματικές συνθήκες στο περιβάλλον του θερμοκηπίου οδηγούν σε μεταβολή της παραγόμενης ποσότητας και οι παραγωγή μπορούν ανάλογα με τις ανάγκες τους να σχεδιάσουν τη στρατηγική που θα ακολουθήσουν.

Το Σχήμα 7.10 (d), παρουσιάζει την εξέλιξη του ξηρού βάρους ανά καρπό. Η μετατροπή της διαδικασίας υπολογισμού της ηλικίας των καρπών οδήγησε σε ικανοποιητικά αποτελέσματα μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών, ειδικότερα μετά την 135^η ημέρα της πειραματικής περιόδου, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 7.10 (d).

7.1.2. Επιβεβαίωση βιολογικού προσομοιώματος (SimTom)

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή αφορούν μετρημένες και υπολογισμένες τιμές για την 2^η πειραματική περίοδο, δηλαδή από την 7^η Οκτωβρίου 2007 έως την 25^η Φεβρουαρίου 2008 και αφορούν:

✘ Αποτελέσματα επιβεβαίωσης της ανάπτυξης των φυτών τομάτας για:

- viii. Τον αριθμό των κόμβων
- ix. Τον αριθμό των σχηματισμένων φύλλων
- x. Τον αριθμό των πραγματικών φύλλων
- xi. Τον αριθμό των αφαιρούμενων φύλλων
- xii. Την φυλλική επιφάνεια του φυτού
- xiii. Τον αριθμό των ταξιανθιών
- xiv. Τον αριθμό των συγκομιζόμενων-ώριμων καρπών
- xv. Τον αριθμό των σχηματισμένων-πράσινων καρπών

✘ Αποτελέσματα επιβεβαίωσης της παραγόμενης βιομάζας για:

- i. Το συνολικό ξηρό βάρος των φυτών
- ii. Το ξηρό βάρος των φύλλων
- iii. Το συνολικό ξηρό βάρος των καρπών
- iv. Το ξηρό βάρος των βλαστών

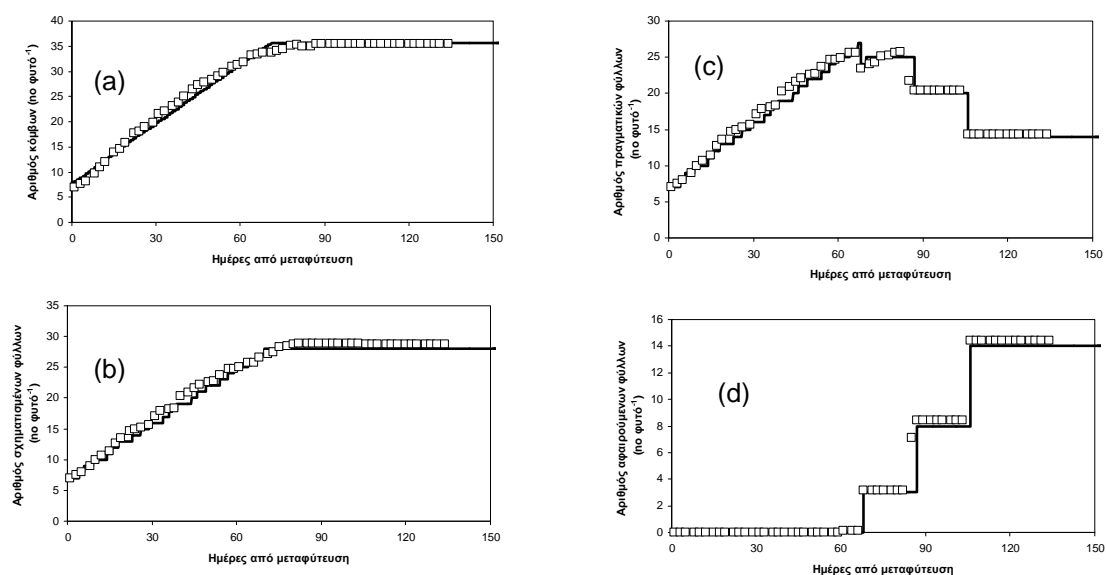
✘ Αποτελέσματα επιβεβαίωσης της παραγωγής καρπών για:

- v. Το ξηρό βάρος των συγκομιζόμενων-ώριμων καρπών
- vi. Το ξηρό βάρος των σχηματισμένων-πράσινων καρπών
- vii. Το ξηρό βάρος των πράσινων & ώριμων καρπών
- viii. Το ξηρό βάρος ανά αριθμό ώριμων καρπών

Στην παρουσίαση πραγματοποιείται, ταυτόχρονη απεικόνιση των μετρημένων τιμών της πειραματικής διαδικασίας και των υπολογισμένων τιμών του βιολογικού προσομοιώματος. Οι κλιματικές μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούν τα κλιματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν κατά την 2^η πειραματική περίοδο από το εσωτερικό του θερμοκηπίου.

7.1.2.1. Αποτελέσματα ανάπτυξης (κατά την επιβεβαίωση)

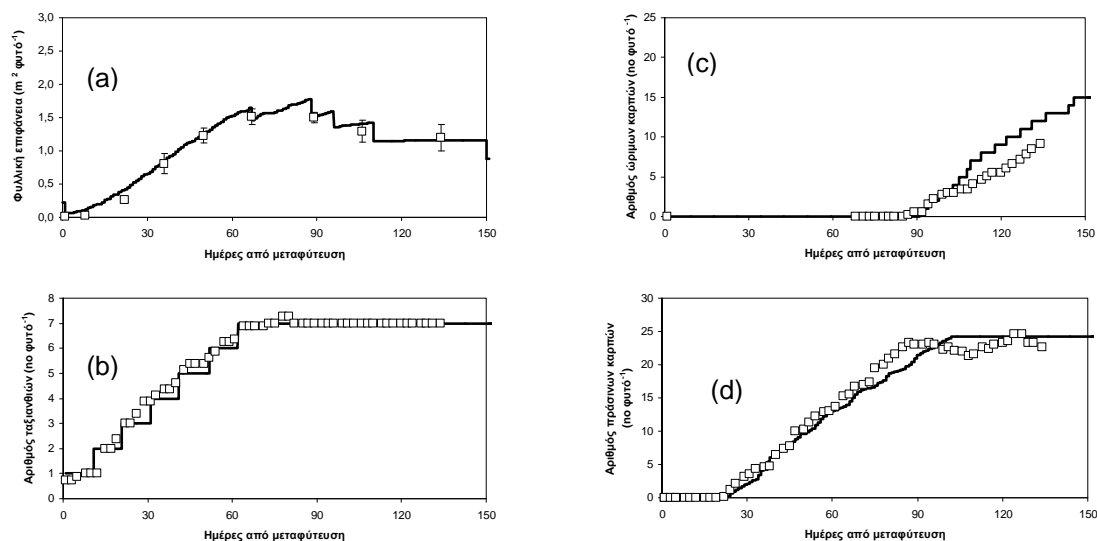
Ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών είναι παρόμοιος για τα διάφορα χαρακτηριστικά ανάπτυξης των φυτών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού των κόμβων, σχηματισμένων, πραγματικών και αφαιρούμενων φύλλων κατά τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου απεικονίζονται στο Σχήμα 7.11 (a), (b), (c), (d).



Σχήμα 7.11 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (\square) και υπολογισμένων ($-$) μέσων τιμών του αριθμού των κόμβων, σχηματισμένων, πραγματικών και αφαιρούμενων φύλλων κατά τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου.

Παρατηρήθηκε ότι η πορεία αύξησης των υπολογισμένων τιμών από τον προσομοιωτή (SimTom) για τον αριθμό των κόμβων και για τα σχηματισμένα, πραγματικά και αφαιρούμενα φύλλα, έρχεται σε συμφωνία με τις πραγματικές τιμές, όπως παρουσιάστηκε και στην παράγραφο 7.1.1.3, παρά το γεγονός ότι το μικροκλίμα του θερμοκηπίου που αποτελεί την εισαγόμενη μεταβλητή ήταν διαφορετικό κατά την 2^η πειραματική περίοδο.

Παρόμοιος βαθμός συμφωνίας μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών παρατηρήθηκε και για τα αποτελέσματα της διακύμανσης των μέσων τιμών της φυλλικής επιφάνειας, του αριθμού των ταξιανθιών, του αριθμού των ώριμων-συγκομιζόμενων και πράσινων-σχηματιζόμενων καρπών, κατά τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου που απεικονίζονται στο Σχήμα 7.12 (a), (b), (c), (d).

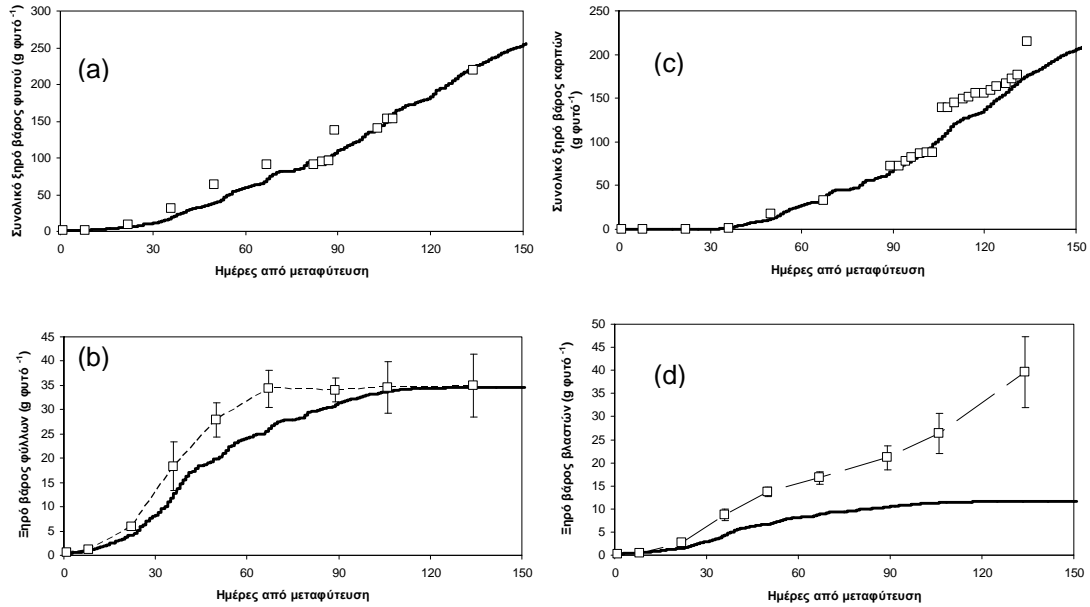


Σχήμα 7.12 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (\square) και υπολογισμένων ($-$) μέσω των τιμών της φυλλικής επιφάνειας, του αριθμού των ταξιανθιών, του αριθμού των ώριμων-συγκομιζόμενων και πράσινων-σχηματιζόμενων καρπών, κατά τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου.

Στο Σχήμα 7.12 (c), παρατηρήθηκε διαφοροποίηση των μετρημένων με τις υπολογισμένες τιμές για τον αριθμό των συγκομιζόμενων-ώριμων καρπών, μετά την 105^η ημέρα από τη μεταφύτευση των φυτών. Η διαφοροποίηση οφείλεται στην μη ικανοποιητική προσέγγιση από τον συντελεστή ηλικίας των καρπών της απαραίτητης χρονικής διάρκειας για την ωρίμανση των καρπών. Άμεση συνέπεια ο προσομοιωτής να υπέρ-εκτιμά την ποσότητα των παραγόμενων προϊόντων από την 105^η ημέρα και μέχρι το τέλος της πειραματικής περιόδου.

7.1.2.2. Αποτελέσματα παραγόμενης βιομάζας (κατά την επιβεβαίωση)

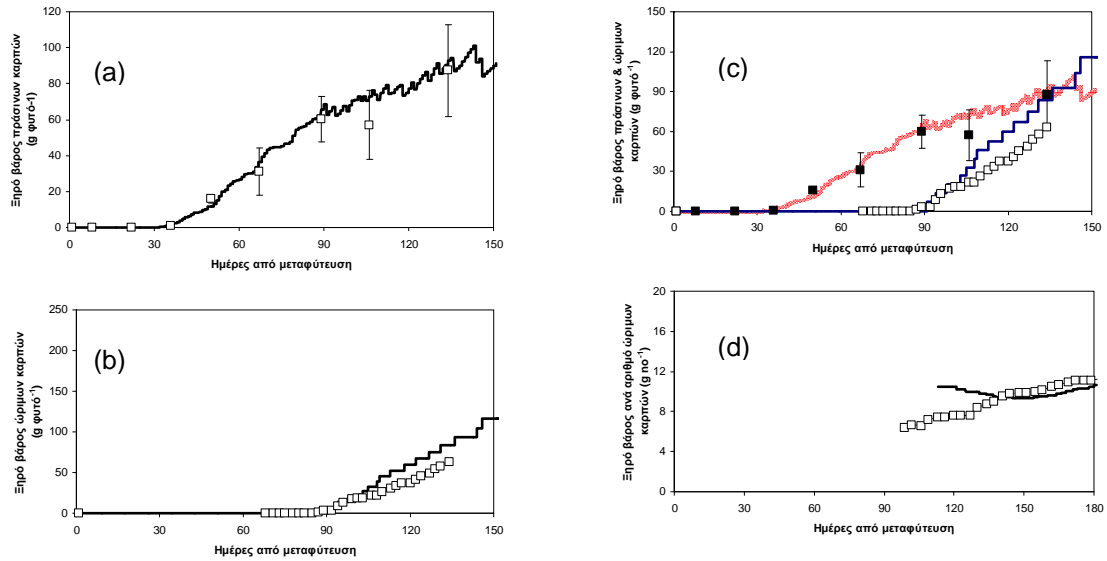
Τα αποτελέσματα της διακύμανσης των μετρημένων και υπολογισμένων μέσω των τιμών του συνολικού ξηρού βάρους του φυτού, του ξηρού βάρους των φύλλων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών και του ξηρού βάρους του βλαστού, κατά τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου, απεικονίζονται στο Σχήμα 7.13 (a), (b), (c), (d). Παρατηρήθηκε ότι η πορεία αύξησης της παραγόμενης βιομάζας, τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές, ακολουθεί παρόμοια κλίση. Διαφοροποίηση παρατηρήθηκε στον υπολογισμό του ξηρού βάρους του βλαστού, στο Σχήμα 7.13 (d), όπως και κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης του προσομοιώματος.



Σχήμα 7.13 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (\square) και υπολογισμένων ($-$) μέσω των τιμών του συνολικού ξηρού βάρους του φυτού, του ξηρού βάρους των φύλλων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών και του ξηρού βάρους του βλαστού, κατά τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου.

7.1.2.3. Αποτελέσματα παραγωγής καρπών (κατά την επιβεβαίωση)

Τα Σχήματα 7.14 (a), (b), (c), (d) παρουσιάζουν την διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων μέσω των τιμών του ξηρού βάρους των πράσινων καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών, του ξηρού βάρους των πράσινων και ώριμων καρπών και του ξηρού βάρους ανά αριθμό ώριμων καρπών, κατά τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου. Στο Σχήμα 7.14 (a), παρατηρείται η ίδια κλίση κατά την περίοδο αύξησης για τις μετρημένες και υπολογισμένες τιμές, με μοναδική διαφοροποίηση κατά την 8^η καταστροφική μέτρηση. Στο Σχήμα 7.14 (b), όπως και στον αριθμό των συγκομιζόμενων-ώριμων καρπών παρατηρείται μια διαφοροποίηση μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών. Ο προσομοιωτής υπέρ-εκτιμά το ξηρό βάρος των ώριμων καρπών. Η διαφορά οφείλεται στο συντελεστή υπεύθυνο για την ηλικία των καρπών.



Σχήμα 7.14 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (\square) και υπολογισμένων ($-$) μέσω των τιμών του ξηρού βάρους των πράσινων καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών, του ξηρού βάρους των πράσινων και ώριμων καρπών και του ξηρού βάρους ανά αριθμό ώριμων καρπών, κατά τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου.

7.2. Συζήτηση βαθμονόμησης και επιβεβαίωσης βιολογικού προσομοιώματος

Οι περισσότεροι από τους αναπτυγμένους βιολογικούς προσομοιωτές (Hoogenboom 1980, Jones et al 1991, de Koning 1994, Heuvelink 1994) είναι προσαρμοσμένοι στις ανάγκες και τις απαιτήσεις των κλιματικών συνθηκών που επικρατούν στις χώρες της Βόρειας Ευρώπης. Οι περισσότερες θερμοκηπιακές μονάδες στις χώρες αυτές είναι σύγχρονα εξοπλισμένες με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ανάγκη για καλλιέργειες μικρής διάρκειας, όπως στις χώρες που βρίσκονται γύρω από τη λεκάνη της Μεσογείου, όπου οι κλιματικές συνθήκες οδηγούν στην διακοπή της καλλιεργητικής περιόδου. Η αδυναμία των προσομοιωτών να προσομοιώσουν το κορυφολόγιο και ουσιαστικά το σταμάτημα της ανάπτυξης της καλλιέργειας, κοινή αγρονομική πρακτική για τις χώρες της Μεσογείου, αποτέλεσε την ανάγκη για τη μετατροπή του προσομοιωτή.

Η σύγκριση μεταξύ των υπολογισμένων τιμών και των πειραματικών δεδομένων για την ανάπτυξη των φυτών, την παραγόμενη βιομάζα και την παραγωγή των καρπών απέδειξε, υψηλή αξιοπιστία και καταλληλότητα του τροποποιημένου προσομοιωτή (SimTom) σε σχέση με την κοινή καλλιεργητική πρακτική που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Τα αποτελέσματα απέδειξαν καλύτερη συμφωνία και υψηλότερο βαθμό προσομοίωσης από αυτά που παρουσίασαν οι Jones *et al.* 1991 και Dayan *et al.* 1993a, 1993b. Ειδικότερα στον υπολογισμό της φυλλικής επιφάνειας του αριθμού των φύλλων και του παραγόμενου ξηρού βάρους των φύλλων όπου οι Jones *et al.* 1991 και Dayan *et al.* 1993a, 1993b, υπό-εκτιμούν τις πραγματικές τιμές. Η αρχική υπόθεση ότι ο μηχανισμός κατανομής του ξηρού βάρους παραμένει και μετά το κορυφολόγιο της καλλιέργειας, φαίνεται ότι δούλεψε σωστά. Μικρή αποτελεσματικότητα παρατηρήθηκε στον υπολογισμό του ξηρού βάρους των βλαστών, κάτι που δεν έχει σημαντική επίδραση στη συνολική εικόνα των αποτελεσμάτων που εξάγονται από τον προσομοιωτή.

Η αναλυτικότερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται από τους Jones *et al.* 1991 και Dayan *et al.* 1993a, 1993b, οδηγεί στην παρατήρηση ότι η ανάπτυξη των φυτών είναι μια συνεχόμενη διαδικασία χωρίς κάποιο ορισμένο τέλος. Η φυλλική επιφάνεια σημαντική για τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα της καλλιέργειας φαίνεται να παραμένει σταθερή 100 ημέρες από τη μεταφύτευση και μέχρι το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου. Αντίθετα και σύμφωνα με τη προσέγγιση του τροποποιημένου προσομοιωτή (SimTom), το κορυφολόγιο της

καλλιέργειας και η προγραμματισμένη αποφύλλωση είναι υπεύθυνες για τη μείωση της φυλλικής επιφάνειας. Ταυτόχρονα άλλη μια συνέπεια του κορυφολογήματος των φυτών εμφανίζεται στον αριθμό και στο βάρος των πράσινων καρπών που παραμένουν στο φυτό. Ο αριθμός και το βάρος των πράσινων καρπών που σύμφωνα με τον προσομοιωτή παραμένουν στο φυτό αποτελεί την απαραίτητη πληροφορία για τους παραγωγούς, προκειμένου να καθορίσουν το πρόγραμμά τους, που πιθανό να ορίζει συγκεκριμένη ημερομηνία για το τέλος της καλλιεργητικής περιόδου, καθώς σύμφωνα με την κοινή πρακτική ακολουθεί μια δεύτερη καλλιέργεια. Οι Jones *et al.* 1991 και Dayan *et al.* 1993a, 1993b, εστιάζουν κυρίως στο ξηρό βάρος των ώριμων καρπών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζουν η κατάσταση της καλλιέργειας και πιο συγκεκριμένα ο αριθμός και το ξηρό βάρος των πράσινων καρπών δεν αποτελούν σημαντικό παράγοντα στον προγραμματισμό καλλιέργειας μακρά διάρκειας.

Τέλος άλλη μια διαφορά μεταξύ των άλλων προσομοιώσεων και αυτής που αφορά τις χώρες της Μεσογείου, είναι το στάδιο της καλλιέργειας κατά τη μεταφύτευση. Κύρια τακτική των παραγωγών της Μεσογείου αποτελεί η μεταφύτευση των σπορόφυτων όταν εμφανίζουν έξι φύλλα και μια ταξιανθία, με σκοπό να διαχειριστούν την αρχική κρίσιμη περίοδο, που χαρακτηρίζεται από αύξηση των βλαστικών οργάνων και σχηματισμό-ανάπτυξη των καρπών. Η ακρίβεια των υπολογισμών σε στάδια διαφορετικά από τη κύρια τακτική που ακολουθείτε στις χώρες της Βόρειας Ευρώπης, υποδεικνύει το βαθμό επιτυχίας του τροποποιημένου προσομοιώματος. Ταυτόχρονα ο προσομοιωτής υπολογίζει με ακρίβεια την ωρίμανση των καρπών, κάτι που όπως προαναφέρθηκε μπορεί να αποτελέσει εργαλείο διαχείρισης για τους παραγωγούς. Ο προσομοιωτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αποδείξει τη βέλτιστη διαχείριση της καλλιέργειας σε σχέση με την ανάπτυξη των βλαστικών μερών και την αναπαραγωγή των οργάνων ή τη βέλτιστη παραγόμενη βιομάζα, ανάλογα με τους ειδικούς στόχους που θα οριστούν αρχικά.

Παρόλα αυτά διαφορές μεταξύ του κορυφολογήματος στην πράξη και αυτής της προσομοίωσης υπάρχουν και οφείλονται στο γεγονός ότι στην πράξη το κορυφολόγημα πρέπει να πραγματοποιηθεί αρκετές φορές σε άτακτα χρονικά διαστήματα, μετά την αρχική επέμβαση, καθώς οι λαίμαργοι βλαστοί του φυτού συνεχίζουν να εκφύονται, γύρω από το κύριο στέλεχος. Ο προσομοιωτής (SimTom), από την άλλη θεωρεί ότι η ανά-βλάστηση των λαίμαργων βλαστών δεν πραγματοποιείται μετά από την εφαρμογή του κορυφολογήματος.

Κεφάλαιο 8°. Επιβεβαίωση βιοφυσικού προσομοιώματος (BioSiGreT)

8. Επιβεβαίωση βιοφυσικού προσομοιώματος (BioSiGreT)

8.1. Αποτελέσματα βιοφυσικού προσομοιώματος (BioSiGreT)

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή αφορούν μετρημένες και υπολογισμένες τιμές κατά την επιβεβαίωση του βιοφυσικού προσομοιώματος (BioSiGreT), για την 1^η πειραματική περίοδο από την 1^η Οκτωβρίου 2005 έως την 1^η Απριλίου 2006, και αναφέρονται:

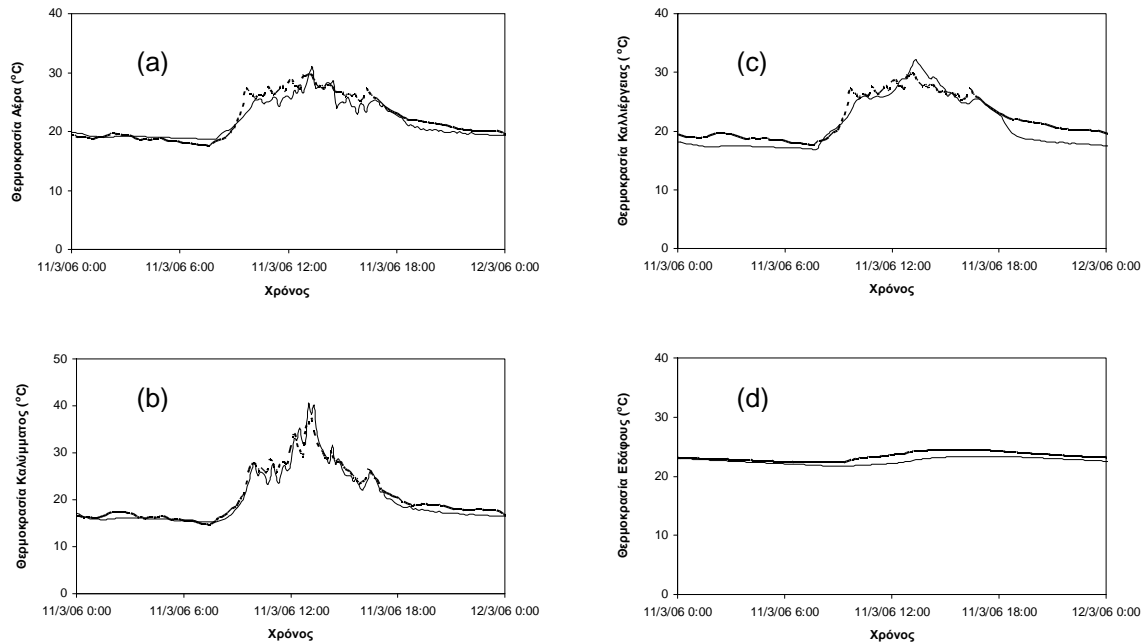
- ✘ Στα αποτελέσματα των κλιματικών παραμέτρων
- ✘ Στα αποτελέσματα ανάπτυξης και παραγωγής φυτών τομάτας

Για την πειραματική επιβεβαίωση του βιοφυσικού προσομοιώματος (BioSiGreT), χρησιμοποιήθηκαν τα κλιματικά δεδομένα της εξωτερικής: i). θερμοκρασίας του αέρα, ii). σχετικής υγρασίας του αέρα, iii). ηλιακής ακτινοβολίας, iv). ταχύτητας του αέρα, καθώς και των ελεγχόμενων μεταβλητών: v). ποσοστό ανοίγματος παραθύρων και vi). ενέργεια που απέδωσε το σύστημα θέρμανσης.

8.1.1. Αποτελέσματα κλιματικών παραμέτρων

8.1.1.1. Χρήση του BioSiGreT για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας και εδάφους

Η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας και του εδάφους, στις 11 Μαρτίου 2006 παρουσιάζεται στα Σχήματα 8.1 (a-d). Η κλίση της καμπύλης για τις υπολογισμένες τιμές από το βιοφυσικό προσομοίωμα (BioSiGreT), είναι παρόμοια με αυτή των μετρημένων τιμών για τη θερμοκρασία του αέρα, καλύμματος, καλλιέργειας και του εδάφους. Για όλες τις μετρούμενες μεταβλητές παρατηρούνται μικρές μεταβολές της διακύμανσης των τιμών της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρα που χρησιμοποιήθηκε για προσομοίωση.

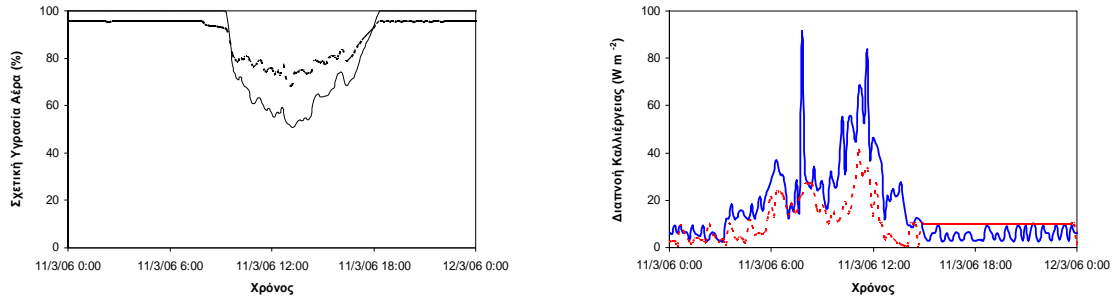


Σχήμα 8.1 (a), (b) (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) με χρήση του BioSiGreT τιμών, της θερμοκρασίας του αέρα, του καλύμματος της καλλιέργειας και του εδάφους, στις 11 Μαρτίου 2006.

Η στατιστική ανάλυση προσδιορίζει την ακρίβεια της προσομοίωσης, καθώς ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών προσδιορίστηκε από 68% για το έδαφος έως και 94% για τις τιμές του καλύμματος.

8.1.1.2. Χρήση του BioSiGreT για τον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας του αέρα και της διαπνοής της καλλιέργειας

Τα Σχήματα 8.2(a-b) παρουσιάζουν τις διαφορές μεταξύ των υπολογισμένων τιμών του βιοφυσικού προσομοιωτή (BioSiGreT) και των μετρημένων τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα και της διαπνοής της καλλιέργειας στις 11 Μαρτίου 2006. Στα Σχήματα 8.2(a-b) παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του προσομοιωτή (BioSiGreT) παρουσιάζουν μικρή διαφοροποίηση από τις μετρημένες τιμές. Όπως παρατηρείται ο προσομοιωτής υπολογίζει μεγαλύτερες τιμές για τη σχετική υγρασία του αέρα, ενώ υπό-υπολογίζει τη διαπνεόμενη ποσότητα της καλλιέργειας, όπως παρατηρήθηκε και στα αποτελέσματα του κλιματικού προσομοιώματος (SimGreC).

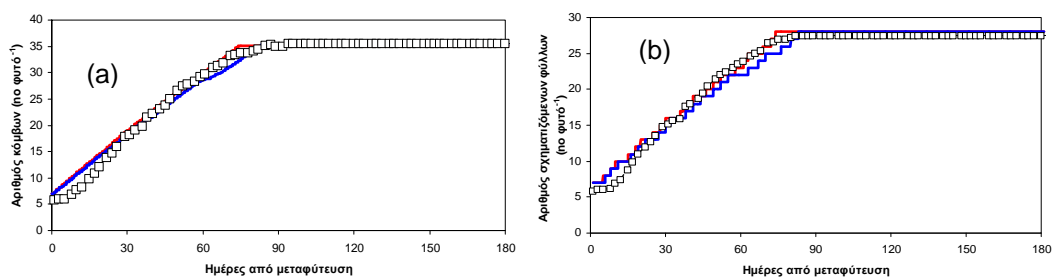


Σχήμα 8.2 (a), (b). Διακύμανση των μετρημένων (—) και υπολογισμένων (---) με χρήση του BioSiGreT τιμών, της σχετικής υγρασίας του αέρα και της διαπνοής της καλλιέργειας στις 11 Μαρτίου 2006.

8.1.2. Αποτελέσματα ανάπτυξης, παραγωγής βιομάζας και παραγωγής καρπών

8.1.2.1. Χρήση του BioSiGreT για υπολογισμό της ανάπτυξης των φυτών

Ο βαθμός συμφωνίας, μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών σύμφωνα με τον βιοφυσικό προσομοιωτή (BioSiGreT), είναι παρόμοιος για τα διάφορα χαρακτηριστικά ανάπτυξης των φυτών. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του αριθμού των κόμβων και των σχηματισμένων φύλλων κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου απεικονίζονται στα Σχήματα 8.3 (a), (b).

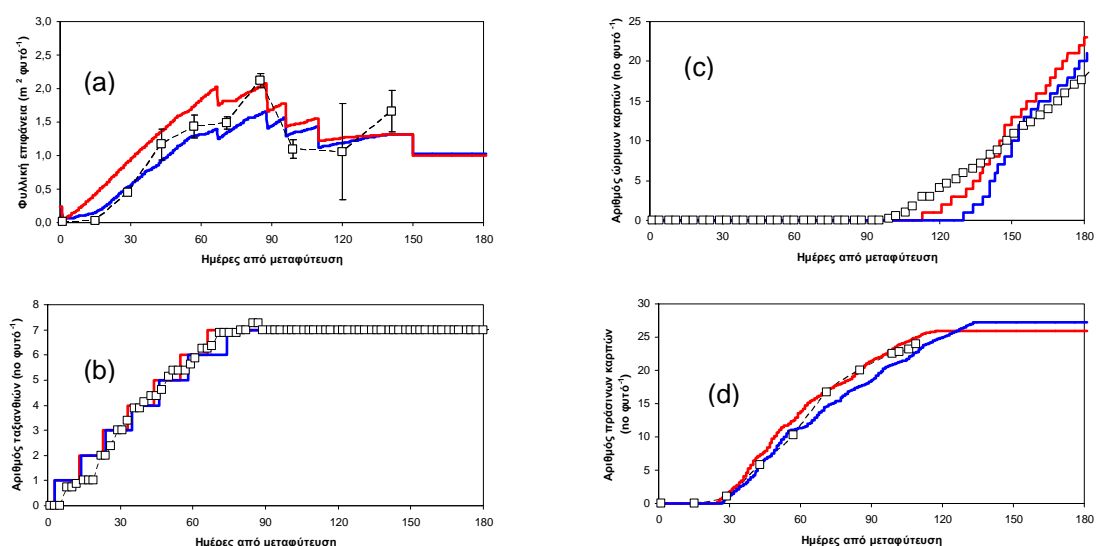


Σχήμα 8.3 (a), (b). Διακύμανση των μετρημένων (\square) και υπολογισμένων με το SimTom (—) & το BioSiGreT (—) μέσω τιμών, του αριθμού των κόμβων και των σχηματισμένων, φύλλων κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου.

Παρατηρήθηκε ότι η πορεία αύξησης του αριθμού των κόμβων και των σχηματισμένων φύλλων, τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές,

ακολουθεί παρόμοια κλίση. Η ανάπτυξη των φυτών διακόπτεται τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές όταν πραγματοποιείται το κορυφολόγημα των φυτών, ενώ ο αριθμός τους παραμένει σταθερός μέχρι το τέλος της περιόδου. Η διαφορά που παρουσιάζουν οι υπολογισμένες τιμές με τον βιολογικό προσομοιωτή SimTom και οι τιμές του βιοφυσικού προσομοιωτή BioSiGreT για το χρονικό διάστημα από την 60^η έως την 90^η ημέρα από τη μεταφύτευση είναι μικρότερη του 8%.

Ικανοποιητική συμφωνία παρατηρείται στο Σχήμα 8.4 (a), μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της φυλλικής επιφάνειας των φυτών, με τις υπολογισμένες τιμές του βιοφυσικού προσομοιώματος να συμφωνούν καλύτερα με τις πραγματικές τιμές, σε σχέση με το βιολογικό προσομοίωμα που υπό-εκτιμά τη φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας από την 50^η έως και της 90^η ημέρα της πειραματικής περιόδου.



Σχήμα 8.4 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (\square) και υπολογισμένων με το SimTom (—) & το BioSiGreT (—) μέσω τιμών της φυλλικής επιφάνειας, του αριθμού των ταξιανθιών, του αριθμού των ώριμων-συγκομιζόμενων και πράσινων-σηματιζόμενων καρπών, κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου.

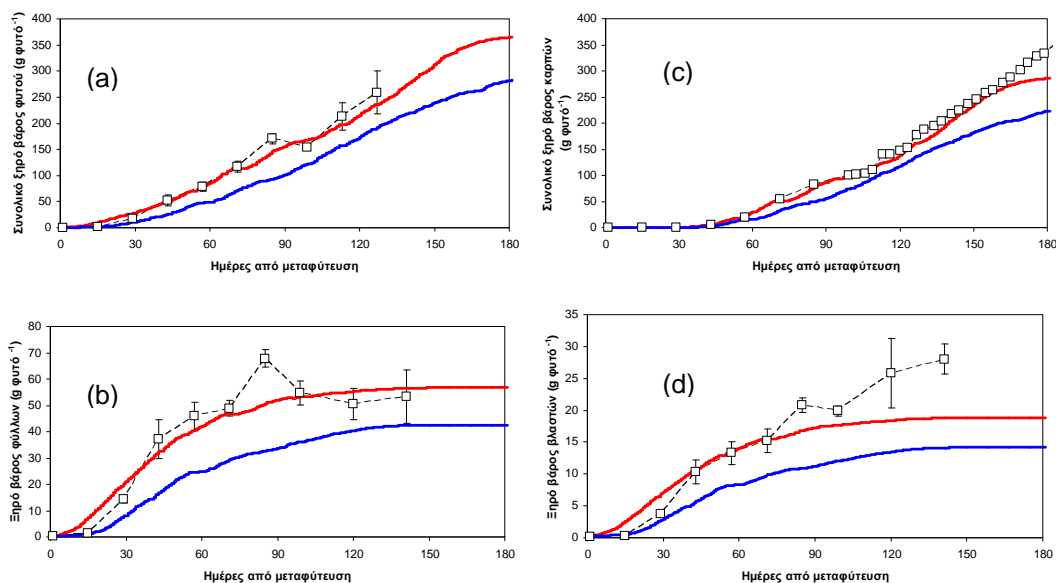
Στο Σχήμα 8.4 (b), απεικονίζεται η εξέλιξη του αριθμού των ταξιανθιών. Οι προσομοιωτές για το αρχικό διάστημα και μέχρι τη 30^η ημέρα υπερεκτιμούν το ρυθμό αύξησης συγκρίνοντας πάντα με τις μετρημένες τιμές που παρουσιάζουν τον αριθμό των σχηματιζόμενων ταξιανθιών. Διαφορά παρουσιάζουν οι υπολογισμένες τιμές με τον βιολογικό προσομοιωτή SimTom με εκείνες του βιοφυσικού προσομοιωτή

BioSiGreT για το χρονικό διάστημα από την 60^η έως την 90^η ημέρα από τη μεταφύτευση, ενώ από την στιγμή πραγματοποίησης του κορυφολογήματος της καλλιέργειας και μέχρι το τέλος της πειραματικής περιόδου δεν εμφανίζουν διαφορές.

Στο Σχήμα 8.4 (c) παρουσιάζεται η εξέλιξη του αριθμού των συγκομιζόμενων-ώριμων καρπών, όπου διακρίνεται μια διαφοροποίηση στη χρονική στιγμή έναρξης της περιόδου συγκομιδής. Τα αποτελέσματα του βιοφυσικού προσομοιωτή υστερούν στην ημερομηνία έναρξης της περιόδου συγκομιδής τόσο με το βιολογικό προσομοιωτή όσο και με τα πειραματικά δεδομένα. Αίτιο της χρονικής υστέρησης αποτελεί η διαφοροποίηση που παρατηρήθηκε στο κλίμα στο εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου (δεδομένα που δεν παρουσιάζονται), καθώς υπήρχαν χρονικά διαστήματα, στο σύνολο των 180 ημερών που προσομοιώνονται που παρατηρήθηκαν λάθη στους αισθητήρες καταγραφής των ελεγκτών του συστήματος (ποσοστό ανοίγματος των παραθύρων, αποδιδόμενη ενέργεια από το σύστημα θέρμανσης). Άμεση συνέπεια της μη ακριβούς καταγραφής των ελεγκτών του συστήματος η διαφοροποίηση του κλίματος που προσομοιώνει ο (BioSiGreT) για το εσωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου. Σημαντική διαφοροποίηση παρατηρήθηκε στη θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, που αποτελεί και τον κύριο παράγοντα για την υστέρηση που παρατηρείται στην ημερομηνία έναρξης της συγκομιδής των ώριμων καρπών. Αντίστοιχα, στην περίπτωση των πράσινων-σχηματιζόμενων καρπών παρατηρείται μικρή υστέρηση, στη χρονική διάρκεια που απαιτείται από την γονιμοποίηση έως τη συγκομιδή τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.4 (d).

8.1.2.2. Χρήση του BioSiGreT για υπολογισμό της παραγόμενης βιομάζας

Τα αποτελέσματα της διακύμανσης των μετρημένων και υπολογισμένων μέσω των τιμών με το βιολογικό (SimTom) και το βιοφυσικό προσομοίωμα (BioSiGreT) του συνολικού ξηρού βάρους του φυτού, του ξηρού βάρους των φύλλων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών και του ξηρού βάρους του βλαστού, κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου απεικονίζονται στα Σχήματα 8.5 (a), (b), (c), (d). Παρατηρήθηκε ότι στην πορεία αύξησης της παραγόμενης βιομάζας των χαρακτηριστικών που μελετώνται, παρουσιάζονται διαφορές μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών, ως συνέπεια της διαφοροποίησης του κλίματος

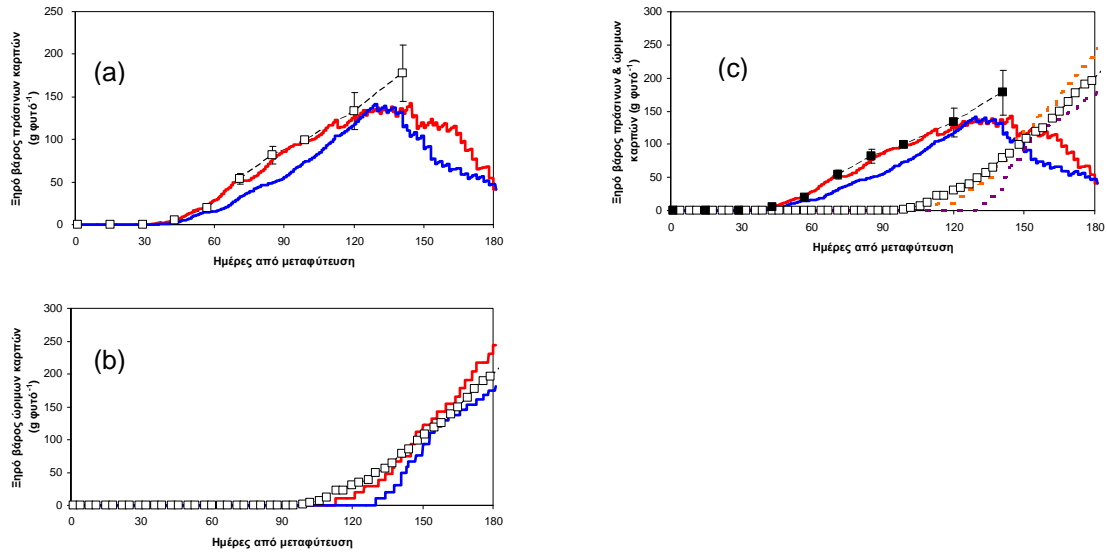


Σχήμα 8.5 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των μετρημένων (\square) και υπολογισμένων με το SimTom (—) & το BioSiGreT (—) μέσω των τιμών του συνολικού ξηρού βάρους του φυτού, του ξηρού βάρους των φύλλων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών και του ξηρού βάρους του βλαστού, κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου.

που διαμορφώθηκε κατά την προσομοίωση στο εσωτερικό της θερμοκηπιακής μονάδας. Οι διαφορές που παρατηρούνται στο συνολικό ξηρό βάρος του φυτού και στο συνολικό ξηρό βάρος των καρπών, που αποτελούν τα κρίσιμα μεγέθη για την εξαγωγή συμπερασμάτων, δεν μπορούν να χαρακτηριστούν σημαντικές. Μελλοντικές προσομοιώσεις μακράς διάρκειας, χωρίς ελλείψεις στα κλιματικά δεδομένα θα συμβάλλουν στην περαιτέρω βελτίωση των αποτελεσμάτων που προσφέρει το βιοφυσικό προσομοίωμα.

8.1.2.3. Χρήση του BioSiGreT για υπολογισμό της παραγωγής καρπών

Στα Σχήματα 8.6(a-c) παρουσιάζεται η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων μέσω των τιμών με το βιολογικό (SimTom) και το βιοφυσικό προσομοίωμα (BioSiGreT) για το ξηρό βάρος των πράσινων καρπών, το ξηρό βάρος των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών και το ξηρό βάρος των πράσινων και ώριμων καρπών για την πειραματική περίοδο. Η πορεία αύξησης του ξηρού βάρους των χαρακτηριστικών παρουσιάζει μικρές διαφοροποιήσεις που όπως εξηγήθηκε παραπάνω, οφείλονται στην επίδραση των κλιματικών συνθηκών.



Σχήμα 8.6 (a), (b), (c). Διακύμανση των μετρημένων (\square) και υπολογισμένων με το SimTom ($-$) & το BioSiGreT ($-$) μέσω των τιμών του ξηρού βάρους των πράσινων καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών, του ξηρού βάρους των πράσινων και ώριμων καρπών, κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου.

8.2. Συζήτηση για την επιβεβαίωση του βιοφυσικού προσομοιώματος (BioSiGreT)

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα αυτή απέδειξαν ότι το βιοφυσικό προσομοίωμα (BioSiGreT) μπορεί να χρησιμοποιηθεί, τόσο για τον υπολογισμό των κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων όσο και για τον υπολογισμό της ανάπτυξης της καλλιέργειας και της παραγόμενης βιομάζας. Παρόλα αυτά προβληματισμός παρουσιάστηκε κατά τον υπολογισμό της παραγόμενης βιομάζας του φυτού και της παραγωγής των καρπών, καθώς η προσομοίωση μακράς διάρκειας οδηγεί σε εσφαλμένο υπολογισμό των κλιματικών παραμέτρων όταν υπάρχουν σφάλματα στις μετρούμενες τιμές. Κατά την ανάπτυξη του βιοφυσικού προσομοιώματος δεν αναπτύχθηκε μηχανισμός με “feedback control” για να ελέγχει τις αποκλίσεις που παρουσιάζονται κατά την ημερήσια διακύμανση σε σχέση με τις προηγούμενες ημέρες και με δεδομένα αποθηκευμένα σε βάση δεδομένων. Σκοπός του βιοφυσικού προσομοιώματος ήταν η πιστή απεικόνιση της πραγματικότητας χωρίς την παρουσία μηχανισμού διόρθωσης. Συνέπεια του τρόπου ανάπτυξης του προσομοιωτή αποτελεί, η άμεση επίδραση σε μεταβολές ή σφάλματα των μετρούμενων χαρακτηριστικών καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα διόρθωσης αυτών. Ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν έγινε με προσομοίωση όλης της πειραματικής περιόδου (180 ημερών).

8.2.1. Συμπεράσματα από τον υπολογισμό των κλιματικών παραμέτρων

Στην παρουσίαση των κλιματικών παραμέτρων παρατηρήθηκε ακρίβεια στον υπολογισμό των μετρούμενων χαρακτηριστικών από το βιοφυσικό προσομοίωμα σε σχέση με τις μετρούμενες τιμές. Παρόλα αυτά υπήρξαν και ημέρες όπου οι τιμές μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών παρουσίασαν διαφορές (δεδομένα που δεν παρουσιάζονται στο παρόν κείμενο). Οι περισσότερες από τις διαφορές οφείλονται κυρίως σε εσφαλμένο υπολογισμό των ελεγχόμενων μεταβλητών i). ποσοστό ανοίγματος των παραθύρων, ii). ενέργεια που παρέχει στη θερμοκηπιακή μονάδα το σύστημα θέρμανσης.

Η καταγραφή μακράς διάρκειας πειραματικών δεδομένων προβληματίζει τους ερευνητές καθώς το πλήθος των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των μετρούμενων δεδομένων οδηγείται περιοδικά σε σφάλματα λόγω της καταπόνησης του θερμοκηπίου από τις εξωτερικές κλιματικές συνθήκες και την εντατική χρήση. Για την μείωση της διαφοράς που παρουσιάστηκε μεταξύ των μετρούμενων και των υπολογισμένων τιμών από το βιοφυσικό προσομοίωμα (BioSiGreT), πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις μικρότερης χρονικής διάρκειας (7 ημερών και 15 ημερών) για το σύνολο της πειραματικής περιόδου. Τα αποτελέσματα (δεν παρουσιάζονται στο παρόν κείμενο) απέδειξαν την αρχική υπόθεση, ότι με μικρής χρονικής διάρκειας το σφάλμα στους υπολογισμούς των κλιματικών συνθηκών περιορίζεται σημαντικά.

8.2.2. Συμπεράσματα από τον υπολογισμό της ανάπτυξης και παραγωγής φυτών τομάτας

Τα αποτελέσματα χρήσης του βιοφυσικού προσομοιώματος για τον υπολογισμό της κατάστασης των φυτών έδειξαν ότι στην περίπτωση της ανάπτυξης των φυτών στα Σχήματα 8.3 (a) και (b), δεν παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές καθώς η διαφοροποίηση των υπολογισμένων τιμών με το (BioSiGreT), σε σχέση με το βιολογικό προσομοίωμα (SimTom) και τις πραγματικές τιμές ήταν μικρότερο του 8% για ορισμένο χρονικό διάστημα.

Στις περιπτώσεις της παραγόμενης βιομάζας και της παραγωγής των καρπών στα Σχήματα 8.4(a-b), 8.5(a-b) και 8.6(a-c) οι διαφορές που παρουσιάστηκαν οφείλονται όπως αναλύθηκε στις κλιματικές συνθήκες. Παρόλα αυτά, η προσομοίωση της πειραματικής περιόδου σε χρονικές περιόδους της τάξεως των 7 και 15 ημερών (αποτελέσματα που δεν παρουσιάζονται στο παρόν κείμενο), έδειξε ελαχιστοποίηση των διαφορών. Άλλωστε σκοπός της ανάπτυξης του βιοφυσικού προσομοιώματος ήταν η χρήση του, για μελέτη σεναρίων ανάλογα με το βάθος πρόβλεψης που δίνουν τα web-site σχετικά με τις κλιματικές συνθήκες, οι οποίες δεν ξεπερνούν σε διάρκεια τις 10 ημέρες. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα το βιοφυσικό προσομοίωμα δύναται να χρησιμοποιηθεί από τους παραγωγούς για την ανάλυση σεναρίων και για την πρόβλεψη τόσο των κλιματικών συνθηκών όσο και της παραγωγής της καλλιέργειας τομάτας.

Κεφάλαιο 9°. Βαθμονόμηση & επιβεβαίωση γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων

9. Βαθμονόμηση & επιβεβαίωση γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων

9.1. Αποτελέσματα γεννήτριας κλιματικών δεδομένων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή αφορούν τη βαθμονόμηση και επιβεβαίωση της γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων. Τα κλιματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση και επιβεβαίωση της γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων συλλέχθηκαν κατά τις δύο πειραματικές περιόδους. Τα αποτελέσματα αφορούν μετρημένες και υπολογισμένες τιμές για το εξωτερικό περιβάλλον του θερμοκηπίου και πιο συγκεκριμένα:

- ✘ Τη θερμοκρασία του αέρα
- ✘ Τη σχετική υγρασία του αέρα
- ✘ Την ηλιακή ακτινοβολία
- ✘ Την ταχύτητα του αέρα

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 και πειραματικό προσδιορισμό στις θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στους Πίνακες 9.1 και 9.2 παρουσιάζονται ο προσδιορισμός των τιμών των παραμέτρων $Kt(h)$ και $Kr(h)$ που πραγματοποιήθηκε κατά την βαθμονόμηση των εξισώσεων υπολογισμού της θερμοκρασίας

$$T_a(h) = T_{a\min} + Kt(h) \cdot (T_{a\max} - T_{a\min}) \quad (3.92)$$

και της σχετικής υγρασίας του αέρα

$$R(h) = Rh_{\min} + Kr(h) \cdot (Rh_{\max} - Rh_{\min}) \quad (3.93).$$

Πίνακας 9.1. Συντελεστής $Kt(h)$ για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας

Ωρα	Μήνας					
	Οκτώβρης	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος
0	0.27	0.30	0.37	0.37	0.33	0.30
1	0.23	0.27	0.36	0.34	0.31	0.26
2	0.20	0.22	0.33	0.31	0.28	0.23

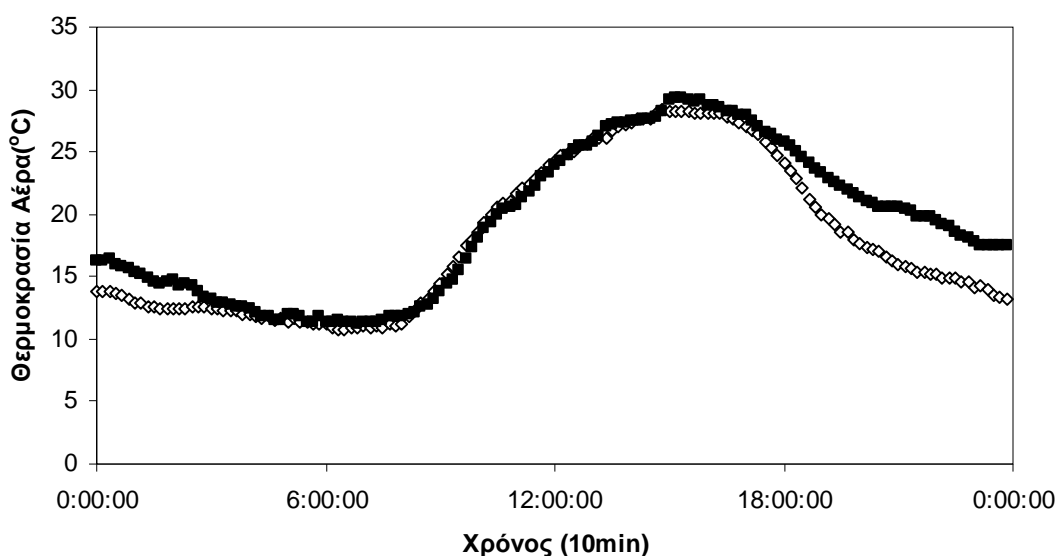
3	0.20	0.20	0.31	0.28	0.21	0.20
4	0.18	0.18	0.28	0.27	0.18	0.17
5	0.16	0.17	0.28	0.23	0.15	0.15
6	0.14	0.17	0.27	0.19	0.13	0.14
7	0.13	0.15	0.26	0.18	0.12	0.14
8	0.16	0.13	0.24	0.19	0.16	0.27
9	0.28	0.17	0.30	0.27	0.33	0.43
10	0.47	0.32	0.46	0.43	0.51	0.60
11	0.61	0.50	0.59	0.61	0.65	0.71
12	0.73	0.62	0.70	0.68	0.75	0.79
13	0.81	0.73	0.79	0.74	0.86	0.86
14	0.87	0.83	0.86	0.78	0.91	0.89
15	0.92	0.89	0.86	0.79	0.92	0.89
16	0.91	0.90	0.83	0.76	0.89	0.85
17	0.87	0.83	0.71	0.66	0.79	0.78
18	0.74	0.68	0.55	0.52	0.61	0.66
19	0.56	0.54	0.48	0.42	0.49	0.51
20	0.45	0.48	0.43	0.39	0.44	0.44
21	0.37	0.44	0.37	0.41	0.38	0.38
22	0.33	0.39	0.34	0.39	0.33	0.31
23	0.29	0.39	0.32	0.35	0.31	0.28

Πίνακας 9.2. Συντελεστής $Kr(h)$ για τον υπολογισμό της Σχετικής Υγρασίας

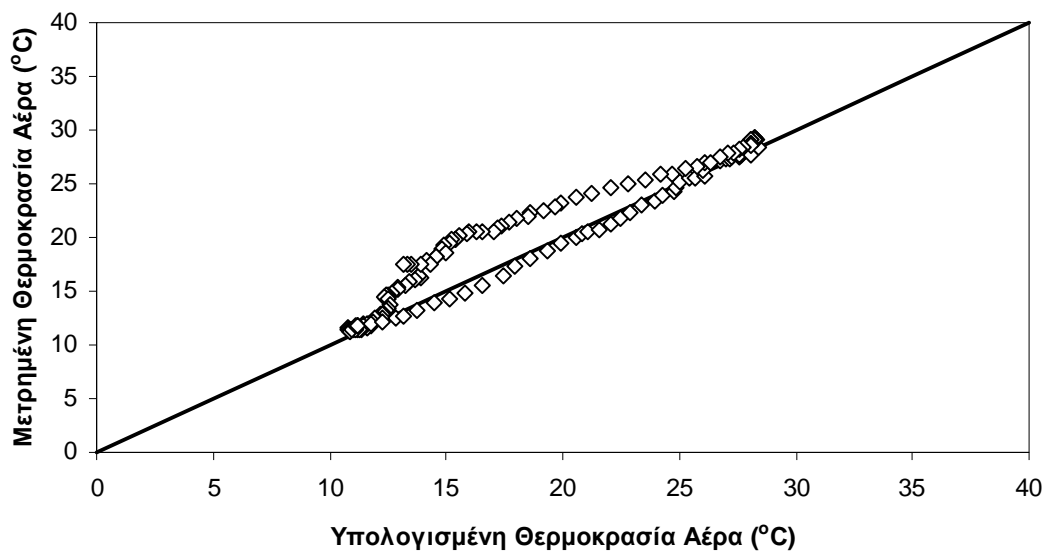
Ωρα	Μήνας					
	Οκτώβρης	Νοέμβριος	Δεκέμβριος	Ιανουάριος	Φεβρουάριος	Μάρτιος
0	0.83	0.80	0.70	0.70	0.75	0.80
1	0.85	0.82	0.70	0.73	0.78	0.83
2	0.87	0.84	0.72	0.73	0.79	0.85
3	0.85	0.86	0.73	0.74	0.80	0.85
4	0.85	0.89	0.75	0.76	0.82	0.88
5	0.86	0.90	0.74	0.76	0.82	0.87
6	0.86	0.91	0.74	0.78	0.83	0.89
7	0.85	0.90	0.75	0.77	0.84	0.91
8	0.84	0.90	0.79	0.76	0.83	0.89
9	0.78	0.89	0.77	0.75	0.77	0.79
10	0.61	0.86	0.67	0.64	0.64	0.64
11	0.44	0.73	0.53	0.46	0.47	0.48
12	0.31	0.56	0.42	0.38	0.37	0.37
13	0.22	0.42	0.32	0.34	0.30	0.27
14	0.15	0.29	0.22	0.29	0.26	0.22
15	0.10	0.19	0.24	0.30	0.25	0.20
16	0.10	0.18	0.26	0.35	0.29	0.23
17	0.15	0.28	0.43	0.47	0.37	0.27
18	0.30	0.53	0.57	0.53	0.47	0.40
19	0.51	0.66	0.60	0.63	0.61	0.60
20	0.63	0.70	0.65	0.62	0.65	0.68
21	0.72	0.73	0.71	0.57	0.64	0.72
22	0.76	0.76	0.74	0.59	0.68	0.76
23	0.79	0.79	0.73	0.63	0.72	0.81

9.1.1. Πρόβλεψη της διακύμανσης της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης της γεννήτριας

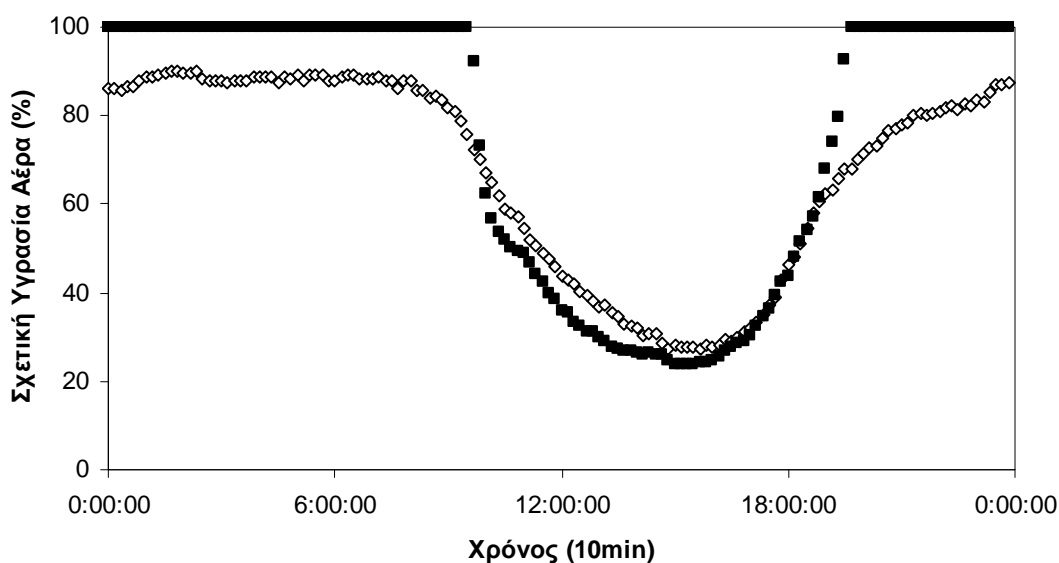
Η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα, στις 10 Οκτωβρίου 2005 παρουσιάζεται στα Σχήματα 9.1 και 9.3. Η τάση της καμπύλης για τις υπολογισμένες τιμές είναι παρόμοια με αυτή των μετρημένων τιμών τόσο για τη θερμοκρασία του αέρα, όσο και για τη σχετική υγρασία. Η κλίση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών για τη θερμοκρασία του αέρα συμφωνεί, ενώ μικρή διαφωνία παρατηρείται κατά την περίοδο μεταξύ της 18:00 και 24:00. Αντίστοιχα για την σχετική υγρασία του αέρα παρατηρείται μια διαφοροποίηση στα ανώτερα σημεία μεταξύ των υπολογισμένων και των μετρημένων τιμών, κάτι που οφείλεται στη μέγιστη τιμή πρόγνωσης που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης για την συγκεκριμένη περίοδο. Τα Σχήματα 9.2 και 9.4 παρουσιάζουν την 1:1 καμπύλη, μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα.



Σχήμα 9.1. Διακύμανση των μετρημένων \blacksquare και υπολογισμένων \diamond τιμών της θερμοκρασίας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων στις 10 Οκτωβρίου 2005.



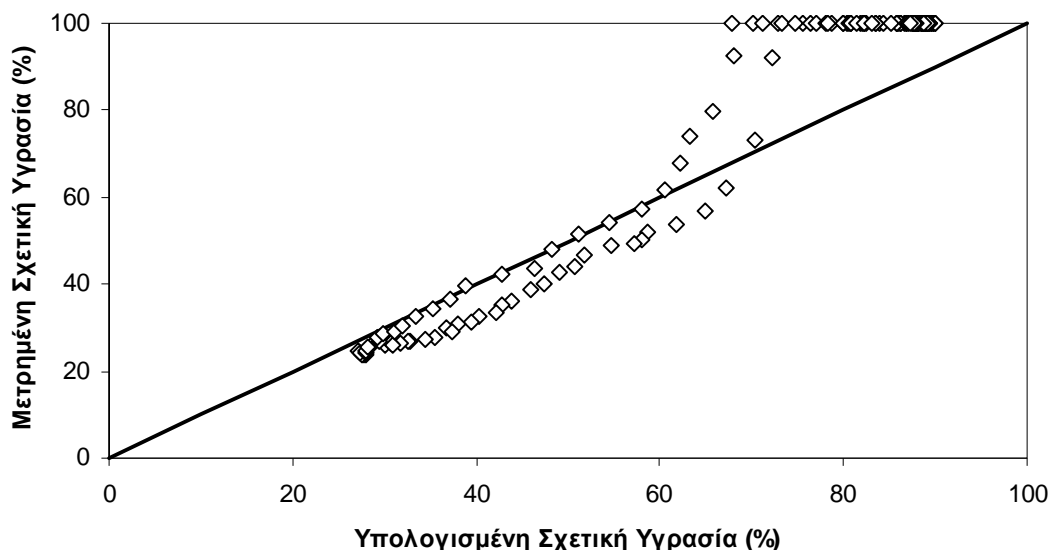
Σχήμα 9.2. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα στις 10 Οκτωβρίου 2005.



Σχήμα 9.3. Διακύμανση των μετρημένων \blacksquare και υπολογισμένων \diamond τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων στις 10 Οκτωβρίου 2005.

Η εκτίμηση της γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων θεωρείται αρκετά ακριβής για τις υπολογισμένες τιμές. Η στατιστική ανάλυση επιβεβαιώνει την 1:1 καμπύλη καθώς ο βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων

τιμών προσδιορίστηκε στο 91 και 93% για τις τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα αντίστοιχα.



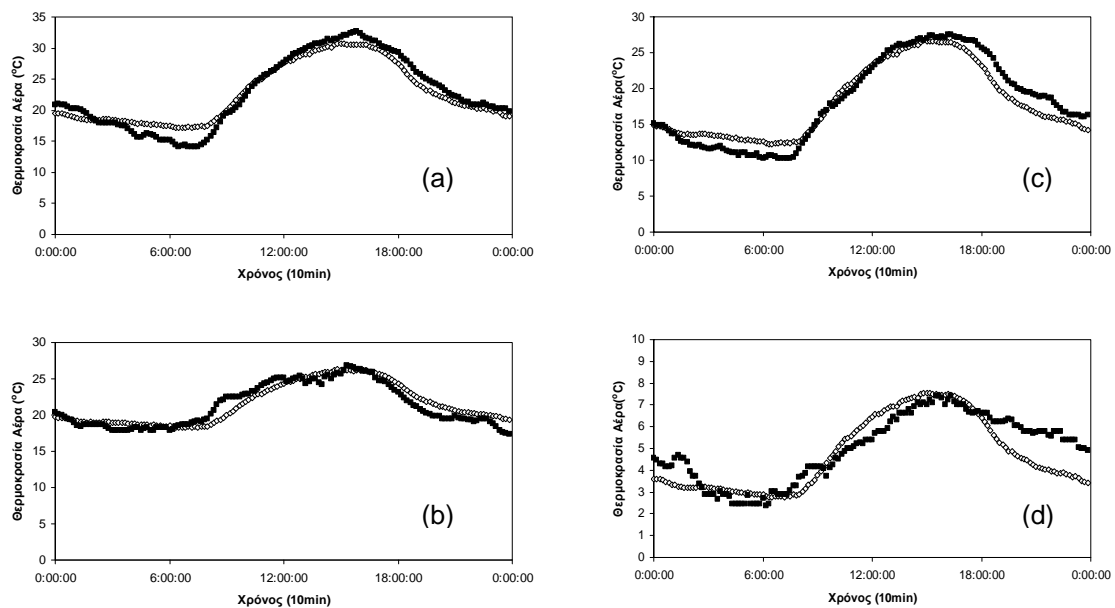
Σχήμα 9.4. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα στις 10 Οκτωβρίου 2005.

Οι μικρές αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν κυρίως στον υπολογισμό της σχετικής υγρασίας του αέρα οφείλονται, στη μεταβολή των κλιματικών δεδομένων σε σχέση με το έτος αναφοράς από όπου προέκυψαν οι τιμές των συντελεστών καθώς και στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές που χρησιμοποιήθηκαν από το web-site για την τροφοδότηση του προσομοιωτή.

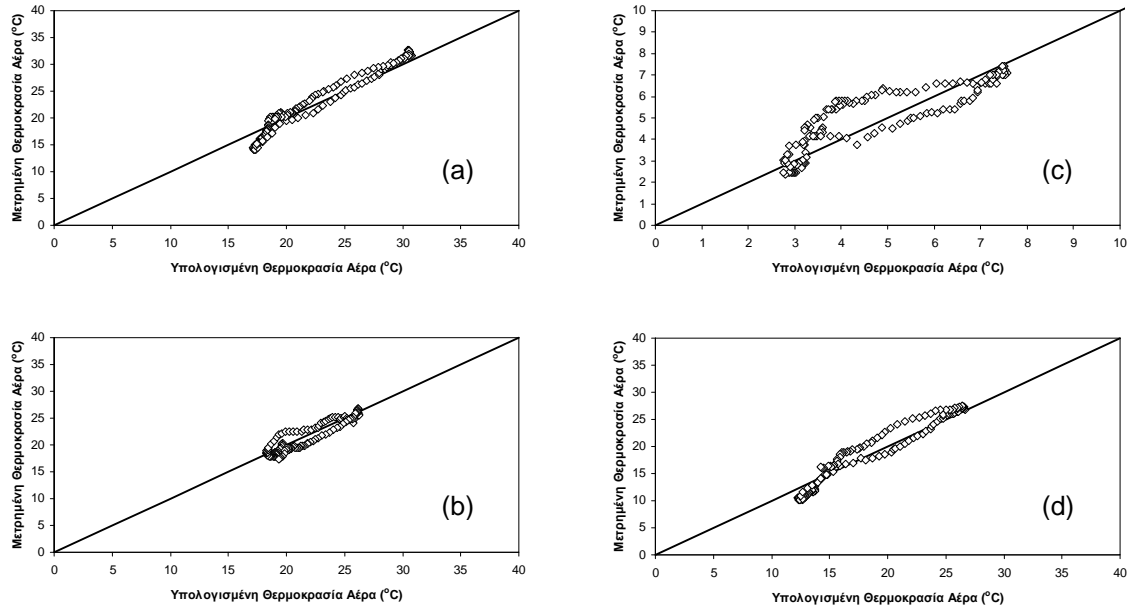
9.1.2. Πρόβλεψη διακύμανσης της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα κατά τη διαδικασία επιβεβαίωσης της γεννήτριας

Τα αποτελέσματα της επιβεβαίωσης της γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων για τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα, για τέσσερις τυχαίες πειραματικές ημέρες απεικονίζονται στα Σχήματα 9.5 (a-d) και 9.7 (a-d). Για την θερμοκρασία του αέρα παρατηρήθηκε ότι η αλλαγή της κλίσης που ακολουθεί η πορεία αύξησης και μείωσής της, τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές πραγματοποιείται στο ίδιο χρονικό διάστημα, με μικρή διαφοροποίηση για την

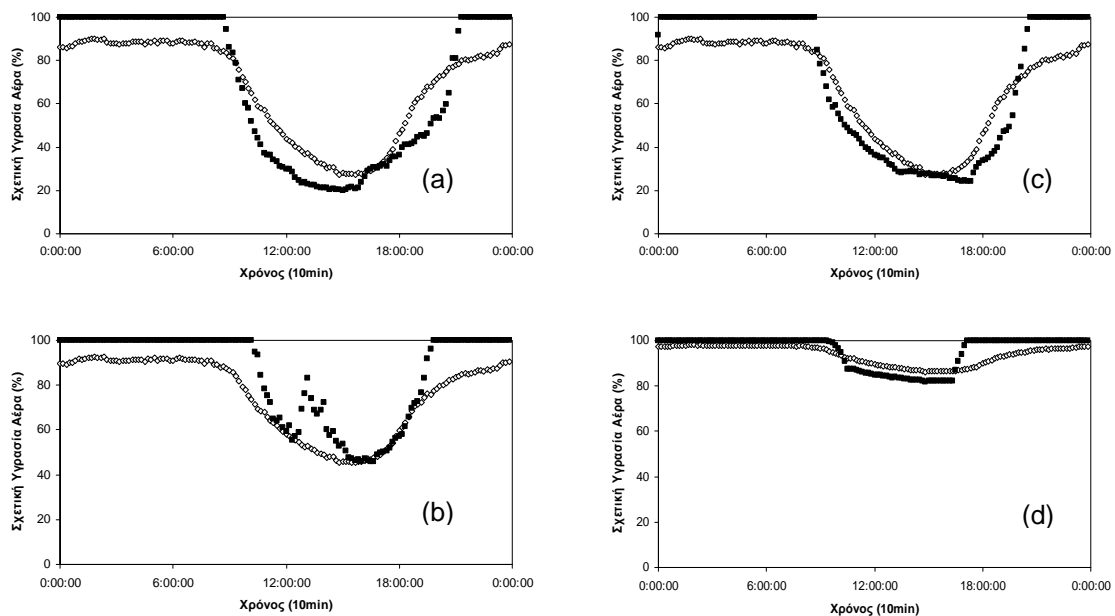
τελευταία πειραματική περίοδο στο Σχήμα 9.5(d). Αντίστοιχα για την σχετική υγρασία του αέρα παρουσιάζονται κάποιες διαφοροποιήσεις τόσο στη μέγιστη τιμή όπως παρατηρήθηκε και στα αποτελέσματα βαθμονόμησης της γεννήτριας όσο και κατά των ημερών που προσομοιώνονται. Τα Σχήματα 9.6(a-d) και 9.8(a-d) παρουσιάζουν την 1:1 καμπύλη, μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας του αέρα. Ο βαθμός συσχέτισης για τη θερμοκρασία του αέρα κυμάνθηκε από 71% για το Σχήμα 9.5 (d) έως 90-93% για τα Σχήματα 9.5(a-c) και αποδεικνύει τη μικρή απόκλιση που παρουσιάζουν οι υπολογισμένες από τις μετρημένες τιμές. Οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται στις υπολογισμένες τιμές του κλίματος οφείλονται, στο πειραματικό σφάλμα που εμπεριέχει ο στατιστικός προσδιορισμός των συντελεστών $Kt(h)$ και $Kr(h)$ καθώς προέρχονται από κλιματικά δεδομένα ενός έτους καθώς και στην ακρίβεια των μέγιστων και ελάχιστων τιμών πρόγνωσης από το web-site που χρησιμοποιήθηκαν ως βάση από την γεννήτρια για την τροφοδότηση του μοντέλου κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης.



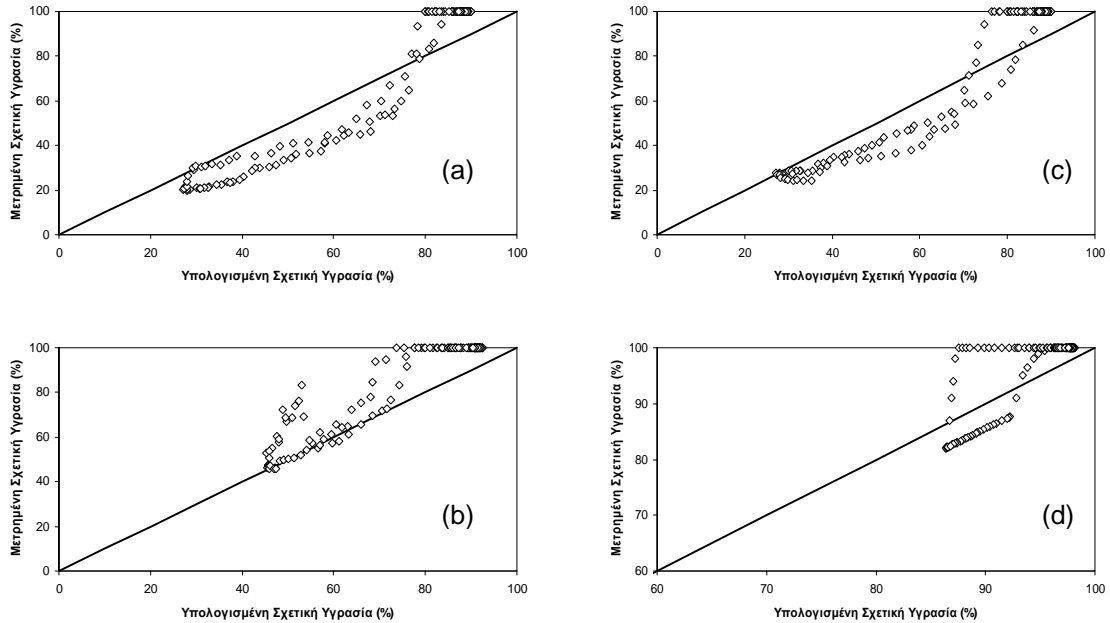
Σχήμα 9.5. Διακύμανση των μετρημένων \blacksquare και υπολογισμένων \diamond τιμών της θερμοκρασίας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων για τις περιόδους: a). 1 Οκτωβρίου 2007, b). 5 Οκτωβρίου 2007, c). 10 Φεβρουαρίου 2008, d). 15 Μαρτίου 2008.



Σχήμα 9.6. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της θερμοκρασίας του αέρα για τις περιόδους: α). 1 Οκτωβρίου 2007, β). 5 Οκτωβρίου 2007, γ). 10 Φεβρουαρίου 2008, δ). 15 Μαρτίου 2008.



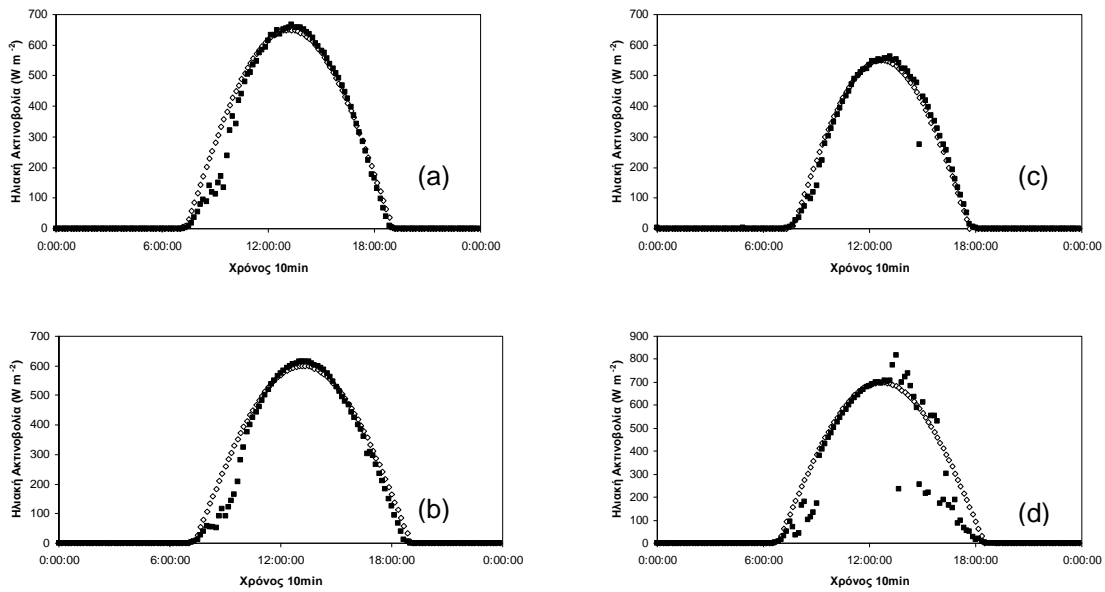
Σχήμα 9.7. Διακύμανση των μετρημένων \blacksquare και υπολογισμένων \diamond τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων για τις περιόδους: α). 1 Οκτωβρίου 2007, β). 5 Οκτωβρίου 2007, γ). 10 Φεβρουαρίου 2008, δ). 15 Μαρτίου 2008.



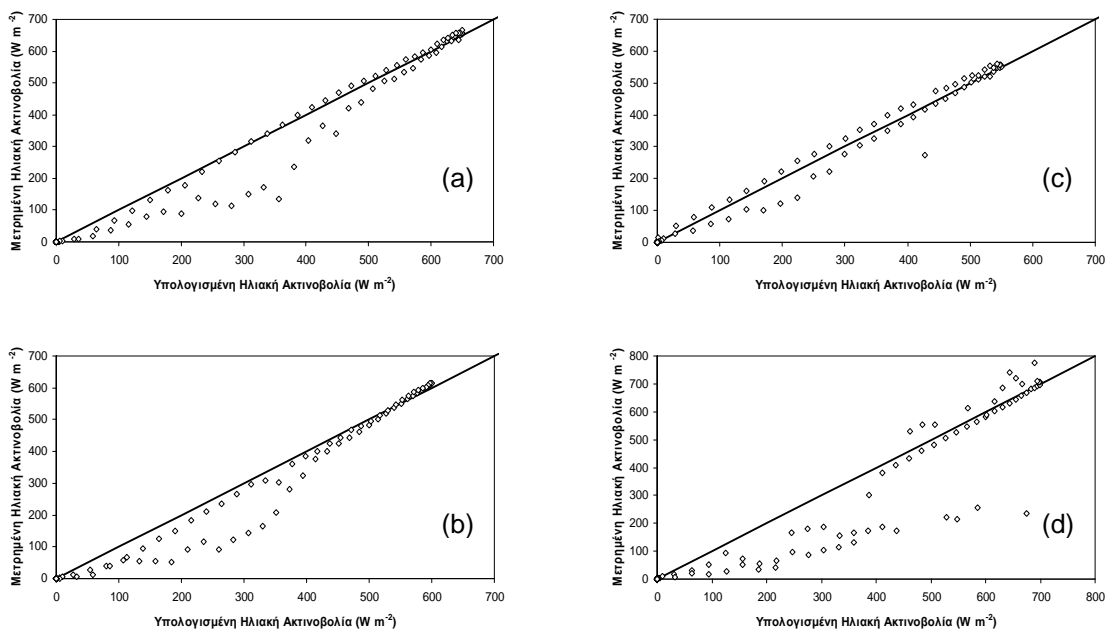
Σχήμα 9.8. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της σχετικής υγρασίας του αέρα για τις περιόδους: α). 1 Οκτωβρίου 2007, β). 5 Οκτωβρίου 2007, γ). 10 Φεβρουαρίου 2008, δ). 15 Μαρτίου 2008.

9.1.3. Πρόβλεψη διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας

Στα Σχήματα 9.9(a-d) απεικονίζεται η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών για την εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία. Παρατηρήθηκε ότι η κλίση της καμπύλης για όλες τις πειραματικές ημέρες είναι παρόμοια τόσο στις μετρημένες όσο και στις υπολογισμένες τιμές. Διαφορές στην κλίση παρουσιάζονται ανάμεσα στις παραγόμενες και τις μετρημένες τιμές για κάποια χρονικά διαστήματα όπου υπήρξε νεφοσκεπής ουρανός με συνέπεια την αυξομείωση των τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα Σχήματα 9.10(a-d) παρουσιάζουν την 1:1 καμπύλη, μεταξύ των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ ο βαθμός συσχέτισής τους κυμάνθηκε από 90% έως 98%. Αυτό αποδεικνύει τη μικρή απόκλιση που παρουσιάζουν οι υπολογισμένες από τις μετρημένες τιμές και επιβεβαιώνει τη λειτουργία της γεννήτριας παραγωγής κλιματικών δεδομένων, ως εργαλείο χρήσιμο για την πρόβλεψη των κλιματικών συνθηκών για ορισμένη χρονική διάρκεια.



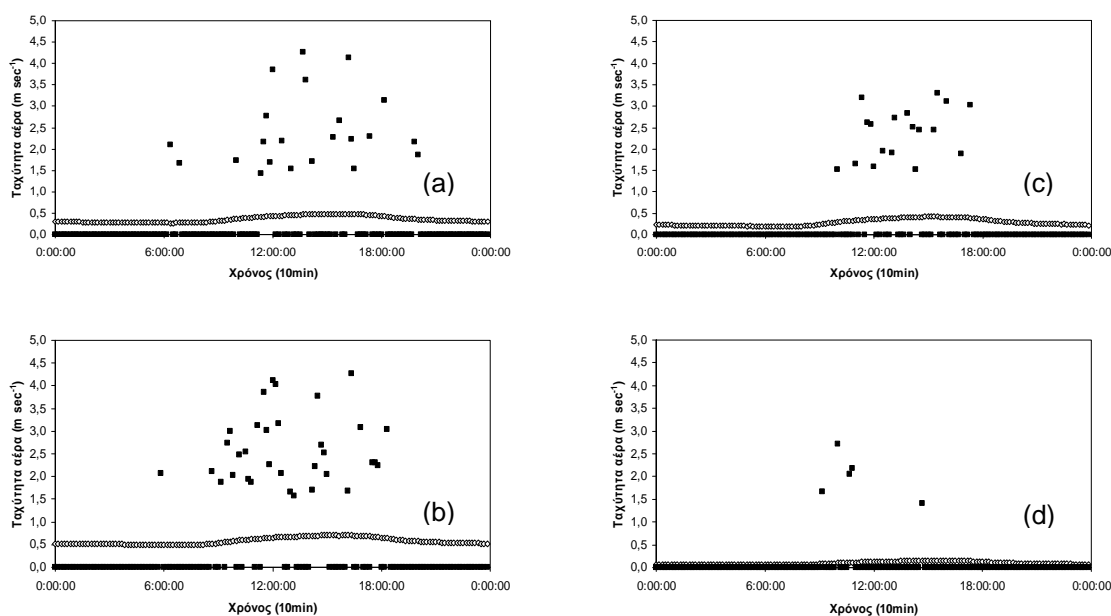
Σχήμα 9.9. Διακύμανση των μετρημένων \blacksquare και υπολογισμένων \diamond τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων για τις περιόδους: a). 1 Οκτωβρίου 2007, b). 5 Οκτωβρίου 2007, c). 10 Φεβρουαρίου 2008, d). 15 Μαρτίου 2008.



Σχήμα 9.10. Συσχέτιση μετρημένων και υπολογισμένων τιμών της ηλιακής ακτινοβολίας για τις περιόδους: a). 1 Οκτωβρίου 2007, b). 5 Οκτωβρίου 2007, c). 10 Φεβρουαρίου 2008, d). 15 Μαρτίου 2008.

9.1.4. Πρόβλεψη διακύμανσης της ταχύτητας του αέρα

Στα Σχήματα 9.11(a-d) απεικονίζεται η διακύμανση των μετρημένων και υπολογισμένων τιμών για την εξωτερική ταχύτητα του αέρα. Παρατηρήθηκε ότι οι προσομοιωμένες τιμές για όλες τις πειραματικές ημέρες, παρουσιάζουν μια κλίση κατά την ημερήσια διακύμανσή τους κάτι που δεν συμφωνεί με τις πραγματικές τιμές στις οποίες παρατηρούνται κύρια μηδενικές τιμές και μια άναρχη διασπορά τιμών όταν εμφανίζεται το φαινόμενο. Η διαφορά οφείλεται στο τρόπο υπολογισμού της ταχύτητας του αέρα, όπου η γεννήτρια στηρίζει τον τρόπο υπολογισμού σε μεγάλο βαθμό στις μέγιστες και ελάχιστες ημερήσιες τιμές της θερμοκρασίας καθώς και στη μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα. Άμεση συνέπεια της επίδραση των θερμοκρασιών είναι η κλίση της καμπύλης, ενώ η μέση τιμή της ταχύτητας του αέρα συμβάλλει στον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής. Η διαφορά για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα των ημερών που προσομοιώθηκαν θεωρείται αμελητέα, καθώς η πραγματική τιμή της ταχύτητας του αέρα ήταν σχεδόν μηδενική ενώ οι τιμές που προέκυψαν από την γεννήτρια δεν ήταν μεγαλύτερες από 0.35m sec^{-1} .



Σχήμα 9.11. Διακύμανση των μετρημένων \blacksquare και υπολογισμένων \blacklozenge τιμών της ταχύτητας του αέρα σύμφωνα με τη γεννήτρια κλιματικών δεδομένων για τις περιόδους: a). 1 Οκτωβρίου 2007, b). 5 Οκτωβρίου 2007, c). 10 Φεβρουαρίου 2008, d). 15 Μαρτίου 2008.

9.2. Συζήτηση των αποτελεσμάτων της γεννήτριας κλιματικών δεδομένων

Οι περισσότερες γεννήτριες παραγωγής κλιματικών δεδομένων έχουν αναπτυχθεί και εξυπηρετούν τις ανάγκες τις Βόρειας Ευρώπης, (Jones et al. 1970, Richardson 1981, Larsen και Pense 1982, *Wgen*, Richardson και Wright 1984, Shu Geng et al. 1985, *Wxgen* Richardson και Nicks 1990, *USClimate*, Hanson et al. 1994, *MTCLIM*, Thorton et al. 1997, *ClimGen*, Stockle et al. 2001, Parlange και Katz 2000, *GEM*, Johnson et al. 1996). Η απουσία γεννήτριας προσαρμοσμένης στις ανάγκες των χωρών της Μεσογείου αποτέλεσε την ανάγκη για τη βαθμονόμηση και επιβεβαίωση της Γαλλικής γεννήτριας. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε με κλιματικά δεδομένα της περιοχής του Βελεστίνου, περιοχής που αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείγμα του κλίματος που επικρατεί κατά τη διάρκεια του χειμώνα στις περισσότερες περιοχές γύρω από τη Μεσογειακή λεκάνη.

Η σύγκριση μεταξύ των υπολογισμένων τιμών και των πειραματικών δεδομένων για την θερμοκρασία και την σχετική υγρασία του αέρα καθώς και την ηλιακή ακτινοβολία απέδειξε, την υψηλή αξιοπιστία και καταλληλότητα της γεννήτριας. Τα αποτελέσματα έδειξαν συμφωνία για τις περισσότερες από τις πειραματικές ημέρες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσομοίωση. Οι διαφορές που παρουσιάστηκαν στον υπολογισμό της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα οφείλονται στο πειραματικό σφάλμα που εμπεριέχει ο στατιστικός προσδιορισμός των συντελεστών $Kt(h)$ και $Kr(h)$ καθώς προέρχονται από κλιματικά δεδομένα ενός έτους. Ταυτόχρονα η μη ακρίβεια στην πρόγνωση των μέγιστων και ελάχιστων τιμών από το web-site που χρησιμοποιήθηκαν ως βάση από την γεννήτρια για την τροφοδότηση του μοντέλου κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης, οδηγεί σε διαφοροποίηση των μετρημένων από τις υπολογισμένες τιμές.

Στην περίπτωση υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρήθηκε ότι η γεννήτρια προσφέρει ακρίβεια στην διακύμανση των τιμών, εκτός των περιπτώσεων νεφοσκεπούς ουρανού όπου οι πραγματικές τιμές διαφοροποιούνται ανάλογα με την περίοδο εμφάνισης του νέφους πάνω από τον αισθητήρα καταγραφής. Αντίθετα στην περίπτωση υπολογισμού της ταχύτητας του αέρα η γεννήτρια δεν προσφέρει την ίδια ακρίβεια στις παραγόμενες τιμές. Η επίδραση των θερμοκρασιών στην κλίση της καμπύλης και της μέσης τιμής της ταχύτητας του αέρα στον υπολογισμό της ελάχιστης τιμής οδηγούν τα αποτελέσματα της γεννήτριας σε διαφοροποίηση σε

σχέση με τις πραγματικές τιμές. Η διαφοροποίηση για την περιοχή αναφοράς (Αγρόκτημα Πανεπιστημίου Θεσσαλίας περιοχή Βελεστίνου) αφορά ένα μικρό κομμάτι της ημέρας κατά τη διάρκεια του οποίου εμφανίζονται υψηλές τιμές για την ταχύτητα του αέρα, κάτι που ασφαλώς δεν προκαλεί μεγάλο σφάλμα, καθώς στο μεγαλύτερο μέρος της ημέρας υπάρχει μικρή διαφοροποίηση των πραγματικών από τις υπολογισμένες τιμές.

Η ακρίβεια που προσφέρει η γεννήτρια παραγωγής κλιματικών δεδομένων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα παραγόμενα μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη σεναρίων από βιοφυσικούς προσομοιωτές καθώς και για μοντέλα ανάπτυξης και αποτίμησης του ρίσκου ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες. Ταυτόχρονα η αναπτυγμένη γεννήτρια δύναται να χρησιμοποιηθεί στην διαδικασία της βελτιστοποίησης καθώς παρέχει τιμές για τα απαραίτητα κλιματικά δεδομένα ανάλογα με το βάθος πρόγνωσης που θα δοθεί από κάποιο web-site.

Κεφάλαιο 10°. Μελέτη περιπτώσεων και ανάλυση ευαισθησίας χρήσης του βιολογικού προσομοιώματος

10. Μελέτη περιπτώσεων και ανάλυση ευαισθησίας χρήσης του βιολογικού προσομοιώματος

10.1. Μελέτη περιπτώσεων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή αφορούν υπολογισμένες τιμές του βιολογικού προσομοιώματος (SimTom), για σειρά περιπτώσεων. Σκοπό της έρευνας αποτέλεσε η ανάλυση ευαισθησίας του βιολογικού προσομοιώματος. Η γνώση της ευαισθησίας αποτελεί κρίσιμο σημείο για το ενωμένο βιοφυσικό προσομοίωμα καθώς αναλύονται οι συνέπειες της επίδρασης των κλιματικών συνθηκών στο εσωτερικό του θερμοκηπίου στην ανάπτυξη και την παραγωγή της καλλιέργειας. Οι μεταχειρίσεις που ακολουθήθηκαν αναφέρθηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 4.6, ενώ στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα επίδρασης της:

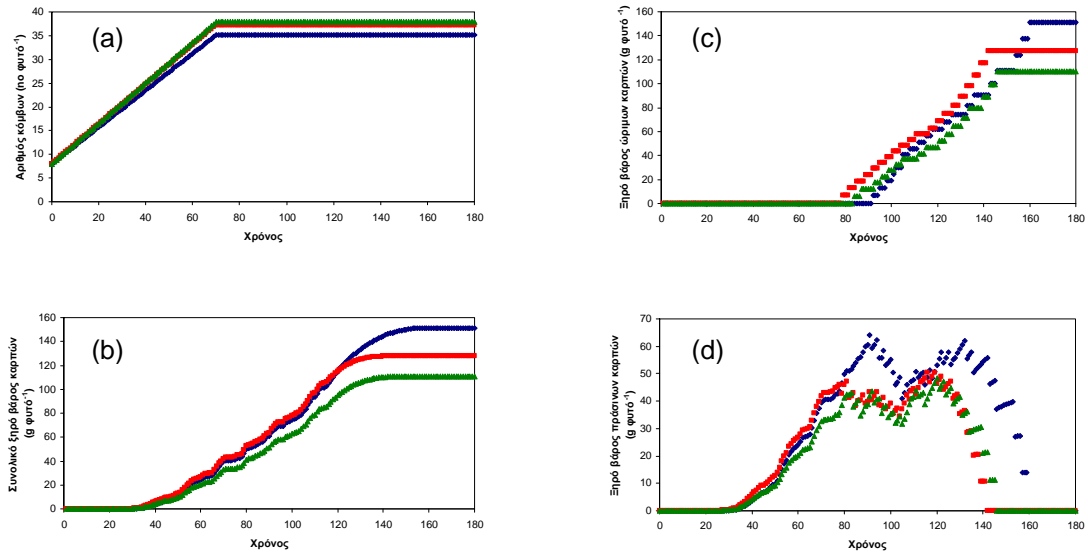
- ✘ Μεταβολής της ημερήσιας θερμοκρασίας έναντι του μάρτυρα για όλη την περίοδο προσομοίωσης
- ✘ Μεταβολής της νυχτερινής θερμοκρασίας έναντι του μάρτυρα για όλη την περίοδο προσομοίωσης
- ✘ Μεταβολής της ημερήσιας/νυχτερινής θερμοκρασίας έναντι του μάρτυρα για ορισμένη περίοδο κατά την προσομοίωση
- ✘ Αυξομείωση της θερμοκρασίας σε σχέση με την αντίστροφη διαδικασία
- ✘ Μεταβολής του εύρους στην ημερήσια και νυχτερινή θερμοκρασία διατηρώντας την ίδια μέση ημερήσια τιμή

Τα αποτελέσματα αφορούν την επίδραση των μεταχειρίσεων στον υπολογισμό του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις υπόλοιπες μεταβλητές εισόδου (εκτός της θερμοκρασίας) του βιολογικού προσομοιώματος, ήταν οι πειραματικές τιμές της περιόδου 1^{ης} Οκτωβρίου 2005 έως 1^η Απριλίου 2006. Τέλος η χρονική διάρκεια ημέρας και νύχτας ήταν ανάλογη της πραγματικότητας και αντίστοιχη ήταν η μεταβολή στις τιμές της θερμοκρασίας.

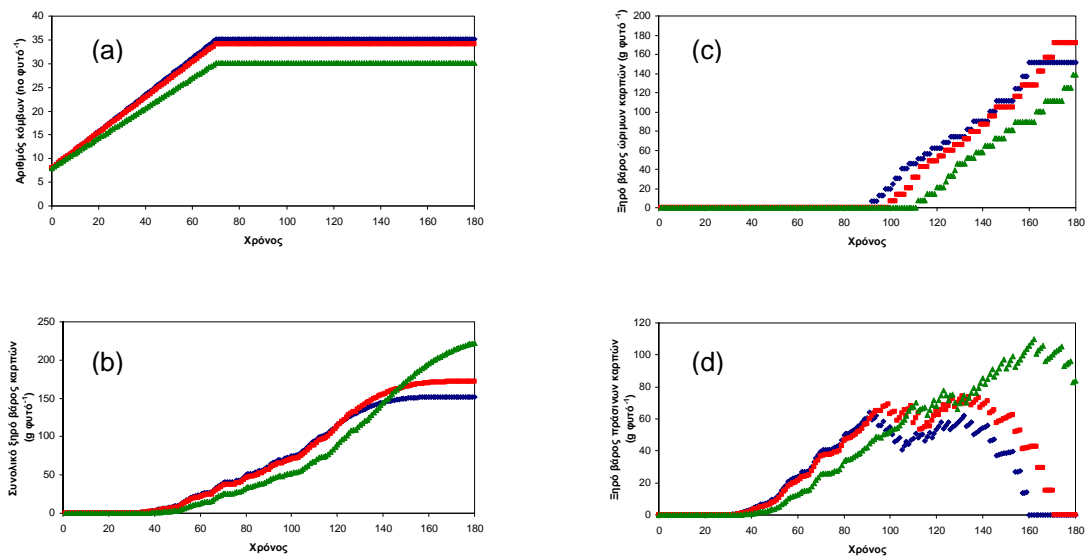
10.1.1. Μελέτη επίδρασης της ημερήσιας και νυχτερινής μεταβολής της θερμοκρασίας

Η διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (20/15°C, 24/15°C και 30/15°C) παρουσιάζεται στα Σχήματα 10.1(a-d). Η αύξηση της τιμής της ημερήσιας θερμοκρασίας προκάλεσε αύξηση του ρυθμού εμφάνισης νέων κόμβων, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 10.1 (a) με άμεση συνέπεια την αύξηση του ρυθμού εμφάνισης του αριθμού των φύλλων και των ταξιανθιών. Παράλληλα η αύξηση της θερμοκρασίας οδήγησε σε μείωση του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών Σχήμα 10.1 (b), ενώ αντίστοιχη ήταν η μείωση που παρουσιάστηκε στο ξηρό βάρος των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών. Μελετώντας το Σχήμα 10.1 (c) παρατηρούμε ότι η μεταχείριση (24/15°C), συνέβαλε στην προώθηση της παραγωγής και η διαφοροποίηση της σε σχέση με τη μεταχείριση του μάρτυρα (20/15°C) να κυμαίνεται στις 10 περίπου ημέρες. Αντίστοιχα στις τιμές του ξηρού βάρους των πράσινων καρπών παρατηρείται ότι απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την ωρίμαση των καρπών για την περίπτωση του μάρτυρα έναντι των δύο άλλων μεταχειρίσεων, ενώ μικρή είναι η διαφοροποίηση που παρατηρείται στις πρώτες 40 ημέρες, κρίσιμη περίοδο για την ανάπτυξη των φυτών. Τέλος η αύξηση της ημερήσιας τιμής της θερμοκρασίας συνέβαλε και στη μείωση του αριθμού των συγκομιζόμενων καρπών καθώς και στη φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας (αποτελέσματα που δεν παρουσιάζονται στο παρόν κείμενο). Συνεπώς η αύξηση της ημερήσιας τιμής της θερμοκρασίας, οδηγεί μεν την παραγωγή στην προώθηση αλλά ταυτόχρονα συμβάλλει και στη μείωση του συνολικά παραγόμενου προϊόντος.

Στα Σχήματα 10.2(a-d) παρουσιάζεται η διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (20/15°C, 20/13°C και 20/11°C). Η μείωση της τιμής της νυχτερινής θερμοκρασίας προκάλεσε μείωση του ρυθμού εμφάνισης νέων κόμβων, ιδιαίτερα εμφανής στα αποτελέσματα της μεταχείρισης (20/11°C), όπως παρατηρείται στο Σχήμα 10.2(a) με άμεση συνέπεια την μείωση του ρυθμού εμφάνισης του αριθμού των φύλλων και των ταξιανθιών.



Σχήμα 10.1 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (◇, 20/15°C), (■, 24/15°C), (▲, 30/15°C).



Σχήμα 10.2 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (◇, 20/15°C), (■, 20/13°C), (▲, 20/11°C).

Παράλληλα η μείωση της θερμοκρασίας οδήγησε σε αύξηση του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών Σχήμα 10.2(b), ενώ αντίστοιχα αυξήθηκε και το ξηρό βάρος των ώριμων-συγκομιζόμενων καρπών. Μελετώντας το Σχήμα 10.2(c) παρατηρούμε ότι η μεταχείριση (20/11°C), οδηγεί την παραγωγή σε υστέρηση και η διαφοροποίηση της σε σχέση με τη μεταχείριση του μάρτυρα (20/15°C) κυμαίνεται στις 20 περίπου ημέρες. Αντίστοιχα στις τιμές του ξηρού βάρους των πράσινων καρπών παρατηρείται ότι απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την ωρίμαση των καρπών για την περίπτωση της μεταχείρισης (20/11°C) έναντι του μάρτυρα και της μεταχείρισης (20/13°C). Ταυτόχρονα στην περίπτωση της μεταχείρισης (20/11°C) παρατηρούμε ότι στο τέλος της περιόδου προσομοίωσης υπάρχουν ακόμη καρποί πράσινοι επάνω στο φυτό, ενώ οι άλλες δύο μεταχειρίσεις έχουν πλήρως συγκομιστεί. Τέλος η μείωση της νυκτερινής τιμής της θερμοκρασίας συνέβαλε αντίστοιχα στη μείωση του αριθμού των συγκομιζόμενων καρπών καθώς και της φυλλικής επιφάνειας της καλλιέργειας (αποτελέσματα που δεν παρουσιάζονται στο παρόν κείμενο).

10.1.2. Μελέτη επίδρασης μεταβολής της θερμοκρασίας για ορισμένο χρονικό διάστημα

Η διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις του Πίνακα 10.1 παρουσιάζεται στα Σχήματα 10.3(a-d).

Πίνακας 10.1. Μελέτη περιπτώσεων μεταβολής της θερμοκρασίας για ορισμένο χρονικό διάστημα (i).

Περίοδος	Μεταχείριση		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η
	Θερμοκρασία (ημέρας / νύχτας)		
1 ^η έως 20 ^η ημέρα	20/15 °C	20/15 °C	20/15 °C
21 ^η έως 30 ^η ημέρα	20/15 °C	18/13 °C	18/13 °C
31 ^η έως 40 ^η ημέρα	20/15 °C	20/15 °C	20/15 °C
41 ^η έως 50 ^η ημέρα	20/15 °C	20/15 °C	22/17 °C
51 ^η έως 180 ^η ημέρα	20/15 °C	20/15 °C	20/15 °C

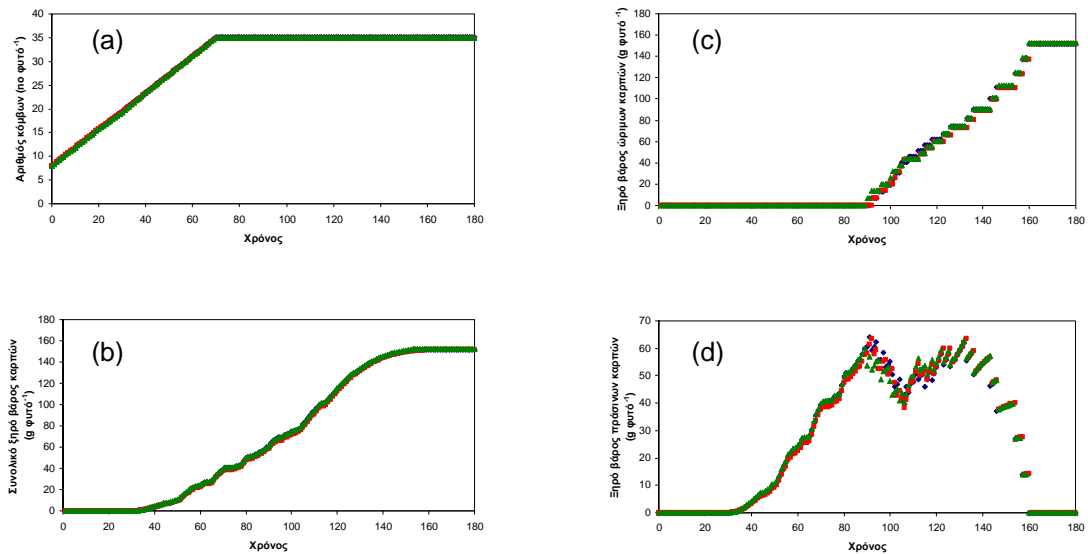
Το υπόλοιπο χρονικό διάστημα εκτός των δεκαήμερων μεταβολών των δύο μεταχειρίσεων, η θερμοκρασία ήταν ίδια με τη θερμοκρασία της μεταχείρισης του μάρτυρα 20/15°C. Σκοπός ήταν η ανάλυση των επιπτώσεων στην ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών τομάτας όταν προκύπτει η ανάγκη για μείωση της θερμοκρασίας καθώς και η μελέτη πιθανού κέρδους αν γίνει προσθήκη των θερμοκρασιών που αφαιρέθηκαν σε χρονικό διάστημα μετά τη μείωση. Μελετώντας τα Σχήματα 10.3(a-d) παρατηρούμε μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των τριών μεταχειρίσεων σε όλα τα μετρούμενα χαρακτηριστικά. Μικρή διαφοροποίηση προέκυψε στον αριθμό των συγκομιζόμενων καρπών (αποτελέσματα που δεν παρουσιάζονται στο παρόν κείμενο) όπου οι δύο μεταχειρίσεις υπολείπονται του μάρτυρα. Η μείωση της θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα των 10 ημερών προκαλεί υστέρηση στον αριθμό των συγκομιζόμενων καρπών χωρίς να μεταβάλει το συνολικό ξηρό βάρος του φυτού και τη φυλλική του επιφάνεια. Η προσθήκη της θερμοκρασιακής διαφοράς δεν επιτυγχάνει να εξαλείψει τη διαφοροποίηση που προκαλείται από τη μείωση της θερμοκρασίας.

Στα Σχήματα 10.4(a-d) παρουσιάζεται η διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις του Πίνακα 10.2.

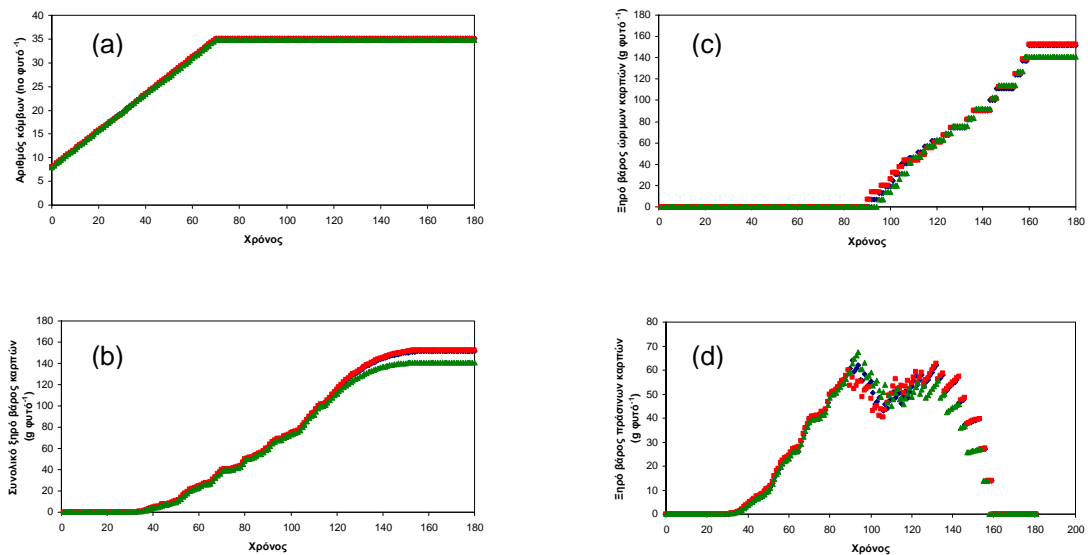
Πίνακας 10.2. Μελέτη περιπτώσεων μεταβολής της θερμοκρασίας για ορισμένο χρονικό διάστημα (ii).

Περίοδος	Μεταχείριση		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η
	Θερμοκρασία (ημέρας / νύχτας)		
1 ^η έως 20 ^η ημέρα	20/15 °C	20/15 °C	20/15 °C
21 ^η έως 30 ^η ημέρα	20/15 °C	18/13 °C	20/15 °C
31 ^η έως 40 ^η ημέρα	20/15 °C	20/15 °C	20/15 °C
41 ^η έως 50 ^η ημέρα	20/15 °C	20/15 °C	18/13 °C
51 ^η έως 180 ^η ημέρα	20/15 °C	20/15 °C	20/15 °C

Σκοπός η μελέτη της επίδρασης μείωσης της θερμοκρασίας σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, με απώτερο στόχο την ανεύρεση της κρίσιμης περιόδου της



Σχήμα 10.3 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (◇, 20/15°C), (■, 18/13°C για την περίοδο από την 21^η έως 30^η ημέρα), (▲, 18/13°C για την περίοδο από την 21^η έως 30^η ημέρα και 22/17°C για την περίοδο από την 41^η έως 50^η ημέρα).



Σχήμα 10.4 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (◇, 20/15°C), (■, 18/13°C για την περίοδο από την 21^η έως 30^η ημέρα), (▲, 18/13°C για την περίοδο από την 41^η έως 50^η ημέρα).

καλλιέργειας. Η μελέτη των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η μείωση της θερμοκρασία για τη χρονική περίοδο από την 41^η έως της 50^η ημέρα είχε ως συνέπεια μεγαλύτερη υστέρηση στην συνολικά παραγόμενη βιομάζα από τα φυτά τομάτας Σχήμα 10.4(b). Ταυτόχρονα μείωση παρατηρήθηκε στον αριθμό και στο ξηρό βάρος των συγκομιζόμενων-ώριμων καρπών Σχήμα 10.4(c). Τέλος δεν παρατηρήθηκε διαφοροποίηση μεταξύ των μεταχειρίσεων τόσο στη φυλλική επιφάνεια της καλλιέργειας όσο και στην ποιότητα των συγκομιζόμενων καρπών.

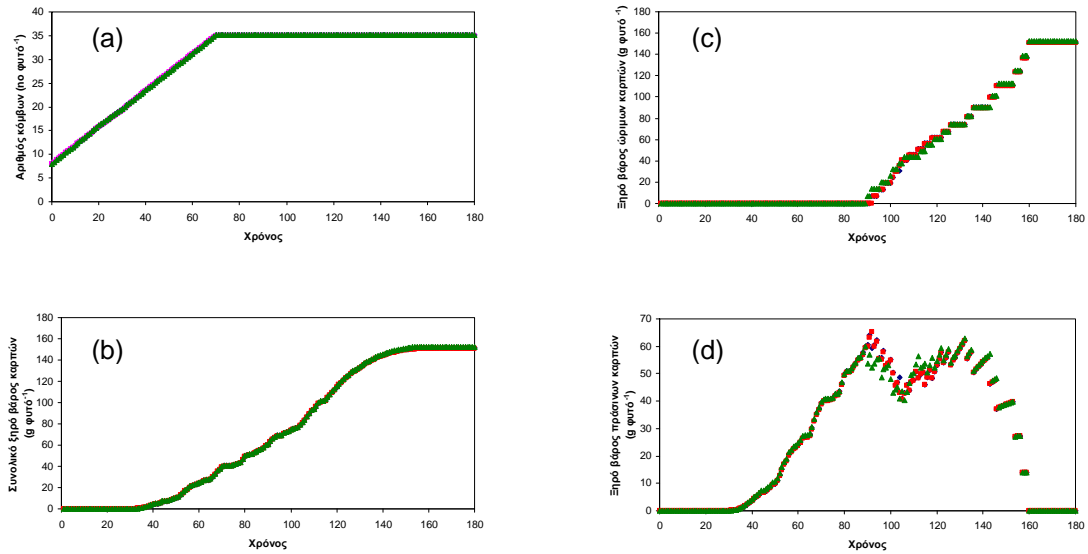
10.1.3. Μελέτη επίδρασης αυξομείωσης της θερμοκρασίας και το αντίστροφο της, για ορισμένο χρονικό διάστημα

Η διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις του Πίνακα 10.3, παρουσιάζεται στα Σχήματα 10.5(a-d). Σύμφωνα με όσα παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.3 το υπόλοιπο χρονικό διάστημα εκτός των δεκαήμερων μεταβολών των δύο μεταχειρίσεων, η θερμοκρασία ήταν ίδια με τη θερμοκρασία της μεταχείρισης του μάρτυρα 20/15°C.

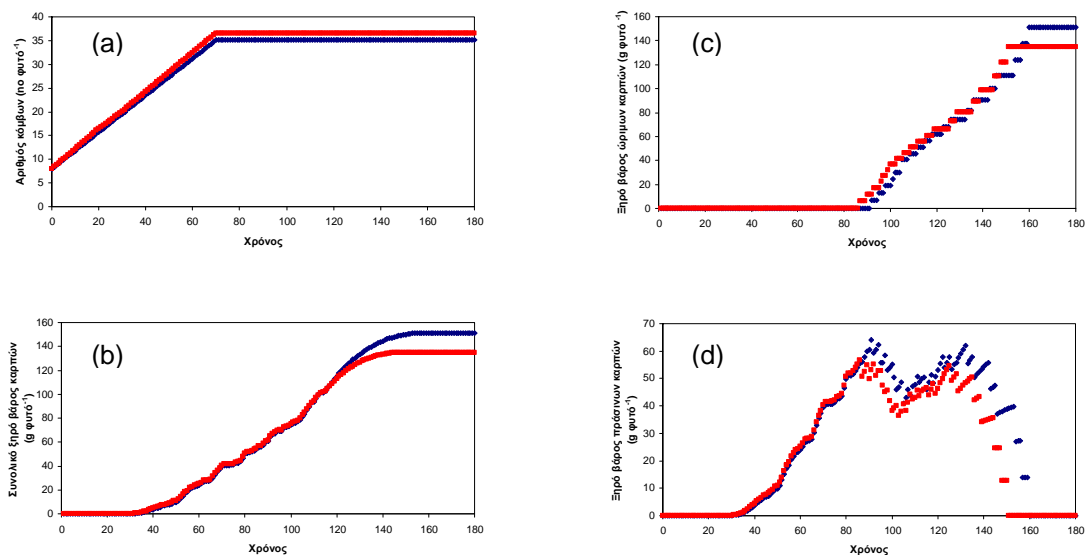
Πίνακας 10.3. Μελέτη περιπτώσεων αυξομείωσης της θερμοκρασίας και το αντίστροφο της, για ορισμένο χρονικό διάστημα

	Μεταχείριση		
	1 ^η	2 ^η	3 ^η
Περίοδος	Θερμοκρασία (ημέρας / νύχτας)		
1 ^η έως 20 ^η ημέρα	20/15 °C	20/15 °C	20/15 °C
21 ^η έως 30 ^η ημέρα	20/15 °C	22/17 °C	18/13 °C
31 ^η έως 40 ^η ημέρα	20/15 °C	20/15 °C	20/15 °C
41 ^η έως 50 ^η ημέρα	20/15 °C	18/13 °C	22/17 °C
51 ^η έως 180 ^η ημέρα	20/15 °C	20/15 °C	20/15 °C

Σκοπός της μελέτης η ανεύρεση της στρατηγικής για τη βέλτιστη διαχείριση στις περιπτώσεις που θα πρέπει να πραγματοποιηθεί αναγκαστική μείωση του θερμοκρασιακού εύρους στο εσωτερικό της θερμοκηπιακής μονάδας.



Σχήμα 10.5 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (\diamond , 20/15°C), (\blacksquare , 22/17°C για την περίοδο από την 21^η έως 30^η ημέρα και 18/13°C για την περίοδο από την 41^η έως 50^η ημέρα), (\blacktriangle , 18/13°C για την περίοδο από την 21^η έως 30^η ημέρα και 22/17°C για την περίοδο από την 41^η έως 50^η ημέρα).



Σχήμα 10.6 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (\diamond , 20/15°C), (\blacksquare , 25/13°C).

Μελετώντας τα Σχήματα 10.5(a-d) παρατηρούμε ότι δεν εμφανίζουν αισθητές διαφορές στα ποσοτικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν την ανάπτυξη και την παραγωγή της καλλιέργειας. Σημαντική θεωρείται η διαφορά που παρουσιάζουν οι μεταχειρίσεις στην χρονική περίοδο έναρξης συγκομιδής των ώριμων καρπών όπου και προηγείται γύρω στις 2 ημέρες, η μεταχείριση στην οποία η θερμοκρασία αρχικά μειώνεται και στη συνέχεια προστίθεται. Μικρή διαφοροποίηση προέκυψε στον αριθμό των συγκομιζόμενων-ώριμων καρπών (αποτελέσματα που δεν παρουσιάζονται στο παρόν κείμενο), όπου η μεταχείριση στην οποία η θερμοκρασία αρχικά μειώνεται και στη συνέχεια προστίθεται, υπολείπεται των άλλων δύο μεταχειρίσεων. Η μεταβολή της θερμοκρασίας ουσιαστικά μειώνει τον αριθμό των συγκομιζόμενων καρπών όταν αρχικά μειώνεται, ενώ στην περίπτωση της αρχικής αύξησης δεν παρουσιάζει καμία διαφοροποίηση από την μεταχείριση του μάρτυρα. Από την μελέτη των αποτελεσμάτων εξάγουμε το συμπέρασμα ότι αν και οι τρεις μεταχειρίσεις χρησιμοποίησαν τις ίδιες θερμοημέρες για την περίοδο προσομοίωσης παρόλα αυτά η μεταχείριση που συστήνεται είναι η μεταχείριση που αρχικά προστίθεται η θερμοκρασιακή διαφορά καθώς τα αποτελέσματά της δεν διαφοροποιούνται από την περίπτωση του μάρτυρα.

10.1.4. Μελέτη επίδρασης της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας με σταθερή μέση τιμή

Στα Σχήματα 10.6(a-d) παρουσιάζεται η διακύμανση των υπολογισμένων τιμών του αριθμού των κόμβων, του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών, του ξηρού βάρους των ώριμων και των πράσινων καρπών, σύμφωνα με τις μεταχειρίσεις (20/15°C και 25/13°C). Σκοπός ήταν η μελέτη της διακύμανσης της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας έχοντας όμως και στις δύο περιπτώσεις τον ίδιο αριθμό θερμοημερών και την ίδια μέση τιμή.

Μελετώντας τα Σχήματα 10.6(a-d) παρατηρούμε ότι η μικρότερη ημερήσια διακύμανση παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές για την περίπτωση του συνολικού ξηρού βάρους των καρπών καθώς και για το ξηρό βάρος των ώριμων καρπών. Μικρή είναι η υστέρηση που εμφανίζει η μεταχείριση (20/15°C) έναντι της μεταχείρισης (25/13°C) στο χρόνο εκκίνησης της συγκομιδής των ώριμων καρπών, ενώ το αντίστροφο παρατηρείται στο ξηρό βάρος των ώριμων και των πράσινων καρπών.

10.2. Συζήτηση από τη μελέτη περιπτώσεων χρήσης του βιοφυσικού προσομοιώματος

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην ενότητα αυτή, προέκυψαν από τη χρήση του βιολογικού προσομοιώματος (SimTom) κάτω από διαφορετικές μεταχειρίσεις. Τα αποτελέσματα έδειξαν χρήσιμα συμπεράσματα, καθώς η τροποποίηση του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων προκαλεί ουσιαστικές μεταβολές στον ρυθμό ανάπτυξης και παραγωγής της καλλιέργειας. Η κατεύθυνση και η ποσοτικοποίηση των μεταβολών αυτών ήταν ένα από τα ζητούμενα της έρευνας καθώς θα αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για την ανάπτυξη στρατηγικών για τη βέλτιστη διαχείριση του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων και την μεγιστοποίηση της παραγωγής.

Αρχικά μελετήθηκε η περίπτωση αύξησης της θερμοκρασίας σε σχέση με την περίπτωση ενός μάρτυρα. Διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε:

- ✘ Αύξηση του αριθμού των κόμβων, φύλλων και ταξιανθιών των φυτών
- ✘ Μείωση του ξηρού βάρους των φύλλων, βλαστών, καρπών καθώς και της φυλλικής επιφάνειας των φυτών
- ✘ Μείωση ταυτόχρονα του αριθμού των ώριμων και σχηματισμένων καρπών
- ✘ Πρωίμιση της παραγωγής

Στην περίπτωση μείωσης της θερμοκρασίας παρατηρήθηκε αντιστροφή των αποτελεσμάτων με ουσιαστική υστέρηση της παραγωγής και ταυτόχρονη αύξηση της συνολικά παραγόμενης βιομάζας.

Έπειτα μελετήθηκε η περίπτωση μείωσης των καθορισμένων ορίων για τις θερμοκρασίες ημέρας και νύχτας κατά 2°C για περίοδο 10 ημερών καθώς και η προσθήκη 2°C για περίοδο 10 ημερών που ακολούθησε. Μικρή διαφοροποίηση προέκυψε στον αριθμό των συγκομιζόμενων καρπών (αποτελέσματα που δεν παρουσιάζονται στο παρόν κείμενο) όπου οι δύο μεταχειρίσεις υπολείπονται του μάρτυρα. Η μείωση της θερμοκρασίας για το χρονικό διάστημα των 10 ημερών προκαλεί υστέρηση στον αριθμό των συγκομιζόμενων καρπών χωρίς να μεταβάλει το συνολικό ξηρό βάρος του φυτού και τη φυλλική του επιφάνεια. Η προσθήκη της θερμοκρασιακής διαφοράς δεν επιτυγχάνει να εξαλείψει τη διαφοροποίηση που προκαλείται, στα υπολογισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη της καλλιέργειας, από τη μείωση της θερμοκρασίας.

Η μελέτη της επίδρασης μείωσης της θερμοκρασίας σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, έδειξε ότι η μείωση της θερμοκρασίας για τη χρονική περίοδο από την 41^η έως της 50^η ημέρα είχε σαν συνέπεια μεγαλύτερη υστέρηση στην συνολικά παραγόμενη βιομάζα από τα φυτά τομάτας Σχήμα 10.4(b). Ταυτόχρονα μείωση παρατηρήθηκε στον αριθμό και στο ξηρό βάρος των συγκομιζόμενων-ώριμων καρπών Σχήμα 10.4(c).

Στην συνέχεια μελετήθηκε η στρατηγική διαχείρισης που θα πρέπει να ακολουθηθεί σε περίπτωση που κριθεί αναγκαία η μείωση των ορίων θερμοκρασίας ημέρας και νύχτας για κάποιο χρονικό διάστημα. Οι μεταχειρίσεις που επιλέχθηκαν διαφοροποιήθηκαν στο χρονικό διάστημα προσθήκης της θερμοκρασιακής διαφοράς, καθώς στην πρώτη περίπτωση προστέθηκε πριν τη μείωση των ορίων, ενώ στη δεύτερη ακολούθησε τη μείωση των ορίων. Η μεταβολή της θερμοκρασίας (μείωση πριν την αύξηση) ουσιαστικά οδηγεί σε μείωση του αριθμού των συγκομιζόμενων καρπών, ενώ στην περίπτωση όπου η μεταβολή της θερμοκρασίας ξεκινά με αύξηση δεν παρουσιάζεται καμία διαφοροποίηση από την μεταχείριση του μάρτυρα. Από την μελέτη των αποτελεσμάτων εξάγουμε το συμπέρασμα ότι αν και οι τρεις μεταχειρίσεις χρησιμοποίησαν τις ίδιες θερμοημέρες για την περίοδο προσομοίωσης παρόλα αυτά η μεταχείριση που συστήνεται είναι η μεταχείριση που αρχικά προστίθεται η θερμοκρασιακή διαφορά καθώς τα αποτελέσματά της δεν διαφοροποιούνται από την περίπτωση του μάρτυρα.

Τέλος τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη της ημερήσιας διακύμανσης μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι όσο μικρότερο είναι το εύρος της ημερήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσό της παραγόμενης ξηράς ουσίας και τα σύνολα των παραγόμενων και συγκομιζόμενων ώριμων καρπών.

Η στρατηγική λοιπόν που δύναται να ακολουθήσουν οι παραγωγοί για τη διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπιακών μονάδων είναι ανάλογη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν στην ενότητα αυτή. Η διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπίων μπορεί να γίνει πιο αποτελεσματική με τη χρήση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τη μελέτη περιπτώσεων του βιολογικού προσομοιώματος ενώ μέρος των συμπερασμάτων αναμένεται να συμβάλει στην ισορροπία των κερδών ενός προϊόντος ονομαστικής αξίας στην αγορά, σε σχέση με το κόστος διαχείρισης του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας.

Κεφάλαιο 11°. Βελτιστοποίηση του βιοφυσικού προσομοιώματος

11. Βελτιστοποίηση του βιοφυσικού προσομοιώματος

11.1. Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Η δημιουργία του βιο-φυσικού προσομοιώματος δίνει τη δυνατότητα μελέτης διαφόρων σεναρίων. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χρήσης του βιοφυσικού προσομοιώματος σύμφωνα με τη μέθοδο διακλάδωσης και φραγμού (branch & bound) που παρουσιάστηκε αναλυτικά στην ενότητα 3.5. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα για τις πειραματικές ημέρες που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 4.7. Σκοπός της έρευνας είναι η συγκριτική διερεύνηση των διαφοροποιήσεων που παρουσιάζονται κατά τη διαχείριση μιας θερμοκηπιακής μονάδας, τόσο στις κλιματικές συνθήκες όσο και στην ανάπτυξη και την παραγωγή φυτών τομάτας. Η σύγκριση αφορά τη μεταχείριση που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων και τη βέλτιστη προτεινόμενη σύμφωνα με τη μέθοδο διακλάδωσης και φραγμού (branch & bound). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δίνουν αναλυτικά τις κλιματικές συνθήκες στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων καθώς και όλα τα χαρακτηριστικά που αφορούν την ανάπτυξη και την παραγωγή των φυτών τομάτας. Από αυτά επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες τα αποτελέσματα που αφορούν:

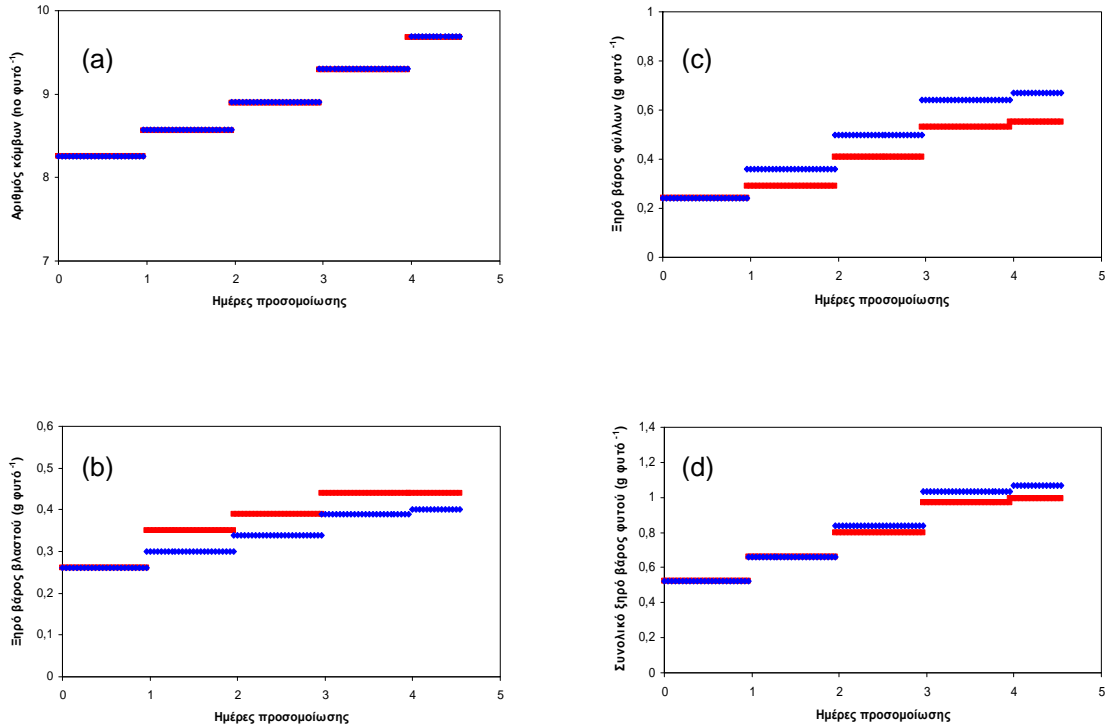
- ✘ Τον αριθμό των κόμβων των φυτών
- ✘ Το ξηρό βάρος του βλαστού
- ✘ Το ξηρό βάρος των φύλλων
- ✘ Το ξηρό βάρος ολόκληρου του φυτού
- ✘ Η καμπύλη προσομοίωσης του ανοίγματος των παραθύρων και του συστήματος
- ✘ Τη θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου
- ✘ Τη θερμοκρασία του καλύμματος

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για τις μεταβλητές εισόδου που αφορούν τον αριθμό των κόμβων, το ξηρό βάρος φύλλων, βλαστού και καρπών προέκυψαν από τη χρήση του τροποποιημένου βιολογικού προσομοιώματος (SimTom).

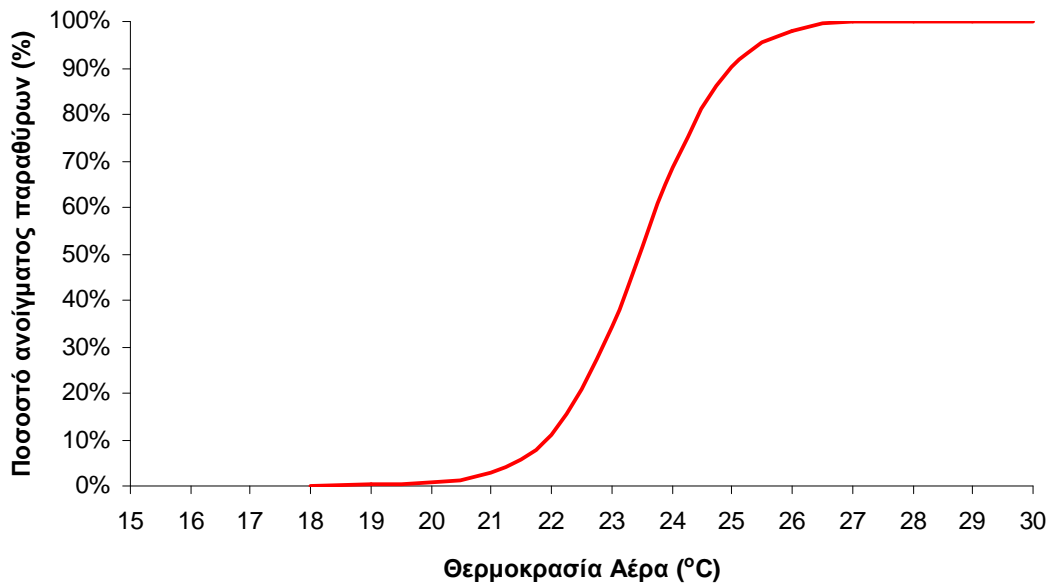
11.1.1. Αποτελέσματα 1^{ου} σεναρίου

Σύμφωνα με όσα αναλυτικά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.5, η διαχείριση των ελεγκτών του συστήματος (άνοιγμα παραθύρων και συστήματος θέρμανσης) βασίζονταν κατά τη βέλτιστη διαχείριση στους αλγόριθμους (3.105) και (3.106). Η χρήση της μεθόδου branch & bound συνέβαλε στον καθορισμό των τιμών των μεταβλητών pb_1 και pc_1 που αφορούν τις μεταβλητές που καθορίζουν το ποσοστό ανοίγματος των παραθύρων στη μελέτη του 1^{ου} σεναρίου και ήταν αντίστοιχα ίσες με $pb_1 = 23.46$ και $pc_1 = 0.7$. Οι μεταβλητές pb_2 και pc_2 που καθορίζουν το ποσοστό ανοίγματος του συστήματος θέρμανσης δεν ορίστηκαν καθώς δεν προέκυψε ανάγκη χρήσης του συστήματος.

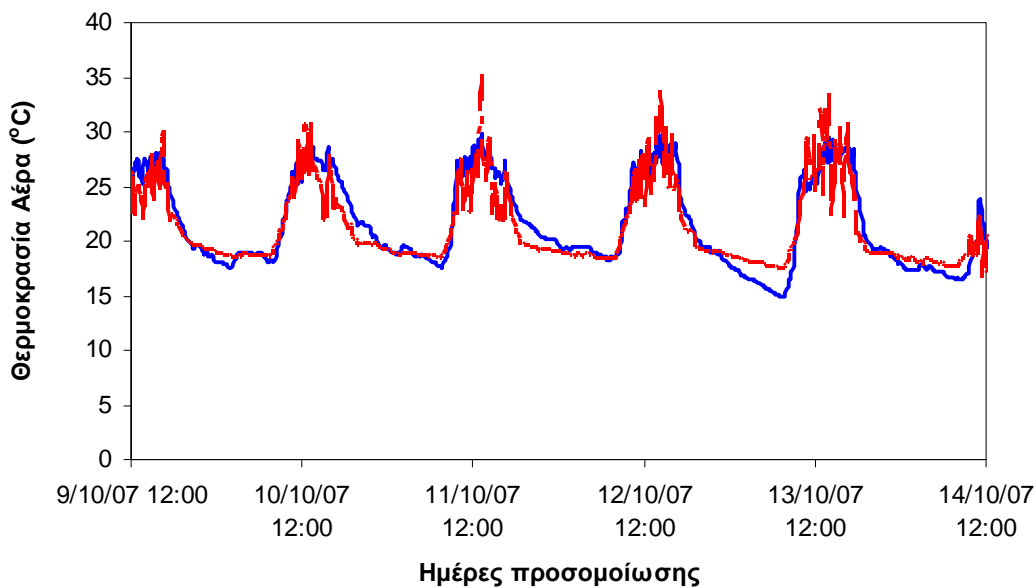
Τα Σχήματα 11.1(a-d) παρουσιάζουν την διακύμανση των υπολογισμένων με χρήση του SimTom και των βέλτιστων τιμών που προέκυψαν έπειτα από τη χρήση της μεθόδου branch & bound και αφορούν τον αριθμό των κόμβων και το ξηρό βάρος του βλαστού, των φύλλων και ολόκληρου του φυτού αντίστοιχα. Στο Σχήμα 11.1(a) παρατηρείται ότι η μεταβολή των κλιματικών συνθηκών δεν μεταβάλλει τον αριθμό των σχηματιζόμενων κόμβων του φυτού. Αντίστοιχα δεν μεταβάλλονται ο αριθμός των παραγόμενων φύλλων και ταξιανθιών (δεδομένα που δεν παρουσιάζονται). Μεταβολή παρατηρείται στο Σχήμα 11.1(b) που απεικονίζει το ξηρό βάρος του βλαστού. Οι υπολογισμένες βέλτιστες τιμές υπερέρχονται αυτών που υπολογίστηκαν με το βιολογικό προσομοίωμα SimTom. Αντίστροφη μεταβολή παρατηρείται στο ξηρό βάρος των φύλλων Σχήμα 11.1(c), όπου οι βέλτιστες τιμές υπολείπονται αυτών που υπολογίστηκαν με το βιολογικό προσομοίωμα SimTom. Μικρότερες διαφορές παρατηρούνται στο Σχήμα 11.1(d) που απεικονίζει τη συνολικά παραγόμενη βιομάζα του φυτού. Οι διαφορές οφείλονται στη διαφοροποίηση των τιμών της θερμοκρασίας του αέρα, Σχήμα 11.3. Μείωση της θερμοκρασίας του αέρα οδηγεί σε υστέρηση της αύξησης και ανάπτυξης των φυτών τομάτας σύμφωνα με όσα αναλυτικά παρουσιάστηκαν στην ενότητα 10.1.1. Η μείωση της παραγόμενης βιομάζας όταν τα φυτά βρίσκονται στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης συμβάλλει στη δημιουργία πιο εύρωστων φυτών μελλοντικά και αποτελεί πάγια τακτική των παραγωγών που αναγκάζονται να καταφύγουν σε διαφοροποιήσεις τόσο της χημικής σύστασης του θρεπτικού διαλύματος όσο και της δόσης άρδευσης για να την επιτύχουν.



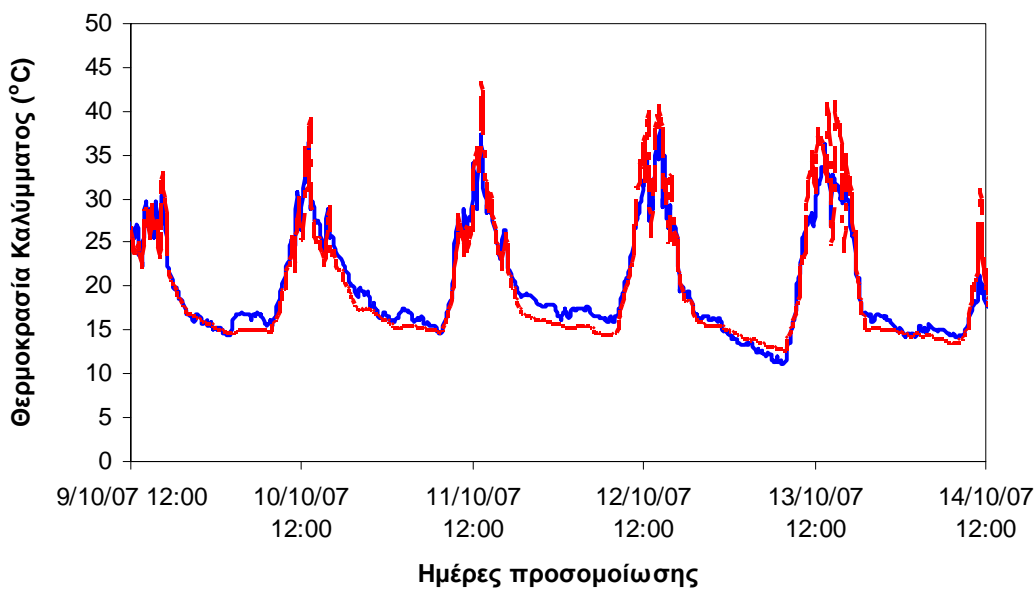
Σχήμα 11.1 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων με SimTom (\blacktriangle) και των βέλτιστα υπολογισμένων (\blacksquare) τιμών, ανάπτυξης και παραγωγής βιομάζας φυτών τομάτας κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης



Σχήμα 11.2. Ποσοστό ανοίγματος (%) των παραθύρων κατά τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης



Σχήμα 11.3. Διακύμανση των μετρημένων (—) και των βέλτιστα υπολογισμένων (---) τιμών, της θερμοκρασίας του αέρα (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης



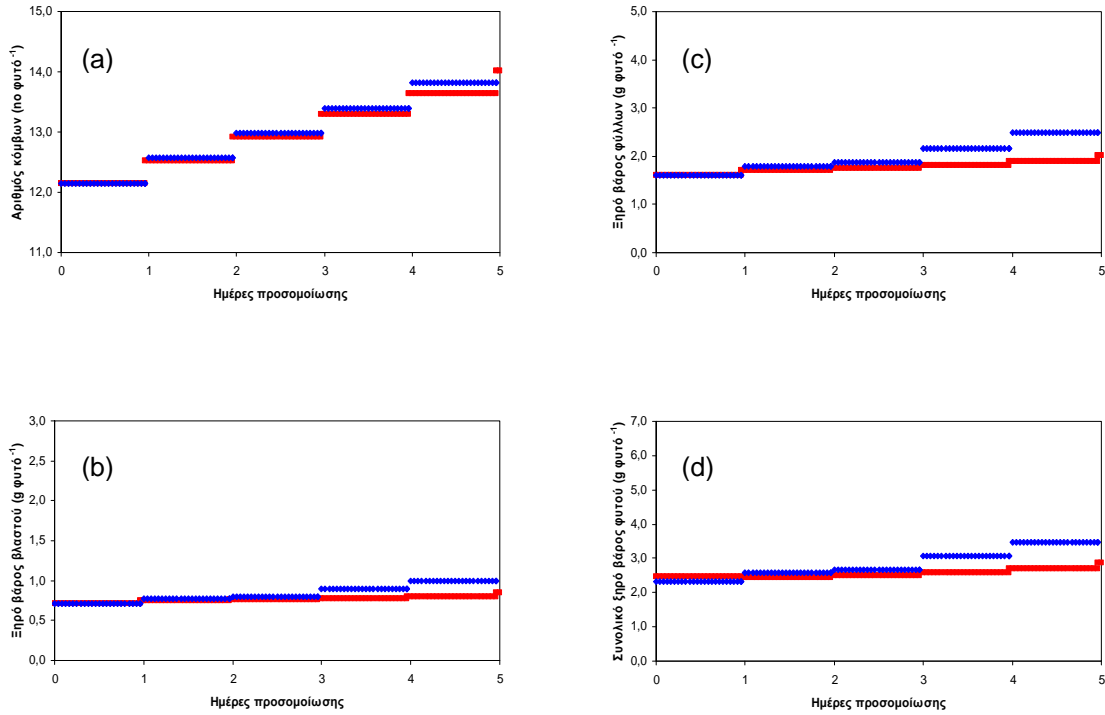
Σχήμα 11.4. Διακύμανση των μετρημένων (—) και των βέλτιστα υπολογισμένων (---) τιμών, της θερμοκρασίας του καλύμματος (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 1^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης

Διαφοροποίηση παρατηρήθηκε τόσο στη διακύμανση των τιμών της θερμοκρασίας του αέρα Σχήμα 11.3 όσο και στη διακύμανση των τιμών της θερμοκρασίας του καλύμματος. Οι βέλτιστα υπολογισμένες τιμές υστερούν των μετρημένων τιμών και αυτό οφείλεται στη διαφοροποίηση που προκύπτει από τον τρόπο ανοίγματος των παραθύρων. Ο έλεγχος του πότε και του πόσο θα ανοίξουν τα παράθυρα προκύπτει από τη χρήση του αλγόριθμου 3.105 και ενδεικτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.2. Η διαφοροποίηση στο χρόνο και το ποσοστό ανοίγματος των παραθύρων οδηγεί τόσο στη μείωση της θερμοκρασίας όσο και στη μείωση της σχετικής υγρασίας (δεδομένα που δεν παρουσιάζονται) στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, με συνέπεια τη δημιουργία καλύτερου μικροκλίματος για την αύξηση και την ανάπτυξη των φυτών τομάτας.

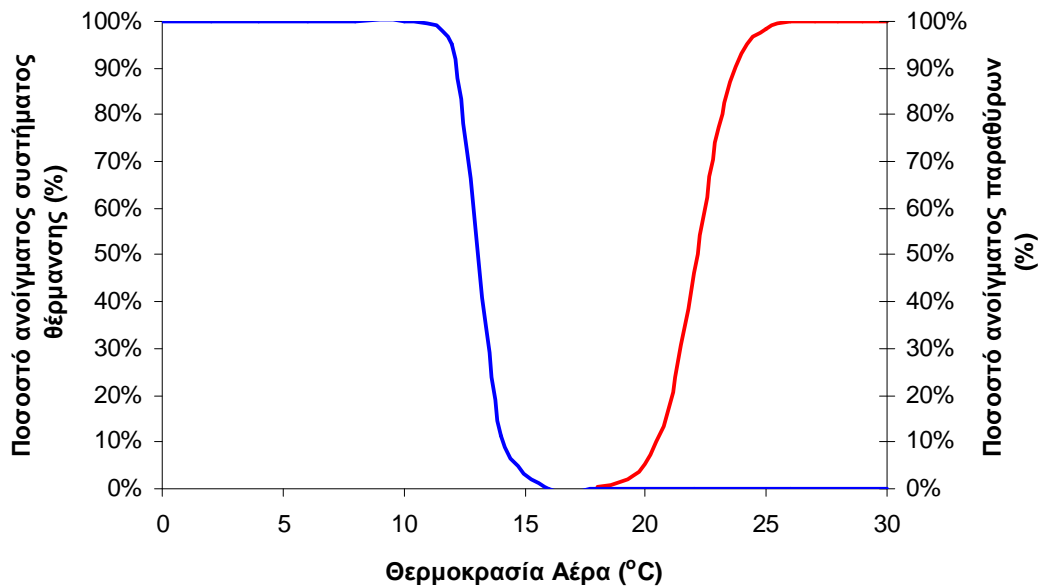
11.1.2. Αποτελέσματα 2^ο σεναρίου

Τα Σχήματα 11.5(a-d) παρουσιάζουν την διακύμανση των υπολογισμένων με χρήση του SimTom και των βέλτιστων τιμών που προέκυψαν έπειτα από τη χρήση της μεθόδου branch & bound και αφορούν τον αριθμό των κόμβων και το ξηρό βάρος του βλαστού, των φύλλων και ολόκληρου του φυτού αντίστοιχα για το 2^ο πειραματικό σενάριο. Στο Σχήμα 11.5(a) παρατηρείται ότι οι βέλτιστα υπολογισμένες τιμές που αφορούν το σχηματισμό των κόμβων, υπολείπονται ελαφρώς αυτών του SimTom. Ο ρυθμός ανάπτυξης που προκύπτει από τη βέλτιστη διαχείριση του κλίματος είναι μικρότερος από την διαχείριση που ακολουθήθηκε κατά την πειραματική περίοδο. Αντίστοιχα μειωμένες παρουσιάζονται οι τιμές που αφορούν το ξηρό βάρος του βλαστού, των φύλλων και ολόκληρου του φυτού αντίστοιχα. Η μείωση είναι της τάξης του 15.5% για το ξηρό βάρος του βλαστού, 18.5% για το ξηρό βάρος των φύλλων και 17.4% για το ξηρό βάρος ολόκληρου του φυτού. Η μείωση προκύπτει από τη χαμηλότερη μέση τιμή για τη θερμοκρασία του αέρα, που διατηρείται στο εσωτερικό του θερμοκηπίου.

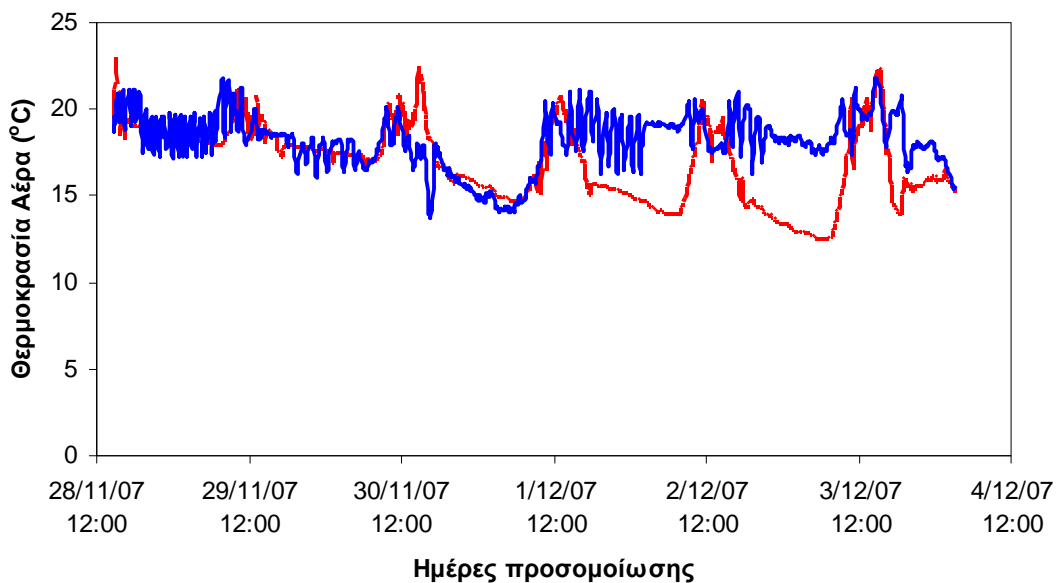
Οι τιμές των μεταβλητών που καθορίζουν το ποσοστό ανοίγματος των παραθύρων στη μελέτη του 2^ο σεναρίου ήταν ίσες με $pb_1 = 22.12$ και $pc_1 = 0.729$, ενώ ταυτόχρονα οι μεταβλητές που καθορίζουν το ποσοστό ανοίγματος του συστήματος θέρμανσης ήταν ίσες με $pb_2 = 1.827$ και $pc_2 = 0.398$.



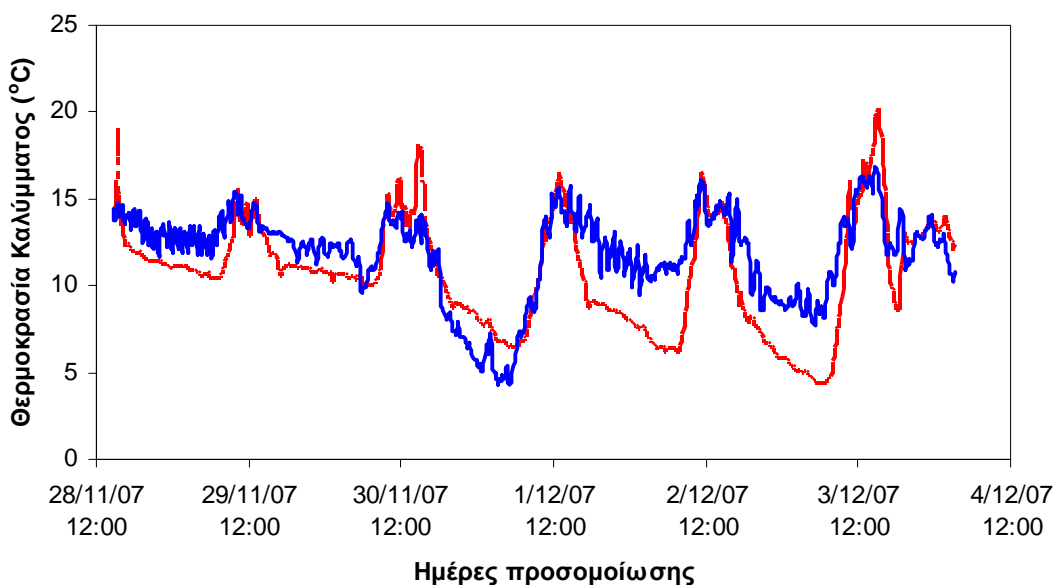
Σχήμα 11.5 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων με SimTom (\blacktriangle) και των βέλτιστα υπολογισμένων (\blacksquare) τιμών, ανάπτυξης και παραγωγής βιομάζας φυτών τομάτας κατά τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης



Σχήμα 11.6. Ποσοστό ανοίγματος (%) του συστήματος θέρμανσης και των παραθύρων κατά τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης



Σχήμα 11.7. Διακύμανση των μετρημένων (—) και των βέλτιστα υπολογισμένων (—) τιμών, της θερμοκρασίας του αέρα (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης



Σχήμα 11.8. Διακύμανση των μετρημένων (—) και των βέλτιστα υπολογισμένων (—) τιμών, της θερμοκρασίας του καλύμματος (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 2^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης

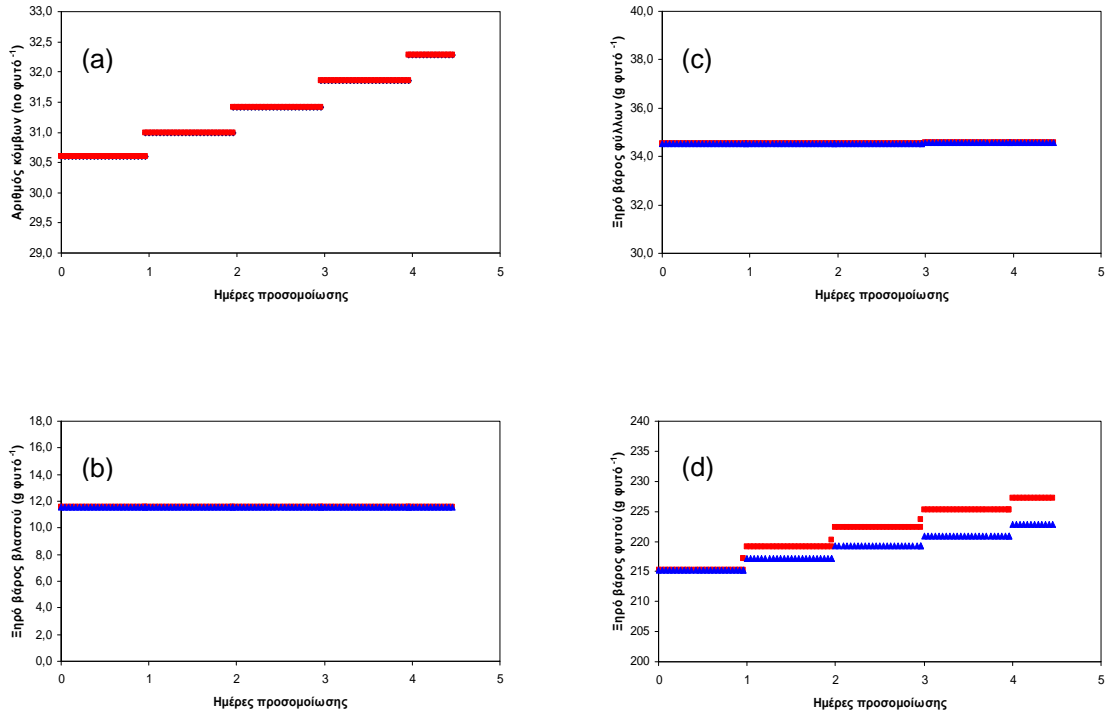
Ο έλεγχος του πότε και του πόσο θα ανοίξουν τόσο τα παράθυρα όσο και το σύστημα θέρμανσης, προκύπτει από τη χρήση των αλγορίθμων 3.105 και 3.106 παρουσιάζεται στο Σχήμα 11.6.

Η διαχείριση του κλίματος που προκύπτει από τη χρήση των αλγορίθμων 3.105 και 3.106, με τις τιμές που παρουσιάστηκαν οδηγούν σε μείωση της θερμοκρασίας του αέρα (Σχήμα 11.7) στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Παρατηρείται ότι κατά την πειραματική διαχείριση το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα διατηρήθηκε θερμοκρασία αέρα υψηλότερη της προκαθορισμένης τιμής των 15 °C. Αντίστοιχη διαφοροποίηση παρατηρείται και στη θερμοκρασία του καλύμματος που εμφανίζεται στο Σχήμα 11.8.

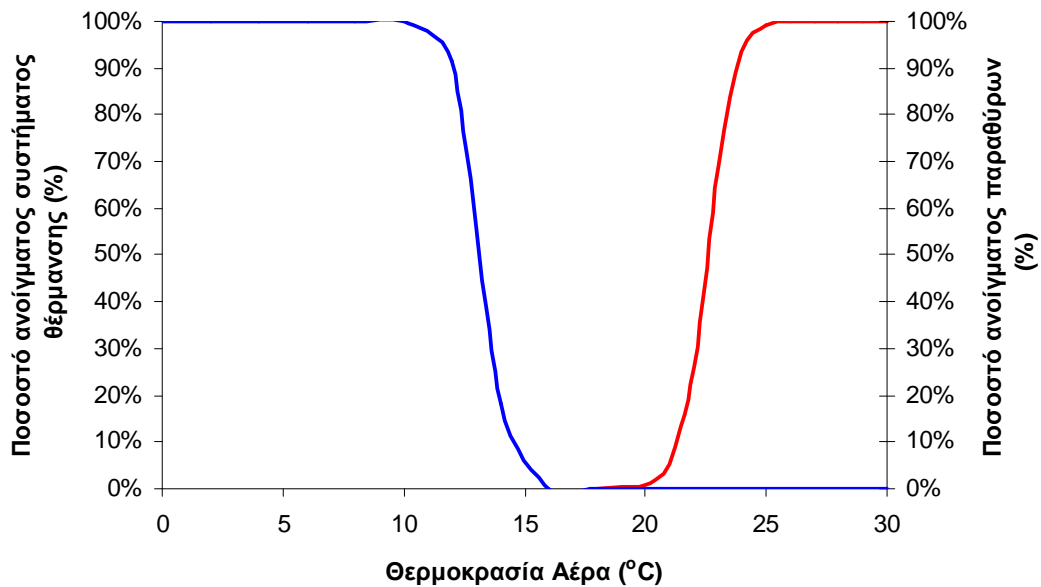
Το κέρδος που προκύπτει από τη διαφοροποίηση του κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου έναντι της πρακτικής που ακολουθήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία εμφανίζεται στη συμμετοχή της θέρμανσης στη διαχείριση του κλίματος. Η μείωση του κόστους της θέρμανσης υπολογίστηκε στο 19.72% έναντι της αρχικής μεταχείρισης. Η μείωση του κόστους παραγωγής που προκύπτει από τη μείωση του κόστους της θέρμανσης, μπορεί να οδηγεί σε μείωση της αύξησης και ανάπτυξης της παραγωγής αλλά μπορεί να αποτελέσει στόχο των παραγωγών σύμφωνα με κάποιο αρχικά καθορισμένο στόχο. Η μείωση που προκαλείται στην αύξηση και ανάπτυξη των φυτών μπορεί να ισορροπηθεί με αύξηση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου σε χρονικό διάστημα πριν από την μείωση κάτι που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 10.

11.1.3. Αποτελέσματα 3^ο σεναρίου

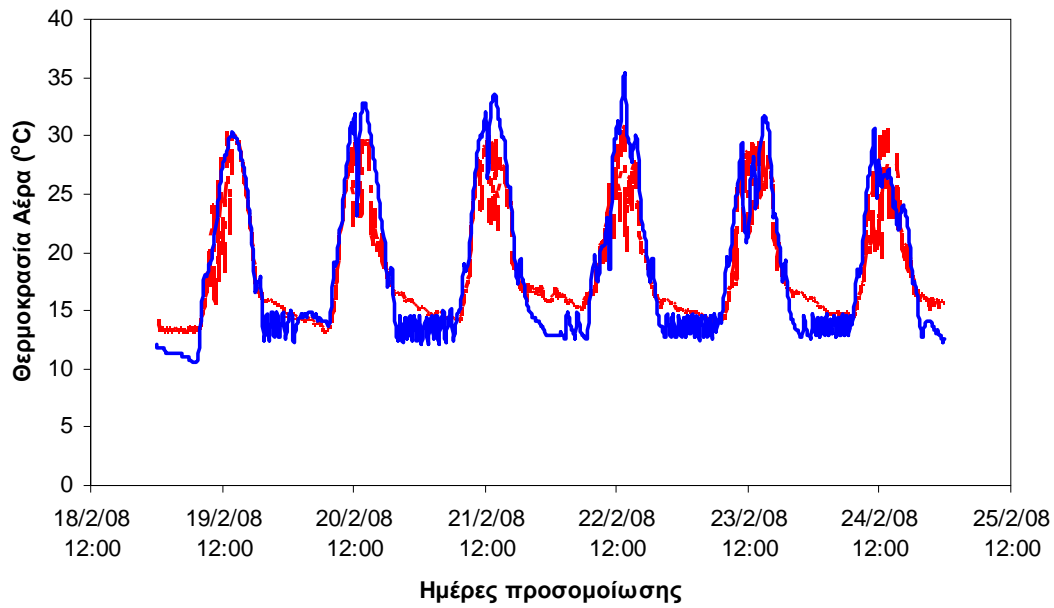
Στα Σχήματα 11.9(a-c) που παρουσιάζεται η διακύμανση των υπολογισμένων με χρήση του SimTom και των βέλτιστα υπολογισμένων τιμών, δεν παρατηρείται διαφορά μεταξύ τους, τόσο στον αριθμό των κόμβων και το ξηρό βάρος του βλαστού, όσο και στο ξηρό βάρος των φύλλων. Διαφορές παρουσιάζονται στο Σχήμα 11.9(d) που απεικονίζει το ξηρό βάρος ολόκληρου του φυτού και προκύπτει από τη διαφοροποίηση του ξηρού βάρους των συγκομιζόμενων ώριμων καρπών. Η διαφοροποίηση που προκύπτει οφείλεται στη θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η αύξηση είναι της τάξης του 2.2 % για το ξηρό βάρος ολόκληρου του φυτού.



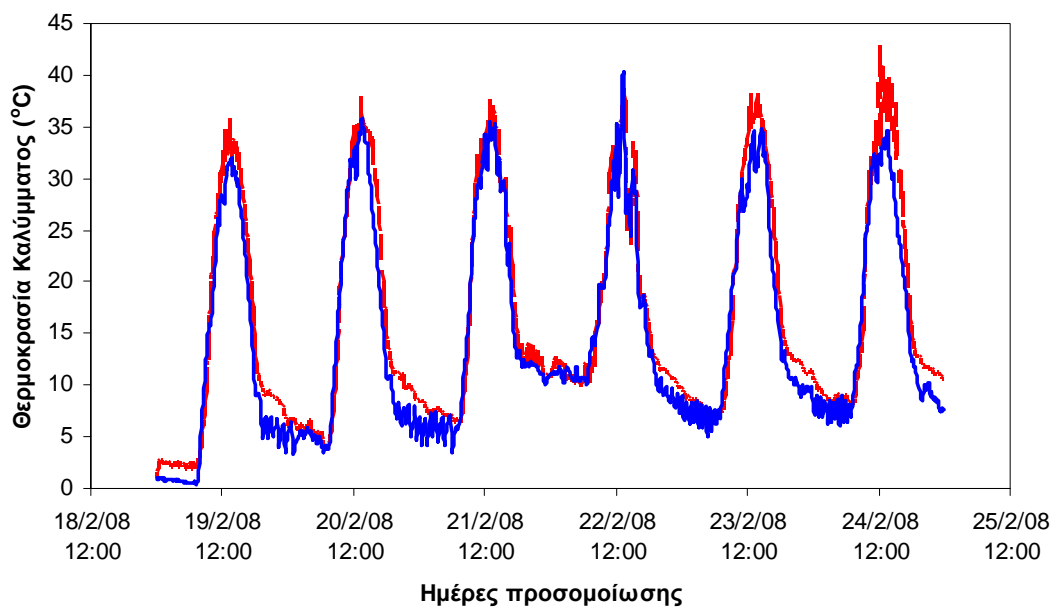
Σχήμα 11.9 (a), (b), (c), (d). Διακύμανση των υπολογισμένων με SimTom (\blacktriangle) και των βέλτιστα υπολογισμένων (\blacksquare) τιμών, ανάπτυξης και παραγωγής βιομάζας φυτών τομάτας κατά τη διάρκεια της 3^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης



Σχήμα 11.10. Ποσοστό ανοίγματος (%) του συστήματος θέρμανσης και των παραθύρων κατά τη διάρκεια της 3^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης



Σχήμα 11.11. Διακύμανση των μετρημένων (–) και των βέλτιστα υπολογισμένων (–) τιμών, της θερμοκρασίας του αέρα (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 3^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης



Σχήμα 11.12. Διακύμανση των μετρημένων (–) και των βέλτιστα υπολογισμένων (–) τιμών, της θερμοκρασίας του καλύμματος (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 3^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης

Διαφορές παρουσιάζονται αντίστοιχα και στη διακύμανση των μετρημένων και των βέλτιστα υπολογισμένων τιμών, της θερμοκρασίας του καλύμματος (°C) κατά τη διάρκεια τη διάρκεια της 3^{ης} πειραματικής περιόδου προσομοίωσης. Οι βέλτιστα υπολογισμένες τιμές εμφανίζονται υψηλότερες κατά τη διάρκεια της νύχτας και χαμηλότερες κατά τη διάρκεια της ημέρας, από τις μετρημένες για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

Οι τιμές των μεταβλητών που καθορίζουν το ποσοστό ανοίγματος των παραθύρων στη μελέτη του 3^{ου} σεναρίου ήταν ίσες με $pb_1 = 22.57$ και $pc_1 = 0.54$, ενώ ταυτόχρονα οι μεταβλητές που καθορίζουν το ποσοστό ανοίγματος του συστήματος θέρμανσης ήταν ίσες με $pb_2 = 1.785$ και $pc_2 = 0.52$.

Η διαχείριση που ακολουθήθηκε σύμφωνα με τη χρήση της μεθόδου branch & bound υπερέχει της πειραματικής μεταχείρισης καθώς συμβάλλει στην αύξηση του ξηρού βάρους των συγκομιζόμενων καρπών κατά 2.2%, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει το κλίμα στο εσωτερικό του θερμοκηπίου καθώς μειώνονται οι θερμοκρασιακές διαφορές κατά τη διάρκεια ημέρας και νύχτας, με παράλληλη μείωση των τιμών της σχετικής υγρασίας (δεδομένα που δεν παρουσιάζονται). Η αύξηση που παρατηρείται στο κόστος της θέρμανσης είναι της τάξεως του 1.9%. Η αύξηση του κόστους παραγωγής που οφείλεται στο κόστος της θέρμανσης δύναται να εξαλειφθεί αν στη στρατηγική διαχείρισης μειωθεί το ενδιαφέρον για τα επίπεδα της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Περιπτώσεις που ενδείκνυνται για μείωση του κόστους παραγωγής είναι η περίοδος κοντά στη λήξη συγκομιδής των ώριμων καρπών της καλλιέργειας. Ο προσδιορισμός της λήξης της καλλιεργητικής περιόδου μπορεί να διαφοροποιήσει τη στρατηγική που θα ακολουθηθεί για την τελική περίοδο.

11.2. Συζήτηση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω αφορούσαν τρία ενδεικτικά σενάρια διαφοροποίησης του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων, με ταυτόχρονη απεικόνιση των μεταβολών που προκλήθηκαν στην ανάπτυξη και την παραγωγή της καλλιέργειας της τομάτας. Οι περίοδοι που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιήθηκαν έχουν ενδιαφέρον για τους παραγωγούς καθώς η 1^η είναι στην έναρξη της καλλιεργητικής περιόδου, η 2^η στο μέσο, ενώ η 3^η προς το τέλος της καλλιέργειας.

Η μελέτη των αποτελεσμάτων του 1^{ου} σεναρίου οδηγεί στη διαπίστωση ότι η μείωση της θερμοκρασίας του αέρα συμβάλλει στη μείωση τόσο του ξηρού βάρους των φύλλων όσο και ολόκληρου του φυτού. Η μείωση της θερμοκρασίας του αέρα οφείλεται στη διαφορετική μεταχείριση των παραθύρων (ελεγκτή του συστήματος). Η τακτική που ακολουθήθηκε σύμφωνα με τη χρήση της μεθόδου branch & bound οδηγεί σε άνοιγμα των παραθύρων του θερμοκηπίου για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από αυτό που ακολουθήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία. Η μείωση όμως της παραγόμενης βιομάζας όταν τα φυτά βρίσκονται στο αρχικό στάδιο ανάπτυξης συμβάλλει στη δημιουργία πιο εύρωστων φυτών μελλοντικά.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του 2^{ου} σεναρίου διαπιστώθηκε ότι η μείωση του κόστους παραγωγής κατά 19.72% οδήγησε σε αντίστοιχη μείωση της παραγόμενης βιομάζας κατά 15.5% για το ξηρό βάρος του βλαστού, 18.5% για το ξηρό βάρος των φύλλων και 17.4% για το ξηρό βάρος ολόκληρου του φυτού. Η μείωση όμως που προκαλείται στην αύξηση και ανάπτυξη των φυτών μπορεί να ισορροπηθεί με αύξηση θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου σε χρονικό διάστημα πριν από την μείωση κάτι που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 10.

Τέλος τα αποτελέσματα του 3^{ου} σεναρίου δείχνουν μια αύξηση του ξηρού βάρους των συγκομιζόμενων ώριμων καρπών κατά 2.2%, με ταυτόχρονη βελτίωση του κλίματος στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Η αύξηση που παρατηρήθηκε στο κόστος της θέρμανσης ήταν της τάξης του 1.9%. Γνωρίζοντας ότι η 3^η πειραματική περίοδος είναι κοντά στο τέλος της καλλιεργητικής περιόδου η στρατηγική που διαμορφώθηκε εστιάζει την αύξηση του κέρδους, στην αύξηση του βάρους των συγκομιζόμενων καρπών. Πιθανή διαφοροποίηση της στρατηγικής με μείωση του ενδιαφέροντος για

τα επίπεδα της σχετικής υγρασίας στο εσωτερικό του θερμοκηπίου οδηγεί σε περαιτέρω μείωση του κόστους παραγωγής.

Η διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπίων όπως αναφέρθηκε αποτελεί μια καθημερινή δραστηριότητα των παραγωγών, η οποία παρά τη συχνότητά της θέτει πολλά προβλήματα. Η περαιτέρω ανάλυση πιθανών κλιματικών σεναρίων αναμένεται να συμβάλει στη δημιουργία στρατηγικών που θα διαμορφώσουν τις προϋποθέσεις για μείωση του κόστους παραγωγής και τη βελτίωση των κλιματικών συνθηκών στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων.

Κεφάλαιο 12°. Συμπεράσματα

12. Συμπεράσματα

Στην αρχή της εργασίας αυτής διατυπώθηκε ότι προκειμένου να αναπτυχθεί ένα σύστημα λήψης αποφάσεων για τον βέλτιστο έλεγχο της διαχείρισης των θερμοκηπιακών μονάδων είναι απαραίτητο: i). να οριστεί ο στόχος – πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί και το κατά πόσο αυτό είναι εφικτό, ii). να υπάρχουν διαθέσιμα τα απαραίτητα “εργαλεία” (λογισμικά) ικανά να ανταποκριθούν τόσο στις ανάγκες διαχείρισης του κλίματος στις θερμοκηπιακές μονάδες όσο και υπολογισμού της ανάπτυξης και παραγωγής της καλλιέργειας τομάτας, iii). να γίνουν βαθμονομήσεις των “εργαλείων” (λογισμικών) για τις αντίστοιχες θερμοκηπιακές μονάδες, iv). να οριστεί η στρατηγική που θα εφαρμόζεται για τη βέλτιστη διαχείριση.

Οι στόχοι των παραγωγών, που ορίζουν ουσιαστικά τα κριτήρια για τη βέλτιστη διαχείριση έγιναν ορατά από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εκτεταμένη έρευνα που πραγματοποιήθηκε σε πολλές περιοχές της χώρας.

Πρώτιστος στόχος των παραγωγών είναι η μείωση του κόστους παραγωγής και πιο συγκεκριμένα η μείωση της κατανάλωσης καυσίμων που επιβαρύνει σημαντικά τον προϋπολογισμό των θερμοκηπιακών μονάδων. Για τη μείωση της κατανάλωσης καταφεύγουν στη μείωση της θερμοκρασίας στόχου τις κρίσιμες ημέρες με χαμηλές θερμοκρασίες, οδηγώντας ταυτόχρονα σε υστέρηση την παραγωγή και καθυστέρηση στην ημερομηνία συγκομιδής, με συνέπεια τη διαφοροποίηση της στρατηγικής που αρχικά διαμορφώνεται από τους παραγωγούς. Αυτό συνεπάγεται σε πολλές περιπτώσεις μείωση της τιμής πώλησης του παραγόμενου προϊόντος με άμεση συνέπεια τη μείωση της κερδοφορίας της επιχείρησης.

Σημαντικό στόχο για τους παραγωγούς αποτελεί και η αποφυγή φυτοϋγειονομικών προβλημάτων κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου, με τον προβληματισμό τους να εστιάζεται στον Βοτρύτη. Παρατηρούν κατά τη χειμερινή περίοδο υγροποιήσεις στην επιφάνεια του καλύμματος κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή αφύγρανση του θερμοκηπίου.

Τέλος, η αύξηση της παραγωγής και η βελτίωση της ποιότητας είναι κάτι που επιθυμούν να επιτύχουν. Η αύξηση όμως της παραγωγής και η βελτίωση της ποιότητας για τους παραγωγούς, είναι συνάρτηση της τιμής που διαμορφώνεται στην αγορά για την τομάτα, τιμή που παρουσιάζει ιδιαίτερες διακυμάνσεις ανάλογα με το έτος, την περιοχή και την καλλιεργητική περίοδο. Σε περιπτώσεις όπου η ζήτηση

παρουσιάζεται μειωμένη οι παραγωγοί προτιμούν να διακόψουν την παραγωγή τομάτας και να πραγματοποιήσουν εναλλαγή της καλλιέργειας.

Η επίτευξη ταυτόχρονα των παραπάνω στόχων δεν είναι πάντα εφικτή και για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η βέλτιστη λύση συνδυασμού επιμέρους στόχων. Η μείωση του κόστους παραγωγής και η αύξηση της παραγωγής είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αλληλοκρουόμενων στόχων. Η δημιουργία και χρήση λογισμικού που θα διαμορφώνει τη στρατηγική που θα πρέπει να ακολουθηθεί ανάλογα με τις ανάγκες και το σχεδιασμό των παραγωγών αποτελεί μια λύση του προβλήματος. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία αποτέλεσε η σύνθεση του βιο-φυσικού προσομοιώματος και η επιμέρους βαθμονόμηση και επιβεβαίωση τόσο του κλιματικού όσο και του βιολογικού προσομοιώματος.

Η καινοτομία του κλιματικού προσομοιωτή (SimGreC), ήταν η σύνθεση 5 υπο-προσομοιωμάτων ικανών να λειτουργούν και ανεξάρτητα, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.1, με άμεσο στόχο τη χρησιμοποίηση του σε ένα μεγάλο εύρος κλιματικών σεναρίων, σύμφωνα πάντα με τις ανάγκες των παραγωγών της Μεσογείου.

Οι συγκρίσεις των βαθμονομημένων και επιβεβαιωμένων αποτελεσμάτων του προσομοιωτή, με τα μετρημένα κλιματικά δεδομένα έδειξαν μεγάλη αξιοπιστία. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ικανοποιητική συμφωνία για την βαθμονόμηση και επιβεβαίωση της θερμοκρασίας του αέρα, του καλύμματος, της καλλιέργειας και του εδάφους. Ο προσομοιωτής δεν υπολογίζει με μεγάλη ακρίβεια όπως στις περιπτώσεις των θερμοκρασιών, την σχετική υγρασία του αέρα. Οι λόγοι που εξηγούν τις διαφοροποιήσεις που παρουσιάζονται μεταξύ των υπολογισμένων και των μετρημένων τιμών είναι η υπό-εκτίμηση των φαινομένων συμπίκνωσης στην επιφάνεια του καλύμματος όταν το θερμοκήπιο είναι τελείως κλειστό ή η υπό-εκτίμηση κατά τη διάρκεια του αερισμού της μεταφερόμενης μάζας και ενέργειας από τον περιβάλλον χώρο του θερμοκηπίου, όταν τα παράθυρα του θερμοκηπίου ελέγχονταν αυτόματα από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Στην περίπτωση του βιολογικού προσομοιωτή παρατηρήθηκε ανικανότητα από τους ήδη αναπτυγμένους βιολογικούς προσομοιωτές στη προσέγγιση του κορυφολογήματος, το σταμάτημα δηλαδή της ανάπτυξης της καλλιέργειας, κοινή αγρονομική πρακτική για τις χώρες της Μεσογείου, κάτι που αποτέλεσε την ανάγκη για τη μετατροπή του προσομοιωτή (TOMGRO). Η σύγκριση μεταξύ των υπολογισμένων τιμών και των πειραματικών δεδομένων για την ανάπτυξη των φυτών, την παραγόμενη βιομάζα και την παραγωγή των καρπών απέδειξε, υψηλή

αξιοπιστία και καταλληλότητα του τροποποιημένου προσομοιωτή (SimTom) σε σχέση με την κοινή καλλιεργητική πρακτική που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Τα αποτελέσματα απέδειξαν καλύτερη συμφωνία και υψηλότερο βαθμό προσομοίωσης και ειδικότερα στον υπολογισμό της φυλλικής επιφάνειας, του αριθμού των φύλλων και του παραγόμενου ξηρού βάρους των φύλλων όπου οι Jones et al. 1991, and Dayan et al. 1993a, 1993b, υπό-εκτιμούν τις πραγματικές τιμές. Η αρχική υπόθεση ότι ο μηχανισμός κατανομής του ξηρού βάρους παραμένει και μετά το κορυφολόγημα της καλλιέργειας, φαίνεται ότι δούλεψε σωστά. Μικρή αποτελεσματικότητα παρατηρήθηκε στον υπολογισμό του ξηρού βάρους των βλαστών, κάτι που δεν έχει σημαντική επίδραση στη συνολική εικόνα των αποτελεσμάτων που εξάγονται από τον προσομοιωτή.

Η αξιοπιστία τόσο του βιολογικού όσο και του κλιματικού προσομοιώματος οδήγησαν στη σύζευξη των δύο σε ένα βιοφυσικό ικανό να προβλέπει τόσο τον υπολογισμό των κλιματικών παραμέτρων στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων όσο και τον υπολογισμό της ανάπτυξης της καλλιέργειας και της παραγόμενης βιομάζας. Τα αποτελέσματα της επιβεβαίωσης του βιοφυσικού προσομοιώματος απέδειξαν ότι το βιοφυσικό προσομοίωμα (BioSiGreT) παρουσιάζει καλή συμφωνία μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών. Ωστόσο προβληματισμός παρουσιάστηκε κατά τον υπολογισμό της παραγόμενης βιομάζας του φυτού και της παραγωγής των καρπών, καθώς η προσομοίωση μακράς διάρκειας οδηγεί σε εσφαλμένο υπολογισμό των κλιματικών παραμέτρων όταν υπάρχουν σφάλματα στις μετρούμενες τιμές.

Για την πρόβλεψη κλιματικών σεναρίων και τη χρήση του βιοφυσικού προσομοιώματος, απαραίτητη ήταν η επιβεβαίωση μια γεννήτριας κλιματικών δεδομένων. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε με κλιματικά δεδομένα της περιοχής του Βελεστίου, περιοχής που αποτελεί αντιπροσωπευτικό δείγμα του κλίματος που επικρατεί κατά τη διάρκεια του χειμώνα στις περισσότερες περιοχές γύρω από τη Μεσογειακή λεκάνη. Η ακρίβεια που προσφέρει η γεννήτρια παραγωγής κλιματικών δεδομένων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα παραγόμενα μετεωρολογικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελέτη σεναρίων από βιοφυσικούς προσομοιωτές καθώς και για μοντέλα ανάπτυξης και αποτίμησης του ρίσκου ανάλογα με τις κλιματικές συνθήκες. Ταυτόχρονα η αναπτυγμένη γεννήτρια δύναται να χρησιμοποιηθεί στην διαδικασία της βελτιστοποίησης καθώς παρέχει τιμές για τα

απαραίτητα κλιματικά δεδομένα ανάλογα με το βάθος πρόγνωσης που θα δοθεί από κάποιο web-site.

Η τροποποίηση του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων προκαλεί ουσιαστικές μεταβολές στον ρυθμό ανάπτυξης και παραγωγής της καλλιέργειας. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση του βιολογικού προσομοιώματος (SimTom) κάτω από διαφορετικές μεταχειρίσεις και τα αποτελέσματα έδειξαν χρήσιμα συμπεράσματα. Η κατεύθυνση και η ποσοτικοποίηση των μεταβολών αυτών ήταν ένα από τα ζητούμενα της έρευνας καθώς θα αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για την ανάπτυξη στρατηγικών για τη βέλτιστη διαχείριση του κλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων και την μεγιστοποίηση της παραγωγής.

Η στρατηγική λοιπόν που δύναται να ακολουθήσουν οι παραγωγοί και οι συνέπειες της διαχείρισης του κλίματος των θερμοκηπιακών μονάδων στην ανάπτυξη και την παραγωγή της καλλιέργειας τομάτας, είναι ανάλογη των αποτελεσμάτων που προέκυψαν στο *Κεφάλαιο 10*. Σημαντικό συμπέρασμα που προέκυψε από τη μελέτη περιπτώσεων που μελετήθηκαν, ήταν οι συνέπειες που προκύπτουν στην περίπτωση μιας ενδεχόμενης μείωσης της θερμοκρασίας για ορισμένο χρονικό διάστημα. Γνωρίζοντας λοιπόν μια βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη για μείωση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου, συστήνεται στους παραγωγούς αύξηση της μέσης τιμής της θερμοκρασίας στο εσωτερικό των θερμοκηπίων για το αντίστοιχο διάστημα καθώς τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι δεν προκύπτει διαφοροποίηση τόσο στο ρυθμό ανάπτυξης όσο και στην παραγωγή της καλλιέργειας τομάτας.

Η διαχείριση του κλίματος των θερμοκηπίων μπορεί να γίνει πιο αποτελεσματική με τη χρήση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη μελέτη περιπτώσεων του βιολογικού προσομοιώματος ενώ μέρος των συμπερασμάτων αναμένεται να συμβάλλει στην ισορροπία των κερδών ενός προϊόντος ονομαστικής αξίας στην αγορά, σε σχέση με το κόστος διαχείρισης του εξοπλισμού κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας.

Τέλος τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην εργασία αυτή για τη βελτιστοποίηση του βιοφυσικού προσομοιώματος με τη χρήση της μεθόδου branch & bound, αποδεικνύουν τη χρηστικότητα της βελτιστοποίησης στη πράξη. Η διαφοροποίηση της διαχείρισης του κλίματος των θερμοκηπιακών μονάδων, ανάλογα με τις ανάγκες που διαμορφώνονται σύμφωνα με το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και του κλίματος που επικρατεί στον περιβάλλον χώρο του θερμοκηπίου, δύναται να μεταβάλλουν τη στρατηγική που ακολουθείται για τη

μείωση του κόστους παραγωγής και τη αύξηση της κερδοφορίας της επιχείρησης. Η περαιτέρω ανάλυση σεναρίων αναμένεται να συμβάλλει στην διαμόρφωση στρατηγικών που θα ακολουθούν οι παραγωγοί κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου.

Το πρώτο βήμα για τη δημιουργία και επιβεβαίωση ενός βιοφυσικού προσομοιώματος και μιας γεννήτριας κλιματικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε. Ταυτόχρονα η ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου έδειξε τις απαντήσεις σε πιθανά σενάρια διαχείρισης του κλίματος. Παράλληλα η βελτιστοποίηση του βιοφυσικού προσομοιώματος θα αποτελέσει εργαλείο για τον καθορισμό των στρατηγικών διαχείρισης του μικροκλίματος στο εσωτερικό των θερμοκηπιακών μονάδων. Ο περαιτέρω εμπλουτισμός του βιοφυσικού προσομοιώματος με αλγόριθμους υπεύθυνους για τον υπολογισμό του κλίματος και τη θερινή περίοδο και η διερεύνηση βέλτιστων λύσεων σε μεγαλύτερο εύρος κλιματικών σεναρίων, αναμένεται να το καταστήσουν χρήσιμο εργαλείο στη λήψη αποφάσεων.

Κεφάλαιο 13°. Βιβλιογραφία

13. Βιβλιογραφία

- Acock, B., Charles-Edwards, D.A., Fitter, D.J., Hand, D.W., Ludwig, L. J., Warren-Wilson, J. and Withers, A.C., 1978.** The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: An experimental examination of two canopy models. *Journal of Experimental Botany*, **29**: 815-827.
- Agin, N., 1966.** Optimum Seeking with Branch-and-Bound. *Management Science*, **13**: 176-185.
- Atherton, J.G. and Harris, G.P., 1986.** Flowering. In: J.G. Atherton and J. Rudich, (Eds) The tomato crop. Chapman and Hall, 167-200.
- Atherton, J.G. and Othman, S., 1983.** Effects of irradiance and water stress on flower abortion in the glasshouse tomato. *Acta Horticulturae*, **134**: 133-138.
- Avissar, R., Avissar, P., Mahe, r Y., Bravdo, B.A., 1985.** A model to simulate response of plant stomata to environmental conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, **34**: 21-29.
- Bailey, B.J., Seginer, I., 1989.** Optimum control of greenhouse heating. *Acta Horticulturae* **245**: 512-518.
- Baille, A., Boulard, T., Gary, C., 1990.** Les critères d'optimisation dans la gestion du climat et de la production sous serre. *C.R. Academiae Agriculturae France* **76**(5): 25-36.
- Bakker, J.C. and Challa H., 1995.** Aim and approach of this book. In: Bakker J.C., Bot G.P.A., Challa H., van de Braak N.J., eds. *Greenhouse climate control. An integrated approach*. Wageningen: Wageningen Pers, pp. 1-3.
- Bakker, J.C., van Uffelen, J.A.M., 1988.** The effect of diurnal temperature regimes on growth and yield of glasshouse sweet pepper. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, **36**: 201-208.
- Balas, E., 1963.** Programare liniara cu variable bivalent (Linear Programming with Zero-One Variables). Proc. *Third Scientific Session on Statistics*, Bucharest, December 5-7.
- Bellman, R.E., 1957.** Dynamic programming. Princeton, New Jersey, USA: Princeton University Press.
- Bertier, P. and Roy, B., 1964.** Procedure de resolution pour une classe de problemes pouvant avoir un caractere combinatoire. *Cahiers du Centre d Etudes de Recherche Operationelle*, **6**: 202-208.
- Bertin, N., 1993.** Environnement climatique, compétition pour les assimilats et modélisation de la nouaison de la tomate en culture sous serre. [Climatic environment, competition for assimilates and modelling fruit-set of greenhouse tomato.] *PhD Thesis*, Institut National Agronomique Paris-Grignon, France.

- Bertin, N., Gary C., 1993.** Evaluation of TOMGRO, a dynamic model of growth and development of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) at various levels of assimilate supply and demand. *Agronomie*, **13**: 395-405.
- Bertin, N., Heuvelink, E., 1993.** Dry-matter production in a tomato crop: comparison of two simulation models. *Journal of Horticultural Science*, **68**(6): 995-1011.
- Bot, G.P.A., 1983.** Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. *Ph.D. Thesis*, Landbouwhogeschool, Wageningen.
- Bot, G.P.E., 2001.** Developments in indoor sustainable plant production with emphasis in energy saving. *Computers and Electronics in Agriculture*, **30**: 151-165
- Boulard, T., Baille, A., Le Gall, F., 1991a.** Etude de différentes méthodes de refroidissement sur le climat et la transpiration de tomates de serre. [Study of various methods of cooling on climate and tomato transpiration in greenhouse.] *Agronomie*, **11**(7): 543–553.
- Boulard, T., Baille, A., Mermier, M., Villette, F., 1991b.** Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomates de serre. [Measurement and modelling of stomatal resistance and tomato transpiration in greenhouse.] *Agronomie*, **11**: 259–274.
- Boulard, T., Feuilloley, P., Kittas, C., 1997.** Natural ventilation performance of six greenhouse and tunnel types. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **67**(4): 249–266.
- Boulard, T., Jemaa, R., 1993.** Greenhouse tomato crop transpiration model application to irrigation control. *Acta Horticulturae*, **335**: 381- 387.
- Boulard, T., Mermier, M., Fargues, J., Smits, N., Rougier, M., 2002.** Tomato leaf boundary layer climate: implication for microbiological control of whiteflies in greenhouse. *Agricultural Forest Meteorology*, **110**: 159–176.
- Brooks, G.H. and White C.P., 1965.** An Algorithm for Finding Optimal and Near Optimal Solutions to the Production Scheduling Problem. *Journal of Industrial Engineering*, **16**: 34-40.
- Businger, J.A., 1963.** The glasshouse (greenhouse) climate. In W.R. van Wijk (Editor), *Physics of Plant Environment*. North-Holland, Amsterdam, pp. 277-318.
- Buwalda, F., Eveleens, B., Wertwijn, R., 2000.** Ornamental crops tolerate large temperature fluctuations: a potential for more efficient greenhouse heating strategies. *Acta Horticulturae*, **515**: 141-150.
- Calvert, A. and Slack, G., 1975.** Effects of carbon dioxide enrichment on growth, development and yield of of glasshouse tomatoes. I. Responses to controlled concentration. *Journal of Horticultural Science*, **50**: 61-71.
- Calvert, A., 1965.** Flower initiation and development in the tomato. *National Agricultural Advisory Service Quart. Rev.*, **70**: 79-80.

- Challa, H., 1990.** Crop growth models for greenhouse climate control. In: Rabbinge R., Goudrian, J., van Keulen H., Penning de Vries F.W.T., Van Laas H.H., eds. *Theoretical production ecology: reflection and perspectives*. Simulation Monographs 34. Wageningen: Pubdoc, pp. 125-145.
- Challa, H., Schapendonk, A.H.C.M., 1986.** Dynamic optimization of CO₂ concentration in relation to climate control in greenhouses. In: H.Z Enoch and B.A. Kimball (Editors), *Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouse Crops*, Vol. 1. CRC, Boca Raton, FL, pp. 147-160.
- Challa, H., van de Vooren, J., 1980.** A strategy for climate control in greenhouses in early winter production. *Acta Horticulturae*, **106**: 159-164
- Charles-Edwards, D.A. and Ludwig, L.J., 1975.** The basis of expression of leaf photosynthetic activities. In: R. Marcelle, (Ed.) Environmental and biological control of photosynthesis, Dr W. Junk, The Hague, 37-44.
- Chiapale, J.P., Kittas, C. and Villele, O., 1981.** Estimation regionale des besoins de chauffage des serres. *Acta Horticulturae*, **115**: 493-502.
- Choisnel, E., 1986.** Aspects topoclimatiques: une methode d'etude. *Communication presente au Seminaire «Agrometeorologie de moyenne montagne»*, Toulouse, INRA, 16-17 Avril 1986.
- Clarke, N.D., Shipp, J.L., Papadopoulos, A.P., Jarvis, W.R., Khosla, S., Jewett, T.J., Ferguson G., 1999.** Development of the Harrow Greenhouse Manager: a decision-support system for greenhouse cucumber and tomato. *Computers and Electronics in Agriculture*, **24**:195-204.
- Cockshull, K.E., Hand, D.W., Langton, F.A., 1981.** The effect of day and night temperature on flower initiation and development in Chrysanthemum. *Acta Horticulturae*, **125**: 101-110.
- Coleman, W.K. and Greyson, R.I., 1976.** The growth and development of the leaf in tomato (*Lycopersicon esculentum*). I. The plastochron index, a suitable basis for description. *Canadian Journal of Botany*, **54**: 2421-2428.
- Cooper, A.J., 1966.** Seasonal changes in net assimilation and leaf growth of young tomato plants. *Acta Horticulturae*, **4**: 76-78.
- Cooper, A.J., 1967.** Effects of shading and time of year on net assimilation rates of young glasshouse tomato plants. *Annals of Applied Biology*, **59**: 85-90.
- Dakin, R.J., 1965.** A Tree-search Algorithm for Mixed Integer Programming Problems. *The Computer Journal*, **8**: 250-255.
- Danuso, F., Della Mea, V., 1994.** Development and evaluation of a stochastic model for the generation of weather data. *III ESA Congress*, Abano, Italy, 18-22 September.

- Day, W., 1998.** The value of crop and greenhouse models in greenhouse environment control. *Acta Horticulturae*, **456**: 295–301.
- Dayan, E., H. van Keulen, J. Jones, I. Ziropi, D. Shmuel and H. Challa, 1993a.** Development, field calibration and validation of a tomato greenhouse model. I. Model description. *Agriculturae Systems*, **43**: 145-163.
- Dayan, E., H. van Keulen, J. Jones, I. Ziropi, D. Shmuel and H. Challa, 1993b.** Development, field calibration and validation of a tomato greenhouse model. II. Field calibration and validation. *Agriculturae Systems*, **43**: 165-183.
- de Koning, A.N.M., 1988.** The effect of different day/night temperature regimes on the growth, development and yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, **63**(3): 465-471.
- de Koning, A.N.M., 1990.** Long term temperature integration of tomato. Growth and development under alternating temperature regimes. *Scientia Horticulturae*, **45**: 117-127.
- de Konig A.N.M., 1994.** Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach. *PhD Thesis*, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- Deltour, J., de Haulleux, D., Nijskens, .J, Coutisse, S. and Nisen, A., 1985.** Dynamic modelling of heat and mass transfer in greenhouses. *Acta Horticulturae*, **174**: 119-126.
- Driebeek, N.J., 1966.** An Algorithm for the Solution of Mixed Integer Programming Problems. *Management Science*, **12**: 576-587.
- Efroymsen, M.A. and Ray, T.L., 1966.** A Branch-and-Bound Algorithm for Plant Location. *Operations Research*, **14**: 361-368.
- Elad, Y., 1988.** Effect of abiotic conditions on development of grey mould of rose and scanning electron microscopy. *Phytopathologia Mediterranea*, **28**: 122-130
- Elwell, D.L., Bauerle, W.L., 1990.** TOMMOD a new model of greenhouse tomato development. *International Summer Meeting of American Society of Agricultural Engineers*, 11pp.
- Fatnassi, H., Boulard, T., Bouirden, L., 2003.** Simulation of climatic conditions in full-scale greenhouse fitted with insect-proof screens. *Agricultural and Forest Meteorology*, **118**(1–2): 97–111.
- Favett, J.W. and Plyter, N., 1966.** The Optimal Assignment of Facilities to Locations by Branch and Bound. *Operations Research*, **14**: 210-232.
- Fisher, K.J., 1977.** Competition effect between fruit trusses of the tomato plant. *Scientia Horticulturae*, **7**: 37-42.
- Fisher, P.R. and Heins, R.D., 1996.** The Greenhouse CARE System: A decision-support system for height control and scheduling of potted flowering plants. *Acta Horticulturae*, **417**.

- Friend, D.J.C., 1966.** The effects of light and temperature on the growth of cereals. In: F.L. Milthorpe and J.D.Ivins, (Eds) *The Growth of Cereals and Grasses*, Butterworths, London, 181-199.
- Gal, S., Angel, A., Seginer, I., 1984.** Optimal control of greenhouse climate: methodology. *European Journal of Operations Research*, **17**(1): 45-56.
- Gary, C., Charasse L., Tchamitchian, M., Bertin, N., Rebillard A., Boulard, T., Cardi, J.P., and Baille, A., 1995.** SIMULSERRE: An educational software simulating the greenhouse-crop system. *Acta Horticulturae*, **456**.
- Gauthier, L., 1992.** GX: a Smalltalk-based platform for greenhouse environment control. Part 2: Supporting and implementing control strategies. *Transactions of the ASAE*, **35**(6): 2011-2020.
- Geofrion, A.M., 1967.** Integer Programming by Implicit Enumeration and Balas' Method. *Society for Industry and Applied Mathematics*, **9**: 178-190.
- Ghosal, M.K. and Tiwari, G.N., 2006.** Modelling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse. *Energy Conversion and Management*, **47**: 1779-1798.
- Ghosal, M.K., Tiwari, G.N. and Srivastava, N.S.L., 2004.** Thermal modelling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: an experimental validation. *Energy and Buildings*, **36**: 219-227.
- Gijzen, H., 1992.** Simulation of photosynthesis and dry matter production of greenhouse crops. CABO-DLO, Wageningen. 70 p. Simulation Report CABO-TT, no. **28**.
- Gijzen, H., Heuvelink, E., Marcelis, L.F.M., Dayan, E., Cohen, S., Fuchs, M., Challa, H., 1998.** HORTISIM: a model for greenhouse crops and greenhouse climate. *Acta Horticulturae*, **456**: 441-450.
- Gilmore, P.C., 1962.** Optimal and Suboptimal Algorithms for the Quadratic Assignment Problem. *Journal Society for Industry and Applied Mathematics*, **10**: 305-313.
- Gosiewski, W., Nilwik, H.J.M. and Bierhuizen, J.F., 1981.** Effects of irradiance on photosynthesis of outdoor tomato cultivars. *Gartenbauwissenschaft*, **46**: 213-217.
- Goudriaan, J. and van Laar, H.H., 1994.** Modelling Potential Crop Growth Processes: Textbook with Exercises. *Kluwer Academic Publishers*, pp. 239.
- Goudrian, J., 1977.** Crop micro meteorology: a simulation study. PUDOC – Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, The Netherlands, 249p.
- Hanson, C.L., Cumming, K.A., Woolhiser, D.A., Richardson, C.W., 1994.** Microcomputer program for daily weather simulation. US Dept. Agric., *Agricultural Research*, Svc. Pub. No. ARS-114: 38 pp.

- Harazano, Y., 1988.** Artificial intelligence technology to control plant environments. In: *Biotechnology in Agriculture and Forestry*, vol **17**: High-tech and Micropropagation. Berlin, Germany, Springer-Verlag, 432-451.
- Hashimoto, Y., Morimoto, T., Funada, S., 1981.** Computer processing of speaking plant for climate control and computer aided plantation (computer aided cultivation). *Acta Horticulturae*, **115**: 317–325.
- Heuvelink, E. and Marcelis, L.F.M., 1989.** Dry matter distribution in tomato and cucumber. *Acta Horticulturae*, **260**: 1-9.
- Heuvelink, E., 1989.** Influence of day and night temperature on the growth of young tomato plants. *Scientia Horticulturae*, **38**: 11-22.
- Heuvelink, E., 1994.** Dry matter partitioning in tomato: Validation of a dynamic simulation model. *Annals of Botany*, **77** (1): 71–80.
- Heuvelink, E., 1995.** Growth, development and yield of a tomato crop: periodic destructive measurements in a greenhouse. *Scientia Horticulturae*, **61**: 77–99.
- Heuvelink, E., 1996.** Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis. *Ph.D. Thesis*, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, 326pp.
- Ho, L.C., 1980.** Control of import into tomato fruits. *Ber. Deutsch. Bot. Ges.*, **93**, 315-325.
- Ho, L.C., Sjut, V. and Hoad, G.V., 1983.** The effect of assimilate supply in fruit growth and hormone level in tomato plants. *Plant Growth Regulation*, **1**: 155-171.
- Hoogenboom, G., 1980.** Simulation of the growth of tomatoes in a greenhouse. Department of Theoretical Production Ecology, Wageningen Agricultural University, Wageningen.
- Hurd, R.G. and Cooper, A.J., 1967.** Increasing flower number in single-truss tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, **42**: 181-228.
- Hurd, R.G. and Thornley, J.H.M., 1974.** An analysis of the growth of young tomato plants in water culture at different light integrals and CO₂ concentrations. I. Physiological aspects. *Annals of Botany*, **38**: 375-388.
- Hurd, R.G., Gay, A.P. and Mountfield, A.C., 1979.** The effect of partial flower removal on the relation between root, shoot and fruit growth in the indeterminate tomato. *Annals of Applied Biology*, **93**: 77-89.
- Hussey, G., 1963a.** Growth and development in the young tomato. I. The effect of temperature and light intensity on growth of the shoot apex and leaf primordial. *Journal of Experimental Botany*, **14**: 316-325.
- Hussey, G., 1963b.** Growth and development in the young tomato. II. The effect of defoliation on the development of the shoot apex. *Journal of Experimental Botany*, **14**: 326-333.
- Hussey, G., 1965.** Growth and development in the young tomato. III. The effect of night and day temperatures on vegetative growth. *Journal of Experimental Botany*, **16**: 373-385.

- Ignall, E. and Schrage, L., 1965.** Application of the Branch-and-Bound Techniques to Some Flow Shop Scheduling Problems. *Operations Research*, **13**: 400-412.
- Ioslovich, I., Tchamitchian, M., 1998.** Carbon dynamics in plants – Application to optimal control of greenhouses. *European Agricultural Engineering Conference (EurAgEng'98)*, Oslo, août 1998.
- Jarvis, P.G., 1976.** The interpretation of the variations in leaf water potential and stomata conductance found in canopies in the field. *Philosophy Transr Society London B* **273**: 593-610.
- Jarvis, W.R., 1980.** Epidemiology. In: The biology of Botrytis (Edited by J.R. Coley Smith, K. Verhoeff and W.R. Jarvis). *Academic Press*, London, pp. 219-250
- Jarvis, W.R., 1989.** Managing diseases in greenhouse crops. *Plant Diseases*, **73**: 190-194.
- Jeannequin, B., Martin-Clouaire, R., Tchamitchian, M., 1997.** Planning daily climate set-points for a greenhouse tomato production: the SERRISTE system. In: Model-based decision support in agriculture, *Quantitative approaches in Systems Analysis*, **15**: 9-14.
- Jewett, T.J. and Jarvis, W.R., 2001.** Management of the greenhouse microclimate in relation to disease control: a review. *Agronomie*, **21**: 351-366.
- Johnson, G.L., Hanson, C.L., Hardegree, S.P., Ballard, E.B., 1996.** Stochastic weather simulation: Overview and analysis of two commonly used models. *Journal of Applied Meteorology*, **35**: 1878-1896.
- Jolliet, O., 1994.** HORTITRANS, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **57**: 23-37.
- Jolliet, O., Danloy, L., Gay, J.B., Munday, G.L. and Reist, A., 1991.** HORTITRANS: an improved static model the energy consumption of a greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*, **55**: 265-294.
- Jones, J.W., Colwick, R.F., Threadgill, E.D., 1970.** A simulated environmental model of temperature, evaporation, rainfall and soil moisture. *ASAE Paper* n. 70-404.
- Jones, J.W., Dayan, E., Allen, L.H, van Keulen, H, Challa, H., 1991.** A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Transaction of ASAE*, **34** (2): 663–672.
- Jones, J.W., Dayan, E., Allen, L.H, van Keulen, H, Challa, H., 1989b.** Modelling tomato growth for optimizing greenhouse temperatures and carbon dioxide concentrations. *Acta Horticulturae*, **248**: 207-216.
- Jones, J.W., Hwang, Y.K. and Seginer, I., 1995.** Simulation of greenhouse crops, environments and control systems. *Acta Horticulturae*, **399**: 73-84.
- Jones, J.W., Kenig, A., Vallejos, C.E., 1999.** Reduced State-Variable Tomato Growth Model. *Transactions of the ASAE*, **42**(1): 255-265.

- Kano, A., Van Bavel, C.H.M., 1988.** Design and test of a simulation model of tomato growth and yield in a greenhouse. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, **56**: 408-416.
- Karlsson, M.G., Heins, R.D., 1985.** Modelling of light and temperature effects on *Chrysanthemum morfolium*. *Acta Horticulturae*, **174**: 235-240.
- Klapwijk, D., 1981.** Effect of season on early tomato growth and development rates. Netherlands. *Journal of Agricultural Science*, **29**: 179-188.
- Kolesar, P.J., 1967.** A Branch-and-Bound Algorithm for the Knapsack Problem. *Management Science*, **13**: 723-735.
- Krug, H., Liebig, H.P., 1979.** Analyse, Kontrolle und Programmierung der Pflanzenproduktion in Gewächshäusern mit Hilfe beschreibender Modelle. II. Produktion von Radies (*Raphanus sativus* var. *sativus*) *Gartenbauwissenschaft*, **44**: 202-213.
- Land, A.H. and Doig, A., 1960.** An Automatic Method for Solving Discrete Programming Problems. *Econometrica*, **28**: 497-520.
- Larsen, G.A., Pense, R.B., 1982.** Stochastic simulation of daily climatic data for agronomic models. *Agronomy Journal*, **74**: 510-514.
- Lawler, E.L., 1963.** The Quadratic Assignment Problem. *Management Science*, **9**: 586-599.
- Levy, A., Rabinovitch, H.D. and Kedar, N., 1978.** Morphological and physiological characters affecting flower drop and fruit set of tomatoes at high temperatures. *Euphytica*, **27**: 211-218.
- Liebig, H.P., 1985.** Model of cucumber growth and yield. II. Prediction of yields. *Acta Horticulturae*, **156**: 139-154.
- Lieth J.H., Pascian C.C. 1991.** A simulation model for the growth and development of flowering rose shoots. *Scientia Horticulturae*, **46**: 109-128.
- Little, J.D.C., Murty, K.G., Sweeney, D.W. and Karel, C., 1963.** An Algorithm for the Traveling Salesman Problem. *Operations Research*, **11**: 972-989.
- Lomnicki, Z.A., 1965.** A Branch-and-Bound Algorithm for the Exact Solution of the Three-Machine Scheduling Problem. *Opnl. Res. Quart.*, **16**: 89-100.
- Ludwig, L.J. and Withers, A.C., 1984.** Photosynthetic responses to CO₂ in relation to leaf development in tomato. In: C. Sybesma, (Ed.) *Photosynthesis Research*, Martinus Nijhoff, Dr W. Junk, The Hague, **4**: 217-220.
- Marcelis, L.F.M., Heuvelink, E. And Goudriaan, J., 1998.** Modelling biomass production and yield of horticultural crops : a review. *Scientia Horticulturae*, **74**: 83-111.
- Marcellis, L.F.M., 1994.** A simulation model for dry matter partitioning in cucumber. *Annals of Botany*, **74**: 43-52.
- Martin-Clouaire, R., Boulard, T., Cros, M.J., Jeannequin, B., 1993.** Using empirical knowledge for the determination of climatic set-points: an artificial intelligence approach.

- In: The computerized greenhouse: Automatic control application in plant production. New-York, USA: Academic Press, 197-224.
- Martin-Clouaire, R., Jeannequin, B., Tchamitchian, M., 1996.** SERRISTE, un système d'intelligence artificielle pour la planification journalière du climat sous serre. In : Actes du séminaire de l'AIP SERRE. Avignon, France, INRA, 153-162.
- Martin-Clouaire, R., Schotman, P.J., Tchamitchian, M., 1996.** A survey of computer-based approaches for climate management. *Acta Horticulturae* **406**: 409–423.
- Monteith J.L., Unsworth M.H., 1990.** Principles of Environmental Physics. London: Edward Arnold.
- Morris, L.G., 1964.** The heating and ventilation of greenhouses. National Institute Agricultrae Engineering Silsoe Bedfordshire.
- Murray, F.W., 1967.** On the computation of saturation vapour pressure. *Journal Applied Meteorology*, **6**: 203–204.
- Myster, J., Moe, R., 1995.** Effect of diurnal temperature alternations on plant morphology in some greenhouse crops – a mini review. *Scientia Horticulturae*, **62**: 205-215.
- Nourai, A.H.A., 1980.** Growth correlation and flower development in tomato. *Ph.D. Thesis* University of Reading, UK
- Parlange, M.B., Katz, R.W., 2000.** An extended version of the Richardson model for simulating daily weather variables. *Journal of Applied Meteorology*, **39**: 610-622.
- Peat, W.E., 1970.** Relationships between photosynthesis and light intensity in the tomato. *Annals of Botany*, **34**: 319-328.
- Penning de Vries, F.W.T., 1975.** The costs of maintenance processes in plant cells. *Annals of Botany*, **39**: 77-92.
- Penning de Vries, F.W.T., van Laar, H.H. and Chardon, M.C.M., 1983.** Bioenergetics of the growth of seeds, fruits and storage organs. In: Potential productivity of field crops under different environments. International Rice Research Institute, Manila, Philippines, 15-33.
- Perez Parra, J., Baeza, E., Montero, J.I., Bailey, B.J., 2004.** Natural ventilation of parral greenhouses. *Biosystems Engineering*, **87**(3): 355–366.
- Picken, A.J.F., Stewart, K. and Klapwijk, D., 1986.** Germination and vegetative development. In: Atherton J.G. and J. Rudich, (Eds), The tomato crop. Chapman and Hall, 111-166.
- Pieters, J., Deltour, J., 1999.** Modelling solar energy input in greenhouses. *Solar Energy*, **67**, 119-130.
- Pieters, J., Deltour, J., Debruyckere, M., 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., 1997.** Performances of greenhouses with the presence of condensation on cladding materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **68**(2): 125-137.
- Pluimers, J.C., Kroeze, C., Bakker, E.J., Challa, H., Hordijk, L., 2000.** Quantifying the environmental impact of production in agriculture and horticulture in The Netherlands: which emissions do we need to consider? *Agricultural Systems*, **66**: 167-189.
- Pontryagin, L.S., Boltyanskii, V.G., Gamkrelidze, R.V., Mishchenko, E.F., 1962.** The mathematical theory of optimal processes. New-York, USA: Wiley Interscience.
- Price, W.L., 1967.** Increasing the Capacity of a Network Where the Costs Are Nonlinear: A Branch-and-Bound Algorithm. *CORS Journal*, **5**: 100-114.
- Rado, F., 1963.** Programare liniara cu conditii logice (Linear Programming with Logical Conditions). *Communicarile Academici R. P. R.*, **13**: 1039-1041.
- Ramírez, A., Rodríguez, F., Berenguel, M., Heuvelink, E., 2004,** Calibration and validation of complex and simplified tomato growth models for control purposes in the southeast of Spain. *International Workshop on Models for Plant Growth and Control of Product Quality in Horticultural Production*.
- Richardson, C.W., 1981.** Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resources Research*, **17**: 182-190.
- Richardson, C.W., Nicks, A.D., 1990.** Weather generator descriptor. In: EPIC - Erosion Productivity Impact Calculator. 1. *Model documentation*. USDA, Tec. Bull. 1768, Temple, TX.
- Richardson, C.W., Wright, D.A., 1984.** WGEN: a model for generating daily weather variables. US Dept. Agric., Agric. Res. Svc. Pub. No. ARS-8: 83 pp.
- Rijsdijk, A.A. and Houter, G., 1993.** Validation of a model for energy consumption, CO₂ consumption and crop production (ECP-model). *Acta Horticulturae*, **328**: 125-131.
- Rijsdijk, A.A., Vogelesang, J., 2000.** Temperature integration on a 24 hour basis: a more efficient climate control strategy. *Acta Horticulturae*, **519**: 163-170.
- 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.
- Russel, C.R. and D.A. Morris, 1983.** Patterns of assimilate distribution and source-sink relationship in the young reproductive tomato plant (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Annals of Botany*, **52**: 357-363.
- Russel, C.R. and Morris, D.A., 1982.** Invertase activity, soluble carbohydrates and inflorescence development in the tomato. *Annals of Botany*, **49**: 89-98.

- Rylski, I., 1979.** Fruit set and development of seeded and seedless tomato fruits under diverse regimes of temperature and pollination. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **36**: 195-205.
- Salinas, J., Glandorf, D.C.M., Picavet, F.D. and Verhoeff, K., 1989.** Effects of temperature, relative humidity and age of conidia on the incidence of spotting on gerbera lowers caused by *Botrytis cinerea*. *Netherland Journal of Plant Pathology*, **98**: 51-64.
- Sawhney, V.K., 1983.** The role of temperature and its relationship with gibberellic acid in the development of floral organs of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Canadian Journal of Botany*, **61**: 1258-1265.
- Schapendonk, A..H.C.M., Gaastra, P., 1984.** A simulation study on CO₂ concentration in protected cultivation. *Scientia Horticulturae*, **23**: 217-229.
- Seginer, I., Gary, C., Tchamitchian, M., 1994.** Optimal temperature regimes for a greenhouse crop with a carbohydrate pool: a modelling study. *Scientia Horticulturae*, **60**: 55-80.
- Seginer, I., McClendon, R.W., 1992.** Methods for optimal control of the greenhouse environment. *Transactions of the ASAE*, **35**(4): 1299-1307.
- Shu Geng, Penning de Vries, F.W.T., Supit, I., 1985.** Analysis and simulation of weather variables. Part II: temperature and solar radiation. *Simulation Reports CABOTT* n. 5.
- Sigrimis, N., Anastasiou, A., Vogli, V., 1997.** Management and control for quality in greenhouses. Mathematical and control applications in agriculture and horticulture. *Proceedings of the 3rd IFAC workshop*, Hannover, Germany. Oxford, United Kingdom, Pergamon/Elsevier Science Ltd, 7-12.
- Sigrimis, N., Rerras, N., Anastasiou, A., Vogli, V., 1998.** A, adaptive system for optimising the management of greenhouses. *7th International conference on computers in agriculture*, Orlando, Florida, USA. St Joseph, USA, ASAE, 769-779.
- Singh, G., Singh, P.P., Singh, Lubana P.P., Singh, K.G., 2006.** Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renewable Energy*, **31**: 1541-1560.
- Spitters, C.J.T., Van Keulen, H., Van Kraalingen D.W.G., 1989.** A simple and universal crop growth simulator: SUCROS 87. In: Rabbinge R, Ward SA, Van Laar HH, eds. Simulation and systems management in crop protection. *Wageningen: Pudoc*, pp. 147–181.
- Stanghellini, C., 1983.** Radiation absorbed by tomato crop in a greenhouse. *Res Rep IMAG*, Wageningen, **83**: 23 p.
- Stanghellini, C., 1987.** Transpiration of greenhouse crops, an aid to climate management. *Thèse Ph-D IMAG*, Wageningen, 150 p.

- 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.
- Starck, Z., 1983.** Photosynthesis and endogenous regulation of the source-sink relation in tomato plants. *Photosynthetica*, **17**: 1-11.
- Stöckle, C.O., Nelson, R.L., Donatelli, M., Castellvì, F., 2001.** ClimGen: a flexible weather generation program. *Proceedings of 2nd International Symposium on Modelling Cropping Systems*, 229-230. Florence, Italy, 16-18 July.
- Sweeney, D.G., Hand D.W., Slack, G., Thornley, J.H.M., 1981.** Modelling the growth of winter lettuce. In: Rose DA, Charles-Edwards DA, eds. *Mathematics and plant physiology*. New York: Academic Press, pp 217-229.
- Swinbank, W.C., 1963.** Long wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **89**: 339-348
- Takakura, T., Jordan, K.A. and Boyd, L.L., 1971.** Dynamic simulation of plant growth and environment in the greenhouse. *Transaction of ASAE*, **14**: 964.
- Tanaka, A., Fujita, K. and Kikuchi, K., 1974a.** Nutrio-physiological studies on the tomato plant. I. Outline of growth and nutrient absorption. *Soil Science & Plant Nutrition*, **20**: 57-68.
- Tap, R.F., van Willigenburg, L.G., van Straten, G., van Henten, E.J., 1993.** Optimal control of greenhouse climate: computation of the influence of fast and slow dynamics. *12th IFAC Triennial World Congress*, Sydney, Australia, Volume 4, 4pp.
- Tchamitchian, M., Henry-Montbroussous, B., Jeannequin, B., Martin-Clouaire, R., 1997.** SERRISTE: A daily greenhouse climate set-point determination for tomatoes. In: *Mathematical and control applications in agriculture and horticulture*. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier Science, 25-30.
- Tchamitchian, M., Henry-Montbroussous, B., Jeannequin, B., Lagier, J., 1998.** SERRISTE: climate set-point determination for greenhouse tomatoes. *Acta Horticulturae*, **456**: 321-327.
- Tchamitchian, M., Ioslovich, I., 2000.** Equivalence of the temperature integral and the carbon dynamics concepts in plants: utility for control. *Acta Horticulturae*, **519**: 171-180.
- Tchamitchian, M., Lagier, J., Jeannequin, B., Martin-Clouaire, R., 2001.** SERRISTE, un outil pour la gestion climatique des serres. In : *Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision*, Montpellier, CIRAD, 203-215.
- Tchamitchian, M., Martin-Clouaire, R., Lagier, J., Jeannequin, B., Mercier, S., 2006.** SERRISTE: A daily set point determination software for glasshouse tomato production. *Computers and Electronics in Agriculture*, **50**: 25-47.

- Tchamitchian, M., Tantau, H.J., 1996.** Optimal control of the daily greenhouse climate: physical approach. *13th IFAC Triennial World Congress*, San Francisco, USA, **Volume B**: 471-475.
- Tchamitchian, M., van Willigenburg, L.G., van Straten, G., 1993.** Optimal control applied to tomato crop production in a greenhouse. *European Control Conference (EEC'93)*, Groningen, The Netherlands, **Volume III**: 1348-1342.
- Teh, C., 2006.** Introduction to mathematical modeling of crop growth: How the equations are derived and assembled into a computer model. *BrownWalker Press*, pp. 256.
- Thornley, J.H.M., Hurd, R.G. and Pooley, A., 1981.** A model of growth of the fifth leaf of tomato. *Annals of Botany*, **48**: 327-340.
- Thornton, P.E., Running, S.W., White M.A., 1997.** Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology*, **190**: 214-251.
- Trigui, M., Barrington, S., Gauthier, L., 1997.** A strategy for greenhouse climate control, Part I: Model development. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **78**(4): 407-413.
- Topçu, S. and Baytorun N.A., 1998.** Evaluation of the Greenhouse Tomato Growth Model TOMGRO Under Cukurova Protected Cultivation Conditions. *Tr. Journal of Agriculture and Forestry*, **23**: 749-755.
- Tucker, D.J., 1981.** Phytochrome regulation of leaf senescence in cucumber and tomato. *PI. Science Letters*, **23**, 103-108.
- Udink ten Cate, A.J., Challa, H., 1984.** On optimal computer control of the crop growth system. *Acta Horticulturae* **148**(1): 267-276.
- van Bavel, C.H.M., Damagnez, J. And Sadler, E.J., 1981.** The fluid-roof solar greenhouse: Energy budget analysis by simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, **23**: 61-76.
- van de Vooren, J., Welles, G.W.H. and Hayman, G., 1986.** Crop production. In: J.G. Atherton, and Rudich, J. (Eds.), *The tomato crop*. Chapman and Hall: 581-624.
- van Henten, E.J., 1994.** Greenhouse climate management: An optimal control approach. *Ph.D. Thesis*, Wageningen Agricultural Univericity, Wageningen, The Netherlands, 319pp.
- van Pee, M., Berckmans, D., 1999.** Quality of modelling plant responses for environmental control purposes. *Computers and Electronics in Agriculturae*, **22**: 209-219.
- van Straten, G., Challa, H., Buwalda, F., 2000.** Towards user accepted optimal control of greenhouse climate. *Computers and Electronics in Agriculturae*, **26**: 221-228.
- Vogelezang, J., Cuijpers, L., de Graaf-van der Zande, M.T., 1992.** Growth regulation of bedding plants by reversed day/night temperature only. *Acta Horticulturae*, **305**: 37-43.

- Vogelezang, J., de Hoog, J., Marissen, N., 2000.** Effects of diurnal temperature strategies on carbohydrate content and flower quality of greenhouse roses. *Acta Horticulturae* **515**: 111-118.
- Vriesenga, J.D. and Honma, S., 1974.** Inheritance of tomato inflorescence. Part 2. Flower number and branching. *Journal of Heredity*, **65**: 43-47.
- Walker, A.J. and Ho, L.C., 1977.** Carbon translocation in the tomato: carbon import and fruit growth. *Annals of Botany*, **41**: 813-823.
- Walker, A.J., Ho, L.C. and Baker, D.A., 1978.** Carbon translocation in the tomato: pathway to carbon metabolism in the fruit. *Annals of Botany*, **42**: 901-909.
- Walker, J.N., 1965.** Predicting temperatures in ventilated greenhouses. *Transaction of ASAE*, **8**: 445-448.
- Wilks, D.S., 1992.** Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Climate Change*, **22**: 67-84.
- Yunis, H., Elad, Y., Mahrer, Y., 1990.** Effects of air temperature, relative humidity and canopy wetness on gray mold of cucumbers in unheated greenhouses. *Phytoparasitica*, **18** (3): 203-215.

Δημοσίευση Εργασίας

